

Determinação preliminar do modelo de maré terrestre para Presidente Prudente/SP

RESUMO

A variação periódica do nível da crosta terrestre devido à influência das forças gravitacionais exercidas pelo Sol e pela Lua é denominada Maré Terrestre. Recentemente, os estudos dos diferentes tipos de maré têm se tornado mais importantes por sua aplicação na determinação precisa da órbita de satélites artificiais, na melhor determinação de medidas geodésicas e no estudo das propriedades elásticas da Terra. Este trabalho tem como objetivo determinar um modelo preliminar de Maré terrestre para Presidente Prudente/SP, utilizando dados gravimétricos coletados entre Maio e Dezembro de 2013. Softwares compatíveis com o gravímetro gPhone foram utilizados na análise dos dados e na determinação das componentes harmônicas. Realizaram-se comparações entre o modelo de maré terrestre e grupos de componentes Lunares e diurnas, concluindo-se que as principais componentes para geração do modelo de maré terrestre são as componentes O_1 , K_1 , M_2 e S_2 . Por fim, observou-se que a não consideração da influência da carga oceânica e do movimento do polo neste modelo de maré terrestre faz com que ele apresente uma discrepância de até $4 \mu\text{Gals}$, ou 1.33cm em sua componente vertical, diferença esta considerada expressiva e que torna este modelo interessante somente para fins educacionais.

PALAVRAS-CHAVE: Maré Terrestre, gravímetro gPhone, Modelo.

Plínio Marcos Piccin Benedito

eng.plinio@outlook.com

orcid.org/0000-0001-6844-5223

Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, São Paulo, Brasil.

Fabio Luiz Albarici

fabio.albarici@fisdeminas.edu.br

orcid.org/0000-0003-4436-0561

Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, São Paulo, Brasil.

Jorge Luiz Alves Trabanco

trabanco@fec.unicamp.br

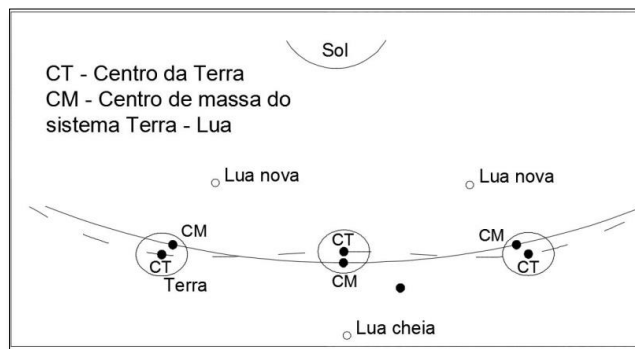
orcid.org/0000-0002-2558-2858

Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, São Paulo, Brasil.

INTRODUÇÃO

O Sol e a Lua exercem forças gravitacionais sobre a Terra fazendo com que ela orbite o centro de massa do sistema Terra-Lua (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Essa força gravitacional é variável com o tempo devido às posições relativas dos astros em relação à Terra, ou seja, as variações de distância do Sol e da Lua em relação à Terra, devido à movimentação dos astros, produzem uma alteração na gravidade (WAHR, 1981). Além disso, a rotação da Terra em torno do centro de massa do sistema gera uma força centrífuga que age juntamente com a força gravitacional. A resultante dessas duas forças é denominada Força de Maré, cuja ação causa variações na direção e na intensidade do vetor gravidade, provocando alterações no nível dos mares e uma variação periódica (deformação) do nível da crosta terrestre, efeito este conhecido como Maré Terrestre (MELCHIOR, 1983).

Figura 1 – Sistema Terra-Lua



Fonte: Adaptado de Mesquita e França (1996).

