

UTILIZAÇÃO DE SONDAS MULTIPARAMÉTRICAS PARA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA MARÉ EM AQUIFERO ALUVIONAR COSTEIRO

Mancuso, M.A. ^{1}; Carol, E. ²; Kruse, E. ³; Schroeder, J.K. ⁴;*

Resumo – O objetivo deste estudo foi avaliar a influência das marés no aquífero aluvionar a partir da análise de mudanças nos níveis freáticos e do perfil de Condutividade Elétrica das águas subterrâneas. A área de estudo é a zona costeira do bairro de Alcântara, Lisboa, Portugal. O aquífero aluvionar, de porosidade granular, consiste principalmente de areias médias a finas, seixos e fragmentos de rochas. Foi analisada a propagação da onda de maré no aquífero a partir de medições nível de água subterrânea e Condutividade Elétrica, realizadas a cada 5 minutos na coluna de água de três piezômetros alinhados perpendicularmente à linha de costa do rio Tejo. A estratificação e aumento da condutividade elétrica da água na maré alta, assim como o aumento das concentrações de sulfatos e cloretos em direção à costa são indicativos da propagação da onda de maré no aquífero costeiro, que atinge pelo menos 150 m, a partir da linha de costa. Observa-se que a maré provoca inversões de fluxo aquífero-Rio Tejo e Rio Tejo-aquífero que modificam a geoquímica do sistema, principalmente na sua zona intermediária e superficial. As zonas mais profundas do aquífero, apesar de apresentarem maior salinidade, se caracterizam pelo equilíbrio nas características hidrogeoquímicas estudadas.

Palavras-Chave – Aquífero aluvionar, Rio Tejo, maré.

ANALYSIS OF TIDAL INFLUENCE IN ALLUVIAL COASTAL AQUIFER USING MULTIPARAMETRIC PROBE

Abstract – The aim of this study was to evaluate the influence of the tides in the alluvial aquifer analyzing changes in groundwater levels and profile of Electrical Conductivity in the aquifer. The study area is the coastal area of the Alcântara district, in Lisbon, Portugal. The alluvial aquifer of granular porosity consists mainly on medium to fine sand, pebbles and rock fragments. Was analyzed the propagation of the tidal wave in the aquifer from groundwater level Electrical Conductivity measurements, conducted every five minutes by a probe located in the water column. Three piezometers aligned perpendicular to the shoreline of the river Tagus were used on this study. Stratification and increased on electrical conductivity during high tides, as well as increased concentrations of sulfates and chlorides towards the coast were indicative of tidal wave propagation in the coastal aquifer. This was observed at least at 150 m from the shoreline. The study showed flow reversals from aquifer-River Tagus to River Tagus-aquifer due the tide influence. Also were observed modification on the geochemistry of the system, mainly in the middle and shallow zone. The deeper part of the aquifer, despite showing higher CE, was stable on the studied hydrogeochemical behavior.

Keywords – Alluvial aquifer, Tagus River, tidal

^{1*} Universidade Federal de Santa Maria – UFSM/FW – Brasil - malvamancuso@ufsm.br

² CONICET - Facultad de Ciencias Naturales y Museo (UNLP) – Argentina - eleocarol@yahoo.com.ar

³ CONICET - Facultad de Ciencias Naturales y Museo (UNLP) – Argentina - kruse@fcnym.unlp.edu.ar

⁴ Universidade Federal de Santa Maria – UFSM/FW – Brasil - josi_ambiental@hotmail.com

INTRODUÇÃO

A complexidade das questões costeiras tem aumentado nas últimas décadas, como resultado do impacto de atividades humanas e usos. Estima-se que 80% da população mundial reside a distância de até 100 km da costa e essa tendência está aumentando. Isso implica na instalação de milhões de pessoas que precisam de espaço construído e insumos para habitação, trabalho e recreação, materiais, alimentos, água potável, etc. Portanto, o desafio do nosso tempo é, sem dúvida, o desenvolvimento tecnológico, científico, econômico e jurídico específico para abordar com sucesso as necessidades que essas mudanças representam.

