

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**



**Aspectos Hidrodinâmicos, Balanço Hídrico e Simulação de Fluxo
no Aquífero Costeiro de Itaipuaçu, Maricá - RJ.**

Trabalho Final de Curso

Glauco Zely da Silva Eger

UFRJ
Rio de Janeiro
2012



UFRJ

Glauco Zely da Silva Eger

**Aspectos Hidrodinâmicas, Balanço Hídrico e Simulação de Fluxo no Aquífero
Costeiro de Itaipuaçu, Maricá - RJ.**

Trabalho Final de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Geólogo.

Orientador(es):

Prof. Dr. Gerson Cardoso da Silva Jr.(UFRJ)

Vinícius do Nascimento Cristo (Mestrando em Geologia, UFRJ).

Rio de Janeiro

2012

EGER, Glauco Zely da Silva.

Aspectos Hidrodinâmicos, Balanço Hídrico e Simulação de Fluxo no Aquífero Costeiro de Itaipuaçu, Maricá - RJ / Glauco Zely da Silva Eger - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2012.

x, 47 p. : il.; 30cm

Trabalho Final de Curso (Geologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, ano.

Orientador(es): Gerson Cardoso da Silva Jr., Vinícius do Nascimento Cristo

1. Hidrogeologia. 2. Aspectos Hidrodinâmicos. 3. Balanço Hídrico 4. Simulação de Fluxo. 5. Geologia. I. Silva Jr., Gerson Cardoso da; Cristo, Vinícius do Nascimento. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III. Título.

Glauco Zely da Silva Eger

Aspectos Hidrodinâmicas, Balanço Hídrico e Simulação de Fluxo no Aquífero
Costeiro de Itaipuaçu, Maricá - RJ.

Trabalho Final de Curso de Graduação em
Geologia do Instituto de Geociências,
Universidade Federal do Rio de Janeiro -
UFRJ, apresentado como requisito
necessário para obtenção do grau de
Geólogo.

Orientador(es):

Prof. Dr. Gerson Cardoso da Silva
Jr.(UFRJ)

Vinícius do Nascimento Cristo (Mestrando
em Geologia, UFRJ).

Aprovada em: __/__/__

Por:

Orientador: Prof. Dr.Gerson Cardoso da Silva JR.(UFRJ)

Prof. Ora. Katia Leite Mansur (Dep.Geologia IGEO/UFRJ)

Prof. Dr. Nelson Ferreira Fernandes (Dep. Geografia IGEO/UFRJ)

UFRJ
Rio de Janeiro
2012

Dedico este trabalho a meus pais, Francisco e Cleide por todo amor, dedicação, apoio e ensinamentos que, a cada dia me fazem crescer sendo um homem melhor. E a Sabrina, minha namorada, que também esteve ao meu lado durante este período, sempre com seu amor, cuidado e suas palavras de motivação que, me fazem buscar o meu melhor.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por mais essa etapa vencida, pois sem Ele nada disso seria possível.

Aos meus pais Francisco e Cleide que com muito amor me ensinaram os valores que hoje tenho. Que juntamente com meu irmão Ícaro, acreditaram em mim e forneceram-me todo suporte para que esse objetivo fosse alcançado.

A minha namorada Sabrina que esteve ao meu lado com seu cuidado e atenção, sempre me encorajando e com as palavras certas para cada momento que precisei.

Aos colegas de turma Geologia UFRJ 2008-2012, por cada momento compartilhado ao longo desses cinco anos de intensa convivência.

Ao meu orientador Prof. Gerson Cardoso da Silva Jr. pelo conhecimento e confiança passado ao longo desses período como estagiário e aluno.

Aos amigos do Laboratório de Hidrogeologia da UFRJ, que de alguma forma colaboraram para este trabalho, e que tenho convivido durante o período de aprendizado, Vinicius Cristo, Talita Azevedo, Patricia Silveira, Bruno Antonio, Fellippe Bione, Héllisson Nascimento, Thais Brêda e Pedro.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Iniciação Científica.

E a Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo financiamento do Projeto Hidroq-Rio (APQI).

Sumário

Agradecimentos	v
Sumário	vi
Lista de Figuras e Tabelas	viii
Resumo	ix
Abstract	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	4
2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	5
2.1. Localização	6
2.2. Geologia Regional	7
2.3. Geologia Local	9
2.4. Caracterização hidrogeológica	10
2.5. Clima	12
3. METODOLOGIA.....	12
3.1. Análise da Base de :Qados Pré-Existente	13
3.2. Campanhas de Campo	13
3.3. Topografia e Nivelamento de Poços	13
3.4. Perfuração de Poços	16
3.5. Estratigrafia	16
3.6. Teste de Interferência.....	16
3.7. Balanço Hídrico	17
3.8. Simulação de Fluxo com Software Visual MODFLOW	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
4.1. Cadastro de Poços..... ;.....	23
4.2. Topografia e Nivelamento de Poços	24
4.3. Estratigrafia	25
4.4. Teste de Interferência.....	28
4.5. Balanço Hídrico	29

4.5.1.	Visual Balan	29
4.5.2.	Estimativa de Recarga pela Lei de Darcy	31
4.5.3.	Balanço Hidrometeorológico Simplificado.....	31
4.5.4.	Balanço de Cloretos	32
4.6.	Simulação de Fluxo com Software Visual MODFLOW	33
4.7.	Discussões	38
5.	CONCLUSÕES.....	39
6.	RECOMENDAÇÕES.....	41
7.	BIBLIOGRAFIA	42
	ANEXOS	46
	<i>Anexo 1 - Relação de poços Cadastrados durante o estudo...••.....</i>	<i>46</i>
	<i>Anexo 2 -Relação de poços e Corpos d'água Nivelados durante o estudo.....•..•••</i>	<i>47</i>

Lista de Figuras e Tabelas

Figuras:

Figura 1 - Ciclo Hidrológico e representação das diferentes fontes de recarga. (fonte: http://pubs.usgs.gov/gip/gw_ruralhomeowner/images/fig1.gif)	2
Figura 2- Mapas de Localização da Área de Estudo	6
Figura 3-Domínios Tectono-magmáticos do Estado do Rio de Janeiro (CPRM, 2001)	8
Figura 4 - Carta Geológica de Maricá/Itaboraí 1: 100.000	8
Figura 5- Levantamento topográfico, antena em modo estático	14
Figura 6- Desenho Esquemático da Conversão c/c Altitude.....	15
Figura 7 - Esquema hidrológico adotado pelo Visual Balan (adaptado de SAMPER et al., 1999)	18
Figura 8 - Estação meteorológica do Lab. Hidrogeologia - UFRJ	21
Figura 9 - Mapa de Localização dos Poços Cadastrados no Projeto HIDROQ-Rio	24
Figura 10- Mapa de poços com Cotas de Níveis Estáticos em m.....	25
Figura 11 - Localização dos Poços Estratigráficos (A-Poço ACOST-Rio; B-Poço 1HIDROQ-Rio; C-Poço 2HIDROQ-Rio)	27
Figura 12- Gráfico de evolução do teste de interferência.....	28
Figura 13 - Balanço Hídrico de Itaipuaçu (valores médios anuais).....	30
Figura 14 - Mapa de Isoietas da Planície costeira de Itaipuaçu.....	31
Figura 15 - Perfil do Modelo Conceitual proposto para Planície Costeira de Itaipuaçu.....	33
Figura 16- Mapa de condições de Contorno	35
Figura 17 - Gráfico de correlação entre os valores reais de carga hidráulica e aquelas calculadas pela simulação em regime permanente.....	36
Figura 18 - Gráfico de Balanço de Massa, com as cargas de entrada representadas em azul e as de saída em vermelho	36
Figura 19 - Mapa Potenciométrico do Aquífero Costeiro de Itaipuaçu.....	37
Figura 20 - Seção sintética demonstrando as vazões escoadas pelo complexo sistema aquífero.	39

Tabelas:

Tabela 1 - Dados Climáticos de Maricá (Fonte: INMET)	12
Tabela 2 - Dados do inseridos no modelo geoidal IBGE	24
Tabela 3 - Parâmetros e opções aplicados na modelagem do balanço Hídrico	29
Tabela 4 - Parâmetros Hidráulicos da Simulação de Fluxo	34
Tabela 5 - Volumes de Recarga obtidos nas diferentes metodologias	38

Resumo

EGER, Glauco Zely da Silva. **Aspectos Hidrodinâmicas, Balanço Hídrico e Simulação de Fluxo no Aquífero Costeiro de Itaipuaçu, Maricá - RJ.** Ano. 2012. Trabalho Final de Curso (Geologia) - Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

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 a 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 até mesmo a 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, obtenção de parâmetros de fluxo do aquífero, obtenção e processamento de dados meteorológicos e medidas das entradas e saídas de água do sistema aquífero, com a aplicação no programa Visual BALAN V.2.0 de cálculo do balanço hídrico. Como forma de comparação outras metodologias de cálculo foram empregadas com balanço hidrometeorológico simplificado (programa Easybal4) e balanço pela Lei de Darcy.

Perfuraram-se poços no aquífero raso da região no qual foi realizado o levantamento da estratigrafia; além de um teste de interferência para a obtenção de parâmetros físicos do aquífero (ex. permeabilidade). 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%.

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

Abstract

EGER, Glauco Zely da **Silva. Hydrodynamic aspects, Water Budget and Flow Simulation in the Coastal Aquifer of Itaipuaçu, Marica - RJ**. Ano. 2012. Trabalho Final de Curso (Geologia) - Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

This study was conducted in the coastal aquifer of Itaipuaçu district, Marica, Rio de Janeiro, and is part of HIDROQ-RIO project, funded by FAPERJ (APQ1). This aquifer is of great importance for the region, because it is still the only means of water supply for the growing population. The use of this water resource without control is one of their biggest problems, because their quality may be impaired by contamination originating from the surface, and because it is a coastal aquifer overexploitation can generate the Salt water intrusion.

This work aims to present the hydrodynamic characteristics of the groundwater aquifer of the study area, through evaluation of local flow, obtaining flow parameters of the aquifer, obtaining and processing weather data; and measures of inputs and outputs of water from the aquifer system with the application in Visual BALAN V.2.0 program for calculating water budget. By way of comparison other calculation methodologies were applied to hydrometeorological simplified balance (program Easybal4) and swing by Darcy's Law.

Wells were drilled in the shallow aquifer of the region in which the survey was conducted of the stratigraphy, and a pumping test for interference to obtain physical parameters of the aquifer (eg permeability). It was accomplished in situ measurements of water levels in wells in the region for potentiometry the shallow aquifer. The data indicate a low hydraulic gradient and equipotential subparallel to the shoreline. Based on the hydraulic parameters were performed flow simulations with the software Visual Modflow 4.2. The results obtained to date indicate a refill around 36% of the precipitation and a hydraulic gradient of less than 1%.

Key-Words: Hydrodynamic aspects; Water Budget; Flow Simulation.

1. INTRODUÇÃO

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 ano de 2013¹, 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 deste recurso hídrico local tem sido crescente para atender a demanda de residências e do comércio local, e não há nenhum controle ou regulação por parte de um órgão gestor. Esses dois fatores podem contribuir para uma superexploração, definida simplificada por Custodio (2002) como uma situação na qual, por alguns anos, a taxa de extração de água de um aquífero é igual ou maior a taxa de recarga ao mesmo, que também relata o problema como possível causador da deterioração da qualidade da água por circunstâncias "naturais", como a salinização do aquífero devido à intrusão da água do mar em aquíferos costeiros, como coincidentemente é o caso da área do presente estudo.

Para o início da gestão de recursos hídricos de uma determinada região é fundamental uma estimativa fiável do Balanço Hídrico. Para isso é necessária a estimativa das taxas recarga e de descarga e, quando possível, o conhecimento de sua distribuição espacial (CROSBIE *et al.*, 2010).

A recarga a um aquífero é definida como um fluxo descendente de água, seja água meteórica, de retomo de irrigação ou ainda de cursos fluviais influentes, que chega a zona saturada, sendo o aquífero reabastecido (Fig.1).

O estudo e a busca pelo entendimento do complexo fenômeno da recarga aos aquíferos tem-se tomado frequente, pois este é de fundamental importância em diferentes áreas da

¹Prevê-se a chegada da rede de distribuição para abastecimento de água e serviço de esgoto no Distrito de Itaipuaçu até o ano de 2013, após inúmeros adiamentos. Isso, caso se concretize, criará uma situação de menos stress sobre os recursos hídricos subterrâneos com relação ao presente.

atividade humana, como gestão de recursos hídricos, abastecimento urbano, agricultura, etc. Devido a essa importância, desde meados dos anos 1980 tem sido crescente a publicação de estudos sobre recarga de aquíferos (VRIES & SIMMRES, 2002).