A análise harmônica das marés é um processo de cálculo que permite determinar as semi-amplitudes e os atrasos de fase das várias componentes harmônicas, ou ondas, que estão presentes na maré. Esse método é baseado nas diferentes variações das fases das componentes, resultantes das diferenças de suas frequências angulares. Baseado no período de ocorrência dessas ondas é possível separá-las em três famílias principais: As ondas semi-diurnas, as ondas diurnas e as ondas de longo período.

A Tabela 1 reúne as ondas lunares (L) e solares (S) de longo período, diurnas e semi-diurnas, além de uma onda ter-diurna, que são consideradas as mais importantes para se modelar a maré terrestre. A onda M_2 é a mais importante das ondas semi-diurnas lunares, por isso é conhecida como lunar principal. O efeito dessa onda pode ser considerado como o único efeito que existiria se a Lua girasse em torno da Terra com órbita circular, equatorial e velocidade de módulo constante. Fazendo analogia com a dinâmica de órbitas, a onda M_2 corresponderia à "órbita normal" e as demais componentes lunares corresponderiam às "perturbações" (GEMAEL, 2002).

Tabela 1 - Principais ondas de maré terrestre.

Símbolo Darwin	Componente	Frequência (cpd)	Amplitude (m)	Argumento
Diurnas				
Q_1	Lunar elíptica maior	0.8932441	-0.05021	$(\tau - s) - (s - p)$
O_1	Lunar principal	0.9295357	-0.26223	$(\tau - s)$
M_1	Lunar elíptica menor	0.9664463	0.02061	$(\tau + s) - (s - p)$
K_1	Lunar declinacional	1.0027379	0.36864	$(\tau + s) = t'^*$
J_1	Lunar elíptica pequena	1.0390296	0.02062	$(\tau + s) + (s - p)$
OO_1	Lunar de 2ª ordem	1.0759401	0.01128	$(\tau + 3s)$
Semidiurnas				
$2N_2$	Lunar elíptica de 2ª ordem	1.8596903	0.01602	$2\tau - 2(s - p)$
N_2	Lunar elíptica maior	1.8959820	0.12105	$2\tau - 2(s - h)$
M_2	Lunar principal	1.9322736	0.63221	2τ
L_2	Lunar elíptica menor	1.9685653	-0.01787	$2\tau + (s - p)$
S_2	Solar principal	2.0000000	0.29411	2τ

* t' = onda Lunisolar devido à relação $t' = \tau + s = \tau + h$

Fonte: Agnew (2007).

O objetivo deste trabalho é determinar um modelo preliminar de maré terrestre para a estação geodésica de Presidente Prudente, localizada na Universidade Estadual Paulista (UNESP), no oeste do estado de São Paulo; utilizando dados gravimétricos coletados de 31 de Maio de 2013 a 31 de Dezembro de 2013 (período total de 7 meses). Tal modelo produzido foi denominado “preliminar”, pois não incluiu as correções das perturbações provindas de fatores como a Carga Oceânica, o Movimento dos Polos, Temperatura e Pressão; correções estas que devem ser realizadas para se obter modelos mais precisos. Por fim, este modelo será comparado com a curva de dados gravimétricos, com o objetivo de verificar a diferença entre eles.

METODOLOGIA

Para a obtenção de dados gravimétricos, é necessário que haja uma base fixa e protegida de ruídos externos. Tal base é formada por um pilar de concreto que está engastado na rocha e isolado lateralmente para não possuir contato com o pavimento. Estas condições apresentam-se na estação geodésica nº 93900 de Presidente Prudente, localizada na Universidade Estadual Paulista (UNESP), onde os dados foram adquiridos. Coletou-se mais de 60.000 leituras gravimétricas em sete meses de observação, de 31 de Maio à 31 de Dezembro de 2013.