A cidade de Lisboa, situada na foz do rio Tejo é a capital e maior cidade de Portugal. A população da cidade está em torno dos 548 mil habitantes (Censo 2011, INPE, 2013) e o crescimento populacional faz com que aumente por espaços alternativos para construção, dentre eles, o espaço subterrâneo. A compreensão da dinâmica dos aquíferos nestas zonas de maior demanda por espaço poderá subsidiar o planejamento da sua ocupação. A zona costeira do bairro de Alcântara, freguesia da cidade de Lisboa, é o foco deste estudo.

Residem em Alcântara 14 mil habitantes, em aproximadamente 4,39 km² (Censo 2011, INPE, 2013). A freguesia está localizada em sedimentos aluvionares, depositados pelo Rio Tejo e pelo Caneiro de Alcântara. Este meio compõe o aquífero livre, com espessura saturada de até 40 m. O aquífero aluvionar é limitado em sua base pelo Complexo Vulcânico de Lisboa (basaltos) e, parcialmente a N, por Calcários compactos e Calcários apinhoados (Almeida, 1985) (Figura 1).

O aquífero, de porosidade granular, apresenta estratificação vertical, consistindo principalmente por areias médias a finas, por vezes com pequenos seixos, fragmentos de rochas, níveis areno-argilosos e argilo-arenosos. Também se observam níveis de argilas lodosas intercaladas, principalmente nas proximidades do rio Tejo e o Caneiro de Alcântara, canalizado em subsuperfície (Mancuso *et al.*, 2008, 2009, 2010). Os níveis das águas do aquífero costeiro são influenciados pelo efeito de propagação de ondas de maré, que atingem as águas de superfície do Rio Tejo (Mancuso *et al.*, 2011a, 2011b).

O objetivo deste estudo é avaliar a influência das marés no aquífero aluvionar a partir da análise de mudanças nos níveis freáticos e da condutividade elétrica das águas subterrâneas que ocorrem no perfil do aquífero. A área não apresenta, atualmente, interesse na exploração de águas para consumo humano, entretanto, a dinâmica da interface águas subterrâneas – águas superficiais são atualmente de interesse para o planejamento de intervenções de engenharia no meio subterrâneo (construção para habitação e transporte, impacto em materiais, aproveitamento geotermal de baixa entalpia, etc.).

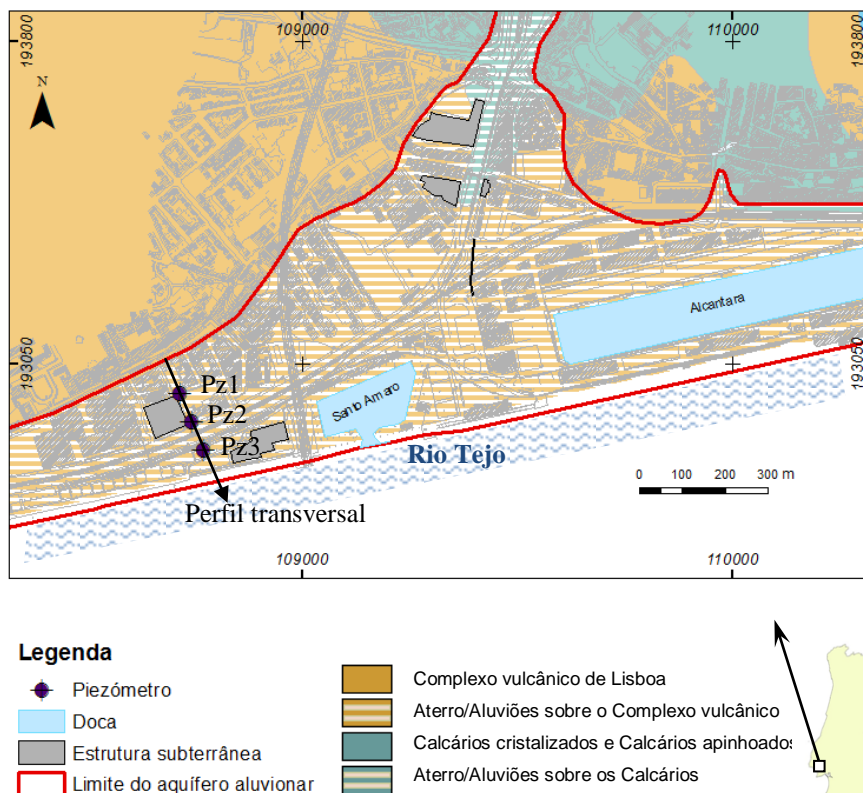


Figura 1: Mapa geológico da zona de Alcântara (Almeida, 1985), com destaque do aquífero aluvionar e localização do perfil transversal estudado

METODOLOGIA

Foi analisada a propagação da onda de maré no aquífero costeiro de Alcântara (cidade de Lisboa) a partir de medições de Nível de Água (N.A.) e Condutividade Elétrica (CE) da água subterrânea, no perfil vertical do aquífero, ao longo de um trecho perpendicular à linha de costa (Figura 1).

