

ELABORAÇÃO DE UM FILTRO BASEADO EM ANÁLISE HARMÔNICA PARA REMOÇÃO DE RUÍDOS DE MARÉ EM DADOS DE NÍVEL DE AQUÍFERO LIVRE NA REGIÃO AMAZÔNICA

Lucas Kimo Costa¹; Veronica Nazaré Ramos Viana²; Giovanni Chaves Penner³; Edson Cezar Wendland⁴

RESUMO – Séries temporais de nível de água subterrânea em aquíferos livres localizados em áreas costeiras ou estuarinas podem apresentar oscilações periódicas associadas à influência das marés, dificultando a interpretação dos dados hidrológicos e a identificação de variações relacionadas à recarga. No campus da Universidade Federal do Pará (UFPA), em Belém do Pará, essa influência ocorre devido à proximidade com o Rio Guamá, cuja dinâmica é afetada pelas marés do Oceano Atlântico. Nesse contexto, este trabalho apresenta os resultados parciais de um projeto voltado ao desenvolvimento de filtros digitais para remoção de ruídos mareais em séries temporais de nível de aquífero livre. Neste trabalho, avalia-se especificamente o desempenho do filtro de Análise Harmônica aplicado a dados de poços de monitoramento da UFPA. Os resultados indicaram que o método foi capaz de reconstruir e remover a componente mareal do sinal observado, evidenciando variações de menor frequência associadas à dinâmica da água no aquífero. A influência mareal apresentou maior amplitude nos poços mais próximos ao Rio Guamá, diminuindo com o afastamento em relação ao rio.

Palavras-Chave – aquíferos, filtros digitais, maré.

ABSTRACT – Groundwater-level time series in unconfined aquifers located in coastal or estuarine areas may exhibit periodic oscillations associated with tidal influence, which can hinder the interpretation of hydrological data and the identification of variations related to recharge. On the campus of the Federal University of Pará (UFPA), in Belém, Pará, this influence occurs due to its proximity to the Guamá River, whose dynamics are affected by tides from the Atlantic Ocean. In this context, this study presents partial results from a project aimed at developing digital filters for removing tidal noise from groundwater-level time series in an unconfined aquifer. Specifically, this study evaluates the performance of the Harmonic Analysis filter applied to data from monitoring wells at UFPA. The results indicated that the method was able to reconstruct and remove the tidal component from the observed signal, highlighting lower-frequency variations associated with groundwater dynamics in the aquifer. The tidal influence showed greater amplitude in wells located closer to the Guamá River, decreasing with increasing distance from the river.

Key-words – aquifers, digital filters, tide.

INTRODUÇÃO

Séries temporais de níveis de água em aquíferos livres localizados em regiões costeiras ou estuarinas apresentam, de forma recorrente, sinais significativos associados às marés. Embora tais sinais sejam naturais, sua presença interfere de maneira expressiva na análise e interpretação dos dados hidrológicos. Nesse contexto, os filtros digitais têm sido amplamente empregados nas áreas da geologia e da oceanografia com o objetivo de suavizar séries temporais e separar componentes

¹Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, lucaskimo@usp.br

²Departamento de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, veronicaviana@usp.br

³Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, penner@ufpa.br

⁴Departamento de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, ew@sc.usp.br

de diferentes frequências. Esses filtros permitem a atenuação de sinais de alta frequência, como os associados às marés, evidenciando componentes de baixa frequência, que são mais relevantes para a avaliação dos processos de recarga (Shirahata et al., 2016).

No âmbito do Processamento Digital de Sinais (PDS), os filtros digitais constituem ferramentas importantes para o tratamento de séries temporais, pois possibilitam a redução de ruídos e a extração de informações relevantes do sinal analisado (Chandra e Chattopadhyay, 2016). Em aplicações hidrogeológicas, sua utilização é particularmente relevante em áreas sob influência de maré, nas quais oscilações periódicas podem mascarar variações associadas à recarga, à evapotranspiração e a outros processos naturais do aquífero. De forma geral, os filtros digitais podem ser classificados em Finite Impulse Response (FIR) e Infinite Impulse Response (IIR), sendo sua escolha dependente das características do sinal, dos objetivos da filtragem e dos requisitos de estabilidade, fase e eficiência computacional (Dhabu et al., 2020).

