

O COMPORTAMENTO HIDROQUÍMICO E HIDRODINÂMICO DE AQÜÍFERO SOB INFLUÊNCIA DO EFEITO-MARÉ

Carlos Eduardo Braga¹; Ingrid de Carvalho Lage¹; Gerson Cardoso da Silva Junior¹; Anderson
Ferreira Damasceno de Freitas² & Elisa de Souza Bento²

Resumo - As flutuações de maré podem ser fenômenos de grande importância hidrogeológica em ambientes costeiros. A interação dos aquíferos com corpos hídricos superficiais sujeitos a oscilação de marés gera variações nos níveis d'água nos aquíferos, além de alterações de ordem química na composição das águas subterrâneas. O presente estudo procura caracterizar esta influência em uma área de manguezal ao redor da Baía de Guanabara, localizada no interior de uma indústria petroquímica (PETROFLEX S.A.) em Duque de Caxias, estado do Rio de Janeiro. Foram realizadas medições de níveis piezométricos, condutividade elétrica e ensaios de condutividade hidráulica (*slug tests*) em três poços de monitoramento e no canal artificial adjacente à área industrial. Como resultado, observou-se que as variações hidroquímicas não são significativas quando cotejadas com as oscilações de maré. Utilizando formulações que simulam a oscilação dos níveis piezométricos em aquíferos em função da maré, obteve-se uma boa estimativa dos parâmetros hidráulicos do aquífero, que mostrou valores consistentes com a obtida por meio de ensaios *in situ*. Esta metodologia possibilitou determinar o comportamento hidráulico do aquífero e classificá-lo como semi-confinado a confinado.

Abstract - Tidal fluctuations may be a significant component in the functioning of coastal aquifers. The interaction between aquifers and surface water bodies under tidal influence produces changes in groundwater levels and in chemical composition. The present paper aims the characterization of those influences on a mangrove ecosystem around Guanabara Bay, in the petrochemical complex of Duque de Caxias, Rio de Janeiro State, Brazil. Piezometric levels and electric conductivity measurements were taken in addition to slug tests in three piezometers and in the artificial canal adjacent to the industrial area. As a result, hydrochemical characteristics lack significant variations as compared to tidal fluctuations. Using equations to estimate aquifer properties from tidal fluctuation in piezometric levels, a good estimation of aquifer properties was obtained, which was consistent with *in situ* field tests. The methodology presented here has allowed the determination of the hydraulic behavior of the aquifer, classified as confined to semi confined.

¹ UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro: Av. Brigadeiro Trompowsky, s/n, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro – RJ.

² UERJ – Universidade do Estado do Rio de Janeiro: R. São Francisco Xavier, n, Maracanã, Rio de Janeiro – RJ

Palavras-chave: Aquífero costeiro; Intrusão salina; Influência de maré.

INTRODUÇÃO

As interações hidrodinâmicas e hidroquímicas entre águas subterrâneas e a água do mar vêm sendo objeto de estudos hidrogeológicos pelo menos desde a década de 1950. Na maior parte das áreas costeiras, a água subterrânea proveniente do continente e a água do mar apresentam um equilíbrio característico que, dentre outros efeitos, provoca oscilações no nível d'água dos sistemas aquíferos em função das variações no nível do mar e a formação de cunhas salinas ao longo da interface água doce - água salgada. As variações do nível do mar, que repercutem nos aquíferos costeiros, se dão devido às marés oceânicas ou marés astronômicas, causadas pelo efeito das forças gravitacionais que o Sol e a Lua exercem sobre a Terra. Existem alguns outros tipos de causas de oscilações dos níveis de água subterrânea e da interface entre águas doces e salgadas, dentre estes as marés meteorológicas, originadas por variações na pressão atmosférica, devido à aproximação de sistemas frontais. Estas têm caráter totalmente aleatório, dificultando o estudo de sua influência na interação hidrodinâmica entre águas subterrâneas e água do mar. Vibrações, variações de temperatura, recarga ao aquífero e outros fatores também podem provocar oscilações do nível d'água e prejudicar a interpretação do fenômeno (Custodio e Llamas, 1983).

O alcance da zona de influência marinha nos aquíferos está condicionado a alguns fatores como a condutividade hidráulica destes e a amplitude local de oscilação das marés. Desta forma, o comportamento da cunha salina e a dimensão da área afetada mostram grande variação entre diferentes locais, fazendo-se necessários estudos específicos para cada sítio. O meio poroso funciona como atenuante das oscilações de maré fazendo com que sua influência seja minimizada com o aumento da distância ao corpo hídrico superficial (o oceano, baía ou braço de mar). Aquíferos livres sofrem grande atenuação e oscilações significativas são improváveis a partir de 30 metros de distância do corpo hídrico superficial. Já os aquíferos confinados tendem a apresentar baixa atenuação, e flutuações no nível potenciométrico podem ser observadas a centenas de metros a partir do corpo hídrico superficial (Jiao e Tang, 1999).