As medições de pressão de coluna de água, pressão atmosférica (para cálculo de N.A.) e CE, foram obtidas mediante a utilização de sensores de medição contínua (com medições a cada 5 min), modelo Leveloggers Junior LTC (transdutor de pressão) e Barologger (medidor de pressão absoluta) da Solinst. Foram coletados dados em 3 piezômetros (P1, P2 e P3), instalados com filtro ao longo de toda a coluna saturada e localizados em perfil perpendicular ao Rio Tejo (Figura 1). A profundidade de medição de N.A. e CE na coluna de água dos piezômetros, foi definida em função da espessura saturada do aquífero aluvionar e condicionadas a medições simultâneas na base do sistema, na seção intermediária e próximo ao nível freático do aquífero (Tabela 1). No piezômetro P1 foi instalado um único sensor, em função da espessura do aquífero, no P2 e no P3 foram instalados três sensores simultaneamente. Os dados do P3 foram complementados com dados coletados por um quarto sensor.

No mesmo período, foi monitorado o nível de água do rio Tejo, próximo aos piezômetros, a fim de avaliar a resposta do aquífero em função das oscilações de marés, e realizadas análises pontuais de concentrações médias de sulfatos e cloretos para auxiliar na interpretação da influência da maré no sistema.

Tabela 1. Profundidade de instalação dos sensores nos piezômetros em aquífero aluvionar

Piezômetro	Coord. M (m)	Coord. P (m)	Cota Altimétrica (m)	Posição do sensor (Profundidade) (m)	Espessura do Aquífero (m)
P1	108716	192980	4,58	4,3	6,10
P2	108743	192914	3,87	4,4 7,6 10,7	11,75
P3	108768	192845	4,20	5,4 6,0 8,6 11,8	12,60

¹Medições realizadas em 2009

RESULTADOS

Na seção estudada foram considerados os dados de três piezômetros localizados no setor oeste da cidade, entre duas estruturas subterrâneas de grande escala (Figura 1). Neste setor, o aquífero aluvionar tem uma espessura de 6,1 m no furo mais distante da costa (P1) e 12,6 m nas proximidades do rio Tejo (P3) (Tabela 1).

As oscilações dos níveis de maré que ocorreram no período analisado indicaram variações de nível entre -1,60 m e 1,55 m de altitude em relação ao nível médio do mar (0 m).

Registros níveis de água subterrânea e de condutividade elétrica da água subterrânea no piezômetro mais distante da costa (P1) mostram que existem variações desses parâmetros de acordo com a maré (Figura 2). O N.A. manteve valores próximos a 0,60 m de altitude e a condutividade elétrica das águas subterrâneas manteve valores próximos de 1,50 mS/cm (Figura 2). As águas do P1 apresentaram concentrações médias de 930 mg/L de cloretos e 200 mg/L de sulfatos.