Nesse contexto, o presente projeto teve como objetivo contribuir para o avanço das pesquisas hidrológicas na região amazônica por meio do desenvolvimento e aplicação de filtros digitais voltados à remoção de ruídos mareais em dados de nível de aquíferos livres localizados em áreas sob influência de maré. Adicionalmente, este trabalho está inserido no âmbito do projeto “Gestão da recarga de aquíferos em diferentes regiões do Brasil e a disponibilidade para uso agrícola”, financiado por meio de um acordo de cooperação entre a Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas do Estado do Pará (FAPESPA) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

OBJETIVOS

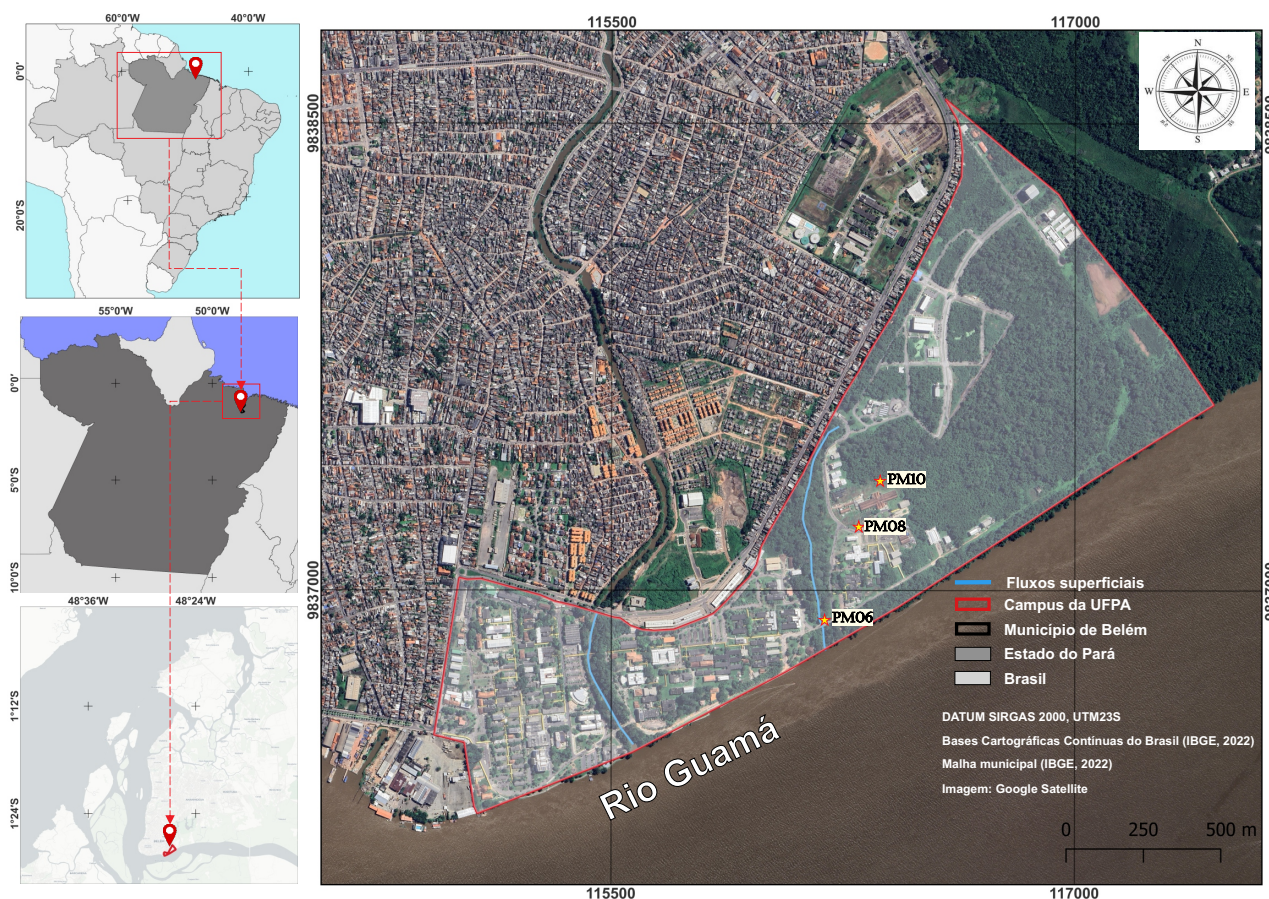
O presente trabalho tem como objetivo apresentar os resultados parciais da aplicação de um filtro digital baseado em Análise Harmônica para remoção da influência de marés em séries temporais de nível de aquífero livre no campus da Universidade Federal do Pará, em Belém-PA. Este estudo integra um projeto de iniciação científica voltado ao desenvolvimento de três abordagens de filtragem digital para tratamento de dados hidrogeológicos influenciados por oscilações mareais. Especificamente, busca-se avaliar a capacidade do filtro de Análise Harmônica em decompor o sinal observado, reconstruir a componente mareal e evidenciar variações de baixa frequência associadas à dinâmica do aquífero e aos processos de recarga.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo do presente trabalho é o campus da Universidade Federal do Pará (UFPA), localizada em Belém, capital do estado do Pará. Uma característica marcante desta área é sua posição às margens do Rio Guamá, um importante rio do nordeste paraense, que possui uma extensão navegável de 160 km, uma vazão aproximada de $21.000 \text{ m}^3/\text{s}$, na foz, e uma bacia de 11870 km^2 , ocupando 1% da área do estado (Rocha e Lima, 2020; Lima et al., 2020). A porção mais baixa da bacia do rio Guamá, onde se encontra a UFPA, é um estuário que está sob forte influência das marés do Oceano Atlântico. Essa condição faz com que as oscilações do nível do rio se propaguem para o aquífero livre do campus, provocando flutuações periódicas no nível freático, mesmo na ausência de