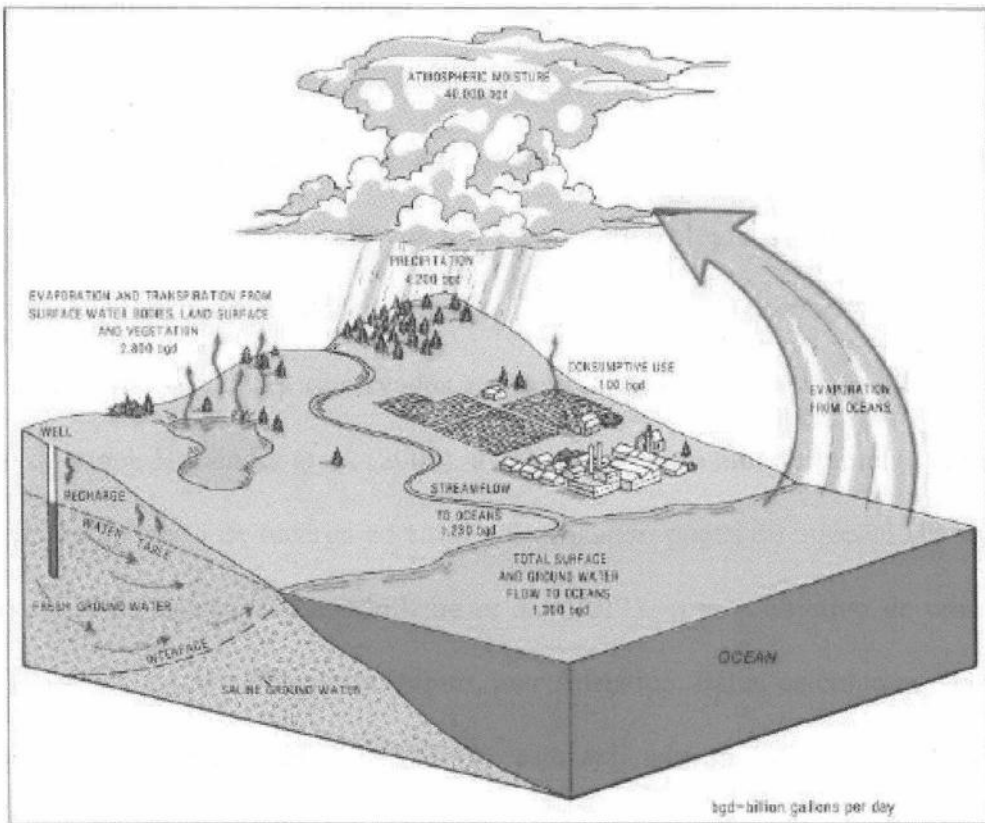


Figura 1 - Ciclo Hidrológico e representação das diferentes fontes de recarga.
(fonte: http://pubs.usgs.gov/gip/gw_ruralhomeowner/images/fig1.gif)

Scanlon *et al.* (2002) avaliaram as diferentes técnicas de estimativa de recarga e sua aplicabilidade em diferentes escalas de tempo e espaço. Já Vries & Simmres (2002) avaliaram os processos de recarga aos aquíferos. Ambos os trabalhos ressaltam a importância do entendimento do processo e da avaliação do volume de recarga ao aquífero em diferentes escalas.

O balanço hídrico é uma medida da continuidade do fluxo de água, que é válido para qualquer intervalo de tempo e aplicando-se a qualquer área, variando de escala local para escala regional ou a partir de qualquer área de drenagem até a Terra como um todo (TODD & MAYS, 2005). Esta metodologia tem sido aplicada para diferentes problemas relacionados à

águas subterrâneas. Yeh *et al.* (2007), a utilizaram para estimar a recarga ao aquífero da bacia de Shui, no Taiwan. Castafieda *et al.* (2007), aplicaram o balanço hídrico em uma região árida, para estimar a recarga em três *playa-lakes* em Montenegro, na Espanha. Para isso, o cálculo foi realizado em duas fases: uma no *software BALANv10.0*, para estimar o volume médio de água nos aquíferos rasos, e outra, aplicada nos *playa-lakes* visando, a partir de medidas de nível e dos fluxos de descarga, estimar a recarga. Raposo *et al.* (2010), na região da Galícia, também na Espanha, buscaram avaliar os impactos hidrogeológicos causados pela escavação de um túnel, aplicando o cálculo do balanço hídrico com o *software Visual Balan v2.0*, e comparando-o com os valores observados no monitoramento dos poços antes e durante a perfuração do túnel. Holländer *et al.* (2009), a aplicaram como uma ferramenta complementar na avaliação do conceito de recarga ao aquífero utilizando poços de injeção, em aquíferos da planície costeira de Orissa, Índia. Mollema *et al.* (2011), com o objetivo de uma avaliação futura na gestão de águas na bacia de Quinto, mar Adriático, Itália, calcularam e compararam o balanço hídrico atual e futuro (2080-2099), este aplicado em dois cenários baseados em modelos de mudanças climáticas.

Uma importante ferramenta de auxílio na fase de planejamento do processo de gestão de recursos hídricos subterrâneos é a modelagem matemática, metodologia cada vez mais difundida, uma vez que os resultados de uma simulação computacional podem fornecer subsídios para a análise de projetos e tomadas de decisões.

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). Diversas revistas internacionais como: *Hydrogeology Journal*, *Journal of Hydrology*, *Groundwater*, *Water Resources Research*, *Water Resources Management*, *Computers & Geosciences*, *Environmental Geology*, *Environmental Earth Sciences*, *Journal of Contaminant Hydrology*,

etc., tem publicado um grande número de artigos científicos com a utilização de modelos matemáticos para a compreensão dos regimes de fluxo da água subterrânea, que auxiliam no gerenciamento dos recursos hídricos e na previsão do transporte de contaminantes, com enfoque tanto na forma de aplicação como na forma de aprimoramento de códigos e modelos específicos.

No Brasil a modelagem também vem tornando uma ferramenta cada vez mais utilizada, principalmente em instituições de pesquisa e empresas de consultoria ambiental, na avaliação de problemas científicos específicos e para previsão da migração de poluentes nos aquíferos, respectivamente. 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 de fluxo com *Visual MODFLOW*.

Para obter-se tal objetivo, realizou-se uma sequência de ações como: levantamento dos parâmetros de fluxo do aquífero, através de ensaios de bombeamento; nivelamento de poços com DGPS; determinação da superfície potenciométrica; estimativa de recarga; 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

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. Esta expansão populacional é causada pela "fuga" da população da capital e pelo crescimento da indústria do turismo. 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. Estes aquíferos possuem seus limites em contato com corpos de água salgada, e esse aumento da taxa de bombeamento, em função da crescente demanda, pode causar o avanço da cunha salina em direção ao continente, provocando a salinização da água destes aquíferos. (Lowsby & Alves, 2000).

O presente estudo foi realizado no aquífero costeiro de Itaipuaçu, distrito de Maricá, Rio de Janeiro. Esta região tem passado por um acelerado crescimento no número de habitantes. Segundo a estimativa populacional do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) para 2011 (IBGE, disponível on-line), Maricá possui 131.355 habitantes, representando cerca de 6% de crescimento em relação ao ano anterior, o segundo maior do estado.

Itaipuaçu é um distrito de Maricá em que a expansão imobiliária tem se mostrado ainda maior e, devido à ausência de redes públicas de abastecimento d'água para atender a população, associada aos baixos custos de implantação e operação de poços, o aquífero costeiro se torna na prática o único meio regular de abastecimento de água para a população até o presente momento, ademais do abastecimento por carros-pipa.

Além da inexistência de tratamento de efluentes, que pode causar uma contaminação por matéria orgânica e/ou industrial, a exploração excessiva ou indiscriminada desse recurso pode gerar outro problema como a intrusão de água do mar ou intrusão salina, um grave problema que tem afetado inúmeros aquíferos costeiros em diferentes continentes, que eleva

a salinidade do aquífero, elevando os custos e até mesmo impossibilitando o consumo deste recurso.

2.1. Localização

A área de estudo está situada no distrito de Itaipuaçu que está localizado a aproximadamente 60 km da capital do estado da Rio de Janeiro e, juntamente com os distritos de Inoã, Maricá (Centro) e Ponta Negra, fazem 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 (Fig.2).

O principal acesso para esta localidade a partir da cidade do Rio de Janeiro se dá pela BR 101 Norte e posteriormente Rodovia Amaral Peixoto (RJ 106).

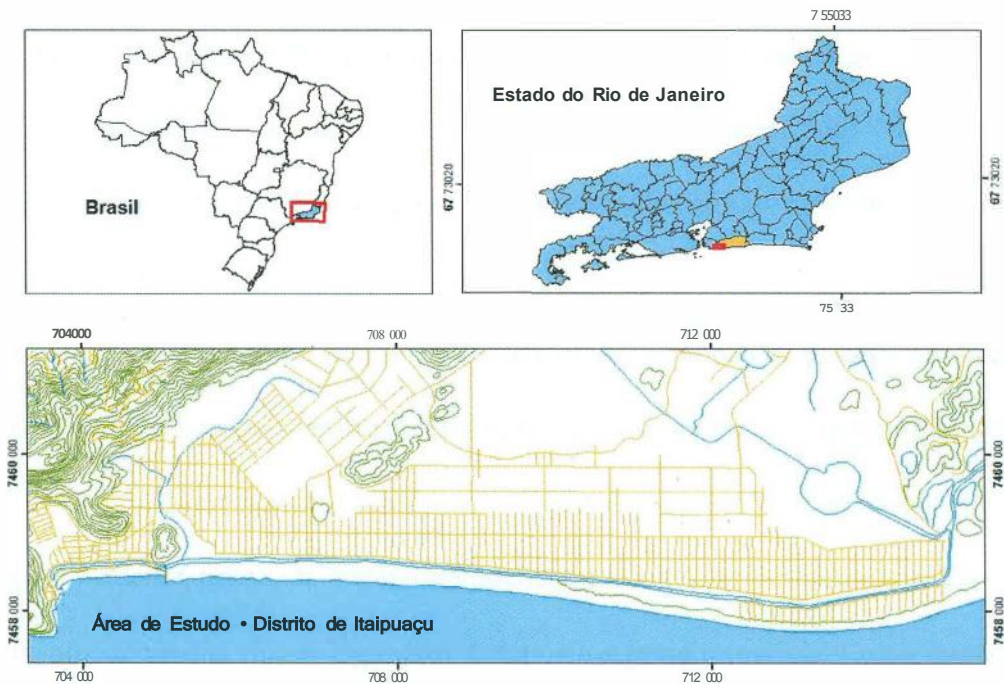


Figura 2- Mapas de Localização da Área de Estudo.

2.2. Geologia Regional

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 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 (Fig.3).

O Domínio Serra do Mar é composto por uma sucessão de arcos magmáticos mostrando marcante polaridade temporal e composicional de W para E. O Domínio é caracterizado ainda por supracrustais que sofrem metamorfismo de baixa pressão e alta temperatura, na fácies anfíbolito, com abundante fusão parcial *in situ* (Complexo Paraíba do Sul). Essa unidade está exposta ao longo de todo o domínio, o qual sofreu cavalgamento, com vergência de topo para NW, por parte das rochas *que* integram o domínio "Região dos Lagos" nos limites SE do domínio. O domínio Região dos Lagos é constituído por ortognaisses paleoproterozóicos e por supracrustais (complexo Búzios) interpretadas como remanescentes de *back arc*. Foi metamorfozizado na fácies anfíbolito superior, em evento colisional com cavalgamento para NW, sobre o Domínio Serra do Mar, durante os estágios terminais da colagem brasileira, no Cambriano (CPRM, 2001).

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 marinhos e/ou lagunares (Fig. 4).

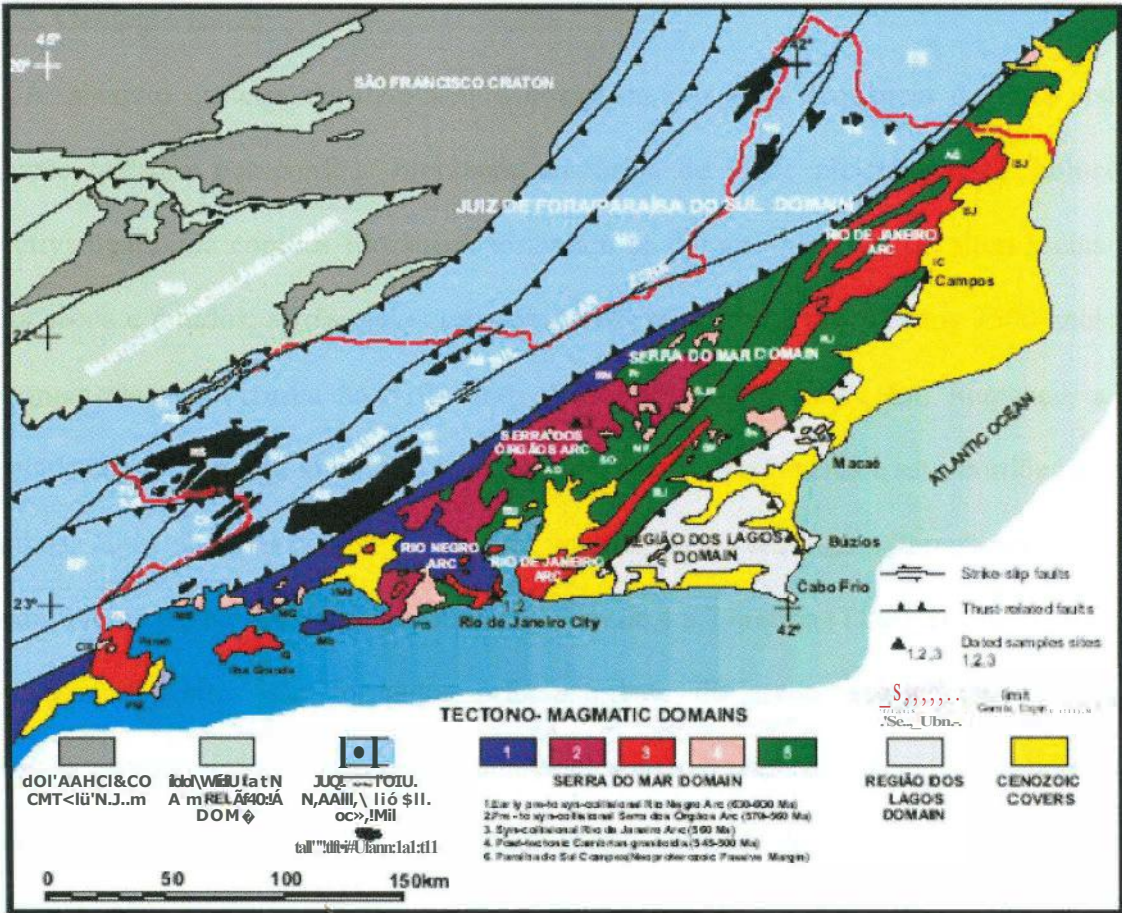


Figura 3-Domínios Tectono-magmáticos do Estado do Rio de Janeiro (CPRM, 2001).