Este trabalho apresenta os resultados da investigação hidrogeológica realizada em uma área industrial localizada num ecossistema de manguezal remanescente da Baía de Guanabara, na cidade de Duque de Caxias, Rio de Janeiro, Brasil (Figura 1).

Neste estudo, medições da carga hidráulica em três sondagens situadas em locais distintos em relação à posição do corpo hídrico superficial – neste caso um canal artificial muito próximo à Baía de Guanabara - foram realizadas, além do acompanhamento das oscilações de maré e de ensaios de permeabilidade. Adicionalmente, análises de condutividade elétrica foram levadas a cabo nos três pontos e no corpo superficial para se caracterizar a movimentação da cunha salina.



Figura 1 – Localização da área de estudo nos limites do ecossistema de manguezal da borda noroeste da Baía de Guanabara, Estado do Rio de Janeiro.

O objetivo principal do trabalho é identificar de que forma as oscilações de maré, que ocorrem no canal artificial adjacente à área estudada, influenciam o comportamento hidroquímico e hidrodinâmico das águas subterrâneas. Através dos resultados pôde-se inferir algumas características de funcionamento do sistema hídrico subterrâneo.

DESCRIÇÃO DA ÁREA

A área estudada localiza-se no interior de uma indústria petroquímica situada no Pólo Petroquímico de Duque de Caxias, a PETROFLEX S.A., situada na borda noroeste da Baía de Guanabara, em um de seus poucos ecossistemas de manguezal remanescentes.

Por sua grande importância ambiental, o ecossistema de manguezal passou a ser parte de um grande programa de caracterização e monitoramento realizado pela referida empresa em parceria com universidades, organizações não-governamentais e com o órgão de fiscalização ambiental do estado do Rio de Janeiro (Feema). Desta forma seria possível identificar e quantificar os impactos ambientais advindos da operação da empresa ao longo de aproximadamente 40 anos de atividade.

A complexa configuração estratigráfica da área estudada tem sua origem explicada na formação da Baía de Guanabara. Segundo Amador (1997), desde os primeiros rasgos estruturais promovidos no Pré-Cambriano até a atual tendência de elevação do nível do mar, a região da baía

vem se ajustando a lentas modificações ambientais do planeta. O sistema de drenagem atual da Baía de Guanabara só começou a se instalar no último período interglacial através da captura de canais fluviais que se dirigiam para a Baía de Sepetiba. O afogamento de uma bacia fluvial pleistocênica, no evento chamado *transgressão guanabarina* (Amador, 1980), originou a atual Baía de Guanabara, que teve seus detalhes de esculpimento relacionados a eventos de oscilação climática e de variação relativa do nível do mar que ocorreram durante o Holoceno.

Desse modo explica-se a intensa interdigitação de camadas argilosas e arenosas, com a predominância do caráter argiloso em todo o perfil, salvo em regiões onde ocorrem paleocanais arenosos, que configuram camadas não muito espessas e sem muita continuidade lateral.

De um modo geral, a área de estudo está localizada sobre depósitos quaternários predominantemente argilosos de origem marinha e flúvio-marinha, sobrepostos ao embasamento cristalino e seu solo residual (Braga, 2000). O solo residual apresenta espessuras ínfimas nas proximidades da porção aflorante do embasamento e da ordem de 20 metros na medida em que se caminha em direção à Baía de Guanabara, onde a sedimentação é mais espessa.

Sobreposto ao solo residual, ocorre uma sucessão de pacotes silto-argilosos ou argilo-siltosos com espessuras variando de 10 a 15 m. Nestes pacotes ocorrem os paleocanais acima descritos, correspondentes às porções mais arenosas.

Uma camada de argila orgânica marinha está presente em toda a área, sobreposta aos pacotes silto-argilosos. Sua espessura varia de 2 a 15 metros e frequentemente apresenta porções turfosas em sua parte superior. Na ocasião da instalação do pólo petroquímico, esta camada foi aterrada por aproximadamente 3 metros de solo silto-argiloso compactado, compondo assim a seção estratigráfica da área (Figura 2).

O nível d'água subterrânea, antes aflorante na maior parte da área, foi recoberto por este aterro, fato comprovado pelas medições periódicas realizadas em poços de monitoramento.

