

Modelo conceitual do aquífero de Itaipuaçu em Maricá – RJ com uso de ferramentas hidrogeoquímicas e hidrodinâmicas.

Conceptual Model of Itaipuaçu Aquifer, Maricá - RJ using Hydrogeochemical and Hydrodynamic Tools

Vinicio do Nascimento Cristo¹, Gerson Cardoso da Silva Jr¹, Glauco Zely Eger¹,

Patricia Helena Martha da Silveira¹ e Juliana Magalhães Menezes²

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Geologia, Laboratório de Hidrogeologia, Rio de Janeiro , RJ, Brasil

vcristo85@gmail.com, gerson@acd.ufrj.br, glaucoeger@geologia.ufrj.br, patricia.silveira@gmail.com

² Universidade Federal Fluminense, Departamento de Geografia, Niterói, RJ, Brasil

menezesgeo@yahoo.com.br

Recebido: 19/12/13 - Revisado: 24/10/14 - Aceito: 29/07/15

RESUMO

Estudos realizados em todo o mundo sobre a intrusão salina em aquíferos são cada vez mais frequentes pela elevada concentração da população próxima às áreas costeiras. Atualmente, os aquíferos costeiros sofrem uma grande pressão, pois são alvos de intensa exploração e vêm sofrendo crescente degradação de seus recursos, dentre outras razões, pela elevada carga de efluentes domésticos e urbanos, como é o caso do distrito de Itaipuaçu, na cidade de Maricá, estado do Rio de Janeiro. O presente trabalho teve por objetivo analisar as condicionantes hidrogeológicas (dados de física e química, isotópos e aspectos hidrodinâmicos) e produzir um modelo conceitual do aquífero de Itaipuaçu. Como principais resultados da pesquisa obtiveram-se: 1) a elaboração de um novo banco de dados hidrogeológicos para a região; 2) a estimativa de recarga do aquífero mediante diferentes técnicas de balanço hídrico; 3) a obtenção de parâmetros hidráulicos do aquífero, que permitiram conhecer suas características hidrodinâmicas, indicando uma elevada condutividade hidráulica do aquífero superior livre, embora este seja de pequena espessura; 4) o estudo da isotopia aportou dados complementares, que auxiliaram na caracterização do aquífero, permitindo diferenciar um aquífero superior livre em toda planície costeira, separado de um aquífero semiconfinado por materiais pélicos; e 5) elaborou-se o modelo conceitual da área, apoiado pela consecção de simulações numéricas e hidrogeoquímicas, o que ajudou a consubstanciar as hipóteses de trabalho e quantificar a recarga, o fluxo subterrâneo e as interações com os corpos salinos adjacentes. Com todos esses elementos pôde-se definir, mesmo que de forma preliminar, o modelo conceitual do aquífero local e confirmar que este aquífero costeiro não apresenta indícios de intrusão salina.

Palavras Chave: Aquífero Costeiro. Hidrogeoquímica. Itaipuaçu. Modelo conceitual. Visual-Modflow.

ABSTRACT

Worldwide studies conducted on the subject of freshwater-saltwater interface and saltwater intrusion in coastal aquifers are becoming more frequent due to the high concentration of population near coastal areas. Currently, coastal aquifers are under great pressure and are subject to intense exploitation in Brazil, with water resources becoming increasingly degraded, due to, among other causes, the high load of domestic and urban sewage, and high withdrawal rates, as in the Itaipuaçu district of Maricá-RJ. The present work aimed to analyze the hydrogeological conditionings (physical and chemical data, isotopes and hydrodynamic aspects) and produce a conceptual model of the aquifer. The main results of the research were: 1) development of a new hydrogeological database for the region; 2) recharge estimation using water balance achieved by a variety of techniques; 3) aquifer hydraulic parameters obtained allowed evaluating hydrodynamic characteristics; 4) isotope study contributed to additional insights into the aquifer characterization, allowing to differentiate the phreatic aquifer from the semiconfined aquifer; 5) a conceptual model of the area was built, supported by the development of numerical and hydrogeochemical modeling exercises, helping to verify working hypotheses and quantify the groundwater flow and recharge and interactions with adjacent saline bodies. All these elements helped to define, even preliminarily, the functioning mode of the local aquifer and to confirm that, according to available data, this coastal aquifer does not show evidence of saline intrusion.

Keywords: Coastal Aquifer. Hidrogeochemistry. Itaipuaçu

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Em Itaipuaçu, distrito do município de Maricá, cidade da Região dos Lagos no estado do Rio de Janeiro mais próxima à capital do estado, houve, nas últimas duas décadas, a segunda maior expansão populacional de todo o estado. Itaipuaçu, antes ocupada predominantemente por residências de verão (segunda residência), por tratar-se de área turística, foi adquirindo cada vez mais o caráter de local de moradia fixa de muitas famílias. Com isso os recursos hídricos, anteriormente demandados com mais intensidade apenas no verão, passaram a suprir as necessidades de água do distrito durante o ano todo, quase exclusivamente através de água de poços. Isso levou a um consumo intenso dos recursos hídricos subterrâneos, e consequentemente indícios de sobre exploração dos recursos. Isso motivou a presente pesquisa para entendimento dos mecanismos hidrogeoquímicos e hidrodinâmicos atuantes, permitindo a avaliação da situação e a eventual proposição de medidas de controle e mitigação dos problemas.

A salinização das águas subterrâneas é considerada um dos maiores problemas de contaminação ambiental no planeta (BARLOW; REICHARD, 2010). Atualmente, existem diversas técnicas e métodos empregados na coleta, processamento e na interpretação dos dados hidrogeológicos obtidos em zonas costeiras, visando o estudo do comportamento da interface salina, tais como medidores e loggers automáticos (utilizados para testes de bombeamento e ensaios de interferência, monitoramento continuado de NA, salinidade, temperatura, etc.); programas computacionais para o processamento dos dados, através da construção de gráficos, diagramas e da obtenção de parâmetros hidrogeoquímicos (VANDENBOHEDE; LEBBE, 2012; WANG; JIAO, 2012) ou para a elaboração de modelos numéricos de fluxo (MCDONALD; HARBAUGH, 1988) e do transporte da cunha salina, como por exemplo o código SEAWAT (GUO; LANGEVIN, 2002). Além das técnicas anteriormente citadas, as ferramentas hidrogeoquímicas representam uma importante fonte de informações e são valiosas coadjuvantes na elaboração de modelos conceituais do comportamento hidrogeológico dos aquíferos. Isso é demonstrado em algumas pesquisas hidrogeológicas com enfoque maior nas questões hidrogeoquímicas (GIMÉNEZ FORCADA, 2010; STUYFZAND, 1999), que contam, entre outras técnicas, com estudos de razões iônicas (ALCALÁ; CUSTODIO, 2008) e análises isotópicas (HAN et. al, 2011; BOUCHAOU et al., 2008; LIN et al. 2009), bem como de modelagem hidrogeoquímica. O aprofundamento da instrumentação e monitoramento geoquímico e hidrodinâmico em áreas onde a intrusão salina pode ocorrer permite o acompanhamento do fenômeno e de seus efeitos. Assim, tais ferramentas foram empregadas de modo ordenado e sistemático ao longo do trabalho, para que os objetivos fossem cumpridos.

A correta definição dos objetivos é fundamental no processo de modelagem. Habitualmente utilizam-se simulações do fluxo subterrâneo natural e de processos de transporte de contaminantes na determinação de futuros impactos das condições atuais, previsão da migração da pluma de contaminação ou atenuação natural, entre outras possibilidades.

Este estudo visa contribuir para o entendimento do

comportamento do aquífero costeiro de Itaipuaçu, a partir do desenvolvimento de um modelo conceitual hidrogeológico. Este modelo pode vir a auxiliar no planejamento das ações de exploração desses recursos, possibilitando que os agentes públicos e a sociedade possam tomar decisões adequadas.

Desse modo, o objetivo principal desta pesquisa é caracterizar os parâmetros hidrodinâmicos e modelar os processos geoquímicos que ocorrem no aquífero costeiro de Itaipuaçu. Com isso, foram avaliadas as potencialidades desse aquífero e os possíveis impactos que o manancial possa sofrer, como a possível salinização da água, além de melhorar a compreensão dos mecanismos de migração da cunha salina neste aquífero. Adicionalmente ao objetivo principal, realizaram-se elaborações adicionais, como um balanço hídrico do aquífero raso e uma modelagem de fluxo com auxílio do código VISUAL-MODFLOW (MCDONALD; HARBAUGH, 1988), que permitiram contrastar melhor os resultados obtidos por técnicas convencionais.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo (Figura 1) está situada no distrito de Itaipuaçu, município de Maricá, localizado a aproximadamente 50 km da capital do estado do Rio de Janeiro.

O município de Maricá caracteriza-se pela presença de um sistema lagunar costeiro que têm grande importância na escultura das feições morfológicas locais que exercem influência nos aquíferos freáticos. Tal sistema faz parte do complexo lagunar no litoral do estado denominado Região dos Lagos.