Carta Geológica de Maricá 1:100.000 (adaptada da Carta Geológica CPRM - Folha Itaboraí)

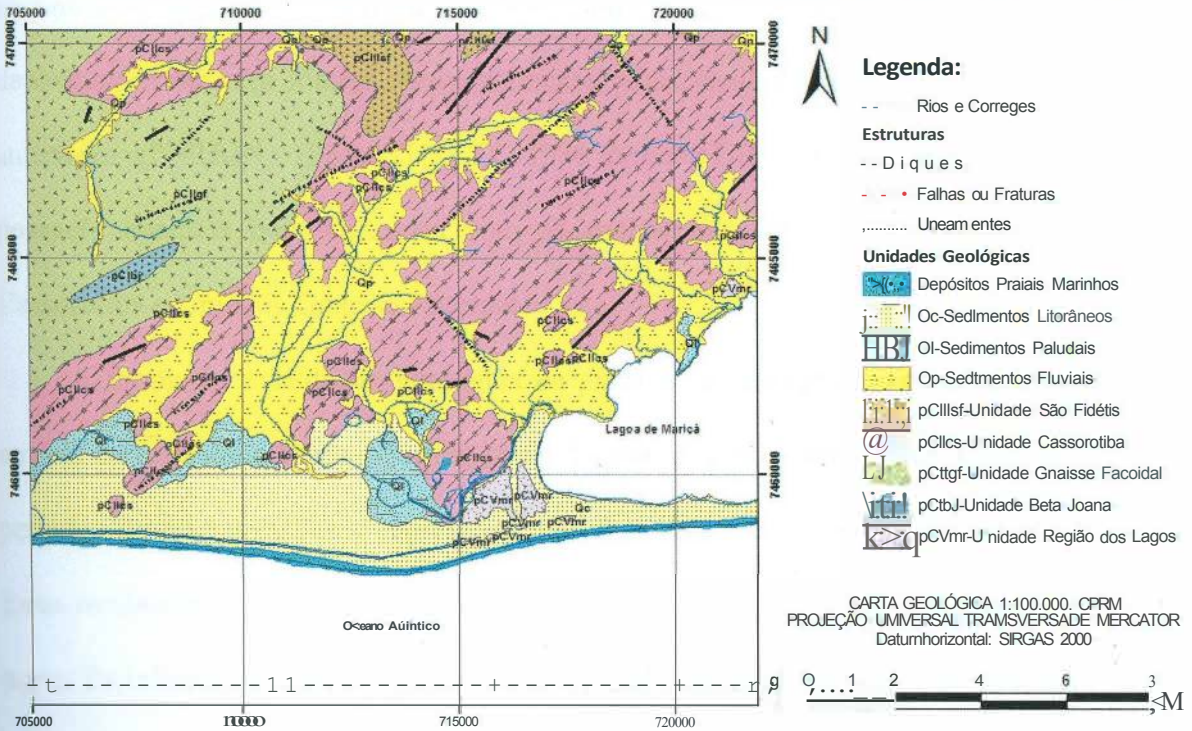


Figura 4 - Carta Geológica de Maricá/Itaboraí 1: 100. 000.

2.3. Geologia Local

A planície costeira de Itaipuaçu é composta por uma sequência de dois sistemas lagunares isolados por cordões litorâneos arenosos, de idade pleistocênica e holocênica, respectivamente. Os cordões litorâneos formaram-se durante períodos de alternâncias entre climas secos e úmidos, e três ciclos transgressivos- regressivos nos últimos 7500 anos, cujo nível mais elevado ocorreu há 5100 anos A.P.(antes do presente). Em Itaipuaçu, a zona conhecida como "restinga interna" é formada por depósitos lagunares e seus cordões arenosos marinhos, cujas altitudes variam de 8 a 12 metros. Já a "restinga externa" ocorre entre a barreira interna e o oceano, e suas altitudes variam de 4 a 7 metros (TURCQ *et al.*, 1999).

Esses depósitos são formados principalmente de areias quartzosas litorâneas de coloração esbranquiçadas, por vezes amareladas, razoavelmente selecionadas com matriz síltica a argilosa nas paleopraias, com granulometria variando de média a grossa, presença de grânulos e até seixos em alguns níveis, com grãos variando de subangulares a arredondados. Entre os depósitos da barreira interna e os depósitos continentais, nesta região são encontrados depósitos arenosos de granulometria mais fina quando comparado com os depósitos da barreira interna, provavelmente relacionado terraços de praias (*beach-ridges*) anteriores (PERRIN, 1984; TURCQ, 1986 *apud* TURCQ *et al.*, 1999). Esses depósitos possuem contatos bem definidos com as rochas aflorantes do Pré-Cambriano: Unidade Cassorotiba e Unidade Gnaisse Facoidal.

A formação e evolução geológica da planície costeira e seus cordões arenosos deu-se através do retrabalhamento de sedimentos, disponibilizados pela erosão do cristalino, durante períodos de transgressões e regressões marinhas (MUEHE, 1998 *apud* ALMEIDA, 2009). Essas oscilações no nível do mar ocorreram durante o Quaternário, cuja ascensão do nível dos mares foi influenciada pelo degelo das calotas polares, marcada pela Transgressão Flandriana

(14.000 a 7.000 anos A.P.) que, no seu clímax, deu origem à formação da Baía de Guanabara e outras enseadas ao longo do litoral fluminense (ALVES, 2000 *apud* ALMEIDA, 2009).

Como citado anteriormente a planície costeira é composta por duplos cordões, a partir dos quais, em sua retaguarda, foram formados complexos lagunares que, segundo Muehe e Carvalho (1989), possuem uma tendência de aumento de espelho d'água em direção a leste. Isso ocorreu em função do gradual afastamento das áreas montanhosas da linha de costa. Segundo Muehe e Corrêa (1989), a formação das lagoas está relacionada à ocorrência de uma ligeira elevação do nível do mar no Holoceno inundando a depressão intracordões.

Martin e Suguio (1989) realizaram uma datação em conchas coletadas na depressão intercordões, com idade de 6.070 anos A.P., associadas ao nível do mar de 7.000 anos A.P.. Conclui-se que o cordão mais interiorizado formou-se antes da última transgressão, ou seja, no Pleistoceno e o cordão frontal é associado à transgressão pós-glacial.

2.4. Caracterização hidrogeológica

A fim de caracterizar e individualizar o domínio hidrogeológico da área de estudo, foram analisadas características detalhadas do sistema aquífero. 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 siltosas e argilosas, que ocorrem nas proximidades das lagoas, decorrentes da formação da baixada litorânea durante os últimos movimentos de transgressão e regressão no Holoceno, entre 5000 e 7000 anos atrás. Disposta paralelamente à linha de costa, foi formada a baixada litorânea, com vegetação rasteira e altos arenosos (PEREIRA *et al.*, 2003; ALMEIDA e SILVA JR., 2007).

O nível d'água na região é geralmente raso, variando em média de 2 a 8 m de profundidade. Os poços existentes na área, utilizados para a captação de água para o abastecimento, têm profundidades em média de 12 metros, estando esses inseridos no aquífero raso. 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, como, por exemplo, no Ponto 15. Estes poços, apesar de sua profundidade e proximidade com o mar, possuem uma água de boa qualidade química. Não obstante, a água subterrânea local tem uma qualidade química bastante variada. Na área estudada, fatores estratigráficos e estruturais condicionam a distribuição da salinidade das águas subterrâneas.

O aquífero livre da área estudada, devido a pouca profundidade do nível d'água nos cordões arenosos, torna-se mais raso na medida em que se aproxima do oceano e das lagunas, onde chega a atingir apenas) m. É bastante vulnerável a alterações químicas, por exemplo, aumento da taxa de nitrato e cloreto. Essa condição, em conjunto com a densa urbanização local, leva tal porção do aquífero a ter uma elevada vulnerabilidade à contaminação bacteriológica. Essa situação é agravada pela declividade, que é praticamente nula nas áreas de baixada, dificultando o escoamento da água; 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 circula livremente pelos interstícios dos sedimentos; a construção dos poços por vezes é feita com deficiente sistema de proteção (ALMEIDA, 2009; SEABRA *et al.*, 2009). No entanto, o principal problema provavelmente é o eventual acúmulo de nitrato, lixiviado a partir dos sistemas de fossa-sumidouro, abundantes na área. Apesar disso, não há um grande número de pontos com valores de nitrato acima do valor de potabilidade.

2.5. Clima

O clima na área de estudo é predominantemente quente e úmido, com estação seca pouco pronunciada e com mais de 1300 mm anuais de precipitação (CEPERJ, 2011 - disponível *on-line*). Devido à influência marítima, a umidade relativa do ar encaixa-se entre 80 e 90% (CIDE, 1998).

Na Baixada Litorânea, onde se encaixa a área de estudo, ocorre clima quente e úmido sem inverno pronunciado, com chuvas no verão e estiagem no inverno. Possui temperaturas médias regularmente elevadas e suas variações são pequenas, oscilando entre 22 e 23°C. A partir de novembro até março as temperaturas médias ficam acima de 24°C, com valores médios máximos de 32°C (Tabela 1), podendo chegar a máximas absolutas elevadas, próximas a 40°C.

Tabela 1 - Dados Climáticos de Maricá (Fonte: INMET).

Dados Climáticos - Maricá												
Meses	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temperatura máxima média (°C)	31,1	31,6	30,3	29,3	26,8	26,1	26,0	26,4	26,7	27,6	28,5	28,6
Temperatura mínima média (°C)	22,7	22,6	22,1	20,8	17,9	16,4	15,9	16,7	17,5	19,3	20,5	21,9
Umidade relativa do ar (%)	81	77	80	82	81	82	80	79	78	80	79	82
Número de dias com chuva	13	9	11	8	9	7	8	7	9	11	13	13
Precipitação mensal total (mm)	150	111	148	140	95	65	99	37	69	124	141	170
Notas:	1. A temperatura mínima chega a 11°C nos meses de maio a julho.											
	2. Média dos últimos 10 anos.											
Fonte:	INMET											

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.

3.1. Análise da Base de Dados Pré-Existente

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

3.2. Campanhas de Campo

Durante as campanhas de campo foram realizadas medições periódicas do nível estático e coletas amostras de água em poços, nas quais foram feitas análises *in situ*, por sensores portáteis (HANNA HI-98120, HI-98128, HI-98311), que avaliam os parâmetros físico-químicos (Condutividade Elétrica, Potencial Óxi-redox e pH, respectivamente); além de coleta de amostras para análises físico-químicas realizadas no LabÁguas da PUC-Rio e análise de cloretos no laboratório de Hidrogeologia da UFRJ. Porém, os dados físico-químicos não serão apresentados neste trabalho.

3.3. Topografia e Nivelamento de Poços

Realizou-se um levantamento topográfico pelo método DGPS, a fim de obter um nivelamento dos poços, dos quais foram levantados os níveis freáticos, para assim definir a superfície potenciométrica do aquífero.

Durante o levantamento topográfico utilizou-se o aparelho de DGPS ProMarkn2 da Ashtech (Fig.5), de 10 canais e receptor L1, com precisão 0,005 metros +1 ppm na horizontal

(maior ou menor precisão depende do tempo de observação) e 0,010 metros + 2 ppm na vertical (depende do tempo de observação); sendo adotado o modo estático com tempo de coleta de 30 minutos e taxa de gravação de 2 segundos, e horizonte mínimo de rastreamento igual a 10°.

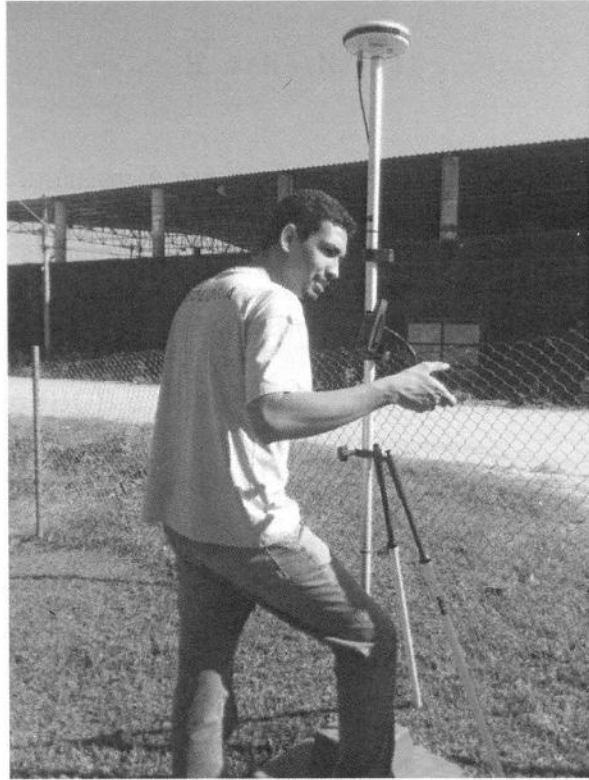


Figura 5- Levantamento topográfico, antena em modo estático.

O levantamento foi levado a cabo com uma estação base regional, operando no modo estático, e estações móveis também operando no modo estático na aquisição das cotas nos poços em que foram medidos os níveis. Como estação base regional adotou-se o marco homologado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) - SAT GPS, código: 96159.