O equipamento utilizado neste estudo foi o gravímetro gPhone fabricado pela *LaCoste & Romberg*, o qual utiliza um sistema de mola suspensa. Uma característica deste equipamento é sua baixa deriva instrumental, o que possibilita seu uso na integração de sinais periódicos, como os de maré terrestre, por longos períodos, com precisão de 1 μGal . A Figura 2 ilustra o gravímetro *gPhone*:

Figura 2 – Gravímetro Micro-g LaCoste



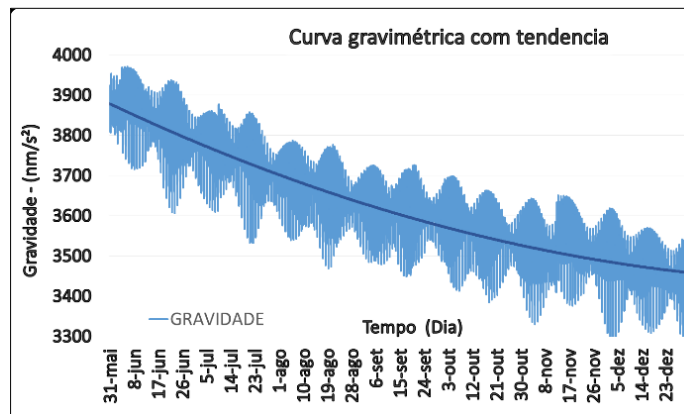
Fonte: Autoria própria (2017).

Todos os dados coletados são gravados no sistema de aquisição como dados brutos, contendo ruídos. Assim, de acordo com Costa (2007), os dados devem ser preparados antes de sua análise. Esses ruídos são ocasionados por perturbações no ambiente produzindo interferências de sinais de alta frequência. Além disso, há descontinuidade de informações geradas por quedas de energia ou interrupções na fase de coleta de dados. Tais interferências produzem mudanças abruptas, que resultam na instabilidade dos dados e não são condizentes com o estudo das observações (Yu *et al*, 2015). Todavia, a eliminação de dados deve ser feita cuidadosamente, pois pode resultar em perda de informações importantes para o desenvolvimento do modelo.

Portanto, foram usados algoritmos suavizadores como, por exemplo, a média móvel, presentes no software *TSoft* (VAN CAMP; VAUTERIN, 2005) para pré-processar os dados e eliminar alguns ruídos.

Realizado o pré-processamento, observou-se que os dados apresentam uma tendência decrescente que não é gerada pela variação da gravidade, mas sim pela deriva instrumental do equipamento, e, portanto, deve ser eliminada. A Figura 3 mostra a tendência decrescente presente nos dados gravimétricos:

Figura 3 – Dados Gravimétricos com tendência decrescente



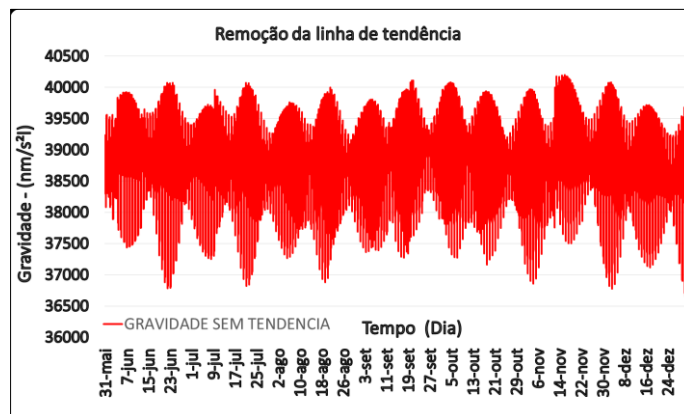
Fonte: Autoria própria (2017).

Utilizando o software Excel, obteve-se a Equação polinomial de segunda ordem que melhor se ajustou aos dados:

$$y = 7 \times (0,0000001) \times (x^2) - (0,1102 \times x) + 38789 \quad (1)$$

A equação 1 foi subtraída dos dados gravimétricos, eliminando, assim, a curva de tendência polinomial. O resultado pode ser visto na figura 4. Ainda assim, é possível observar alguns picos incomuns nos dados, causados por ruídos, que não puderam ser eliminados.