Hidrogeologicamente, a área apresenta um aquífero composto pela parte superior do solo residual e pelos pacotes silto-argilosos ou argilo-siltosos, intercalados por lentes arenosas (Braga et al. no prelo). A direção do fluxo subterrâneo dominante ocorre em direção à Baía de Guanabara, e o nível d'água varia de aproximadamente 1 a 3 m de profundidade, respectivamente, nas áreas não aterradas e aterradas

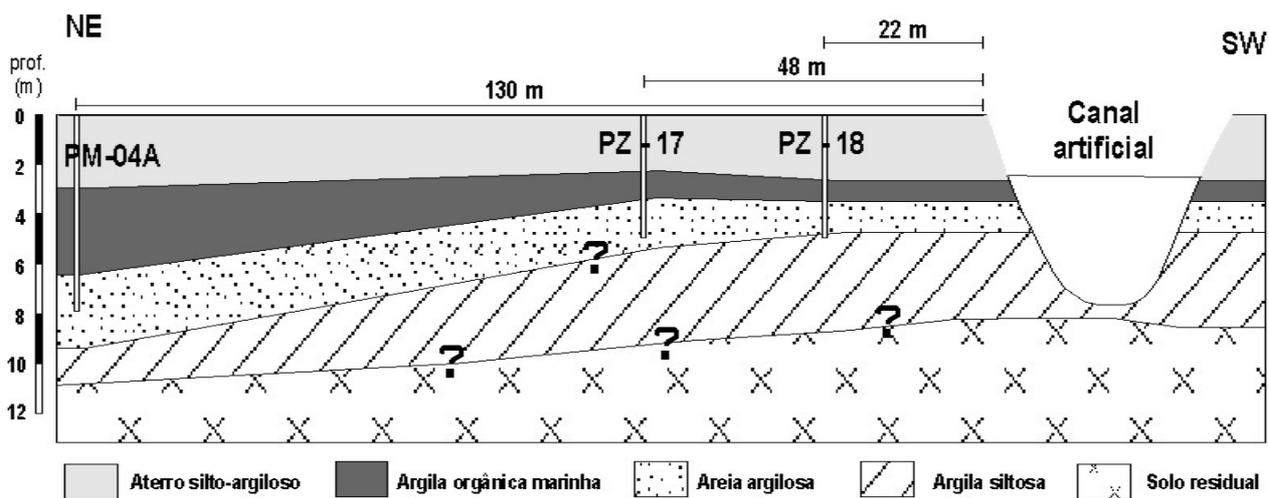


Figura 2 – Seção estratigráfica da área estudada ilustrando a distância dos poços monitorados ao canal artificial onde ocorrem as flutuações de maré.

Observa-se na figura 1 que a área de estudo está localizada a aproximadamente 1,5 km da Baía de Guanabara, e está limitada a sudoeste por um canal artificial utilizado para tomada de água da baía. Considerando-se desprezível o retardo da resposta da oscilação do nível d'água no canal à oscilação da maré na baía, e dada sua localização em relação à área, este foi utilizado para a realização das medidas de oscilação de maré.

METODOLOGIA

Uma rede de poços de monitoramento, que conta atualmente com 45 piezômetros, foi instalada para possibilitar estudos de caracterização hidrogeológica da área de estudo. Deste total, três piezômetros foram escolhidos, tendo em conta as suas distâncias relativas ao canal, para a realização das observações (Figura 3).

As observações dos níveis d'água foram realizadas simultaneamente em um poço e no canal artificial utilizando-se para isso medidores de nível d'água automáticos (Figura 4). Foram registrados, além das variações de pressão os níveis d'água, as variações da pressão atmosférica e de temperatura, de forma a possibilitar uma compensação nas leituras dos equipamentos para a variação da pressão atmosférica. As medidas foram efetuadas em intervalos de 15 min ao longo de 48 horas, para cada poço de monitoramento e simultaneamente para o canal.

A fim de caracterizar a influência da maré na composição química da água subterrânea, foram tomadas amostras a intervalos de hora em hora, em um período de oscilação de maré correspondente à maré semi-diurna, com duração de aproximadamente 12 horas. Esse acompanhamento foi realizado nos três poços de monitoramento e no canal artificial

simultaneamente, medindo-se posteriormente em laboratório a condutividade elétrica destas amostras a fim de identificar o movimento da cunha salina.

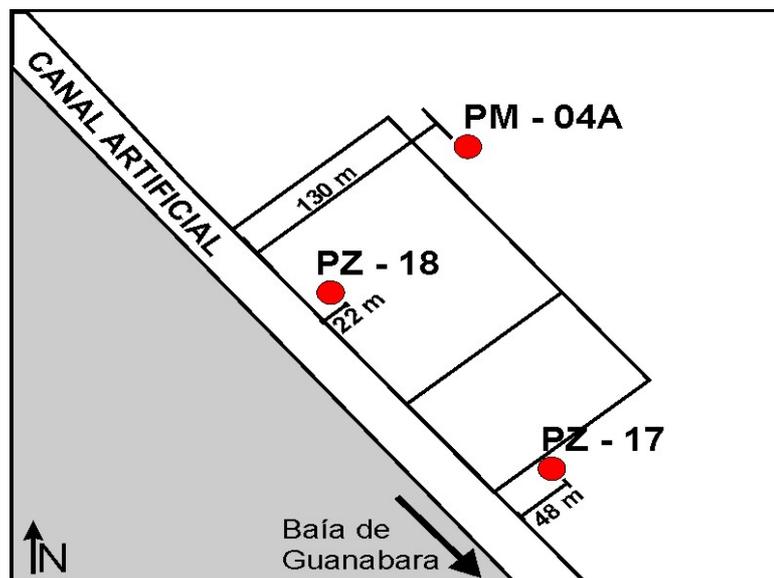


Figura 3 – Localização dos poços utilizados e sua distância relativa ao canal artificial.