O processamento destes dados foi feito com o *software* Ashtech Solutions 2.7, que se utiliza de técnicas baseadas em suavização através da fase portadora L1, onde a correlação espacial entre o ponto de referência (base) e os pontos a determinar (móveis), permitem a eliminação ou redução substancial da maior parte dos erros de posicionamento. Após essa

fase de processamento a base local foi vetorizada com os dados da antena móvel, obtendo-se assim a elevação elipsoidal de cada ponto.

Para obtenção da altitude ortométrica a partir da elevação elipsoidal é necessário realizar a conversão utilizando-se a Equação 1:

$$H = h - N \quad (1)$$

Onde: H é a altitude ortométrica; h é a elevação elipsoidal, obtida pelo processamento dos dados do DGPS; e N é a ondulação geoidal (Fig.6). A ondulação geoidal foi obtida pelo *software* MAPGEO2010, do Sistema Brasileiro Geodésico – desenvolvido pela Coordenação de Geodésia (CGED), do IBGE e pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, gratuito e disponível para download no site do IBGE.

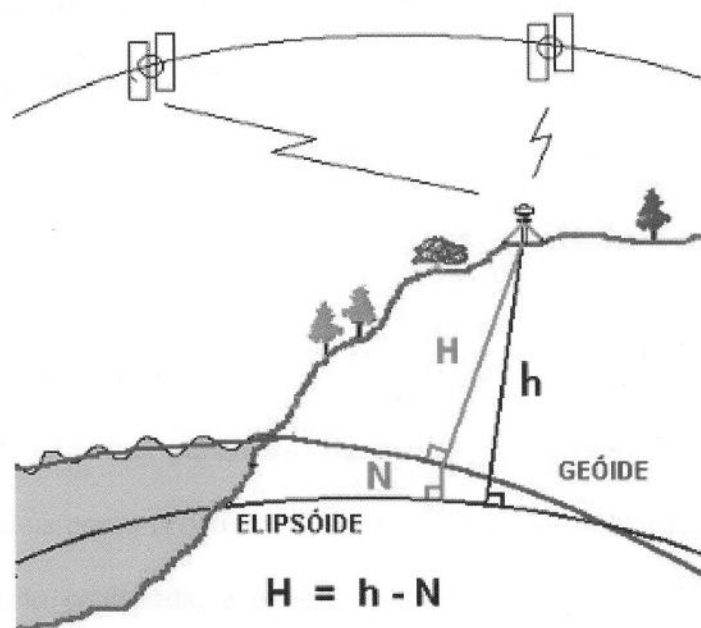


Figura 6- Desenho Esquemático da Conversão de Altitude.

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.

3.4. Perfuração de Poços

No âmbito do projeto Hidroq-Rio FAPERJ foram perfurados dois poços de monitoramento (pontos 27 e 52, ambos com 12 m de profundidade) que, além de servirem para amostragem de água e seus níveis, foram amostrados com a função de completar o conhecimento geológico da área de estudo. Os poços foram perfurados com o método de tradagem manual e a amostragem foi realizada a cada 0,5m ou ao se observar mudança significativa do substrato.

3.5. Estratigrafia

O levantamento estratigráfico foi fundamentado com a análise da base de dados do Laboratório de Hidrogeologia – UFRJ, pois já se havia estudado a área em projetos anteriores e perfurado um poço no ano de 2001; no trabalho de PEREIRA *et al.* (2003) que utilizaram sondagens e perfis de GPR; e nos dois poços perfurados no atual projeto, nos quais foram elaborados perfis estratigráficos.

3.6. Teste de Interferência

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*[®] (um equipamento de monitoramento automático que afere o nível e a salinidade da água, segundo configurações do operador) da Schlumberger Water Service, instalada 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.

3.7. Balanço Hídrico

Foi realizado o Balanço Hídrico do aquífero costeiro de Itaipuaçu (Eqs. 2, 3 e 4). 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).

$$\Delta S = E - S \quad (2)$$

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

$$E = P + Q_{se} + Q_{te}(3)$$

$$S = ETR + Q_{ss} + Q_{ts}(4)$$

Onde:

E = entrada; P = precipitação; Q_{se} = vazão superficial de entrada; Q_{te} = vazão subterrânea de entrada;

S = saída; 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*, o qual permite realizar balanços hidrológicos sequenciais diários abrangendo o solo, a zona não saturada e aquífero (SAMPER *et al.*, 1999 e Espinha Marques *et al.*, 2006).

O *Visual Balan* (SAMPER *et al.*, 1999) e sua versão anterior (BALAN) foram aplicados por hidrogeólogos de Europa e América Latina em diferentes campos da Hidrologia/Hidrogeologia. É um código hidrológico de parâmetros agregados, desenvolvido especialmente para a estimativa dos recursos hídricos.

Este código utiliza como base a equação do balanço hídrico no solo entre dois momentos do tempo (Δt). Com base nas Equações 5, 6 e 7.

$$P + D - I_n - E_s - ETR - P_e = \Delta\theta \quad (5)$$

Ou, considerando:

$$I = P + D - I_n - E_s \quad (6)$$

$$I - (ETR + P_e) = \Delta\theta \quad (7)$$

Onde: \underline{P} é a precipitação, \underline{D} a água de irrigação, $\underline{I_n}$ a interceptação, $\underline{E_s}$ o escoamento superficial, \underline{ETR} a evapotranspiração real, $\underline{P_e}$ a recarga em trânsito ou precipitação eficaz, $\underline{\Delta\theta}$ a variação do teor de umidade no solo e \underline{I} a infiltração. As componentes do balanço expressam-se em termos de volume de água acumulado ao longo do intervalo Δt .

O programa resolve as equações do balanço hídrico no solo superficial, zona não saturada pendular e no aquífero, estimando as componentes de maneira sequencial (Fig.7).



Figura 7 - Esquema hidrológico adotado pelo Visual Balan (adaptado de SAMPER et al., 1999).

O esquema conceptual adoptado pelo *Visual Balan*, o volume de água de entrada (precipitação, irrigação, derretimento da neve) distribui-se entre interceptação (calculada pelo método de Horton ou de Singh), escoamento superficial (calculado como a diferença entre a água de entrada no solo e a infiltração) e infiltração (calculada pelo o método de Horton ou da Curva do Número de *Soil Conservation Service*).

A água infiltrada abandona o solo através da ETR, outra parcela é adicionada à água armazenada no solo contribuindo o restante para a denominada recarga em trânsito ou precipitação eficaz. Os valores de evapotranspiração potencial (ETP) podem ser introduzidos ou calculados com um dos seguintes métodos: Thornthwaite, Blanney-Cridle, Makkink, Penman, Turc e Hargreaves. A ETR é calculada a partir da ETP usando o método original de Penman-Grindley.

O *Visual Balan* pode considerar a recarga em trânsito como tendo duas componentes: uma por fluxo preferencial ou recarga em trânsito direta, que pode ocorrer através de fissuras e/ou macroporos; nesta, a água atravessa o solo sem sofrer evapotranspiração; e outra por recarga em trânsito retardado, que obedece à lei de Darcy sendo mais lento que o fluxo preferente, e dependente da reserva útil e da condutividade hidráulica do substrato.

A recarga em trânsito retardada é calculada considerando que somente ocorre quando a umidade é maior que a capacidade de campo, não podendo exceder a permeabilidade vertical do solo. Para o cálculo da percolação é utilizada a formulação da Lei de Darcy que leva em consideração a circulação de água em aquíferos livres.

No balanço na zona não saturada, utiliza-se uma entrada (a recarga em trânsito) e duas saídas, que podem ser: o escoamento subsuperficial ou a recarga do aquífero resultante da percolação. A recarga constitui, então, a entrada da água no aquífero.

Para o cálculo do balanço hídrico no aquífero o *Visual Balan* permite utilizar modelos uni e multicelulares interligados. A descarga subterrânea é a saída natural de água do aquífero

para nascentes, rios ou outro reservatório de água superficial. O escoamento total de saída da bacia é calculado como a soma do escoamento superficial, do escoamento subsuperficial e da descarga subterrânea. O programa permite estimar automaticamente os parâmetros do modelo mediante a minimização de uma função objetivo (mínimos quadrados) usando o algoritmo multidimensional de Powell. Permite, também, realizar análise de sensibilidade dos resultados com as variações dos parâmetros do modelo.

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 (Eq. 8).

$$Q = K \times i \times A \quad (8)$$

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-seo armazenamento (Eq.9).

$$\Delta S = P \times R \times A \quad (9)$$

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 foi instalada na área do presente

estudo uma estação meteorológica compacta *Oregon Scientific* modelo WMR 928 localizada na sede da subprefeitura de Itaipuaçu (Fig.8), e também foram utilizados os bancos de dados do INMET-BDMEP(Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa) e ANA-HidroWeb. Esses dados foram a fonte de informações para a estimativa da recarga média anual.

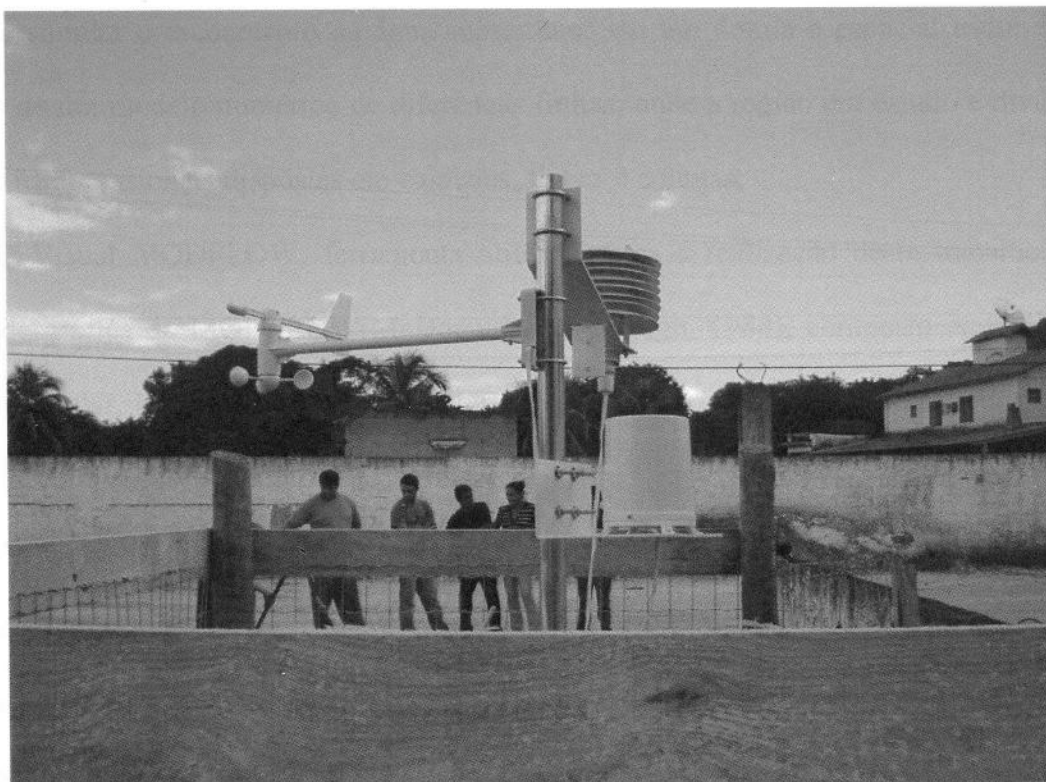


Figura 8 - Estação meteorológica do Lab. Hidrogeologia - UFRJ.

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.

$$R = \frac{Cl^-_{ch}}{Cl^-_{aq}} \quad (10)$$

Onde:

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

3.8. Simulação de Fluxo com Software Visual MODFLOW

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 como *software* Visual MODFLOW v.4.2, para o sistema aquífero.

O Visual MODFLOW (GUIGUER & FRANZ, 1998) é um aplicativo computacional que permite simular o escoamento da água subterrânea em um domínio espacial tridimensional, através de um modelo numérico de diferenças finitas, onde a região em estudo é dividida em células tridimensionais dispostas em camadas, linhas e colunas.

O Visual MODFLOW, ferramenta utilizada para a realização deste trabalho, 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 centrado.

A vantagem oferecida por este *software* Visual MODFLOW é a visualização gráfica do modelo, permitindo maior interatividade com o usuário, possibilitando a elaboração e simulação de problemas em tempo reduzido. Permite também acelerado ajuste dos parâmetros do modelo, inclusive com a utilização de ajustes automáticos destes parâmetros, visando a calibração pelo método da inversão.

A preparação do modelo pode ser dividida nas seguintes etapas:

- Levantamento de campo.

Nesta etapa constam as atividades acima descritas (levantamento de parâmetros hidrodinâmicos e balanço hídrico).

- Elaboração de um modelo conceitual.

Um modelo hidrogeológico conceitual se constitui em um conjunto integrado de informações de natureza geológica, hidrogeológica, geoquímica e de balanço hídrico, representando um entendimento atual sobre a constituição física e sobre o comportamento hidráulico e hidrogeoquímico do respectivo sistema hidrogeológico. Este 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, seguinte:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \quad (11)$$

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

4.1. Cadastro de Poços

O cadastro de poços (ANEXOS) na presente área de estudo procurou atender a melhor distribuição espacial para que houvesse uma representação realística de todo o aquífero

(Fig.9). 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.