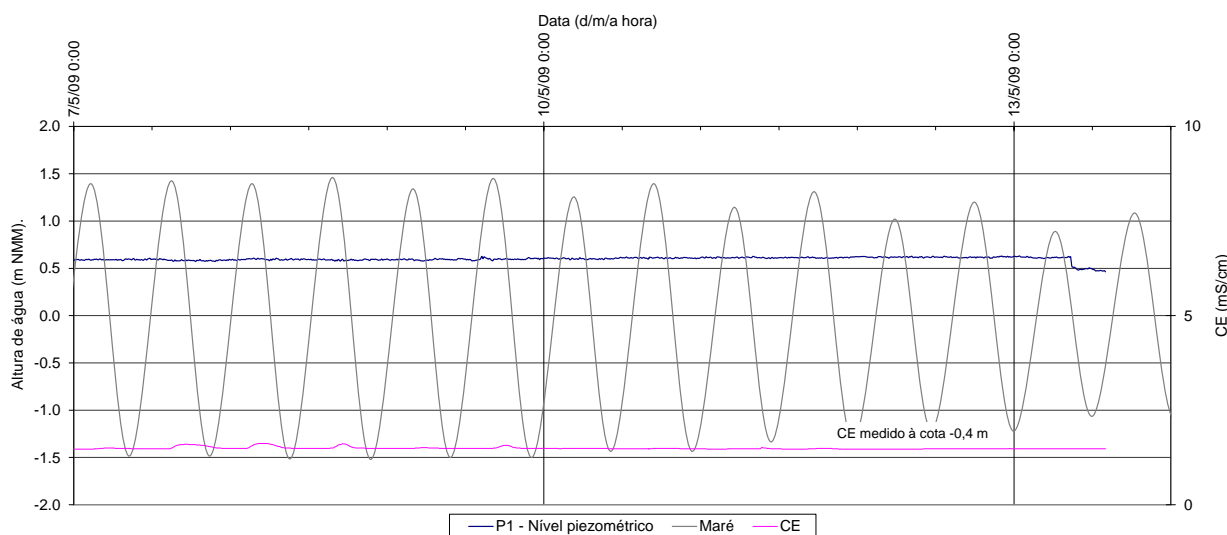


Figura 2. Variação do nível de água subterrânea e da condutividade elétrica observadas no P1 e variação do nível de maré do rio Tejo

No piezômetro P2 as oscilações das marés produziram uma ligeira modificação nos níveis de águas subterrâneas e de condutividade elétrica da água (Figura 3). Na maré baixa o lençol freático oscila entre 0,55 e 0,60 m s.n.m., com elevação ao início da maré alta. Preamar entre 0,90 e 1,48 m s.n.m. ocasionam elevações no N.A. de 0,1 e 0,2 m, respectivamente. Foi registrada estratificação salina na coluna de águas subterrâneas, com valores médios de 11 mS/cm na parte inferior do piezômetro e de 1,5 mS/cm próximo à superfície. Foram observadas concentrações médias de 1700 mg/L de cloretos e de 260 mg/L de sulfatos. Durante a preamar a condutividade elétrica da água tende a aumentar na região intermediária e superior do aquífero (registros correspondentes a -3,7 e 0,5 m s.n.m.), mantendo-se constante na região mais profunda (a -6,8 m s.n.m.) (Figura 3). Por exemplo, na maré alta que ocorreu em 13/05/09, que atingiu o nível de 1,10 m s.n.m., o lençol freático elevou 0,20 m e a condutividade elétrica da água aumentou de 1,7 mS/cm para 4,0 mS/cm, a -3,7 m s.n.m. e de 1,5 mS/cm para 1,7 mS/cm, a -0,50 m s.n.m.

Observa-se, na análise do piezômetro P2 (Figura 3), que os picos de elevação de nível freático ocorrem antes do pico de elevação de preamar do Rio Tejo, enquanto que os registros mais elevados de condutividade elétrica ocorrem com retardo em relação ao pico de preamar do rio.