Figura 4 – Medidor automático de nível d'água utilizado nos poços e no canal.

Para realização dos ensaios de permeabilidade foram utilizados os mesmos medidores automáticos de nível d'água. Foram realizadas *slug tests*, onde o nível d'água no interior do poço é rebaixado quase instantaneamente com o auxílio de *bailers* (amostradores descartáveis) e a recuperação do nível é medida em função do tempo. Medidas foram tomadas a cada cinco segundos, até que o nível inicial se restabelecesse.

A partir das variações de maré foi possível calcular as propriedades físicas do aquífero. Em um aquífero de grande extensão hidraulicamente conectado ao mar, e sem considerar as diferenças de densidade, a amplitude de oscilação da maré em um ponto segundo Jacob (1950, *in* Custodio e Llamas, 1983) é igual a:

$$\Delta h = \Delta H \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi x^2 S}{t_0 T}}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi t}{t_0} - \sqrt{\frac{\pi x^2 S}{t_0 T}}\right) \quad (1)$$

Onde:

Δh = variação do nível d'água em relação a sua posição média;

ΔH = semi amplitude de uma oscilação da maré;

x = distância à conexão entre o aquífero e o mar;

t_0 = período da maré (12 horas e 25 minutos);

S = coeficiente de armazenamento;

T = transmissividade.

O tempo de retardo da chegada da onda a um ponto do aquífero é dado por:

$$\Delta t = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{t_0 S}{\pi T}} \quad (2)$$

Com base nessas formulações foram obtidos os parâmetros do aquífero.

RESULTADOS

As análises desenvolvidas neste estudo mostram que as oscilações de maré devem ser levadas em consideração em estudos hidrogeológicos na área ao redor da Baía de Guanabara. A influência que essas oscilações exercem no sistema aquífero pôde ser sentida, ainda que em pequena escala, a aproximadamente 100 metros de distância a partir do canal artificial monitorado. As curvas de oscilação do nível d'água obtidas para os piezômetros PZ 17 e PZ 18 (Figuras 5 e 6, respectivamente) ilustram esta afirmação. Ambas mostram que há oscilação nos poços em resposta ao efeito da maré. Observa-se um retardo nesta resposta, que no entanto conserva o mesmo período de oscilação da maré. O retardo é de aproximadamente quatro horas e vinte minutos, nos dois casos, e foi obtido graficamente através das curvas de oscilação.

Por outro lado, o resultado obtido para o piezômetro PM 04A mostra que não há influência significativa da oscilação da maré no comportamento do nível d'água subterrânea (Figura 7).