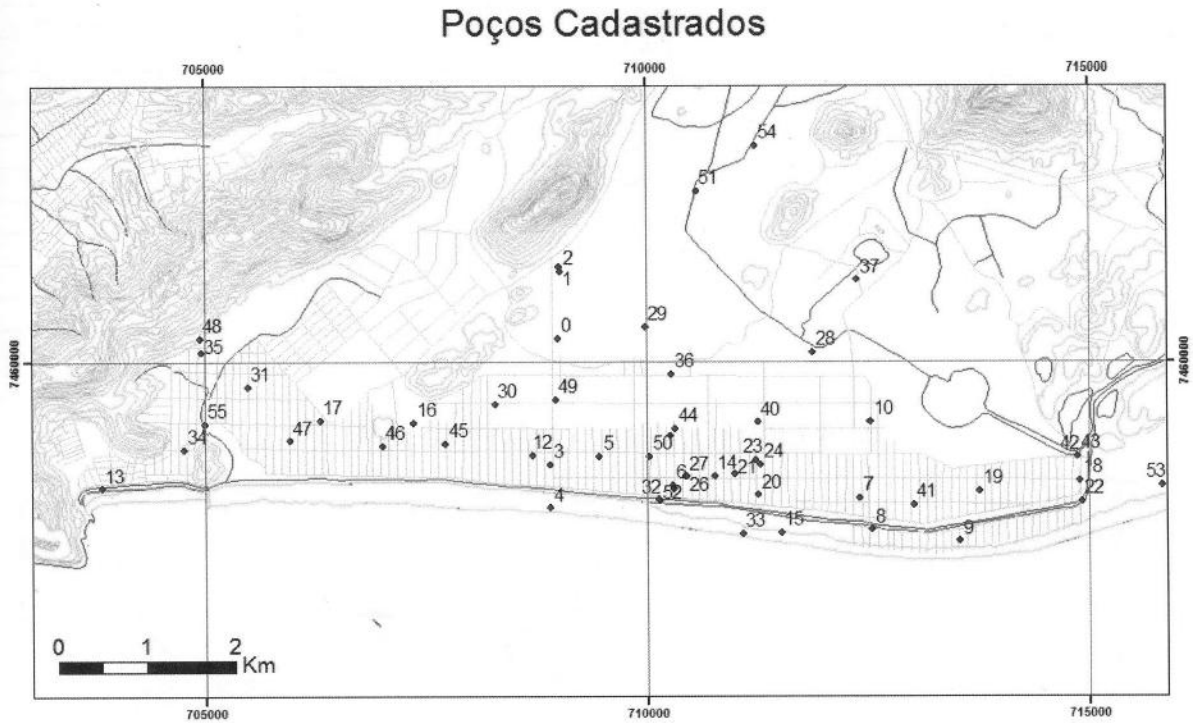


Figura 9 - Mapa de Localização dos Poços Cadastrados no Projeto HIDROQ-Rio.

4.2. 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 (Tabela 2) com base no modelo geoidal, e posteriormente foram calculados os níveis d'água (Fig.10).

Tabela 2 - Dados do inseridos no modelo geoidal IBGE.

ID	Altitude Elipsoidal (h)	Ondulação Geoidal (N)	Altitude Ortométrica (H)
CAN-	-5.665	-6.11	0.445
P001	-1.342	-6.13	4.788
P002	-1.342	-6.13	4.788
P007	5.347	-6.13	11.477

P009	1.032	-6.13	7.162
P012	5.079	-6.13	11.209
P013	-2.946	-6.09	3.144
P014	4.287	-6.14	10.427
P016	1.672	-6.12	7.792
P017	2.844	-6.12	8.964
P026	4.287	-6.14	10.427
P027	4.287	-6.14	10.427
P029	-3.167	-6.14	2.973
P030	-0.605	-6.13	5.525
P034	3.705	-6.1	9.805
P036	-1.868	-6.14	4.272
P040	-0.731	-6.14	5.409
P043	-1.577	-6.11	4.533
P044	-0.275	-6.14	5.865
P048	4.777	-6.1	10.877
P049	-0.993	-6.13	5.137
P050	0.274	-6.14	6.414
Praia	0.464	-6.13	6.594

Poços Nivelados HIDROQ-Rio

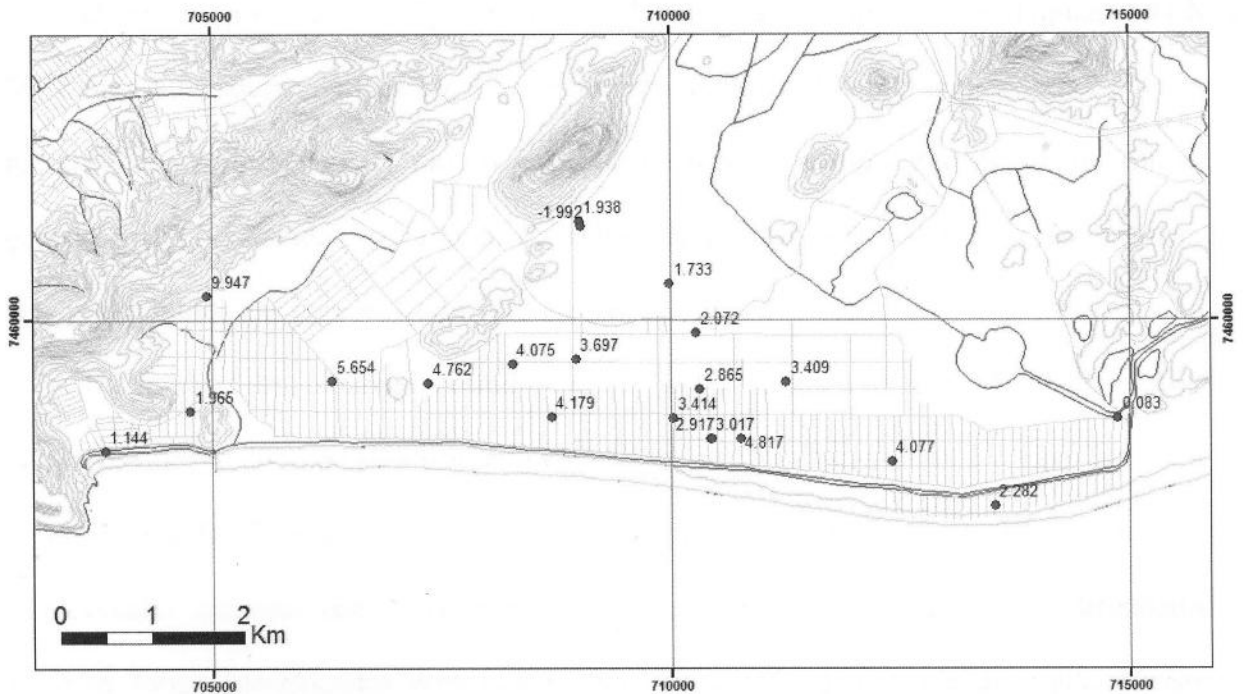


Figura 10 - Mapa de poços com Cotas de Níveis Estáticos em m.

4.3. Estratigrafia

Foi executado um conjunto de poços com a finalidade de proporcionar informação estratigráfica ao projeto (Fig.11). O primeiro poço estratigráfico foi executado ainda durante a vigência do projeto ACOST-RIO, porém analisado por este trabalho está localizado no

entroncamento da Rua 1 com Rua 33, sobre o cordão litorâneo interno. Apresenta níveis de areia de fina a média pouco selecionada. É comum na área a presença de uma camada de argila com cerca de 4 m de espessura localmente conhecida como “tabatinga”. Acredita-se que essa camada tenha um papel hidrogeológico fundamental na separação das unidades aquíferas locais, inclusive em termos de salinidade.

O segundo poço analisado (Ponto 27) é localizado no entroncamento da Rua 56 com a Rua 35, este atingiu a profundidade de 12 m, na porção mais elevada do cordão litorâneo interno. Neste perfil há um predomínio de camadas arenosas quartzosas com granulometria de média a grossa, apresentando níveis de argila orgânica na profundidade aproximadamente de 3 a 7 m.

O terceiro poço (Ponto 53), está localizado nas margens do canal de Itaipuaçu, na Rua 36, próximo à esquina da Rua 56, a parte mais baixa do cordão litorâneo externo. Este poço atingiu a profundidade de 12 metros, nele há um predomínio das frações de areia média e grossa, mal selecionadas, subangulosas, subarredondadas, com a presença de abundantes seixos e grânulos nas porções entre 10 e 12 metros.

Na porção Leste da área de estudo, Pereira (2003) realizou trabalho utilizando-se de três sondagens por trado manual, a primeira com 13 m, a segunda com 6 m, e a terceira com 4 m de profundidade. A sondagem 1, que está sobre o cordão litorâneo externo, há um predomínio das camadas arenosas com frações de média a grossa, de quartzo puro bem arredondado, também foram identificados dois níveis contendo grande quantidade de argila e matéria orgânica, entre 7 e 8 m de profundidade. A sondagem 2, localizada na planície entre cordões arenosos, revelou um nível de turfa a 0,60 metros de profundidade, saturação da areia a 1 m de profundidade e grande quantidade de argila e matéria orgânica a 2,50 m de profundidade, com as mesmas características ocorridas na sondagem 1, além é claro, de areias com granulometria e grau de arredondamento semelhantes à sondagem 1. Já a terceira sondagem,

sobre o cordão litorâneo interno, indicou apenas um nível de areias com o mesmo padrão das sondagens anteriores sobre o embasamento, e de restos de vegetais disseminados nos primeiros níveis do saprólito proveniente do embasamento alterado.

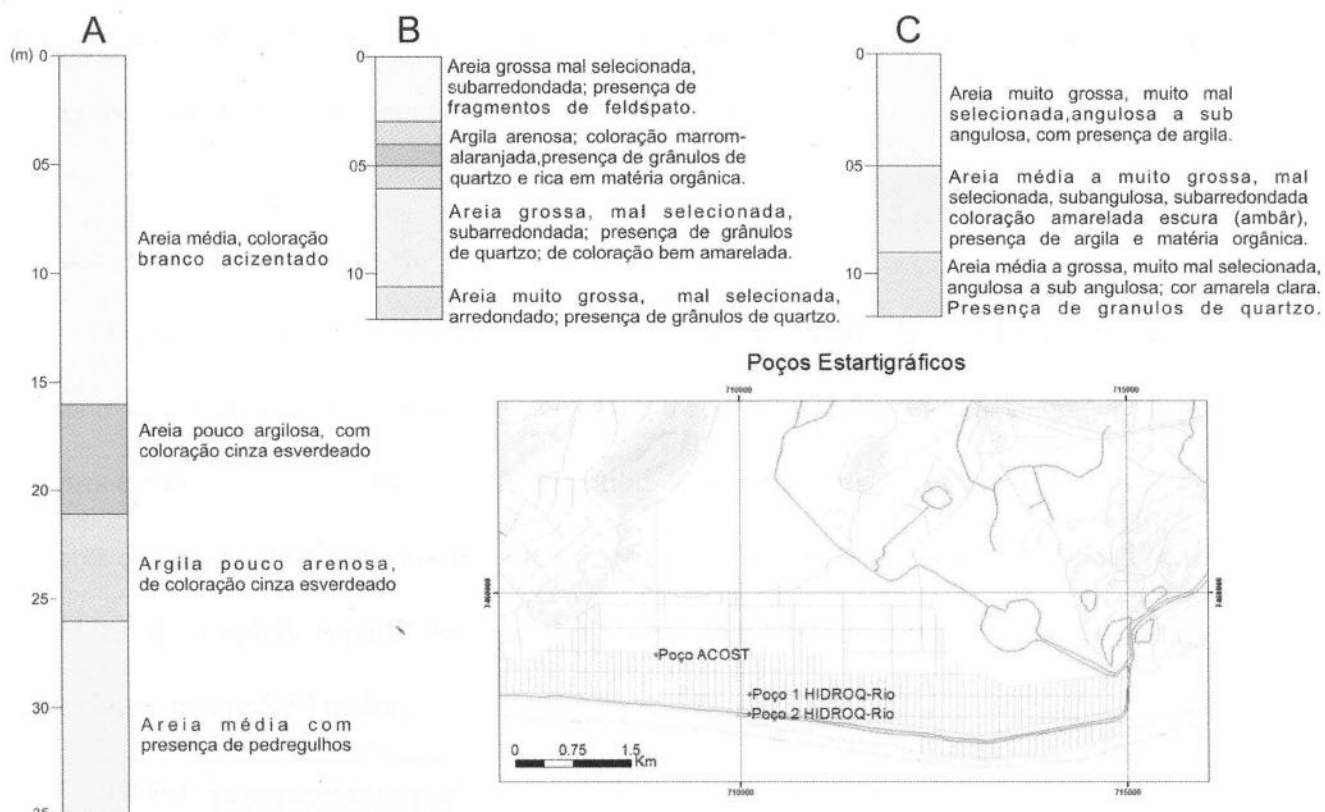


Figura 11 - Localização dos Poços Estratigráficos (A-Poço ACOST-Rio; B-Poço 1HIDROQ-Rio; C-Poço 2HIDROQ-Rio).

Seguindo este modelo, pode-se sugerir que o poço ACOST-Rio secciona o cordão litorâneo arenoso Pleistoceno em seu topo, as camadas de lamias 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 que este localiza-se no cordão litorâneo externo de idade holocênica.

Os resultados confirmam o modelo previamente sugerido para a planície de Itaipuaçu, 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.

4.4. Teste de Interferência

O teste de interferência foi realizado entre os poços (Pontos 26 e 27) teve duração de 5 horas e 10 minutos, a uma vazão de 0,27 L/s, e foram registradas 18.625 medições. A partir do processamento no *Aquifer Test*[®] foram obtidos os parâmetros hidráulicos do aquífero. Os valores dos parâmetros transmissividade e coeficiente de armazenamento são respectivamente de 111m²/dia e 0,468. A partir desses dados foi obtido o valor de condutividade hidráulica, de aproximadamente 5,54 m/dia.