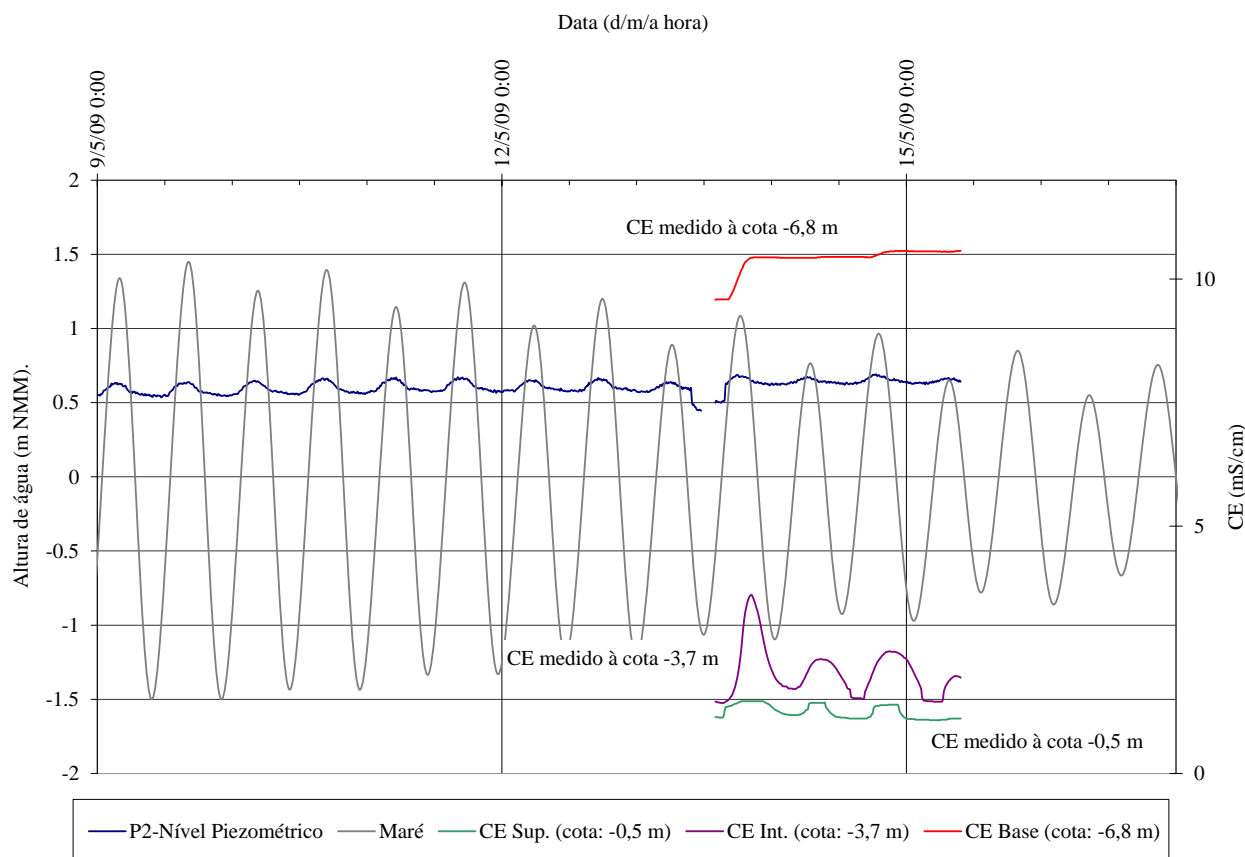


Figura 3. Variação do nível de água subterrânea e da condutividade elétrica observadas no P2 e variação do nível de maré do rio Tejo

O aquífero nas proximidades da linha de costa (P3) apresenta um comportamento semelhante ao observado no P2, mas com amplitudes maiores na oscilação do N.A. e maiores concentrações de sulfatos (600 mg/L) e cloretos (3500 mg/L). Na baixa-mar, o nível freático está próximo dos 0,2 m s.n.m., após a mínima, inicia a sua elevação atingindo o pico de máximo de N.A. antes do pico de preamar do Rio Tejo (Figura 4).

As oscilações do nível das águas do Rio Tejo, entre -1,40 e 1,30 m s.n.m., provocaram oscilações de nível nas águas subterrâneas da ordem 0,50 m (observado no piezômetro P3). As águas do aquífero apresentam estratificação salina, com valores médios de 17 mS/cm na base do aquífero e de 8 mS/cm na zona superficial. Durante a maré alta, a condutividade elétrica das águas subterrâneas nas proximidades da superfície tende a aumentar (registros correspondentes a -1,2, -4,4 e -6,0 m s.n.m.), enquanto em profundidade são mantidas constantes (-7,5 m s.n.m.). Por exemplo, no mesmo período de maré alta analisado para o P2, o nível freático se eleva 0,45 m em relação à baixa-mar e a condutividade elétrica aumenta de 12,50 mS/cm para 14,00 mS/cm a -4,4 m s.n.m. e de 8,90 mS/cm para 10,50 mS/cm a -1,20 m s.n.m.