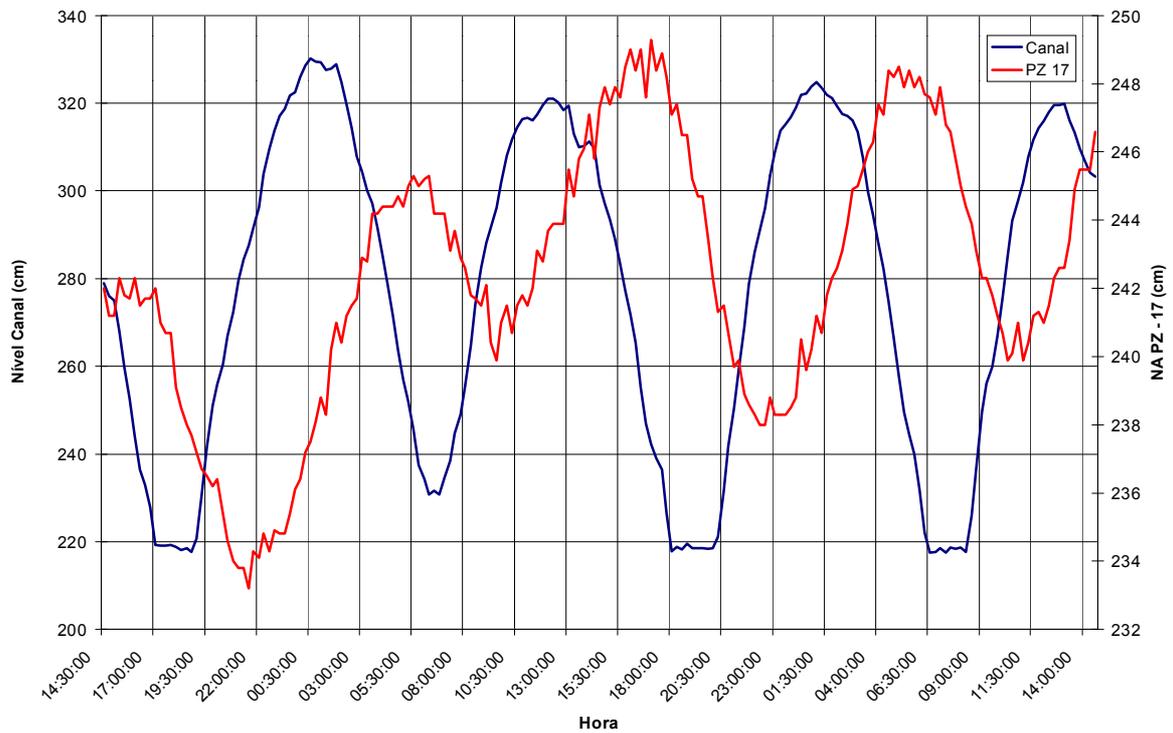


Figura 5 – Curvas de oscilação do nível d’água do PZ-17 comparadas à oscilação da maré no canal.

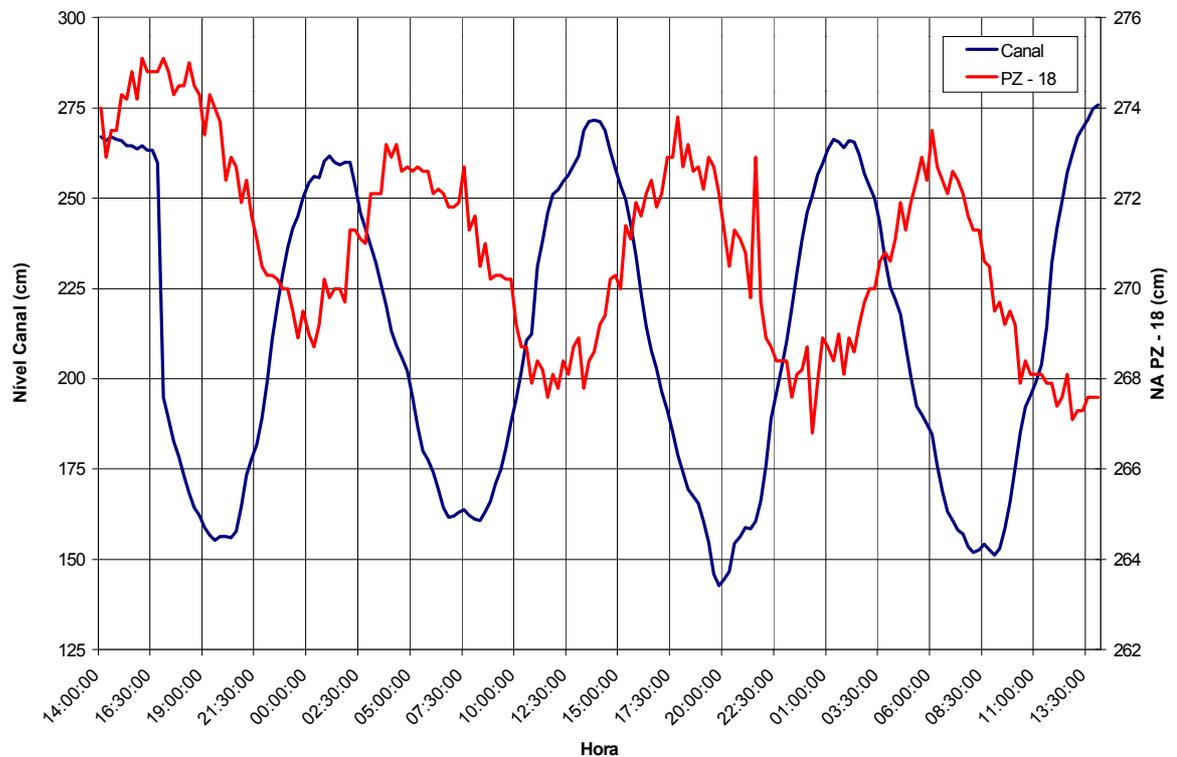


Figura 6 – Curvas de oscilação do nível d’água do PZ-18 comparadas à oscilação da maré no canal.