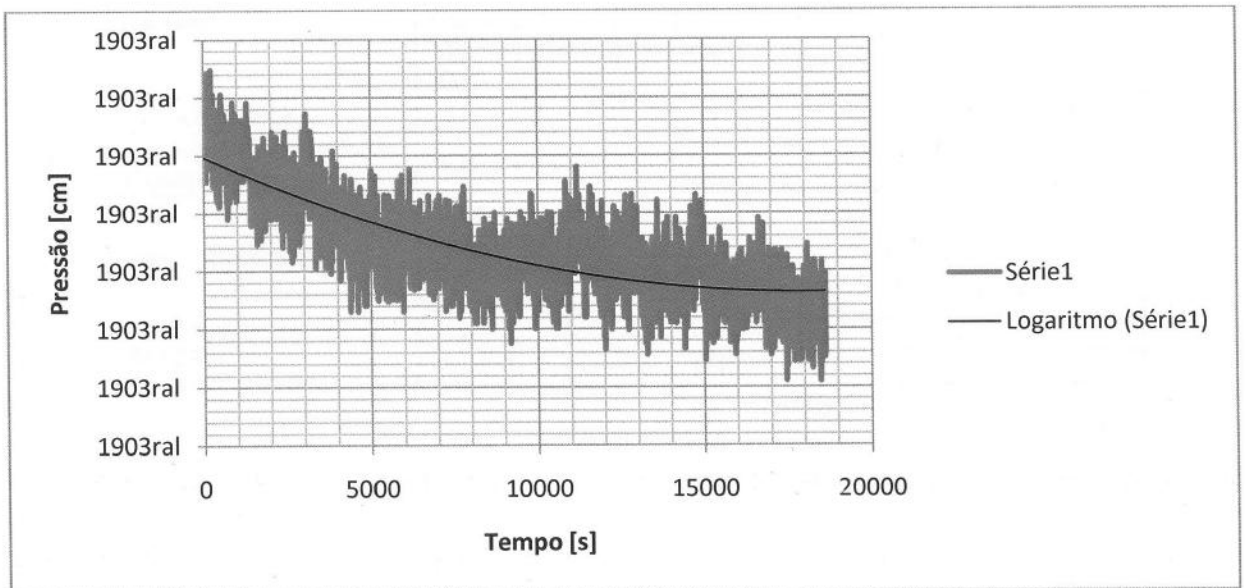


Figura 12- Gráfico de evolução do teste de interferência.

No gráfico da Figura 12 possível observar o rebaixamento ocorrido durante a execução do ensaio, cujo valor máximo alcançado foi de 4 cm. Outro importante fator que pode ser observado foi a estabilização do rebaixamento após aproximadamente 4 horas de ensaio.

4.5. Balanço Hídrico

4.5.1. Visual Balan

A modelagem hidrológica no *Visual Balan* v2.0 (Fig.13) 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 Lab. de Hidrogeologia – UFRJ (Tabela 3).

Tabela 3 - Parâmetros e opções aplicados na modelagem do balanço Hídrico.

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 <i>et al.</i> , 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)
Aquífero	Coef. de Armazenamento (1/d)	0,2
	Coef. de Esgotamento (1/d)	0,99

A precipitação anual média foi de 1396 mm, sendo este o principal e único 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 esco 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 1329,88 mm. Para a ETR o valor calculado foi de 431,88 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 a média para esse mesmo período obtida 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 Itaipuaçu, cerca de 507 mm, que fornece um volume de 11.477.755 m³/ano de água ao aquífero.

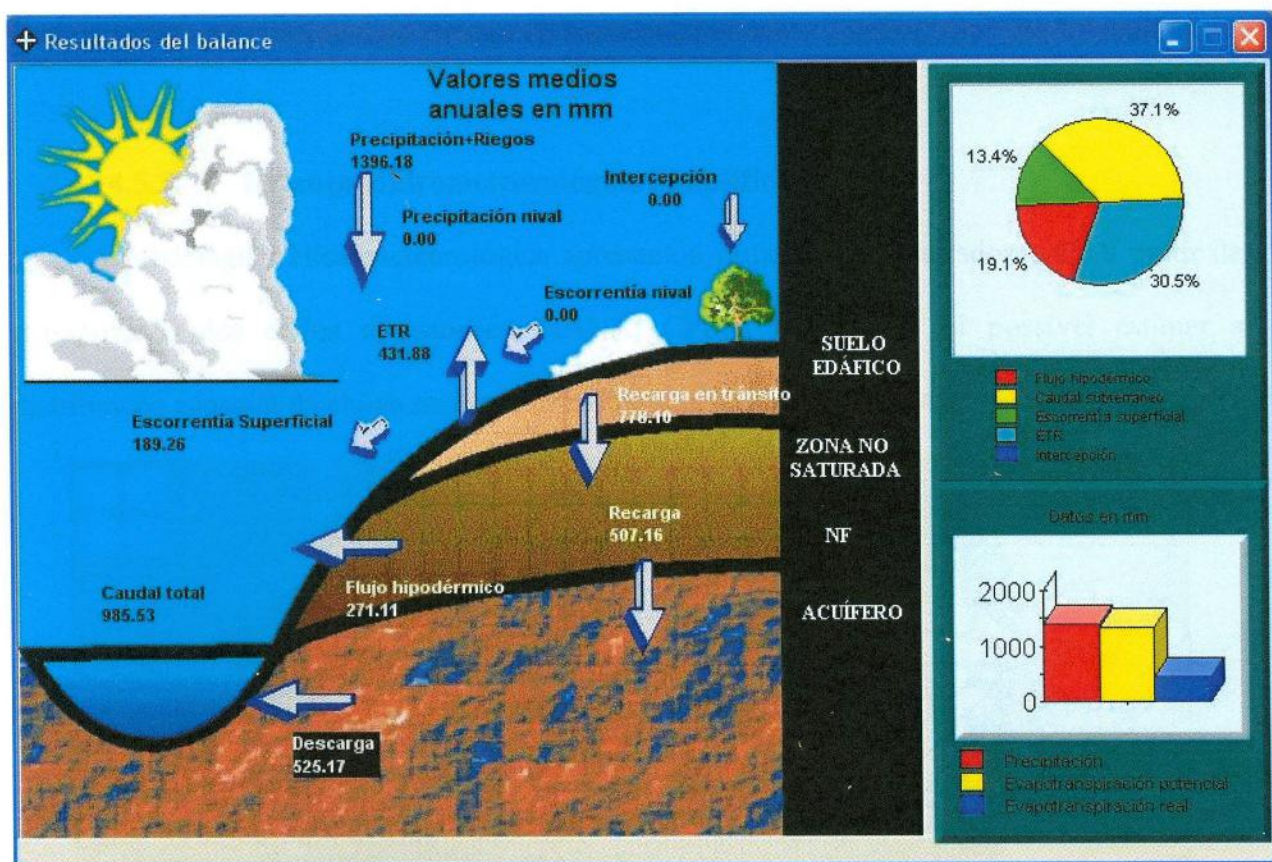


Figura 13 - Balanço Hídrico de Itaipuaçu (valores médios anuais).

4.5.2. 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:

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

$$Q_1 = [0,01] \times [10^{-4} \text{ m/s}] \times [5500\text{m} \times 12\text{m}] = 0,066 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_2 = [0,004] \times [10^{-4} \text{ m/s}] \times [2500\text{m} \times 12\text{m}] = 0,012 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_3 = [0,001] \times [10^{-4} \text{ m/s}] \times [5000\text{m} \times 12\text{m}] = 0,006 \text{ m}^3/\text{s}$$

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

Esta metodologia estimou uma recarga de aproximadamente - $2.649.024 \text{ m}^3/\text{ano}$ ao aquífero.

4.5.3. Balanço Hidrometeorológico Simplificado

A modelagem Hidrometeorológica apresentou importantes resultados onde 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 (Fig.14).

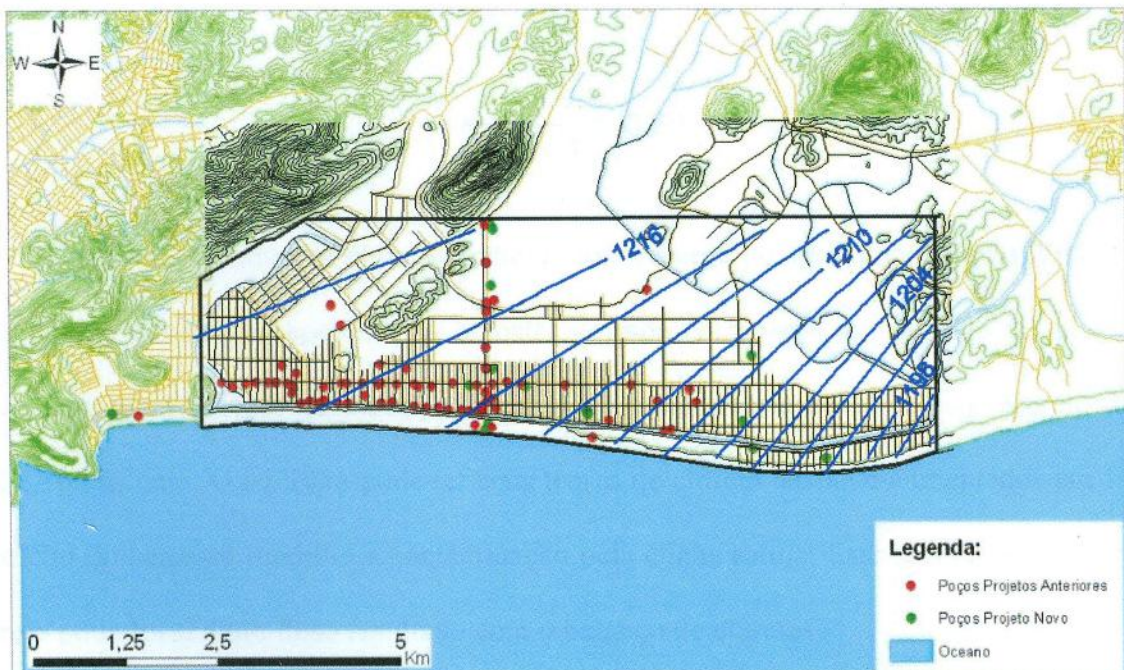


Figura 14 - Mapa de Isoietas da Planície costeira de Itaipuaçu.

O processamento no EasyBAL v4.0 indicou uma precipitação de 1396mm 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:

$$\Delta S = \Delta P \times R \times A_{\text{superficial}}$$

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

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

4.5.4. 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:

$$R = \frac{8,6}{42,4} = 0,20$$

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 totaliza 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.

4.6. 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. O modelo hidroestratigráfico simplificado do aquífero costeiro de Itaipuaçu foi definido como uma sucessão de areias de granulometria média a muito grossa, intercaladas com camadas relativamente delgadas de argila.

No modelo 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 (Fig.15). 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 uma heterogeneidade litológica. A terceira camada representada pelo aquífero profundo é composta por predomínio de areias médias.

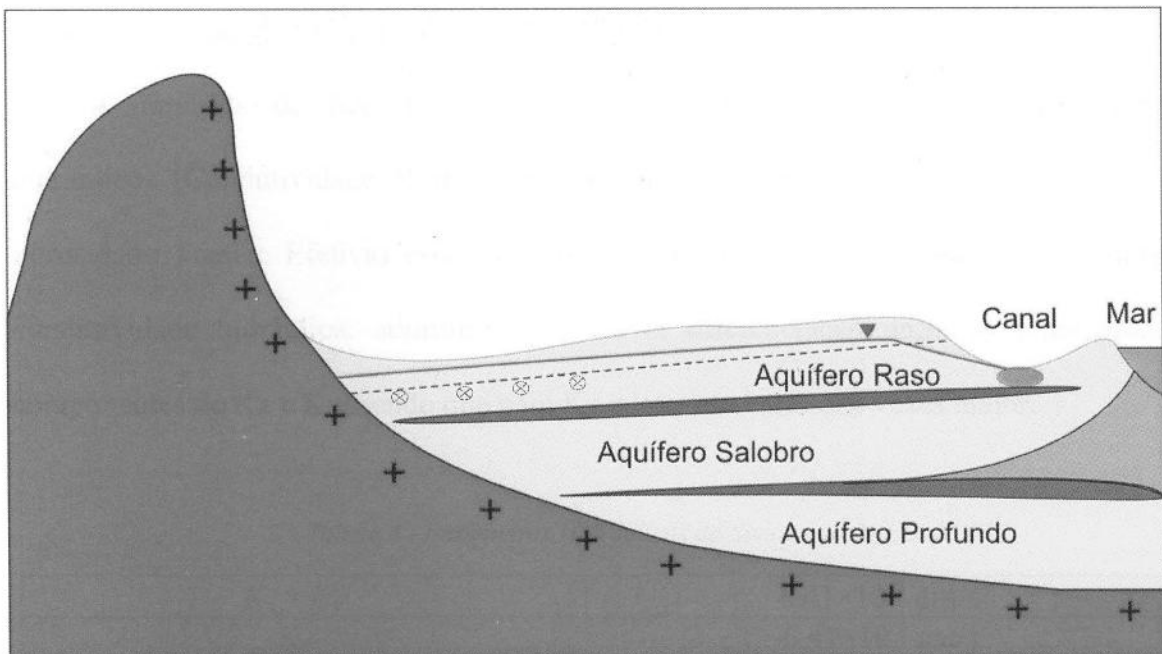


Figura 15 - Perfil do Modelo Conceitual proposto para Planície Costeira de Itaipuaçu.

Pode-se concluir 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.

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 4. 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.

Tabela 4 - Parâmetros Hidráulicos da Simulação de Fluxo.

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

A área modelada é limitada a Oeste pela Pedra do Elefante e pela Serra da Tiririca, a Norte é limitada pela Pedra de Itaoaia, 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.

Esses domínios podem ser delimitados pela Pedra de Itaoaia, na porção Oeste deste corpo rochoso há uma tendência de fluxo em direção ao mar, e foram utilizadas 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 um 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 16.