Itaipuaçu não dispunha, até o fechamento da presente pesquisa, de uma rede de armazenamento e distribuição de água tratada, ficando por conta de cada morador o suprimento de água para suas necessidades, na maioria dos casos através de poços caseiros. Recentemente, a CEDAE, companhia estatal de tratamento de água e esgotos, concessionária em Maricá, inaugurou um sistema de distribuição em Itaipu (outubro de 2014). Em decorrência deste fato, até o fechamento da pesquisa quase a totalidade dos moradores abastecia suas residências utilizando a água subterrânea. Contudo, a área ainda não é dotada de rede de tratamento de esgoto sanitário, utilizando-se

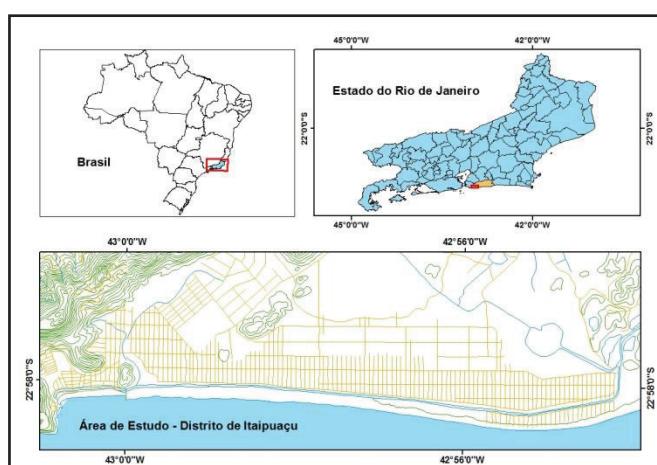


Figura 1 - Localização da área de estudo, com destaque para o distrito Itaipuaçu

fossas e sumidouros.

As planícies costeiras são predominantes na área de estudo e representam superfícies sub-horizontais, com microrrelevo ondulado com amplitudes topográficas inferiores a 20 metros, que em geral são formadas por processos de sedimentação eólica e/ou marinha. Os terrenos comuns nessas feições são em geral bem drenados com padrão de drenagem paralelo, acompanhando as depressões intercordões.

De acordo com a CPRM (2001a), a área de estudo (Figura 2) recobre dois importantes domínios tectono-magnéticos do estado do Rio de Janeiro: O Domínio Serra do Mar e o Domínio Região dos Lagos.

O domínio Serra do Mar corresponde geograficamente à microplaca Serra do Mar. É composto por uma sucessão de arcos magnéticos mostrando marcante polaridade temporal e composicional de W para E. Caracteriza-se ainda por rochas supracrustais que sofrem metamorfismo de baixa pressão e alta temperatura, na fáceis anfibolito, 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 (CPRM, 2001a).

O domínio Região dos Lagos situa-se na porção mais a leste da província. É constituído por ortognaisses paleoproterozóicos (embasamento) e supracrustais (Cambro-Ordovicianos - Complexo Búzios) interpretadas como remanescente de back arc. Foi metamorfofizado na fáceis anfibolito superior, em evento colisional com cavalgamento para NW, sobre o domínio Serra do Mar durante os estágios terminais da colagem brasiliana, no Cambriano (CPRM, 2001b).

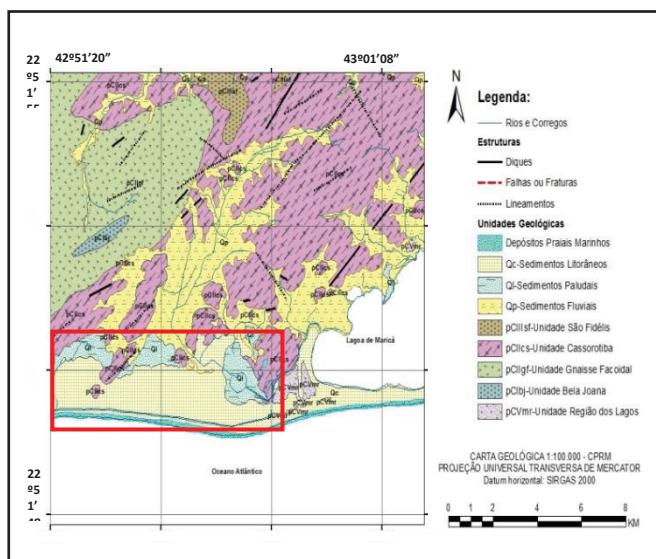


Figura 2 - Mapa Geológico do estado do Rio de Janeiro, com destaque na área de estudo (retângulo vermelho)

Os estudos realizados nesta pesquisa limitaram-se basicamente aos cordões litorâneos (Figuras 3 e 4), que são coberturas constituídas por sedimentos litorâneos e paludais de idade quaternária, que ocupam a faixa litorânea bordejando irregularmente lagoas e lagunas da região (MUEHE; VALEN-

TINI, 1998).

Esses depósitos são formados principalmente de areias quartzosas litorâneas de coloração esbranquiçada, por vezes amareladas, razoavelmente selecionadas com matriz siltica a argilosa nas paleopraias (áreas de cordões de praia primitivas), granulometria variando de média à grossa, com grãos variando de subangulares a arredondados, geralmente se associando com presença de feldspato ou minerais maficos.

A presença de duplos cordões, o mais interiorizado mais alto do que o frontal (Figura 3) e a formação, na depressão entre eles, de lagunas alongadas, sugere ainda que houve uma migração dos cordões em função das mudanças do nível do mar.

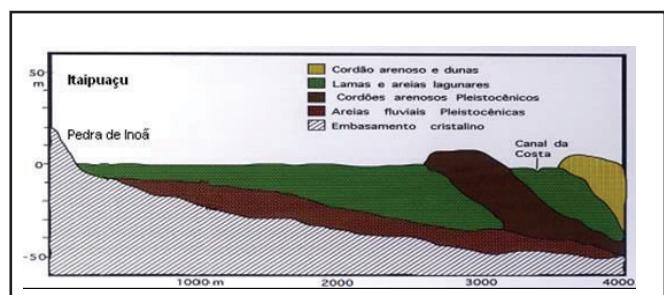


Figura 3 - Duplos cordões no litoral de Itaipuaçu: perfil esquemático (cedido por Dr. Cleverson Guizan Silva)

O mapa da Figura 4 representa a posição dos cordões litorâneos (dunas) na área de estudo.



Figura 4 - Mapa com a localização dos cordões de dunas

A hidrogeologia da região é caracterizada por um sistema aquífero composto de materiais sedimentares, do tipo granular, constituídos por depósitos aluvionares costeiros, por vezes porções de solo e rocha alterada. Os aquíferos aluvionares são compostos principalmente por areias quartzosas e, subordinadamente, por areias siltosas e argilosas, que ocorrem nas proximidades das lagunas decorrentes da formação das baixadas litorâneas durante os últimos movimentos de variações do nível do mar. Constituem, portanto, aquíferos livres a semiconfinados, de pequena espessura e forte influência de fatores sazonais.

A qualidade da água está geralmente relacionada ao ambiente em que se localizam os aquíferos. De um modo geral,

a salinidade da água aumenta com a proximidade do litoral e, ao mesmo tempo, com a profundidade, sendo também controlada pela maior ou menor densidade de ocupação (ALMEIDA, 2009).

Há fatores que predispõem o aquífero livre da área estudada a uma elevada vulnerabilidade à contaminação bacteriológica, tais como: a declividade nas áreas de baixada é praticamente nula, dificultando o escoamento da água; as áreas próximas às lagunas estão sujeitas à oscilação das marés e inundações periódicas em função de chuvas intensas; na maioria das vezes, 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 é feita com deficiente sistema de proteção (SEABRA; SILVA JR.; CRUZ, 2009).

O aquífero poroso ou granular, que foi o alvo principal das análises realizadas neste trabalho, é formado por areias moderadamente selecionadas, com matriz siltica e argilosa, de granulometria fina a grossa. Trata-se de aquífero livre, raso e normalmente salinizado.

Este aquífero recebe recarga diretamente das chuvas. Devido à elevada condutividade hidráulica (em média da ordem de 10^{-1} cm/s) das areias e à pequena profundidade do nível estático, este aquífero vem sendo intensamente explotado.