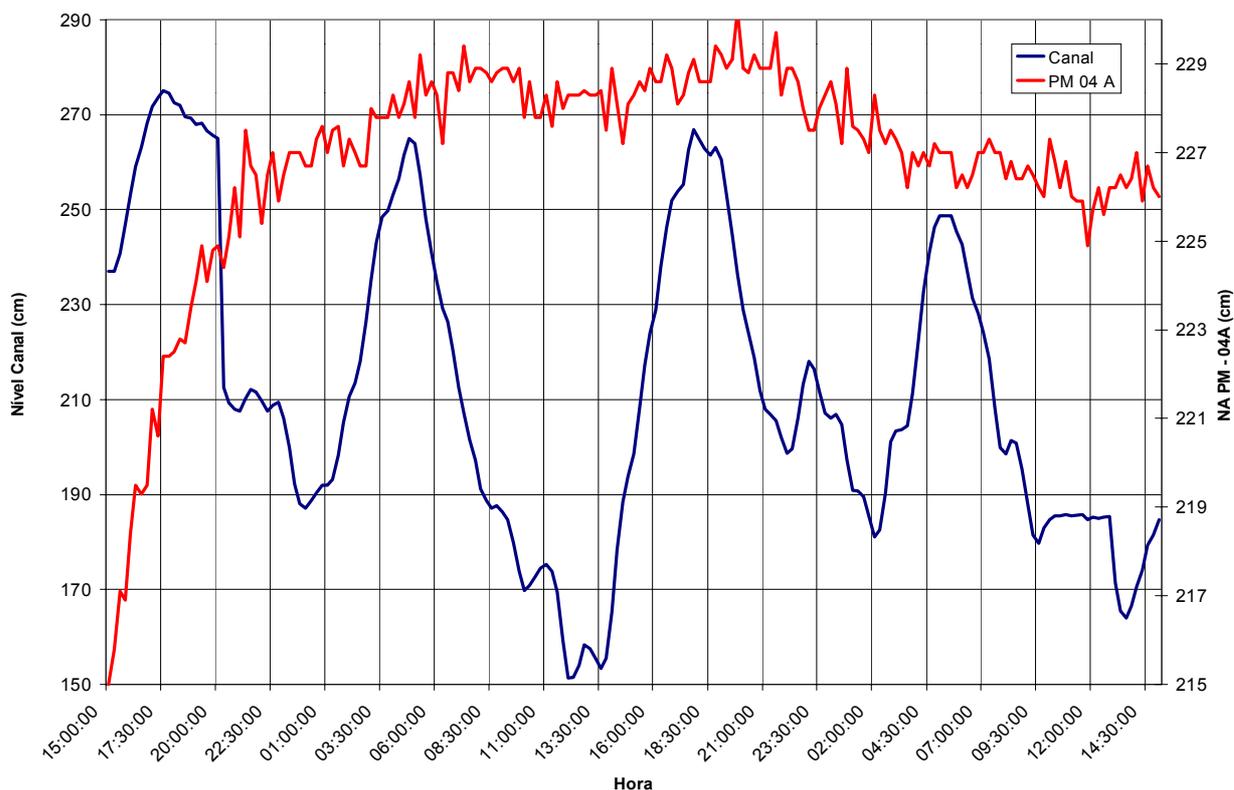


Figura 7 – Curvas de oscilação do nível d’água do PM-04A comparadas à oscilação da maré no canal.

Choveu durante a realização das medições dos poços PZ-17 e PM-04A. O efeito desta chuva pode ser observado nas figuras 5 e 7, pelo aumento do nível d’água ao longo do tempo de experimento. A quantidade de chuva não foi medida, porém estima-se que a recarga ao aquífero tenha começado aproximadamente 5 horas após o início das medições e continuado até o fim dos experimentos. Isso denota um tempo de resposta curto do aquífero, o que possivelmente está relacionado a presença de condutos diretos, como estruturas do solo, raízes, etc.

Os valores de condutividade hidráulica (K) obtidos através dos *slug tests* se mostraram condizentes com os horizontes ensaiados (areias argilosas). Para os piezômetros PZ-17, PZ-18 e PM-04A, os valores obtidos foram de $1,2 \cdot 10^{-7}$ m/s, $6,6 \cdot 10^{-8}$ m/s e $7,4 \times 10^{-8}$ m/s, respectivamente. Multiplicando-se os valores de K pela espessura (b) do aquífero em cada ponto, obtém-se a transmissividade (T) em cada ponto, que resulta numa média de $6,1 \cdot 10^{-2}$ m²/dia para o aquífero.

Com os valores de transmissividade, a distância entre o ponto de observação e o canal (x), as semi-amplitudes de oscilação medidas nos poços (Δh_0) e no canal (ΔH_0) e o período de maré (t_0), obtém-se os coeficientes de armazenamento (S) para cada ponto através da equação (1). Os valores de S encontrados foram $9,1 \cdot 10^{-6}$ e $3,2 \cdot 10^{-5}$ respectivamente para os poços PZ 17 e PZ 18.

Utilizando-se os valores de T e S na equação (2) obtém-se os tempos de retardo (Δt) da oscilação da maré ao poço de monitoramento, tendo como resultado 4 horas e 38 minutos no PZ-

17 (em comparação a 4 horas e 30 minutos calculado graficamente) e 5 horas e 42 minutos no PZ – 18 (em comparação a 4 horas e 30 minutos calculado graficamente).