eventos de precipitação. A Figura 1 apresenta o mapa de localização do campus da UFPA e dos poços de monitoramento utilizados neste estudo. Como se observa no mapa, os poços estão distribuídos a distâncias progressivamente maiores em relação ao Rio Guamá, permitindo avaliar a atenuação da influência do sinal de maré à medida que aumenta o afastamento em relação ao rio.

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo e poços de monitoramento.



Fonte: Autores.

O clima nesta região é classificado como equatorial úmido, apresentando altas médias de precipitação ao longo de todo o ano. De acordo com Martorano et al. (2017), a precipitação média anual na região de Belém varia entre 2.600 e 2.900 mm, com uma estação mais chuvosa entre os meses de dezembro e maio e uma estação menos chuvosa nos meses de junho a novembro. Com relação às temperaturas, as médias mensais variam entre 27 e 28 °C em todos os meses do ano.

Existem 5 unidades hidrogeológicas na Região Metropolitana de Belém (RMB), denominadas Aluviões, Pós barreiras, Barreiras, Pirabas Superior e Pirabas Inferior. Na área da UFPA estas unidades estão sob depósitos argilosos flúvio-marinhos com predominância de gleissolo háplico (Matta, 2002; ANA, 2018). É importante mencionar que, na sua implantação e ao longo do seu desenvolvimento, o campus da UFPA foi aterrado com material arenoso; este aterro arenoso é o que compõe, atualmente, a porção mais superficial do solo no campus.

MATERIAIS E MÉTODOS

Monitoramento de nível do aquífero

Os dados de nível do aquífero no campus da UFPA foram obtidos por meio de monitoramentos manuais e automáticos realizados em poços de monitoramento localizados na área de estudo. O monitoramento manual foi realizado com o uso de um medidor de nível (Figura 2a), com uma frequência semanal; enquanto o monitoramento automático foi conduzido por meio de sensores instalados nos poços (Figura 2b), com dados obtidos a cada 15 minutos, permitindo a obtenção de séries temporais contínuas e detalhadas, adequadas para a análise da influência das marés e das respostas do aquífero aos eventos de precipitação. As medições manuais foram utilizadas na correção das séries registradas pelos sensores, especialmente para ajustar possíveis deslocamentos de cota associados a reposicionamentos dos equipamentos, deriva instrumental ou pequenas inconsistências acumuladas ao longo do período de monitoramento. Dessa forma, os dados automáticos corrigidos passaram a representar de forma mais consistente a variação temporal do nível de água subterrânea nos poços monitorados.