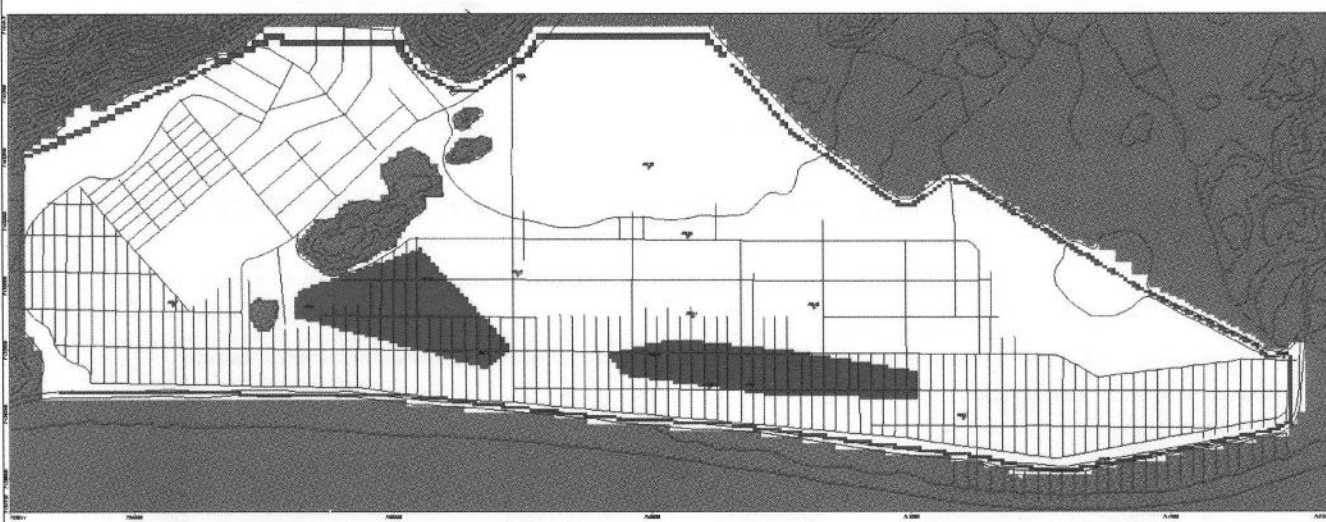


Figura 16- Mapa de condições de Contorno.

No gráfico de valores calculados \times observados (Fig.17), que representa a curva de ajuste final para a simulação, é possível observar um coeficiente de correlação entre os valores de carga hidráulica, calculados pela simulação, e aquelas mensurados nos poços de

monitoramento, que foi de 0,608. O resíduo médio obtido foi de 0,845 m, e erro normalizado quadrático de 21,024%.

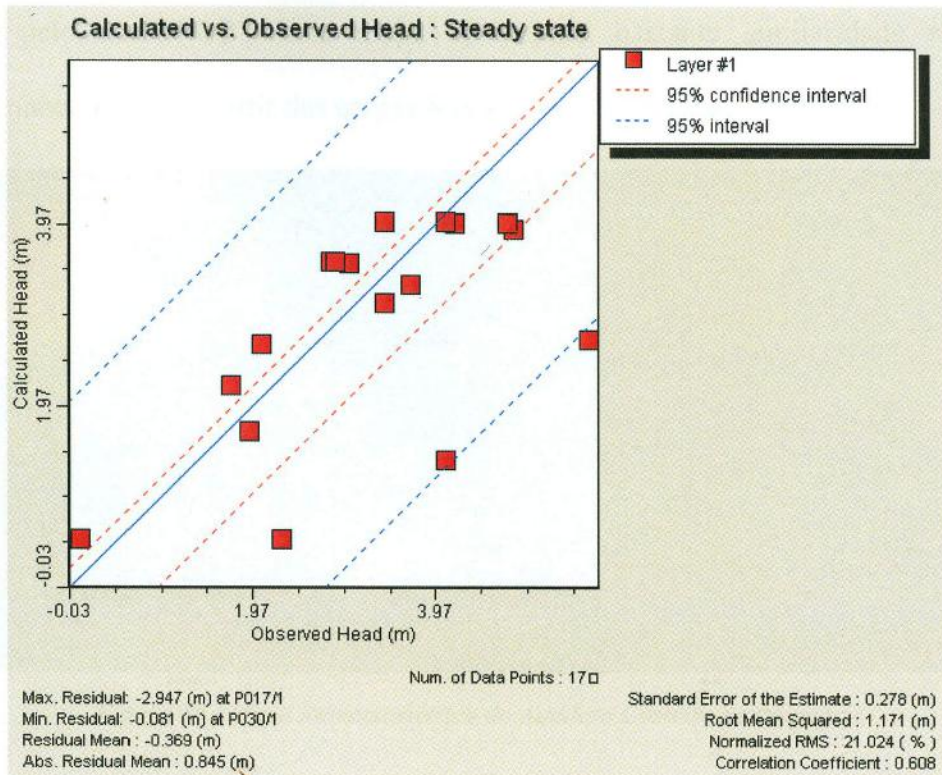


Figura 17 - Gráfico de correlação entre os valores reais de carga hidráulica e aquelas calculadas pela simulação em regime permanente.

O balanço hídrico calculado (Fig.18) representou satisfatoriamente as cargas de entrada, as quais foram condizentes com os valores calculados manualmente com base no mapa potenciométrico do modelo conceitual.

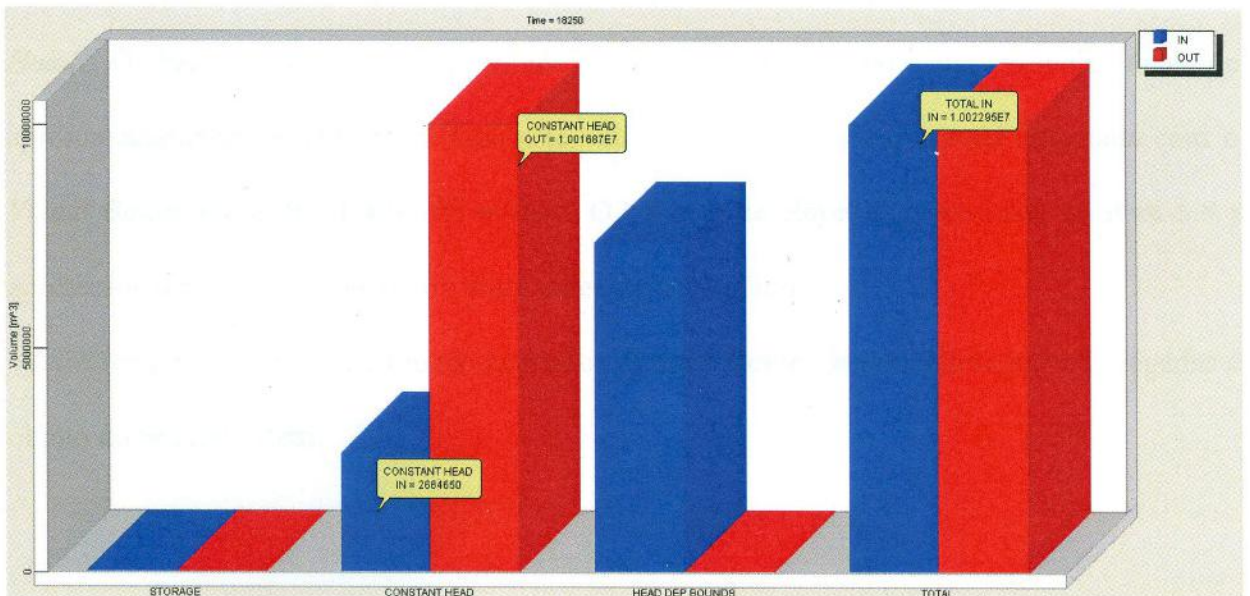


Figura 18 - Gráfico de Balanço de Massa, com as cargas de entrada representadas em azul e as de saída em vermelho.

O mapa potenciométrico calibrado (Fig.19) foi modelado a partir das cargas hidráulicas calculadas pelo MODFLOW. Este mapa apresentou bastante similaridade como mapa elaborado manualmente a partir das cargas hidráulicas observadas.

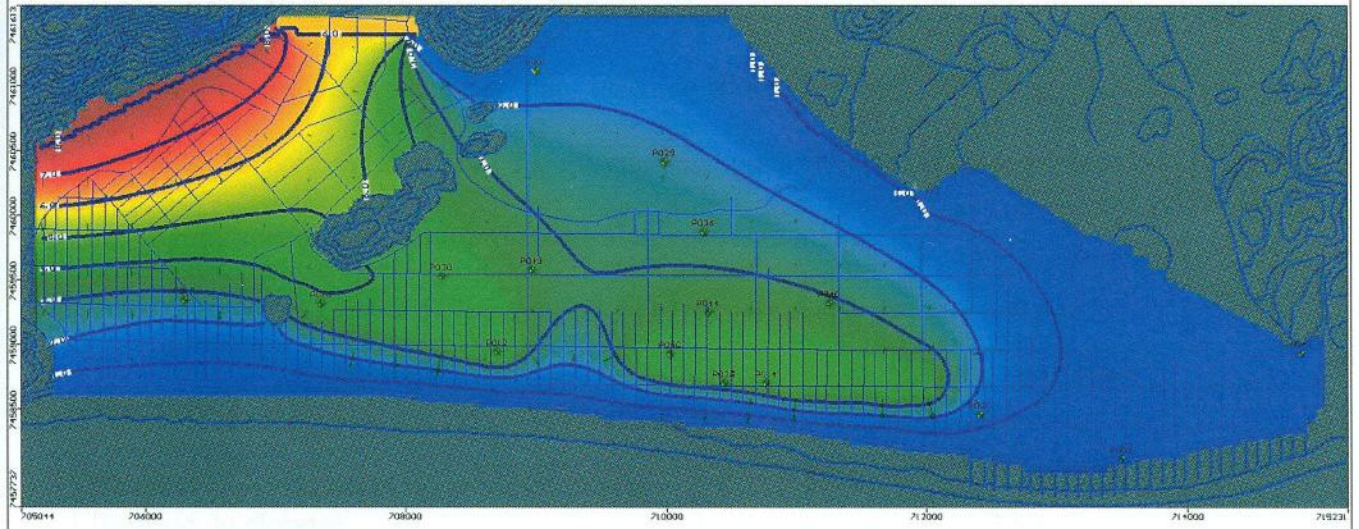


Figura 19 - Mapa Potenciométrico do Aquífero Costeiro de Itaipuaçu.

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 $0,084 \text{ m}^3/\text{s}$, o que gera um volume de $2.649.229,3 \text{ m}^3/\text{ano}$ para o mapa do modelo conceitual e $2.664.650 \text{ m}^3/\text{ano}$ para o calculado pelo *Visual ModFlow* com base na *Constant Head*. O balanço de massas calculado pelo *software* indicou um volume total de aproximadamente $10.022.950 \text{ m}^3/\text{ano}$ este valor é próximo a recarga total calculada com o *Visual Balan* que é de $11.477.755 \text{ m}^3/\text{ano}$. O balanço de cloretos, como visto no item 5.5.4 apresentou um valor intermediário entre esses dois resultados.

A discrepância observada entre os resultados obtidos através das metodologias empregadas é objeto do próximo item.

4.7. Discussões

Foram obtidos valores de recarga ao aquífero bastante discrepantes segundo o método empregado. A Tabela 5 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, resulte nesses quantitativos. A espessura total do pacote sedimentar que drena o aquífero é consideravelmente maior.

Tabela 5 - Volumes de Recarga obtidos nas diferentes metodologias

Método	Volume (hm³/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

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 (Fig.20).

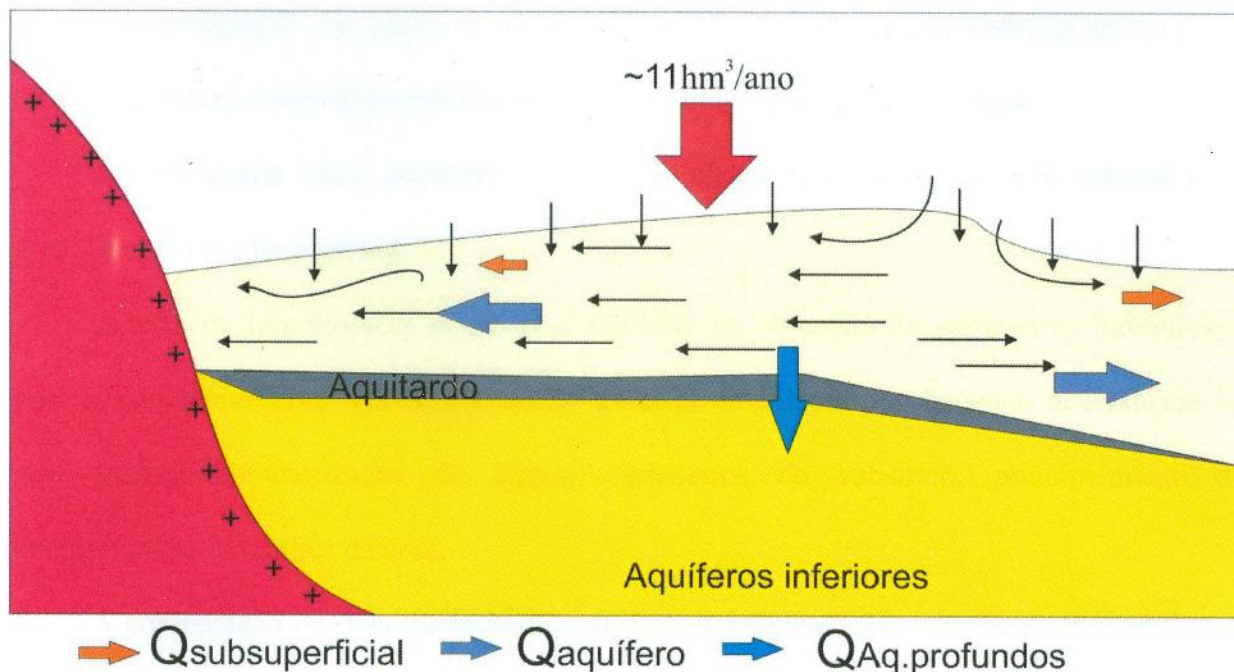


Figura 20 - Seção sintética demonstrando as vazões escoadas pelo complexo sistema aquífero.