MATERIAL E MÉTODOS

Levantamento de dados geológicos e hidrogeológicos

Cadastro de poços

Foi formulado um cadastro de poços composto por 57 poços tubulares rasos (Figura 5) especialmente para o desenvolvimento do projeto Hidroq-Rio (SILVA JR.; CRISTO, 2012), utilizado nesta pesquisa. Os poços cadastrados apresentam profundidade média de 10 a 15 m, captando água da camada aquífera mais superficial. A exceção ocorre no poço 9, que

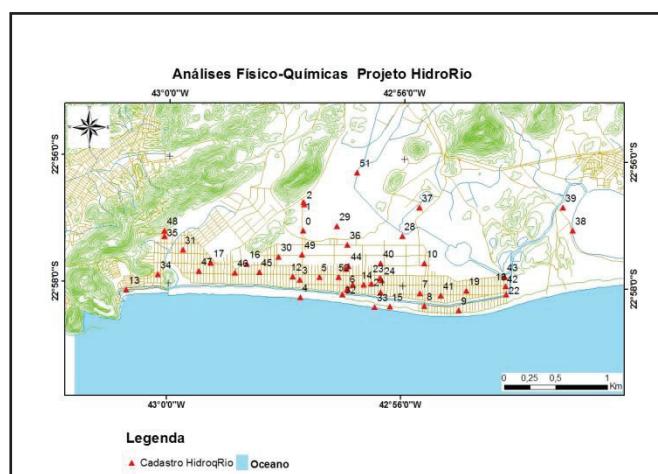


Figura 5 - Mapa de localização do cadastro de 57 pontos de coleta de água em Itaipuã. Os triângulos vermelhos indicam a localização dos poços cadastrados na pesquisa

possui 40 m de profundidade e capta água exclusivamente do aquífero inferior, já que nessa região do cordão arenoso mais externo, da superfície até cerca de 35 m de profundidade a água encontrada é salobra.

Ainda foram realizados esforços na obtenção de parâmetros físico-químicos in situ, como pH, condutividade elétrica (CE), potencial redox (Eh) e nível d' água. Após esses levantamentos, foram confeccionados mapas temáticos da área (de variação de pH, CE, Eh e íon cloreto), através da utilização do programa ArcGis® versão 9.3, para uma melhor elaboração do modelo final.

Levantamentos topográficos

Foram realizados levantamentos topográficos pelo método DGPS, a fim de obter-se o nivelamento dos poços, dos quais foram levantados os níveis freáticos, para assim definir a superfície potenciométrica do aquífero. O método DGPS ou GPS Diferencial, consiste em obter a altitude ortométrica (H, altitude em relação ao geoide) através da altitude elipsoidal (h, altura obtida do levantamento) descontando-se a ondulação geoidal (N), conforme equação 1.

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

Durante o levantamento topográfico utilizou-se o DGPS ProMark2 da Ashtech®, com uma antena base local no modo de operação estático, para levantamento de cotas nos poços selecionados em que foram medidos os níveis d' água.

A ondulação geoidal foi obtida pelo programa MAP-GEO2010 do Sistema Brasileiro Geodésico-IBGE. Os dados topográficos foram processados no programa ArcGis® versão 9.3 da ESRI, no qual foram confeccionados mapas e perfis.

Balanço hídrico

Realizou-se o balanço de massa de água para obter a estimativa da quantidade de água presente e circulante no sistema aquífero, através do cálculo de entradas e saídas da água do sistema. Essa atividade foi fundamental para a avaliação do funcionamento hidrogeológico do aquífero, bem como um passo importante na direção de prover instrumentos de gestão dos recursos hídricos subterrâneos locais, permitindo estimativas do volume de água que pode ser explotado. A equação 2 (balanço hídrico) foi utilizada nessa estimativa.

$$\Delta S = \text{Entradas} - \text{Saídas} \quad (2)$$

Balanço Hídrico pelo Visual Balan®

Para auxiliar a aplicação do método do Balanço Hídrico utilizou-se o código computacional Visual Balan versão 2.0 (SAMPER et al., 1999), o qual permite realizar balanços hidrológicos sequenciais diários abrangendo o solo, a zona não saturada e aquífero. O Visual Balan tem como base um modelo matemático agregado e determinístico (ESPINHA MARQUES

et al., 2006).

A fim de corroborar os resultados do programa também foram aplicadas diferentes metodologias como Balanço Hídrico por Darcy, Balanço Hidrometeorológico simples e Balanço de Cloretos.

Balanço Hídrico por Darcy

É a aplicação da lei de Darcy para todo aquífero. A lei de Darcy:

$$Q = K \cdot i \cdot A \quad (3)$$

na qual o parâmetro Q é a vazão, K é condutividade hidráulica, i é o gradiente hidráulico e A é a Área da seção. Como o aquífero é um corpo heterogêneo, seus parâmetros variam, a fim de amenizar as distorções foram utilizados os valores máximo, mínimos e suas médias.

Balanço Hidrometeorológico

Nesse método, para quantificar o volume de aportes ao aquífero, aplica-se a equação 4:

$$\Delta S = \Delta P \cdot R \cdot A \quad (4)$$

em que ΔP é a precipitação anual média, R é a percentagem média de recarga e A é a área de abrangência do aquífero em superfície. Para o cálculo da precipitação foi instalada uma estação meteorológica na área do presente estudo e também foram utilizados os bancos de dados do INMET-SONABRA e ANA-HidroWeb. Esses dados foram processados no programa Easy Bal v9.2 (VÁZQUEZ-SUÑÉ; CASTRO, 2002), onde foi estimada a recarga média anual.

Balanço de Cloretos

É uma metodologia de estimativa de recarga obtida pela razão dos valores médios do íon cloreto em amostras de água da chuva e do aquífero coletadas e analisadas para estudo. O íon cloreto tem um caráter conservativo, o que permite através de sua análise, estimar a recarga (ALCALÁ; CUSTODIO, 2008), como demonstrado na equação 5.

$$R = \frac{Cl_p}{Cl_{aq}} \quad (5)$$

Onde: R = recarga ao aquífero; Cl_p = cloretos na precipitação e Cl_{aq} = cloretos no aquífero.

Instrumentação e monitoramento

Dados pluviométricos

Dispõe-se de dados da Estação de Maricá da Rede do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa do INMET e do Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA), permitindo comparações com os dados específicos obtidos na área de trabalho com a estação meteorológica adquirida pelo projeto Hidroq-Rio.

Perfuração de Piezômetros

Foram instalados dois piezômetros (pontos 27 e 52) em áreas pré-determinadas que apresentaram relevância dentro da área de estudo. A proximidade dos poços construídos e de poços pré-existentes permitiu elaborar um teste de interferência para obtenção de importantes parâmetros hidrodinâmicos (como transmissividade e armazenamento) deste aquífero. Os poços construídos nesta pesquisa foram perfurados até a profundidade de 15 metros sendo que no perfil construtivo dos dois poços foi observada uma composição de pequenas camadas de areia branca a amarela, grossa e mal selecionada, intercaladas com argilas de cor marrom a verde.

Ensaio de Interferência

Utilizando um poço previamente construído (poço 26) em uma propriedade particular e outro poço construído no âmbito desta pesquisa (poço 27), foi realizado um teste de interferência com a instalação de um medidor automático de nível (Diver® da Schlumberger Water Services) para o ensaio de interferência realizado em um dia.

Foram realizadas 18.625 medições durante o teste, que teve duração de 5 horas e 10 minutos, com vazão constante de 0,27 L/s. O teste foi interrompido, com a duração acima mencionada, pois o poço apresentava tendência a estabilização. Através deste ensaio e do pós-processamento dos dados coletados, foi possível obter os valores dos parâmetros hidráulicos do aquífero Transmissividade (T) e Coeficiente de Armazenamento (S) com a utilização do programa Aquifer Test® da Schlumberger Water Services.

Caracterização hidrogeoquímica

Este trabalho foi realizado com base nas amostras coletadas ao longo desta pesquisa e posteriormente analisadas em laboratório. A partir de poços, águas dos cursos hídricos superficiais, água do oceano e da lagoa de Maricá, foram selecionadas amostras para o estudo hidrogeoquímico.

Análises Hidrogeoquímicas

A partir do cadastro de poços, com 57 pontos de água cadastrados com medições de parâmetros in situ, realizou-se a amostragem de água em 27 pontos (designados P1, P3, P7, P9, P11, P12, P13, P14, P15, P16, P17, P26, P28, P29, P30, P31, P32, P33, P34, P35, P36, P37, P38, P42, P50, P51 e P56) analisados em laboratório (21 análises em poços de particulares na área e 6 pontos de água superficial), identificou-se a assinatura geoquímica da água subterrânea do aquífero do Distrito de Itaipuaçu, Maricá.

As análises químicas das águas subterrâneas foram submetidas ao balanço iônico para avaliar as informações das análises fornecidas pelo laboratório especializado, segundo o critério de Logan (1965).

A partir dos resultados das análises químicas foram construídos diagramas interpretativos elaborados gráficos no

programa de gerenciamento de planilhas Excel® para fins de caracterização hidrogeoquímica da região e comparação com os dados hidrogeoquímicos dos projetos anteriores. Os diagramas elaborados foram os de Piper e Schöller.

O estudo das razões iônicas é de grande importância para classificação e interpretação da hidrogeoquímica dos aquíferos, especialmente no caso de aquíferos costeiros. No distrito de Itaipuaçu foram escolhidas as razões iônicas de maior significado para a representação das condições locais. Posteriormente, os resultados foram inseridos em plataforma SIG (Sistema de Informações Geográficas) para a elaboração de mapas de isoteores, enfatizando as características de parâmetros *in situ* e de cloretores do aquífero do Distrito de Itaipuaçu, Maricá.