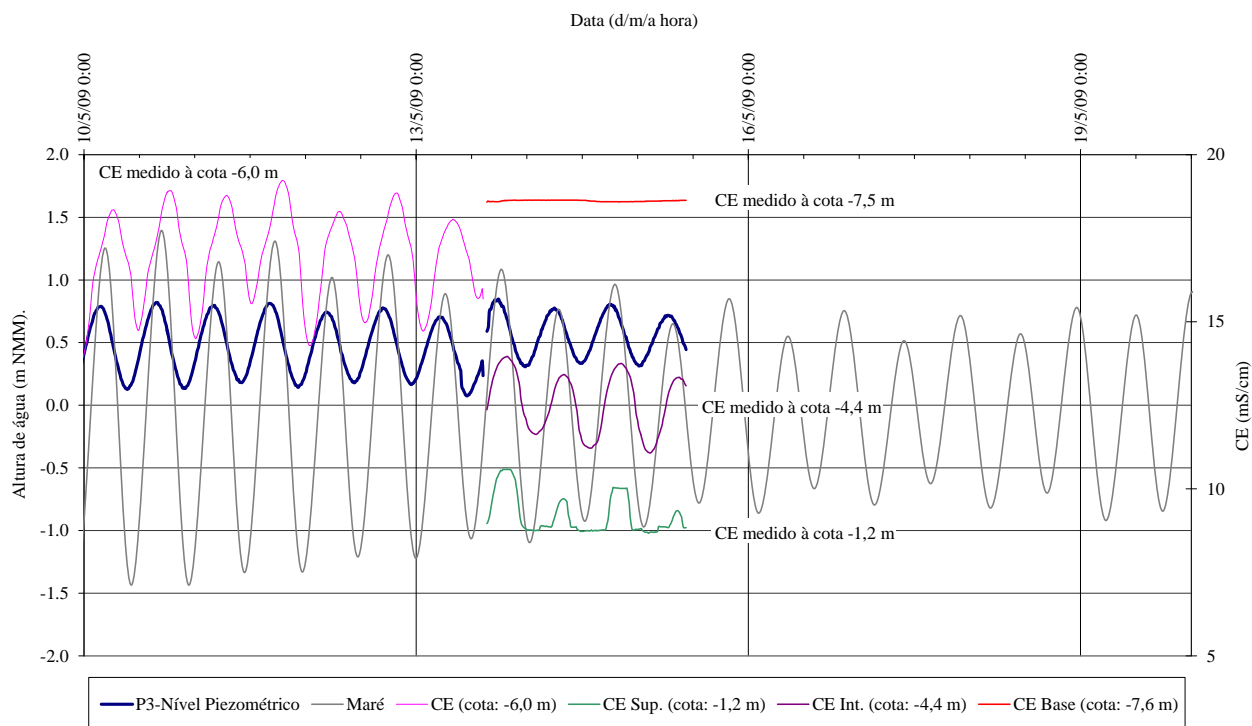


Figura 4. Variação do nível de água subterrânea e da condutividade elétrica observadas no P3 e variação do nível de maré do rio Tejo

DISCUSSÃO

A análise dos três poços em conjunto mostra que a propagação da onda atinge pelo menos 150 m, a partir da linha de costa, produzindo variações nos níveis de água subterrânea, cuja amplitude diminui com o aumento da distância em relação ao Rio Tejo. A estratificação e aumento da condutividade elétrica da água na maré alta, assim como o aumento das concentrações de sulfatos e cloretos em direção à costa são indicativos da propagação da onda de maré no aquífero costeiro. No entanto, o aumento dos níveis das águas subterrâneas está associado a dois processos. No início da preamar, a elevação do nível de água do Rio Tejo impede a descarga das águas subterrâneas do aquífero no Rio Tejo, provoca o acúmulo de água subterrânea e consequente elevação dos níveis no meio poroso. Com a contínua elevação dos níveis de água do rio, ocorre a inversão temporária do fluxo no sentido Rio Tejo-aquífero. Esta situação mantém a elevação dos níveis freáticos incorporando a elevação da salinidade do meio (aumento da condutividade elétrica). Estes dois processos são evidentes na relação entre os picos de maré alta no nível do rio e a condutividade do aquífero, ocorrendo picos de nível do lençol freático antes do pico de maré no rio e pico de concentração da condutividade elétrica na água com tempo de retardamento em relação aos níveis máximos de água do rio.