Figura 2: Exemplos de equipamentos utilizados no monitoramento do nível do aquífero, incluindo modelo similar de sensor automático de nível.



(a) Medidor manual de nível.



(b) Sensor automático de nível.

Fonte: Autores.

Filtragem digital

A filtragem digital foi aplicada com o objetivo de atenuar as principais componentes mareais que influenciam os dados de nível do aquífero, preservando sinais referentes a processos naturais, como variações de menor frequência relacionadas à resposta hidrológica do aquífero. Neste trabalho, foi utilizado um filtro baseado em Análise Harmônica, implementado em Python, devido à sua ampla aplicação no processamento de sinais mareais e à disponibilidade de bibliotecas voltadas à análise de séries temporais.

Entre as principais constituintes mareais consideradas nesta análise, destacam-se a M2, componente semidiurna lunar principal, associada à ação gravitacional da Lua e caracterizada por dois ciclos

em aproximadamente 24 h e 50 min; a M4, componente harmônica de águas rasas derivada da M2; e a MS4, também classificada como constituinte de águas rasas, resultante de interações não lineares entre componentes mareais. Essas constituintes estão entre as mais representativas da dinâmica mareal na região de Belém e em sistemas estuarinos adjacentes (Santos, 2013; Prestes et al., 2017).

O filtro foi aplicado aos dados de monitoramento do aquífero coletados nos três poços apresentados no mapa da Figura 1. Esses poços foram selecionados por estarem localizados a diferentes distâncias do Rio Guamá, possibilitando avaliar a propagação e a atenuação do sinal de maré através do solo. A análise abrangeu o período de 01 de novembro de 2024 a 29 de novembro de 2024, correspondente a um intervalo de quatro semanas, o que permitiu observar a amplitude do sinal de maré e outras variações presentes nos dados de nível do aquífero.

Conforme discutido por Sánchez-Úbeda et al. (2016) e Yu et al. (2019), a Análise Harmônica (HA) clássica é uma técnica amplamente empregada no processamento e na previsão de dados de nível do mar, tendo sido posteriormente adaptada para o estudo da resposta mareal em aquíferos costeiros. Esse método parte do pressuposto de que as oscilações do nível da água em um determinado ponto podem ser representadas como a soma de um número finito de funções senoidais, cada uma associada a um constituinte astronômico específico, com amplitudes, frequências e fases bem definidas. Diferentemente de abordagens puramente espectrais, as frequências utilizadas na HA não são estimadas a partir dos dados, mas previamente fixadas com base nos movimentos astronômicos do sistema Terra–Lua–Sol.

Neste estudo, a Análise Harmônica foi utilizada para reconstruir a componente mareal presente nas séries temporais de nível de água subterrânea e, posteriormente, removê-la do sinal observado. Dessa forma, buscou-se obter uma série filtrada, na qual as oscilações periódicas associadas à maré fossem atenuadas, permitindo uma interpretação mais clara das variações de menor frequência relacionadas à dinâmica do aquífero.

No contexto da reconstrução ou ajuste de um sinal mareal multi-constituente, a elevação da maré, ou a carga hidráulica induzida pela maré, no instante t pode ser expressa matematicamente como (Yu et al., 2019):

$$H(t) = H_{MSL} + \sum_{i=1}^n A_i \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (1)$$

onde:

- $H(t)$ representa o nível da maré ou da carga hidráulica no tempo t ;
- H_{MSL} é o nível médio do sinal (*Mean Sea Level*);
- A_i corresponde à amplitude do constituinte mareal i ;
- ω_i é a frequência angular do constituinte mareal;

- ϕ_i representa a fase inicial associada a esse constituinte.