A variação da condutividade elétrica observada nos três poços é muito pequena, não sendo possível estabelecer nenhuma relação com o movimento de oscilação da maré (Figura 8). Os valores observados no canal artificial mostram a influência da descarga do aquífero, comprovada pelo decréscimo dos valores de condutividade a partir do início da maré vazante, que ocorreu às 12:00 h do dia do experimento. (Figuras 8 e 9 A). A condutividade elétrica no canal artificial varia aproximadamente de 30 a 35 mS/cm, enquanto a média da água do mar é de aproximadamente 50 mS/cm. A variação nos poços está aproximadamente entre 4 e 8 mS/cm (Figura 8).

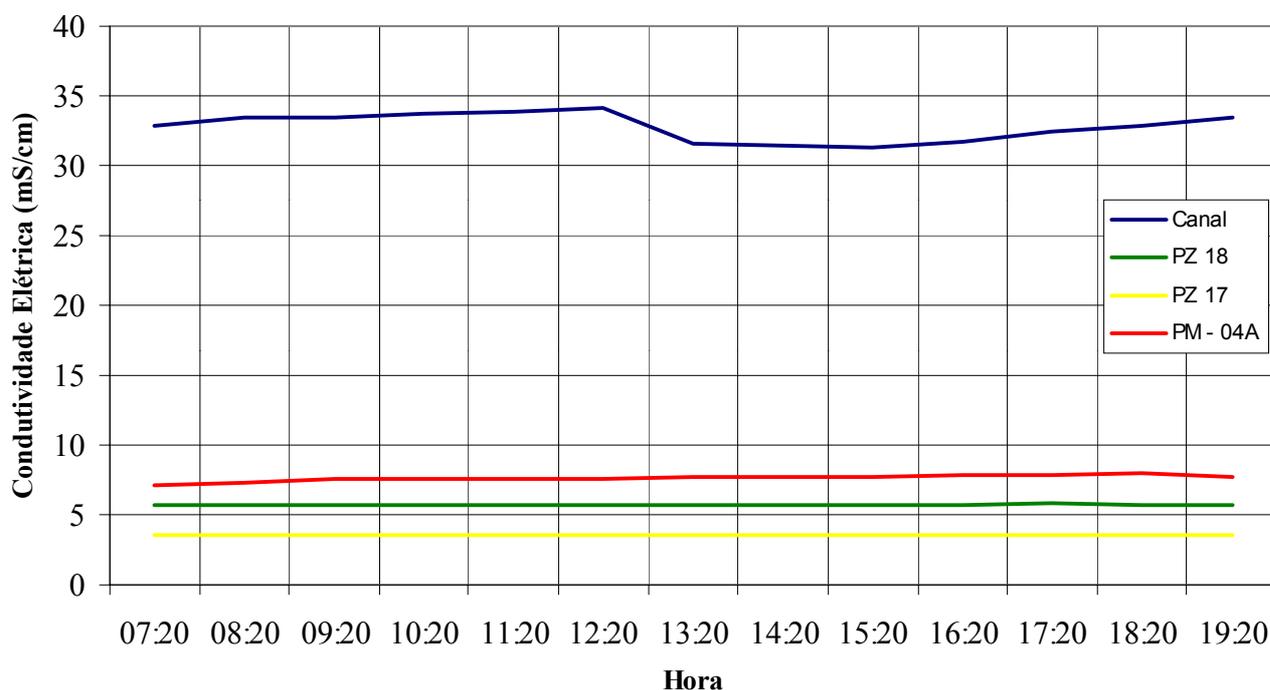


Figura 8 – Variações relativas de Condutividade Elétrica (mS/cm) no canal artificial e nos poços de monitoramento.

CONCLUSÕES

A oscilação das marés apresenta grande importância no regime de fluxo subterrâneo das áreas de aquíferos porosos costeiros, como é o caso ao redor da Baía de Guanabara e, portanto, deve ser sempre levada em consideração em estudos hidrogeológicos nesta região.

Com base nos dados de oscilação dos níveis d'água nos poços, pôde-se observar que as flutuações da maré influenciam o comportamento da água subterrânea nas imediações do canal artificial que margeia a área industrial.