Caracterização isotópica

Os isótopos ambientais oxigênio-18 (^{18}O) e deutério (^2H), empregados no presente estudo, apresentam vantagem sobre outros tipos de traçadores do comportamento da água no meio físico pelo fato de que formam parte da molécula da água, e por isso ficam minimizados os efeitos de retardos, reações químicas, sorção, etc. (CLARK; FRITZ, 1997).

Foram coletadas 6 amostras de água para análise de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$. As análises foram realizadas utilizando-se o método entrada dupla em múltiplas amostras. Para a análise através do método automatizado, 3 mL de amostra foram pipetados em reatores ligados a um sistema on-line automatizado e equilibrado com H_2 . Uma vareta de grafite encamisada em platina foi usada como catalisador para o equilíbrio de H_2 com água. O gás equilibrado foi analisado em um espectrômetro de massa de razões isotópicas Finigan MAT 251 ratio (IRMS).

Modelagem hidrogeoquímica e numérica

Em associação com os dados mineralógicos e químicos das litologias associadas aos aquíferos, bem como das características das águas de superfície, chuva e marinha, foi possível estabelecer hipóteses consistentes sobre a origem, processos dominantes e mesmo balanços de massa através de uso de modelos geoquímicos.

Neste trabalho a modelagem foi realizada com o auxílio do programa computacional PHREEQCi versão 3.02, desenvolvido pelo USGS (PARKHURST; APPELO, 2013). Além da especiação, determinação dos índices de saturação de minerais e avaliação da qualidade das análises, realizaram-se algumas simulações de modelagem inversa, buscando-se determinar as possíveis origens da água de recarga ao aquífero. A elaboração de gráficos, diagramas e obtenção de razões iônicas, dentre outros produtos possibilitaram, conjuntamente com as simulações realizadas com o PHREEQCi, a interpretação e caracterização das análises químicas que, associadas a aspectos geológicos e hidrogeológicos, permitiram elaborar modelos conceituais de funcionamento dos aquíferos.

A simulação numérica de fluxo foi realizada com o programa Visual Modflow versão 4.2, sendo aplicada apenas na camada mais superficial do aquífero costeiro de Itaipuã, cujos parâmetros hidráulicos obtidos anteriormente e utilizados

na simulação foram:

- Condutividade Hidráulica – K_x , K_y e K_z ,
 - Armazenamento Específico - S_s e
 - Porosidade Total e Efetiva ϕ e $\varphi\phi$

Esses valores encontram-se disponíveis na Tabela 3. Os valores de porosidade foram calculados a partir dos dados obtidos com o ensaio de bombeamento. 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 menor.

RESULTADOS

Os resultados alcançados durante a pesquisa permitiram a caracterização do aquífero costeiro de Itaipuã, em sua camada aquífera mais importante (e mais rasa, até 15 metros de profundidade, em média) ao abastecimento da região, já que grande parte dos poços perfurados encontra-se nessa faixa de profundidade. Os parâmetros hidráulicos também foram obtidos, assim como o modelo conceitual do aquífero.

Hidrodinâmica

Para melhor visualização dos resultados foi gerado um mapa da área (Figura 6) onde estão dispostos os valores de potenciometria calculados.

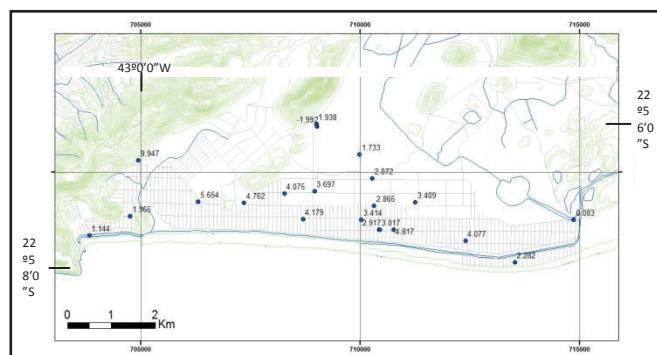


Figura 6 - Localização dos poços nivelados em Itaipuaçu com a cota dos respectivos níveis d'água em metros sobre o nível médio do mar

Após o processamento e tratamento dos dados adquiridos no curso do trabalho tentou-se comparar estes com os dados obtidos no trabalho de Costa (2001), e o resultado é que os dados das duas pesquisas não apresentam boa coincidência. Acredita-se que essa discrepância seja devida ao fato do levantamento anterior ter sido realizado com ferramentas mais rudimentares, com medições de nível e trena, sem um controle e amarração de pontos de apoio básico do Sistema Geodésico Brasileiro.

Ensaio de interferência

Depois da etapa de processamento dos dados, foi possível obter os valores dos parâmetros hidráulicos do aquífero como a transmissividade (T), estimada em $111 \text{ m}^2/\text{dia}$ e

o coeficiente de armazenamento (S) igual a 0,47. Estes valores foram obtidos a partir do método de Neuman (1975). Além desses parâmetros, foi possível obter de maneira aproximada a condutividade hidráulica através da fórmula:

$$T = K * b \quad (6)$$

Em que, T = Transmissividade, K = Condutividade Hidráulica e b = espessura do aquífero, resultando em uma condutividade hidráulica da ordem de 7,4 m/dia.

A observação dos dados obtidos com esse ensaio leva a interpretação de que o aquífero reage hidráulicamente com uma resposta de aquífero livre, com os três segmentos característicos dessa resposta (NEUMAN, 1975). A possibilidade de uma influência de efeito de maré existe nos aquíferos costeiros, mas parece ser pouco provável, dadas as características locais como a distância ao mar, a alta permeabilidade e caráter livre do aquífero.

Estimativa da recarga ao aquífero (balanço hídrico)

Na Tabela 1 sumarizam-se os valores calculados para cada método a fim de traçar uma comparação entre eles.

| MÉTODO | RECARGA (m^3/ano) |
|--------------------------------------|-----------------------|
| Balanço Hídrico pelo <i>V. Balan</i> | $1,15 \times 10^7$ |
| Balanço Hídrico por Darcy | $2,65 \times 10^6$ |
| Balanço Hidrometeorológico | $1,2 \times 10^7$ |
| Balanço de Cloretos | $7,62 \times 10^6$ |

Tabela 1 - Valores de recarga calculados por Eger (2012).

Os balanços realizados com os métodos Visual Balan e Hidrometeorológico apresentam valores muito semelhantes, respectivamente $1,15 \times 10^7 m^3/ano$ e $1,2 \times 10^7 m^3/ano$. Tais métodos são conceitualmente muito parecidos, realizando a estimativa de recarga profunda a partir da evapotranspiração real e de dados estimados de escoamento superficial e interceptação. Muitos dos parâmetros empregados são de difícil obtenção prática e realista, sendo obtidos na literatura, sujeitos, portanto, a erros nas estimativas.

O balanço calculado com o método de cloretos possui um valor que, embora consideravelmente menor ($7,62 \times 10^6 m^3/ano$), aproxima-se mais dos balanços realizados com os métodos Visual Balan e Hidrometeorológico. O método de cloretos pode apresentar efeitos deletérios pela presença do aerossol marinho, contaminação pela cunha salina e tipo e natureza da chuva incidente, o que pode induzir a erros. A estimativa pela Lei de Darcy leva em conta somente a água entrante no aquífero através de suas áreas de recarga naturais, mas não se dispõe de nenhum

método de medida confiável da saída de água do aquífero, o que leva a valores altamente subestimados de recarga. Sendo assim, os resultados obtidos permitem estipular que a recarga deste aquífero está entre 7×10^6 e $1,2 \times 10^7 m^3/ano$ (ou entre 7 e 12 hm^3/ano , aproximadamente). Tais dados serão comparados ao resultado da modelagem de fluxo ao final deste capítulo.

Interpretações hidrogeoquímicas

Com a amostragem de parâmetros físico-químicos in situ, foi possível elaborar mapas temáticos de isoteores que representam a situação do aquífero costeiro de Itaipuaçu do ponto de vista geoquímico. Os mapas resultantes representam apenas os dados do aquífero mais superficial. Todos os mapas

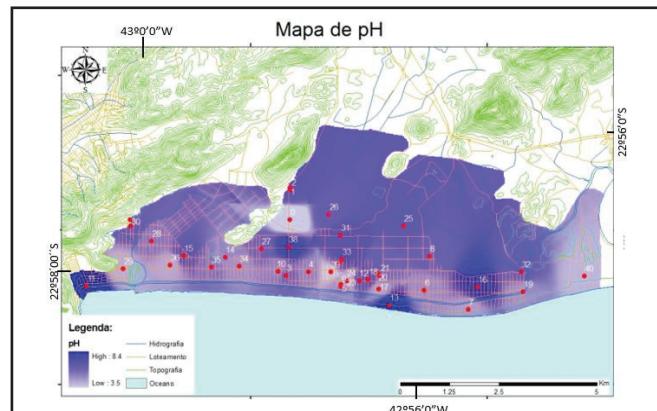


Figura 7 - Mapa de variação de pH nas amostras de água da área de estudo

foram gerados utilizando a técnica de interpolação pelo Inverso do Quadrado a Distância.