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-MODLFOW), 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. RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados e nas conclusões foram analisadas as necessidades futuras, o que permitiu a elaboração de sugestões e recomendações, possibilitando uma melhor caracterização da área de estudo.

- Sugere-se a ampliação da malha de poços nivelados, e realizar medições de seus níveis potenciométricos de forma periódica, buscando caracterizar os períodos de cheia e seca;
- realização de ensaios para obtenção de parâmetros hidráulicos em diferentes pontos da área, para uma melhor amostragem de sua distribuição;
- melhor caracterização do aquífero mais profundo, mais o cadastro e perfuração de novos poços que o monitorem, bem como realizar ensaios para obtenção de seus parâmetros hidráulicos;
- melhorar calibração do modelo estacionário, com base na melhor caracterização das condições de contorno no Modelo Conceitual;
- uma modelagem multicamadas, discretizando em camadas menores tanto o aquífero superior como os inferiores;
- estimar parâmetros adicionais para construir e calibrar o modelo transiente, e analisar os resultados com base em dados de campo;
- realizar análise adicionais de cloreto na água da chuva, para refinar o balanço de cloretos na área.

7. BIBLIOGRAFIA

- ALBERTO, M. C. (2005), Fluxo da água subterrânea em sistema de encosta-rio, município de Paulínia (SP): caracterização hidrogeológica e simulação numérica. – Rio Claro: Dissertação de Mestrado – Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Universidade Estadual Paulista. 117 p.
- 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 de Geociências, Rio de Janeiro, v. 30-2, p.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 – PPGL, 2009 - Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. 120 p.
- ALVES, M.G. (2002), Diagnóstico ambiental da Região Oceânica de Niterói e Distrito de Inoã - Maricá (RJ): uma visão por geoprocessamento e mapeamento geológico-geotécnico. Tese de Doutorado – Programa de pós-graduação em Geologia - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 175p.
- BORGES, A.F., (2001), Relatório de atividades no projeto PADCT III: ACOST-RIO – Estudo da Intrusão Marinha em Aquíferos Costeiros entre os Municípios Niterói e Rio das Ostras.
- CASTAÑEDA, C.; GARCÍA-VERA, M.A. (2008), Water balance in the playa-lakes of an arid environment, Monegros, NE Spain. *Hydrogeology Journal*, Volume 16(1), February, 2008, p. 87–102.
- CIDE - FUNDAÇÃO CENTRO DE INFORMAÇÕES E DADOS DO RIO DE JANEIRO, Território. 2. ed. Rio de Janeiro: CIDE. 1998. 80 p.
- CLEARY, R.W. (1991), Qualidade das Águas Subterrâneas. In: PORTO et al. *Hidrologia Ambiental*. ABRH e EDUSP. São Paulo. p. 211-293.
- CPRM - Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações 2º Edição/ Coordenado por Fernando A. C. Feitosa & João Manoel Filho. Fortaleza – CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2000, 391 p.
- CPRM - Geologia do Estado do Rio de Janeiro: texto explicativo do mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro/ Organizado por Luiz Carlos da SILVA & Hélio Canejo da Silva CUNHA. – Brasília: CPRM. 2ª edição revista em 2001.
- CROSBIE, R., JOLLY, I., LEANEY, F., PETHERAM C. AND 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? In. *Hydrogeology Journal*, Volume 10(2), April 2002, p. 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. and 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 Lab. Geológico de La Coruña*. 2006. Vol. 31, p. 43-65.

GUIGUER, N. & FRANZ, T. (1998), *Visual MODFLOW*. Waterloo Hydrogeologic, Inc., Waterloo, Canada.

HOLLÄNDER, H.M.; MULL, R.; PANDA, S.N. (2009), A concept for managed aquifer recharge using ASR-wells for sustainable use of groundwater resources in an alluvial coastal aquifer in Eastern India. *Physics and Chemistry of the Earth*. V.34(4-5) p. 270-278.

LOWSBY, M.G.; ALVES M.G. (2000), Characterization of Coastal Aquifers in the Oceanic Area of Niterói- RJ, Brazil. In: 31° CONGRESSO INTERNACIONAL DE GEOLOGIA, 2000, Rio de Janeiro.

MARTIN, L. & SUGUIO, K. (1989), Excursion route along the Brazilian coast between Santos (state of São Paulo) and Campos (north of state of Rio de Janeiro). In: *International Symposium on Global Changes in South America during the Quaternary*. São Paulo: p. 94-99.

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.

Mollema, P.; Antonellini, M.; Gabbianelli, G.; Laghi, M.; Marconi, V.; Minchio, A. (2012) Climate and water budget change of a Mediterranean coastal watershed, Ravenna, Italy. *Environmental Earth Sciences* 65: p. 257–276.

MUEHE, D.; CARVALHO, V. G. (1989) Morfologia e distribuição dos sedimentos na plataforma continental interna entre Saquarema e Cabo Frio. In: 1° SIMPÓSIO SOBRE OCEANOGRAFIA, Resumos. São Paulo, p. 87-58.

MUEHE, D. e CORRÊA, C.H.T. (1989) Morfologia e distribuição dos sedimentos na plataforma continental interna entre Saquarema e Cabo Frio. In: 1° Simpósio Sobre Oceanografia, 1989, Resumos. São Paulo, p. 87-58.

PERALTA, A. T. - Hydrogeological Characterization in the Barra of Maricá, RJ, Brazil - MSc Thesis Project – vrije Universiteit amsterdam, 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*, v. 21 (2), p. 164-172.

PERRIN, P., (1984) Evolução da costa Fluminense entre as pontas Itaquatiara e Negra,, preenchimentos e Restingas. p. 65-73. In: *Restingas, Origem, Estrutura, Processos*. Lacerda, L.D.; Araújo, D.S.D.; Cerqueira, R. e Turcq, B. (Eds.). CEUFF Niterói.

RAPOSO, J. R.; MOLINERO, J.; DAFONTE, J. (2010), Quantitative evaluation of hydrogeological impact produced by tunnel construction using water balance models. *Engineering Geology*, v.116 (3-4), p. 323–332.

SAMPER, J., HUGUET, LL., 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, 5/99. 205p.

SCANLON, B.R., HEALY, R. W., AND COOK, P. G. (2002), Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge: *Hydrogeology Journal*, v. 10, no. 1, p. 18-39.

SEABRA, V. S.; SILVA JR., G.C.; CRUZ; C. B. M. (2009) - The use of geoprocessing to assess vulnerability on the east coast aquifers of Rio de Janeiro State, Brazil. *Env. Geol.* 57(3): p.665–674. 2009.

SOARES, R. C. V. (2010), Caracterização Do Fluxo Subterrâneo das Águas na Porção Sudoeste da Bacia Representativa de Juatuba. Dissertação de apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais.

TODD, D.K., AND MAYS, L.W. (2005), *Groundwater Hydrology (Third Edition)*: John Wiley and Sons, New York, 636 p.

TURCQ, B., COE NETO, R., FROIDEFOND, J.M. (1986) - Variability of beach ridges on the cost of Maricá (Rio de Janeiro, Brazil). *Quaternary of South America and Antarctic peninsula*, Balkema Publishers, vol.4: p. 45-57.

TURCQ, B. *et al.*, (1999) - Origin and evolution of the quaternary coastal plain between Guaratiba and Cabo Frio, State of Rio de Janeiro, Brazil. *Environmental Geochemistry of Coastal Lagoon Systems*, Rio de Janeiro, v. 6, p. 25-46, 1999. Série Geoquímica Ambiental.

VRIES J.J. and SIMMERS I. (2002), Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*, Vol. 10(1), February 2002, p. 5-17.

YEH, H.F.; LEE, C.H.; CHEN, J.F.; AND CHEN, W.P.(2007), Estimation of Groundwater Recharge Using Water Balance Model. *Water Resources*, 2007, Vol. 34, No. 2, p. 153–162.

Sítios na Web

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).

ANEXOS

Anexo 1 - Relação de poços Cadastrados durante o estudo.

ID	X	Y	Proprietário
0	709000	7460269	Sr. Gilson
1	709002	7461092	D.Palmira Real Park Hotel
2	709025	7461033	D.Palmira Real Park Hotel
3	708900	7458825	D. Patrícia Loja de Artesanato da Rua 1 lote 16 Q 116
4	708907	7458325	Mar
5	709464	7458915	Cond. Flor de Cactus Rua 34 c/49
6	710290	7458584	Sr. Jorge/Leo (Caseiro) R.58 Q.242 L.26 casa 26
7	712405	7458442	Sr. Pedro Paulo R.82 Q 428 L 43
8	712538	7458074	Canal de Itaipuaçu
9	713533	7457945	D. Rita ou Sr. Ari Rua 140 Q 541 L 24 casa1
10	712536	7459315	Sr. Luciano
11	710300	7458540	Sr. Wallace R.58 Q 242 L 31
12	708699	7458929	Mecânica All Car Paulo/ André
13	703827	7458552	Sr. Pedro
14	710763	7458687	D. Sandra R.66 Q 313 L 32
15	711520	7458045	Sr. Wandeley (Cantinho do Wandeco) R.72 Q.393 L4
16	707353	7459298	Sr. Roberto
17	706305	7459330	D. Barbara e Sr. Guilherme R. 26 Q 84 L25
18	714901	7458638	Canal de Itaipuaçu
19	713764	7458515	Dorival
20	711262	7458474	Sr. Nilton
21	710992	7458720	D. Aline
22	714925	7458401	D. Jaqueline
23	711234	7458875	Sr. Humberto Rua 76 Q 383 L7
24	711287	7458822	Sr. Leonardo Rua 34 Q 383 L5
25	710260	7459150	Cond. Novo de esquina Av. 2 c/ Rua 59
26	710444	7458685	Rua 35 esquina com rua 57 Poço da Casa da Ariadne
27	710445	7458684	Poço estratigráfico feito na Casa da Ariadne
28	711886	7460107	D. Dilma R.76 Q 380
29	709986	7460398	D. Isabel Esquina de R.54 c/ R.40 Q.222 L6
30	708276	7459509	D. Maria Goes Rua 32 Q31 L21 C4
31	705482	7459714	Sr. Reginaldo R18 Q 42 L36
32	710142	7458409	Água do Canal com coloração levemente amarelada.
33	711084	7458033	Água do Mar
34	704763	7458999	D. Andrea R.18 Q12 L7
35	704953	7460100	R.8 Q 39 L 30
36	710285	7459856	Sr. Willian Av.2 Q.247 L4 C2
37	712390	7460936	Mineração Santa Joana
38	716867	7460264	Lagoa de Maricá
39	716586	7460935	Canal do Rio Brejo da Costa

40	711258	7459307	Sr. Igor R. 69 Q 341 L7
41	713015	7458364	D. Dulce
42	714872	7458911	Canal de São Bento, R.34 esquina de R. 128
43	714880	7458915	D. Barbara R.34 Q 537 L23
44	710322	7459237	R.58 Q 245 C2
45	707712	7459059	D. Heloisa R.16 Q 56 L33
46	707006	7459036	
47	705957	7459095	R.13 Q 19 L35
48	704942	7460269	R.26 Q 44 L2
49	708966	7459564	
50	710034	7458915	R.33 Q 226 L.25
51	710568	7461948	Canal ponte na rua 28 prox lote 48 (chácara de Inoã)
52	710135	7458427	2º poço estratigráfico
53	715846	7458582	poço raso, tipo manilha
54	711233	7462469	rio
55	704992	7459287	córrego
56	716479	7458803	ney santos

Anexo 2 - Relação de poços e Corpos d'água Nivelados durante o estudo.

ID	X east	Y north	Alt Elips	Ondulação Geoidal	Alt Ortométrica
P042	714848.8	7458907	-5.665	-6.11	0.445
P001	709012.3	7461064	-1.342	-6.13	4.788
P002	709012.3	7461064	-1.342	-6.13	4.788
P007	712418.9	7458426	5.347	-6.13	11.477
P009	713494.2	7458118	1.032	-6.13	7.162
P012	708652.6	7458932	5.079	-6.13	11.209
P013	703789.2	7458539	-2.946	-6.09	3.144
P014	710947	7458559	4.287	-6.14	10.427
P016	707365.6	7459286	1.672	-6.12	7.792
P017	706803.5	7459387	2.844	-6.12	8.964
P026	710947	7458559	4.287	-6.14	10.427
P027	710947	7458559	4.287	-6.14	10.427
P029	709971.7	7460396	-3.167	-6.14	2.973
P030	708271.3	7459516	-0.605	-6.13	5.525
P034	704731.4	7458984	3.705	-6.1	9.805
P036	710263.5	7459817	-1.868	-6.14	4.272
P040	711233.7	7459285	-0.731	-6.14	5.409
P043	714833.3	7458871	-1.577	-6.11	4.533
P044	710307.6	7459238	-0.275	-6.14	5.865
P048	704941.1	7460136	4.777	-6.1	10.877
P049	708929.7	7459910	-0.993	-6.13	5.137
P050	710059	7459217	0.274	-6.14	6.414
Praia	708931.9	7458362	0.464	-6.13	6.594