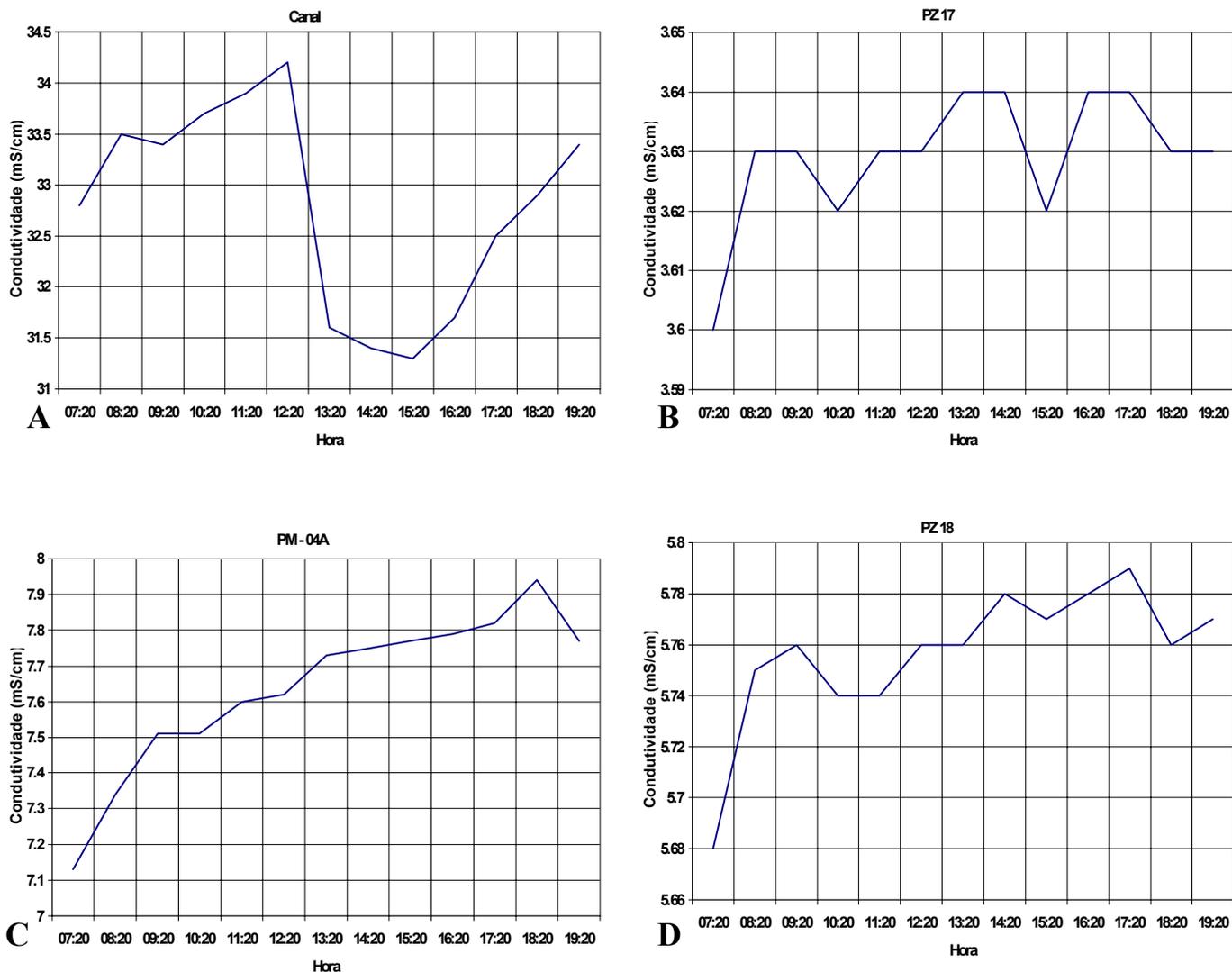


Figura 9: Variação de condutividade elétrica (mS/cm) no canal artificial (A) e nos três poços monitorados (B, C e D). As escalas dos eixos y são diferentes para cada gráfico de forma a melhorar a visualização da variação em cada poço.

Observou-se que as variações hidroquímicas não são significativas quando cotejadas com as oscilações de maré. Utilizando formulações que simulam a oscilação dos níveis piezométricos em aquíferos em função da maré, obteve-se uma boa estimativa dos parâmetros hidráulicos do aquífero, que mostrou valores consistentes com a obtida por meio de ensaios *in situ*. Esta metodologia possibilitou determinar o comportamento hidráulico do aquífero e classificá-lo como semi-confinado a confinado, com um coeficiente de armazenamento da ordem de 10^{-5} .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMADOR, E. S. *Baía de Guanabara e ecossistemas periféricos – Homem e Natureza*, Edição do Autor, Rio de Janeiro, 1997.
- AMADOR, E. S. Baía de Guanabara: Balanço Histórico. *In: Natureza e Sociedade no Rio de Janeiro*, Sec. Mun. Cult./ DGDI – Biblioteca Carioca, v. 21, Rio de Janeiro, 1992.
- BRAGA, C. E. *Diagnóstico das condições hidrogeológicas na área industrial ativa da Petroflex S.A.* Relatório Interno Petroflex Indústria e Comércio S.A., Rio de Janeiro, 2000.
- BRAGA, C. E., LAGE, I. C., ZULIAN, M. T. C., SILVA Jr., G. C., PEDROSO, A. G. *Analysis of groundwater flow and contaminant behavior in na industrial coastal area in Brazil*, no prelo.
- CUSTODIO, E.; LLAMAS, R. *Hidrologia subterránea*. Ed Omega, Barcelona. v. 2, 2189 p. 1983. ISBN 84-282-0446-2.
- JIAO, J. J. & TANG, Z. An analytical solution of groundwater response to tidal fluctuation in a leaky confined aquifer, *Water Res. Research* (35):3, 1999.