Quanto aos parâmetros físico-químicos, medidos na totalidade das amostras, as águas apresentam em geral um pH próximo a neutralidade a levemente ácido, com grande dispersão (Figura 7). Quanto ao teor salino, os valores de condutividade elétrica para a maior parte das amostras apresentam salinidade entre 100 e 500 mg/L. Há uma área a leste, originalmente mais deprimida topograficamente (denominada Lagoa Brava, hoje assoreada), que é o local que possui os valores mais baixos de

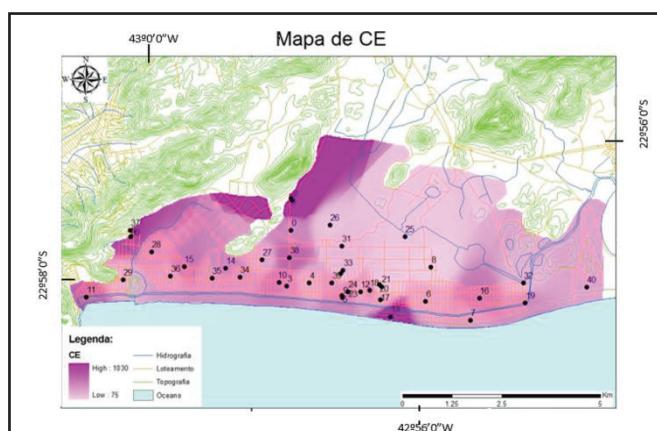


Figura 8 - Mapa de distribuição de condutividade elétrica nas amostras de água da área de estudo.

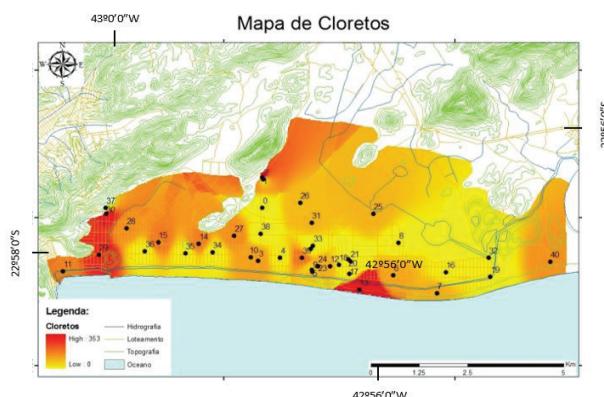


Figura 9 - Mapa de distribuição de teores de cloreto na água da área de estudo

salinização em toda área (Figura 8). O resultado deste parâmetro no trabalho demonstra uma realidade diferente à encontrada por Tapiá (2009) e Almeida (2009). Na área de estudo, localizada alguns quilômetros a leste da área do presente trabalho, os autores apontam para predominância de valores muito altos de condutividade elétrica, talvez por não haver uma barreira física, como é o caso em Itaipuaçu.

O mapa de cloreto aponta de maneira geral que as águas subterrâneas da área possuem valores de cloreto baixos, em média até 100 mg/L (Figura 9). Em algumas localidades sobressaem valores um pouco mais altos de cloreto na área, sendo o valor mais alto registrado de 353 mg/L, já acima do valor máximo permitido para consumo humano, segundo a portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde.

Com os resultados obtidos, utilizando os diagramas de Piper das amostragens realizadas, gerados com a utilização do programa AquaChem®, foi possível obter um panorama mais consistente das características geoquímicas do aquífero costeiro de Itaipuaçu. O diagrama da Figura 10 representa a população de 27 amostras com análises quimicamente equilibradas coletadas durante o projeto. As amostras de água subterrânea representadas no diagrama de Piper conferem a esse grupo de amostras majoritariamente uma classificação cloretada-sódica.

As amostras podem ser classificadas em três famílias distintas, representadas por distintas cores: 1) azul, caracterizadas pela predominância do íon cloreto e complementarmente sulfato e bicarbonato; 2) amostras de coloração amarela, que possuem maior afinidade com a água do mar, provêm do canal de Canal da Costa e do Canal de São Bento, respectivamente no extremo leste e oeste da área do estudo; e 3) amostras representadas em vermelho caracterizam-se pelos baixos valores de sulfato. Apenas dois pontos não fazem parte do grupo com a assinatura hidrogeoquímica citada acima, sendo estas classificadas como bicarbonatadas-sódicas. Tais pontos são representantes de água superficial (ponto 51) ou de amostra de água subterrânea (ponto 14) de uma área elevada, afastada do alcance da influência marinha mais direta.

O diagrama de Piper (Figura 10) indica também que amostras são enriquecidas em sódio e cloreto e possuem valores muito baixos de sulfato.

As análises das Razões Iônicas apresentaram os se-

guintes resultados:

A razão rMg/rCa indica que a maior parte do grupo de amostras possui assinatura de águas continentais. A razão $rCl/rHCO_3$ indica que o grupo de amostras de água subterrânea analisadas para a pesquisa possui uma assinatura compatível com águas continentais.

A razão rCl/rBr^- mostra que algumas amostras da área de estudo têm afinidade com a água marinha, porém isso pode ser explicado pela constante presença de aerossóis marinhos na água da chuva, sendo esta uma das razões para que, mesmo um aquífero sem nenhuma indicação de intrusão salina, possa apresentar uma assinatura relacionada a água do mar. A relação iônica rCl/rBr^- , também permitiu uma análise pela metodologia apresentada por Alcalá e Custodio (2008) para indicar os tipos de origem da salinidade ou processos de salinização em um dado sistema. No caso de Itaipuaçu, a aplicação do método leva a conclusão que não ocorrem sinalizações de contaminação devido à presença de indústrias ou a atividades rurais poluidoras, podendo-se atribuir como causa única da salinidade local à exploração de água do aquífero.

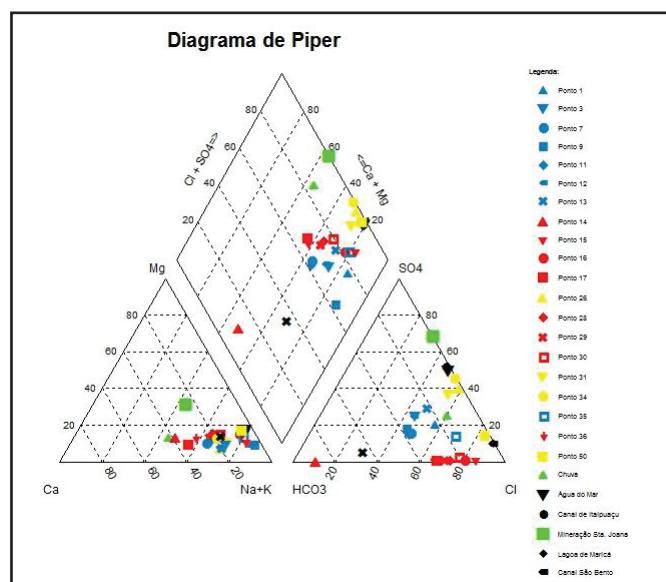


Figura 10 - Diagrama de Piper para amostras da área de estudo. Podem ser percebidas diferentes assinaturas hidrogeoquímicas, bem marcadas, representadas pelas cores vermelha, amarela e azul.

As amostras demonstram afinidade com a água marinha. Porém, conforme explicado anteriormente, a presença dos aerossóis marinhos na água que recarrega o aquífero pode influir nestes valores, não se tratando necessariamente de contato direto com a cunha salina.

A razão rNa/rCl demonstra que a maior parte das amostras coletadas possui uma relação iônica próxima à água marinha. Devido à grande influência dos aerossóis marinhos na água da chuva que incide sobre a área, a água do aquífero termina por assimilar as características da água que recarrega o manancial, ainda que muito diluída.

Foram realizadas amostragens e análises isotópicas em seis pontos da área de estudo, conforme apresentado na Tabela 2. A distribuição dos pontos obedeceu a um critério de abrangência

e representatividade. A camada aquífera mais profunda (Ponto 15 na tabela 2) tem uma assinatura isotópica algo distinta das demais águas analisadas, confirmando seu isolamento e recarga distante, com valores mais depletados em O-18 e H-2.

As amostras estão alinhadas com a Reta Meteórica Mundial (RMM), com muito pouca diferença dos valores desta, indicando a origem meteórica das águas dos aquíferos locais (Figura 11).

A interpretação dos trabalhos anteriores (MUEHE; CORRÉA, 1989), juntamente com a pesquisa atual, indica que o contato do embasamento com os depósitos sedimentares do cordão interior está a uma profundidade menor, da ordem de 10 a 20 m, enquanto o contato do cordão exterior com o embasamento ocorre a aproximadamente entre 50 e 60 metros de profundidade, dependendo do ponto onde ele está localizado. Isso ocasiona um maior tempo de residência no aquífero mais profundo, explicando o comportamento observado na amostra do Ponto 15. Possivelmente há um equilíbrio com condições climáticas pretéritas do sistema, levando ao comportamento diferenciado.