CONCLUSÕES

A análise dos dados e níveis de condutividade elétrica das águas subterrâneas em diferentes profundidades, dependentes da oscilação das marés do Rio Tejo, permitiu compreender a dinâmica da relação rio-aquífero na zona costeira de Alcântara e a sua dependência direta com a maré. A influência da maré no aquífero diminui em direção as áreas de afloramento do basalto, com a distância da linha de costa. As zonas de variação hidrodinâmica e hidroquímica apresentam

principal interesse em função do impacto que as características do meio possam ocasionar aos materiais e estruturas subterrâneas. O estudo também permite concluir que as zonas mais profundas do aquífero, apesar de apresentarem maior salinidade, se caracterizam pelo equilíbrio nas características hidrogeoquímicas estudadas. O aprofundamento e extensão do estudo a toda a área do aquífero aluvionar de Alcântara permitirá definir as zonas sujeitas à oscilação de níveis de água e de variação cíclica de salinidade, de forma a subsidiar a seleção de materiais adequados à construção subterrânea no aquífero costeiro de Alcântara.

AGRADECIMENTOS

À REFER (os dados e elementos aqui apresentados foram colhidos no âmbito de trabalhos desenvolvidos pelo LNEC para a REFER, sendo de propriedade da mesma).

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC (Lisboa, Portugal), pela possibilidade de desenvolver atividades de pós-doutorado sobre o tema dos impactos hidrogeológicos de obras de engenharia.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F.M. (1985). *Carta Geológica do Concelho de Lisboa. Direção Geral de Geologia de Minas. Serviço Geológico de Portugal*. Gravado e Composta em Geocart. Serviço Cartográfico do Exército. Escala 1:10000.

IPE. Instituto Nacional de Estatística. Statistics Portugal. Censos 2011. Meio digital. Acesso em 2013. <http://censos.ine.pt>.

MANCUSO M.A.; KRUSE E.; DELUCHI, M. (2010). A utilização de modelação numérica hidrogeológica como instrumento de apoio no planeamento da ocupação do espaço urbano subterrâneo. In *Anais do Encontro Nacional sobre o Espaço Subterrâneo e a sua Utilização*. LNEC. Comissão Portuguesa de Túneis (CPT), Sociedade Portuguesa de Geotecnia (SPG). Lisboa, Portugal. ART025.8 p.

MANCUSO M. A.; FERREIRA, J.P.C.L.; OLIVEIRA, M.M.; NOVO M. E.; HENRIQUES M.J. (2008). Modelo matemático do escoamento Subterrâneo no vale de Alcântara. Relatório Sectorial da Fase 1: Águas Subterrâneas. Relatório LNEC 378/2008 – NAS. Lisboa, Portugal. 59 p.

MANCUSO M.A.; NOVO M.E.; FERREIRA, J.P.C.L.; (2009). Modelo matemático do escoamento Subterrâneo no vale de Alcântara. 1.º Relatório Sectorial da Fase 2: Águas Subterrâneas. Relatório LNEC 229/2009 – NAS. Lisboa, Portugal. 47 p.

MANCUSO, M.A.; DELUCHI, M.; KRUSE, E. (2011a). Condiciones hidrogeológicas de un aquífero aluvial costero en una zona urbanizada con ocupación del espacio subterrâneo: Alcântara, Lisboa, Portugal. In *Anais do VII Congreso Argentino de Hidrogeologia. V Seminário Hispano Latinoamericano sobre Temas Actuales de la Hidrologia Subterrânea. Captación y Modelación*. Org. Asociación Internacional de hidrogeólogos – Grupo Argentina. AIH/IAH. Octubre 2011. Salta, Argentina. 7p.

MANCUSO M.A.; KRUSE E.; DELUCHI, M.; JORGE, C.; GONÇALVES, A. (2011b). Potential impact of groundwater salinity stratification on concrete and metal of a tunnel to be build under a coastal urban aquifer, Portugal. In *Anais do 13th AFTES International Congress. Association Française des Tunnels et de L'Espace Souterrain*. 17 a 19 de Outubro de 2011. 8p.

RODRIGUES, F. (2010). Identificação de Infra-estruturas presentes no subsolo. In *Anais do Encontro Nacional sobre o Espaço Subterrâneo e a sua Utilização*. LNEC. Comissão Portuguesa de Túneis (CPT), Sociedade Portuguesa de Geotecnia (SPG). Lisbon, Portugal. ART027. 8 p.