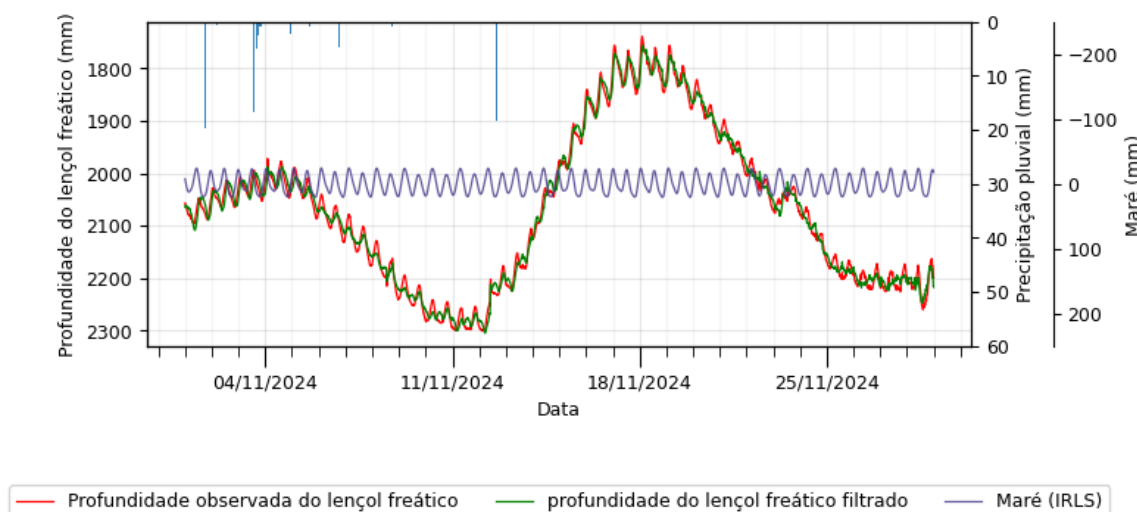
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados e a discussão do desempenho do filtro digital baseado em Análise Harmônica (HA) aplicado às séries temporais de nível do aquífero. As Figuras 3, 4 e 5 mostram, para cada poço de monitoramento (PM06, PM08 e PM10), a evolução temporal do nível observado, do sinal filtrado, da componente mareal reconstruída por meio do filtro HA e da precipitação registrada no período analisado.

De forma geral, observa-se que o filtro baseado em Análise Harmônica foi capaz de decompor o sinal original em suas componentes principais, isolando adequadamente a contribuição periódica associada à maré. A reconstrução da componente mareal permite identificar com clareza o comportamento oscilatório imposto pelas variações do nível do rio, enquanto o sinal filtrado evidencia tendências de mais baixa frequência, potencialmente associadas aos processos de recarga do aquífero.

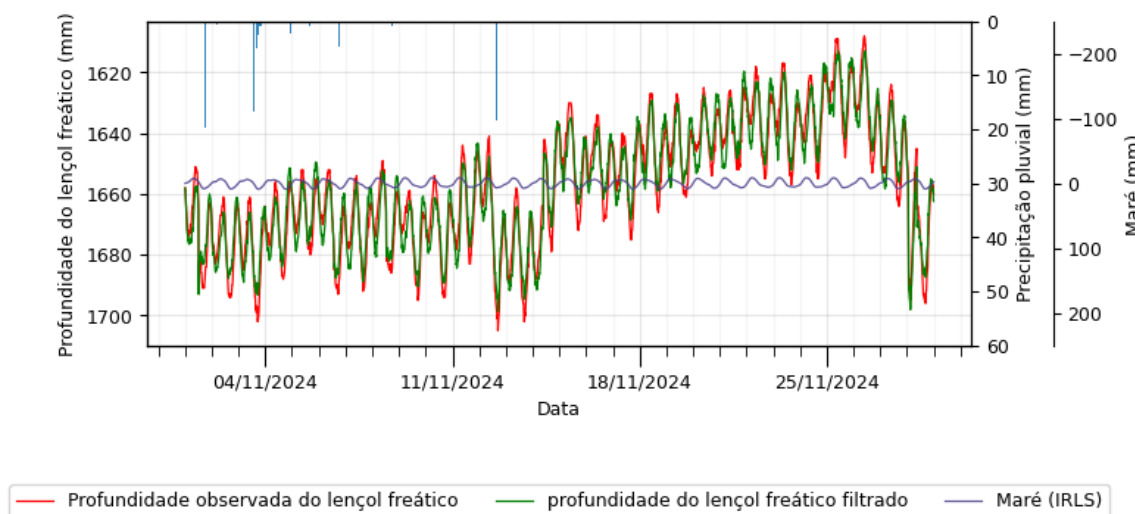
Um aspecto relevante evidenciado nas Figuras 3, 4 e 5 é a variação da amplitude do sinal mareal reconstruído entre os diferentes poços de monitoramento. É possível notar indícios de atenuação espacial da influência mareal com o afastamento do rio, mas essa resposta também pode ser influenciada por características locais do aquífero. Esse comportamento é consistente com a configuração espacial dos poços em relação ao Rio Guamá, principal fonte de propagação do sinal de maré no sistema aquífero. Conforme indicado na Figura 1, o poço PM06 encontra-se mais próximo às margens do rio, sendo, portanto, mais fortemente influenciado pelas oscilações mareais de baixa e alta frequência, o que se reflete na maior amplitude do sinal reconstruído. Por outro lado, o poço PM10 está localizado mais afastado, apresentando uma atenuação significativa desse efeito, enquanto o PM08 apresenta comportamento intermediário.