Tabela 2 - Pontos em que foram realizadas análises isotópicas.

| ID | Prof. (m) | Distância ao Mar (km) | Cota (m) | $\delta^{18}\text{O}$ ‰ | $\delta^2\text{H}$ ‰ | Excesso de Deutério |
|----------|-----------|-----------------------|----------|-------------------------|----------------------|---------------------|
| Ponto 1 | 15 | 2,81 | 4,788 | -3,62 | -16,70 | 12,26 |
| Ponto 3 | 25 | 0,67 | | -3,75 | -17,50 | 12,50 |
| Ponto 13 | 15 | 0,63 | 3,144 | -3,82 | -18,40 | 12,16 |
| Ponto 15 | 40 | 0,93 | | -3,97 | -19,50 | 12,26 |
| Ponto 16 | 18 | 0,94 | 7,792 | -3,55 | -15,70 | 12,70 |
| Ponto 26 | - | 0,57 | 10,472 | -3,93 | -18,50 | 12,94 |

Modelo hidrogeológico conceitual

A caracterização hidroestratigráfica de Itaipuaçu foi realizada com a compilação de informações de trabalhos anteriores (ALMEIDA; SILVA JR., 2007; ALVES, 2000), campanhas de campo e coleta de dados estratigráficos, hidrodinâmicos e hidroquímica mais poços e mapeamento. A região costeira do estado do Rio de Janeiro, desde Niterói até cidade de Cabo Frio, tem um sistema lagunar com barreiras arenosas depositadas nas planícies com os limites condicionados pelos monólitos gnáissicos e graníticos, típicos da costa do Rio de Janeiro.

Essa disposição geológica levou ao condicionamento das feições hidrogeológicas observadas na área, bem como a distribuição das características hidroquímicas e isotópicas. Por exemplo, o relativo isolamento hidráulico da camada mais antiga levou a um condicionamento de suas características isotópicas diferenciadas.

Através da informação obtida até a presente data, é possível definir o modelo hidrogeológico e estratigráfico preliminar do aquífero Itaipuaçu como sendo constituído por uma

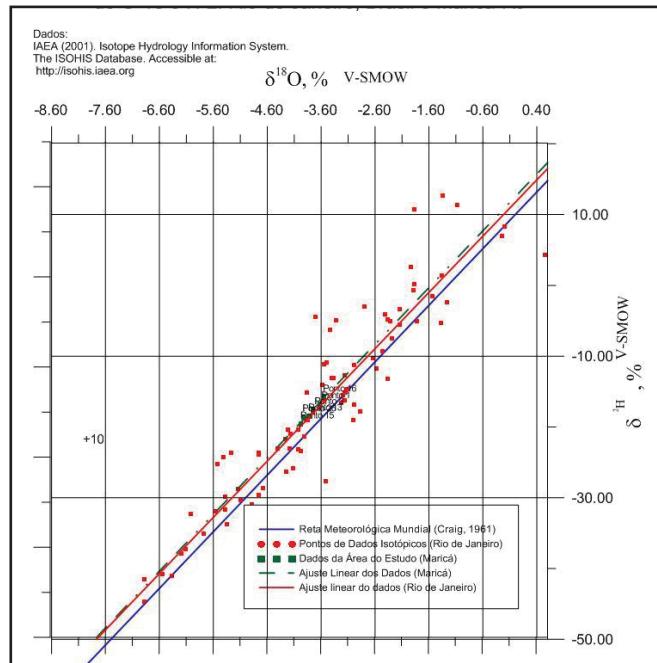


Figura 11 - Gráfico da razão deuterio versus oxigênio-18.

sucessão de areias médias a grossas intercaladas com camadas relativamente delgadas de argila. Assim, foi possível elaborar um modelo no qual dois aquíferos rasos localizados em diferentes níveis, o superior, até uma profundidade de 8 a 15 m, e uma parte inferior, entre 35 e 45 m de profundidade, ambos de água doce (Figura 12). Entre estes dois aquíferos, e sobre o inferior, um corpo de água salobra ocorre, o que torna muito importante uma atenção especial quando se considera a exploração de aquíferos e a proteção dos recursos hídricos.

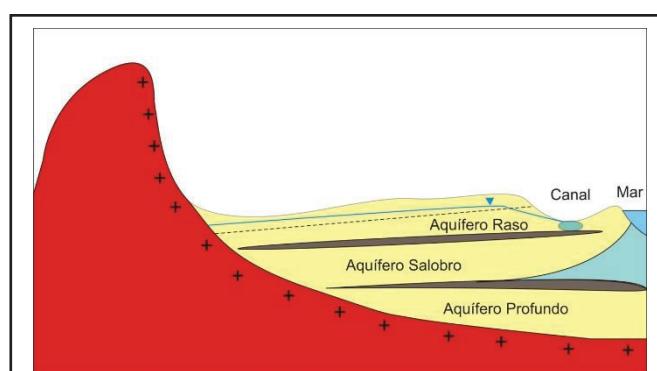


Figura 12 - Seção esquemática do Aquífero Costeiro de Itaipuaçu. A textura em cor azulada representa a água marinha salobra, mais densa.

Modelagem hidrogeoquímica

A modelagem hidrogeoquímica foi realizada com o programa PhreeqCI, versão 3.02, (PARKHURST; APPELO, 2013). Os índices de saturação de minerais prováveis componentes das amostras gerados pelo PhreeqCI permitiram a elaboração de hipóteses sobre o comportamento hidrogeoquímico da área de estudo. Os minerais carbonáticos se encontram subsaturados

em solução, com o Índice de Saturação (IS) variando numa faixa entre -0,16 e -21,85. Cerca de 70% das amostras encontram-se supersaturadas em solução (IS >0) quanto aos minerais goethita e hematita. Os demais minerais de ferro, alumino-silicatos e os outros minerais em geral apresentam-se subsaturados. Tais resultados apontam para um ambiente predominantemente influenciado pela ocorrência de processos pedológicos, como a laterização. Os resultados obtidos no presente estudo se assemelham ao trabalho realizado por Cruz e Silva Jr. (2006) em pesquisa que envolvia toda a Região dos Lagos fluminense.

A partir da ferramenta de modelagem inversa, parte do código *PhreeqCI*, procurou-se verificar uma possível afinidade da água da Lagoa de Maricá com a água do aquífero presente na região, através de uma conexão hidráulica entre esses corpos hídricos. Para isso utilizou-se a mineralogia básica da região, quartzo, k-feldspato, halita, mica potássica, dolomita, hematita, goethita, barita, calcita, pirita, albíta, ácido sulfídrico e clorita, cuja área fonte é representada uma diversidade de granitos e gnaisses constituintes do substrato rochoso.

De uma maneira geral, os resultados apontam para uma forte influência continental e marinha nas águas subterrâneas ou lacustres da baixada de Itaipuáçu. Um exemplo de simulação realizada mostra que uma hipotética evolução da água doce do aquífero, somada ao aporte marinho, seja como mescla direta através do canal, seja pelo aerosol, pode perfeitamente resultar na água da lagoa de Maricá, dentro de uma viabilidade geoquímica plausível. Há, contudo, ajustes na solução, como consequência da mescla, que resultam na dissolução de K-feldspato, hematita, calcita, albíta, clorita e ácido sulfídrico e na precipitação de quartzo, mica potássica, dolomita, goethita e pirita, conforme o modelo resultante mais bem ajustado (com menores erros numéricos).

Realizou-se um exercício de simulação numérica de fluxo de água subterrânea com o programa Visual Modflow versão 4.2, aplicado apenas na camada mais superficial do aquífero costeiro de Itaipuáçu. Os parâmetros hidráulicos obtidos e utilizados na simulação encontram-se na Tabela 3 e foram obtidos do ensaio de bombeamento executado na área de estudo. 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 menor.

Tabela 3 - Parâmetros Hidráulicos utilizados na simulação de fluxo

| | |
|-------------|------------------------------------|
| $K_x = K_y$ | $6,41 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ |
| K_z | $6,41 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ |
| S_s | 0,039 |
| φ | ~0,5 |
| φ_e | 0,468 |

A área modelada é limitada a Oeste pela Serra da Tiririca, a Norte pela Pedra de Itaocaia, a Leste pela Lagoa Brava\ APA de Maricá, e a Sul é limitada pelo canal da Costa. Com base no mapa potenciométrico, foram estabelecidos dois domínios de diferentes comportamentos de fluxo (EGER, 2012). Esses domínios podem ser delimitados pela tendência de fluxo em direção ao mar na porção a Oeste da Pedra de Itaocaia e pela

tendência de drenar em direção ao continente, na porção a Leste.

Na porção central da área foi aplicada uma fronteira do tipo General-Head Boundary (GHB) com carga hidráulica de 4 m em seu trecho Sul, mais elevado. Sobre o canal da Costa foi atribuída uma carga específica de 1 m, compatível com a topografia local (cor violeta na Figura 13, desde o leste da Pedra de Itaocaia passando pela Lagoa Brava até o Canal da Costa). Outra condição de contorno utilizada na simulação observada na Figura 13, estendendo-se de sul e oeste da Pedra de Itaocaia, corresponde à carga hidráulica especificada de 8 m (cor marrom).

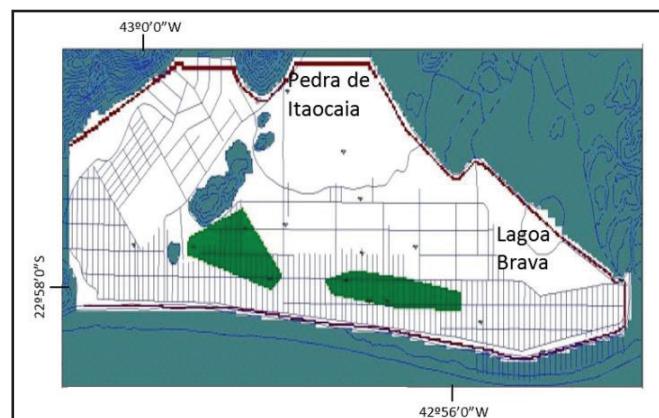


Figura 13 - Mapa das condições de contorno da simulação. Cor verde: limite do tipo GHB; marrom, violeta: condições de contorno de carga constante

No gráfico de valores calculados versus observados, que representa a curva de ajuste final para a simulação (Figura 14), 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%, bastante elevado.

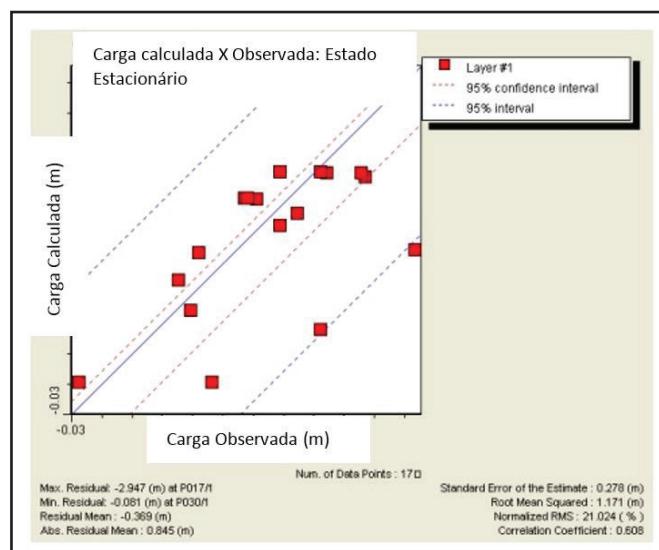


Figura 14 - Gráfico de correlação entre os valores reais de carga hidráulica e aquelas calculadas pela simulação em regime permanente

O balanço hídrico calculado (Figura 15) representou satisfatoriamente as cargas de entrada, as quais foram condizentes com os valores calculados manualmente com base no mapa potenciométrico do modelo conceitual.

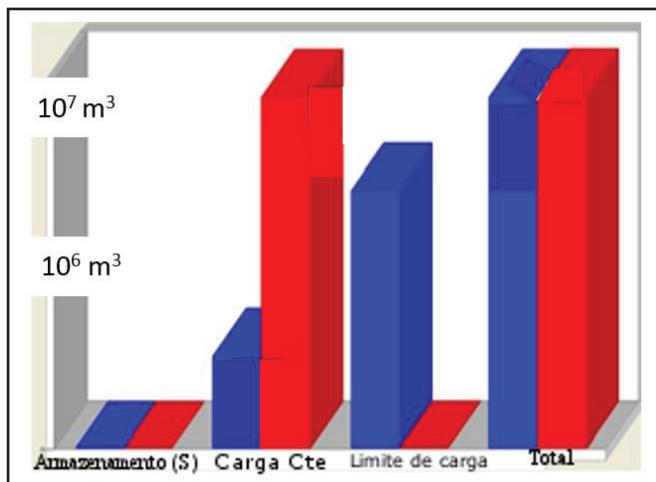


Figura 15 - Gráfico de Balanço de Massa, com as cargas de entrada representadas em azul e as de saída em vermelho

O mapa potenciométrico (Figura 16) resultante da simulação, representa a calibração calculada pelo Visual Modflow a partir das cargas hidráulicas inseridas. Este mapa apresentou bastante similaridade com o mapa elaborado anteriormente apenas com os dados de cargas hidráulicas observadas.

É possível notar na Figura 16 a presença de dois domínios potenciométricos, um que sofre a influência da densidade de maciços rochosos presentes na área e o outro domínio que é caracterizado pela baixada 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 $2.649.229 \text{ m}^3/\text{ano}$ para o mapa do modelo conceitual e $2.664.650 \text{ m}^3/\text{ano}$ para o calculado pelo Visual Modflow com base na carga constante. O balanço de massas calculado pelo programa (Figura 15) 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 cloreto apresentou um valor próximo ($7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$) à média entre

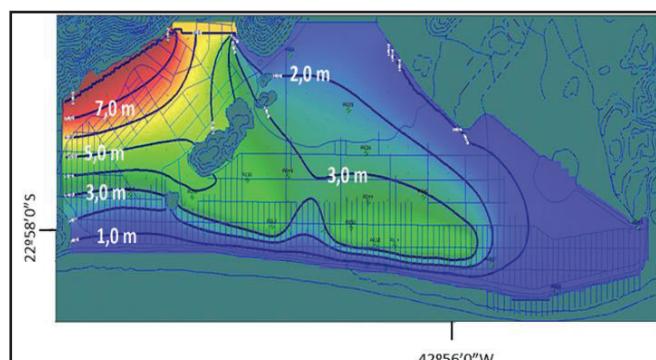


Figura 16 - Mapa Potenciométrico do Aquífero de Itaipuaçu. Cotas em metros sobre o nível médio do mar

esses dois resultados.

Assim, após os cálculos da estimativa de recarga e simulação numérica sugere-se um modelo de funcionamento para o aquífero costeiro de Itaipuaçu em sua camada mais superficial até 15 metros de profundidade. Sabe-se, que está camada aquífera representa apenas uma fração do volume total infiltrado e perdas para o escoamento subsuperficial e para os aquíferos das camadas inferiores, devem ser consideradas, no desenvolvimento e refinamento da modelagem numérica (Figura 17).

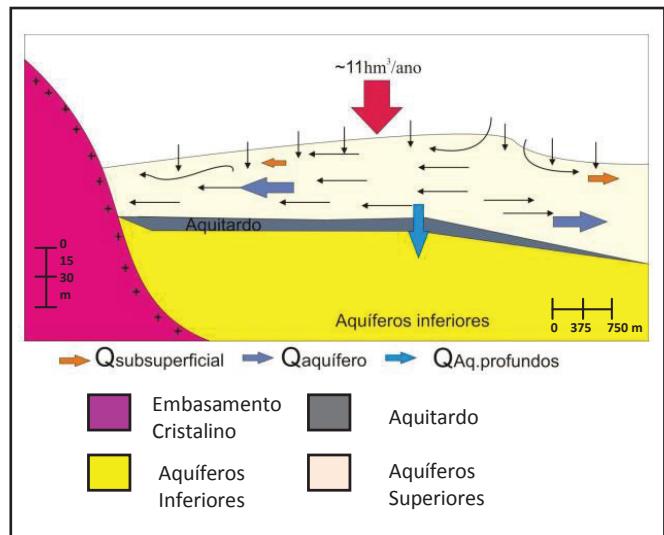


Figura 17 - Seção esquemática considerando as vazões escoadas na camada aquífera mais superficial

CONCLUSÕES

Durante a pesquisa observou-se que grande parte da população de Itaipuaçu se utiliza do aquífero siliciclástico mais superficial, já que a profundidade média dos poços construídos varia entre oito e quinze metros de profundidade. Poucos moradores possuem poços na camada aquífera doce mais profunda, confinada e de maior condutividade elétrica, conforme ilustrado no modelo hidrogeológico conceitual.

A análise dos perfis sedimentológicos, através dos dois piezômetros construídos, colaboraram para, mesmo de maneira pontual, confirmar o que autores que precederam esta pesquisa no estudo da área haviam descrito sobre a deposição sedimentar neste local.

Devido à falta de informações construtivas dos poços na região, ferramentas como análises químicas, isotópicas e modelagem, tanto numérica quanto hidrogeoquímica, tornam-se indispensáveis para o desenvolvimento de uma pesquisa de qualidade, em que se pode confeccionar, testar e aperfeiçoar o modelo conceitual proposto para a área.

Os resultados da simulação com o programa Visual Modflow indicam uma recarga total semelhante à estimada pelo Visual Balan e também pelo balanço hidrometeorológico simplificado.

O mapa potenciométrico, elaborado manualmente a partir das cargas hidráulicas, coincide com o calculado pelo Visual

ModFlow. Foram observados dois domínios potenciométricos, um domínio que sofre a influência em razão da presença dos maciços rochosos da área e o outro domínio caracterizado pela baixada de Itaipuã. Ainda não é muita clara a influência dos corpos rochosos presentes na área. Para o refinamento do modelo, estes corpos devem ser mais bem caracterizados, assim como a alcance da Lagoa Brava na área da baixada.