Figura 3: Gráfico da variação do nível do aquífero observado no PM06, nível após a remoção do sinal de maré e sinal de maré reconstituído, além da precipitação horária na região.



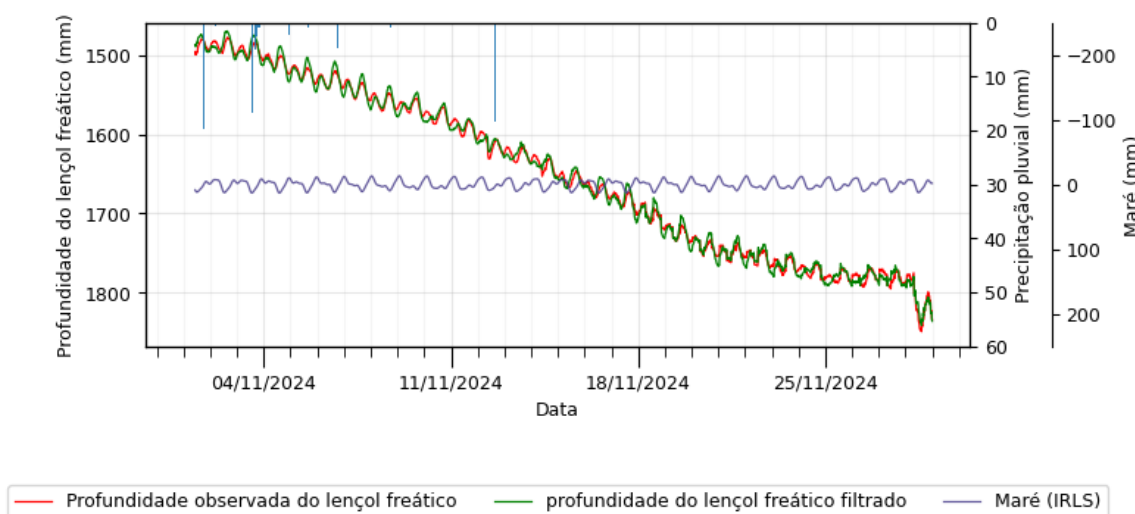
Fonte: Autores.

Figura 4: Gráfico da variação do nível do aquífero observado no PM08, nível após a remoção do sinal de maré e sinal de maré reconstituído, além da precipitação horária na região.



Fonte: Autores.

Figura 5: Gráfico da variação do nível do aquífero observado no PM10, nível após a remoção do sinal de maré e sinal de maré reconstituído, além da precipitação horária na região.



Fonte: Autores.

Essa diferença na intensidade da influência mareal impacta diretamente o desempenho do filtro. Nos poços mais próximos ao rio, como o PM06, a componente mareal representa uma parcela significativa do sinal total, o que favorece a atuação do filtro HA, resultando em um ajuste mais consistente entre o sinal observado e o sinal filtrado. Isso pode ser verificado pela elevada concordância entre as curvas apresentadas na Figura 3. Em contrapartida, nos poços mais distantes, como o PM10, a contribuição mareal é menos pronunciada, fazendo com que o sinal observado seja dominado por outros processos, como recarga por precipitação e variações locais do aquífero. Nesses casos, a remoção da componente mareal tem impacto mais limitado, o que se reflete em diferenças mais perceptíveis entre

o sinal original e o sinal filtrado, conforme observado na Figura 5.