Os resultados obtidos pelo *PhreeqCI* em relação aos índices de saturação mostram que os minerais de Ferro e Alumínio possuem uma tendência a se precipitarem mais que os minerais carbonatados e sulfatados.

Todos os dados coletados durante esta pesquisa assinalam para a confirmação de que o aquífero costeiro de Itaipuã não apresenta indícios concretos que comprovem a ocorrência de intrusão salina. As camadas de argila e matéria orgânica presentes na extensão da baixada de Itaipuã, do canal da Costa para norte da área, funcionam como uma barreira a salinidade, o que evita que o mar mescle suas águas com as do aquífero ali presente.

O teste de interferência foi de grande valia para a obtenção dos parâmetros hidráulicos do aquífero. Sugere-se a realização deste tipo de teste em outros poços na área para que seja alcançada uma representatividade espacial da anisotropia. Com isso, o aquífero será melhor caracterizado.

Como sugestões a pesquisas futuras, simulações de fluxo com densidade variável, através de ferramentas numéricas apropriadas ao estudo da cunha salina em aquíferos costeiros, podem ser de grande valia para testar modelos conceituais e facilitar a gestão dos aquíferos da área.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo financiamento da presente pesquisa, que faz parte de projeto contemplado pelo edital APQ-1/2010.

REFERÊNCIAS

ALCALÁ, F. J.; CUSTODIO, E. Using the Cl/Br ratio as a tracer to identify the origin of salinity in aquifers in Spain and Portugal. *Journal of Hydrology* v.359, n.1, p.189-207, 2008.

ALMEIDA, G. M. *Estudo do Aquífero Costeiro de Maricá – RJ* Instrumentação e Investigação do Comportamento da Cunha Salina. 2009. 109f. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

ALMEIDA, G. M.; SILVA JR., G. C. 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, n.2, p.104-117, 2007.

ALVES, M. G. Diagnóstico ambiental da Região Oceânica de

Niterói e Distrito de Inoã – Maricá (RJ): uma visão por geoprocessamento e mapeamento geológico-geotécnico. 2000. 175f. Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

BARLOW, P. M.; REICHARD, E. G. Saltwater intrusion in coastal regions of North America. *Hydrogeology Journal* v.18 n.1 p.247-260, 2010.

BOUCHAOU, L.; MICHELOT, J. L.; VENGOSH, A.; HISSOU, Y.; QURTOBI, M.; GAYE, C. B.; BULLEN, T. D.; ZUPPI, G. M. Application of multiple isotopic and geochemical tracers for investigation of recharge, salinisation, and residence time of water in the Souss-Massa aquifer, southwest Morocco. *Journal of Hydrology*; v.352, p.267-87, 2008.

CLARK, D.; FRITZ, P. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Boca Raton, FL. CRC Lewis. 1997. 328 p.

CPRM. *Geologia do Estado do Rio de Janeiro: mapa geológico de Maricá*. In: DA SILVA, L. C.; CUNHA, H. C. S. (Org.). –Brasília: CPRM. 2ª ed. Brasília, 2001 (a).

CPRM. *Geologia do Estado do Rio de Janeiro: texto explicativo do mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro*. In: DA SILVA, L. C.; CUNHA, H. C. S. (Org.). CPRM. 2ª ed. Brasília, 2001 (b).

COSTA, M. T. *Levantamento de Parâmetros Hidrogeológicos para estudo e Modelagem Numérica da Intrusão Marinha em Aquíferos Costeiros da Região Litorânea de Itaipuã, Município de Maricá – RJ*. 2001. Trabalho (Conclusão de Curso) - Faculdade de Geologia – Departamento de Geologia Aplicada, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, 2001.

CRUZ, A.; SILVA JR., G. C. Spatial and temporal hydrochemical behavior of Piratininga coastal aquifer. Niteroi City, Brazil. In: 19th Saltwater Intrusion Meeting, 43 Cagliari, Itália. *Anais...* 19th SWIM. Cagliari: U. Cagliari, 2006. v. 1, p. 12-18, 2006.

EGER, G. Z. S. *Aspectos Hidrodinâmicos, Balanço Hídrico e Simulação de Fluxo no Aquífero Costeiro de Itaipuã, Maricá – RJ*. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Geologia Rio de Janeiro Dezembro. 2012.

ESPINHA MARQUES, J.; SAMPER, J.; PISANI, B. V.; ALVARES, D.; VIEIRA, G. T.; MORA, C.; MARTINS CARVALHO, J.; CHAMINÉ, H. I.; MARQUES, J. M.; SODRÉ BORGES, F. 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 do Laboratório Xeológico de Laxe, A Coruña*, v.31, p.86-106. 2006.

GIMÉNEZ FORCADA, E. Dynamic of seawater interface using hydrochemical facies evolution diagram. *Groundwater*; v.48, p.212-216, 2010.

GUO, W.; LANGEVIN, C. D. User's guide to SEAWAT: a computer program for the simulation of three-dimensional variable-density groundwater flow. USGS Techniques of Water Resources Investigations, Book 6, chap A7. 2002.

HAN, D.; KOHFAHL, C.; SONG, X.; XIAO, G.; YANG, J. Geochemical and isotopic evidence for palaeo-seawater intrusion into the south coast aquifer of Laizhou Bay, China. *Applied Geochemistry*. v.26, n.1, p.863-83, 2011.

LIN, J.; SNODSMITH, J. B.; ZHENG, C.; WU, J. A modeling study of seawater intrusion in Alabama Gulf Coast, USA. *Environmental Geology*. v.57, n.1 p.119–130, 2009.

LOGAN, J. *Interpretação de Análises Químicas da Água*. Recife: U.S. Agency for International Development. 1965. 67p.

MCDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*. U.S. Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations, Book 6, chap A1, 1988. 588p.

MUEHE, D.; CORRÊA, C. H. T. Dinâmica de Praia e Transporte de Sedimentos Ao Longo da Restinga da Massambaba. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 19, n.3, p. 387-392, 1989.

MUEHE, D.; VALENTINI, E. *O litoral do Rio de Janeiro: uma caracterização físico-ambiental*. FEMAR, 1998, 123p.

NEUMAN, S. P. 1975. Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response. *Water Resources Research*, v.11, n.2, p.329-342, 1975.

PARKHURST, D. L.; APPELO, C. A. J. Description of input and examples for PHREEQC version 3—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. *U.S. Geological Survey Techniques and Methods*. v.6, n.43, p.497, 2013.

SAMPER, J.; LLORENÇ, H.; ARÉS, J.; GARCÍA, M. A. *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, La Coruña, Spain. 132p. 1999.

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

SILVA JR., G. C.; CRISTO, V. N. do. *Modelagem Hidrogeoquímica do Aquífero Costeiro de Itaipuaçu*. Relatório do projeto FAPERJ APQ-1. 2012.

STUYFZAND, P. J. Patterns in groundwater chemistry resulting from groundwater flow. *Hydrogeology Journal* v.7, p.1, p.15–27, 1999.

TAPIA, A. P. *Hydrogeological Characterization in the Barra of Maricá*,

RJ, Brazil. 2009. Dissertação (Mestrado) - Vrije Universiteit. Amsterdam, 2009.

VANDENBOHEDE, A.; LEBBE, L. Groundwater chemistry patterns in the phreatic aquifer of the central Belgian coastal plain. *Applied geochemistry*. v.27, n.1, p.22-36, 2012.

VÁZQUEZ-SUÑÉ, E.; CASTRO, A. EASY-BAL (Spreadsheet). Hydrogeology Group, UPC-CSIC, Barcelona 2002.

WANG, Y.; JIAO, J. J. Origin of groundwater salinity and hydrogeochemical processes in the confined Quaternary aquifer of the Pearl River Delta, China. *Journal of Hydrology*. v.438–439, p.112–124, 2012.

Contribuição dos autores:

Vinicius do Nascimento Cristo: Autor principal da pesquisa, cujo desenvolvimento levou à obtenção do grau de Mestre em Geologia (Hidrogeologia) pelo Instituto de Geociências da UFRJ. O artigo é o principal resultado científico de sua pesquisa de Mestrado.

Gerson Cardoso da Silva Jr.: orientou a pesquisa de Mestrado e consequentemente participou da elaboração dos resultados que levaram à publicação do artigo em questão.

Glauco Zely da Silva Eger: participou no levantamento de dados de campo e processamento e elaborações do material em laboratório, naquele momento, como aluno de graduação e bolsista de Iniciação Científica;

Patrícia Martha Silveira: participou no levantamento de dados de campo e processamento e elaborações do material em laboratório, naquele momento, como aluno de graduação e bolsista de Iniciação Científica.

Juliana Magalhães Menezes: co-orientou a pesquisa de Mestrado e participou da elaboração dos resultados que levaram à publicação do artigo em questão.