Além disso, a análise conjunta com os dados de precipitação indica que a remoção da componente mareal contribui para tornar mais claras as variações de menor frequência do nível freático, as quais podem estar relacionadas aos processos de recarga e à dinâmica local do aquífero. Dessa forma, os resultados evidenciam o potencial da Análise Harmônica como ferramenta para a separação de componentes periódicas em séries temporais hidrológicas influenciadas por diferentes processos.

De forma geral, as Figuras 3, 4 e 5 indicam que o filtro baseado em Análise Harmônica foi capaz de reconstruir uma componente periódica compatível com o sinal mareal e de removê-la parcialmente das séries observadas de nível do aquífero. Após a filtragem, as curvas mantêm a tendência principal do nível de água subterrânea, enquanto parte das oscilações de alta frequência é atenuada, favorecendo a interpretação das variações de menor frequência. Cabe destacar que os dados utilizados já haviam sido corrigidos quanto à influência da pressão atmosférica, com base em registros de um barômetro instalado na área de estudo, também com frequência de aquisição de 15 minutos. Assim, as oscilações remanescentes em escala diária provavelmente não estão associadas à variação barométrica, mas podem refletir componentes mareais não completamente removidas, respostas locais do aquífero ou outros processos hidrodinâmicos de curta duração. A influência mareal também tende a variar entre os poços, possivelmente em função da distância em relação ao Rio Guamá e de características locais do aquífero. No entanto, como a intensidade das oscilações não apresenta um padrão visual perfeitamente progressivo entre todos os poços, essa interpretação deve ser feita com cautela.

A fim de dar maior credibilidade aos resultados, a eficiência do método proposto foi avaliada por meio da potência média dos sinais, adotada como métrica quantitativa da influência mareal e da eficiência da filtragem. Inicialmente, foi calculada a potência média do sinal original e do sinal filtrado após a remoção de seus respectivos níveis médios, de forma que a análise considerasse apenas a variabilidade temporal dos níveis d'água. A potência média de cada sinal foi calculada como a média dos quadrados das amplitudes em relação ao seu valor médio. Além disso, a potência média associada a cada componente harmônica reconstruída foi estimada individualmente a partir de sua amplitude ajustada. Considerando que cada componente mareal é representada por uma função senoidal, sua potência média foi obtida por:

$$P_i = \frac{A_i^2}{2}, \quad (2)$$

em que A_i representa a amplitude da i -ésima componente mareal reconstruída.

A potência total associada à maré foi então obtida pela soma das potências individuais das componentes harmônicas consideradas na reconstrução.

Finalmente, a eficiência global do processo de filtragem foi quantificada pela redução percentual

da potência média do sinal após a remoção da influência mareal, calculada por

$$\eta(\%) = 100 \left(1 - \frac{P_{\text{filtrado}}}{P_{\text{original}}} \right), \quad (3)$$

em que P_{original} e P_{filtrado} representam, respectivamente, as potências médias do sinal original e do sinal após a filtragem. A tabela 1 resume os resultados da análise de potência, apresentando a contribuição percentual das componentes mareais reconstruídas (M2, M4 e MS4) e a eficiência global do processo de filtragem para cada poço de monitoramento avaliado (PM06, PM08 e PM10). Observa-se que a eficiência global do processo de filtragem diminui à medida que aumenta a distância entre o poço de monitoramento e o Rio Guamá. Esse comportamento é consistente com a redução da influência das componentes mareais sobre o aquífero em regiões mais afastadas do rio, indicando que a contribuição da maré para a variabilidade dos níveis d'água tende a decrescer com a distância da fonte de excitação.

Tabela 1: Contribuição percentual da potência das componentes mareais reconstruídas e eficiência global do processo de filtragem para os poços de monitoramento.

Poço	M2 (%)	M4 (%)	MS4 (%)	Eficiência (%)
PM06	0,3690	0,0054	0,0044	0,2945
PM08	0,0041	0,00002	0,00016	0,0631
PM10	0,0093	0,0007	0,00003	0,0320

Fonte: Autores.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos indicam que o filtro baseado em Análise Harmônica apresentou desempenho satisfatório na identificação e remoção parcial da componente mareal presente nas séries de nível freático monitoradas no campus da UFPA. A aplicação do método permitiu preservar a tendência geral do nível do aquífero e atenuar parte das oscilações de alta frequência, favorecendo a visualização de variações de menor frequência, mais relevantes para a interpretação hidrogeológica e para futuras estimativas de recarga. Entretanto, observou-se que as séries filtradas ainda apresentam oscilações em escala diária, indicando que a remoção do sinal periódico não foi completa. Estas oscilações remanescentes podem estar associadas a componentes mareais não totalmente representadas no ajuste harmônico, a respostas locais do aquífero ou a outros processos hidrodinâmicos de curta duração. Também foi observado que a resposta mareal varia entre os poços analisados, sugerindo possível influência da distância em relação ao Rio Guamá e das condições locais do aquífero. Assim, a Análise Harmônica se mostra uma ferramenta promissora para o tratamento de séries temporais de nível subterrâneo em áreas estuarinas. No entanto, análises complementares ainda são necessárias para quantificar a atenuação espacial do sinal de maré, avaliar as oscilações remanescentes e comparar o desempenho desse método com outras abordagens de filtragem digital.

REFERÊNCIAS

- ANA, (2018). “Estudos hidrogeológicos para a gestão das águas subterrâneas da região de belém, pa”. Relatório técnico, Agência Nacional de Águas (ANA), Metadados disponíveis via Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). Acesso em: 27 dez. 2025.
- CHANDRA, A.; S. CHATTOPADHYAY, (2016). “Design of hardware efficient fir filter: A review of the state-of-the-art approaches”. Engineering Science and Technology: An International Journal 19(1), pp. 212–226.
- DHABU, S.; A. AMBEDE; N. AGRAWAL; K. G. SMITHA; S. DARAK; A. P. VINOD, (2020). “Variable cutoff frequency fir filters: a survey”. Journal Name 2(3).
- LIMA, A. C. D. M.; L. L. FERNANDES; D. F. LOPES; G. M. BITTENCOURT; M. V. D. A. VINAGRE; E. M. D. SILVA, (2020). “Urbanization and urban canals: water quality assessment of the una hydrographic basin in belém city, brazil”. Research, Society and Development 9(7), pp. e232973866.
- MARTORANO, L. G.; M. I. VITORINO; B. P. P. C. D. SILVA; J. R. D. S. C. D. MORAES; L. S. LISBOA; E. D. SOTTA; K. REICHARDT, (2017). “Climate conditions in the eastern amazon: Rain-fall variability in belém and indicative of soil water deficit”. African Journal of Agricultural Research 12(21), pp. 1801–1810.
- MATTA, M. A. D. S., (2002). Fundamentos hidrogeológicos para gestão integrada dos recursos hídricos da região de Belém/Ananindeua - Pará, Brasil. Tese de doutorado, Universidade Federal do Pará, Belém, PA.
- PRESTES, Y. O.; A. C. SILVA; M. ROLLNIC; R. P. ROSÁRIO, (2017). “The m2 and m4 tides in the pará river estuary”. Tropical Oceanography 45(1), pp. 26–37.
- ROCHA, N. C. V.; A. M. M. D. LIMA, (2020). “Water sustainability of the guamá river basin, eastern amazonia, brazil”. Sociedade & Natureza 32, pp. 130–148.
- SANTOS, A. S. D., (2013). “Propagação de maré na baía do marajó e seus principais tributários”. Orientadora: Msc. Inaê de Brito Albuquerque Nascimento; Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Rollnic.
- SHIRAHATA, K.; S. YOSHIMOTO; T. TSUCHIHARA; S. ISHIDA, (2016). “Digital filters to eliminate or separate tidal components in groundwater observation time-series data”. JARQ 50(3), pp. 241–252.
- SÁNCHEZ-ÚBEDA, J. P.; M. L. CALVACHE; C. DUQUE; M. LÓPEZ-CHICANO, (2016). “Filtering methods in tidal-affected groundwater head measurements: Application of harmonic analysis and continuous wavelet transform”. Advances in Water Resources 97, pp. 52–72.
- YU, X.; P. XIN; S. S. J. WANG; C. SHEN; L. LI, (2019). “Effects of multi-constituent tides on a subterranean estuary”. Advances in Water Resources 124, pp. 53–67.