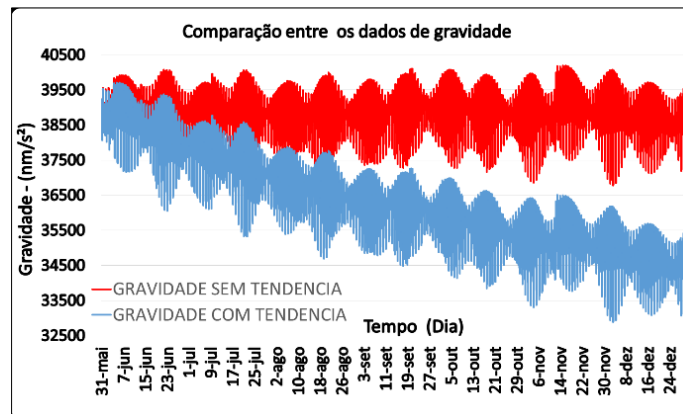
Figura 4 – Curva Gravimétrica após a remoção da linha de tendência



Fonte: Autoria própria (2017).

A Figura 5 apresenta uma comparação entre as curvas gravimétricas, antes e depois da remoção da linha de tendência polinomial:

Figura 5 – Curva Gravimétrica antes e depois da eliminação da linha de tendência polinomial



Fonte: Autoria própria (2017).

Em seguida, o software ETERNA34 (ICET, 2017) foi utilizado para determinar a Fase e a Amplitude de cada Componente Harmônica: Q_1 , O_1 , M_1 , K_1 , J_1 , OO_1 , $2N_2$, N_2 , M_2 , L_2 , S_2 , M_3 e M_6 . Para isso, foi necessário transformar os dados gravimétricos que estavam em μGaus para a unidade de processamento usada pelo ETERNA34, que é nm/s^2 . Através do ETERNA34 foi possível determinar os fatores de amplitude e fase para as componentes harmônicas.

O próximo passo foi sintetizar o modelo de Maré Terrestre utilizando o software TSoft. Para isso, foram adicionados os parâmetros de localização (Coordenadas geográficas aproximadas) da base de Presidente Prudente ($\phi = -51$; $\lambda = -22$; $h = 431\text{m}$). Em seguida, adicionaram-se os Parâmetros de Maré de cada componente harmônica, utilizando o arquivo de extensão .prn fornecido pelo ETERNA34 para gerar o modelo preliminar de maré terrestre e, posteriormente, compará-lo à curva de dados gravimétricos. É importante que este arquivo de texto esteja com a tabulação correta de acordo com as exigências do TSoft.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os valores da amplitude e fase de cada componente harmônica calculado na estação geodésica de Presidente Prudente, nos sete meses de observação. A amplitude teórica apresentada (A_t) é obtida a partir de um modelo inelástico rígido para um planeta sem oceanos de Wahr-Dehant (COSTA, 2007). "FA" representa o fator de amplitude, " σ_{FA} " o seu respectivo desvio-padrão, "F" representa a fase e " σ_F " o seu desvio-padrão. O fator de amplitude é a relação entre a amplitude mensurada e a obtida a partir do modelo inelástico de Wahr-Dehant segundo as coordenadas geográficas do local (COSTA, 2007).

Considerando-se como a principal componente a onda semi-diurna, Lunar Principal (M_2), o valor encontrado para o fator de amplitude foi de $1,162 \pm 0,003 \text{ nm/s}^2$ ou $11,62 \pm 0,03 \mu\text{Gals}$, e a fase foi de $2,082 \pm 0,149^\circ$. Para a componente Lunar Principal diurna (O_1), o fator de amplitude foi de $1,174 \pm 0,008 \text{ nm/s}^2$ ou $11,74 \pm 0,008 \mu\text{Gals}$ e a fase foi de $0,271 \pm 0,379^\circ$.

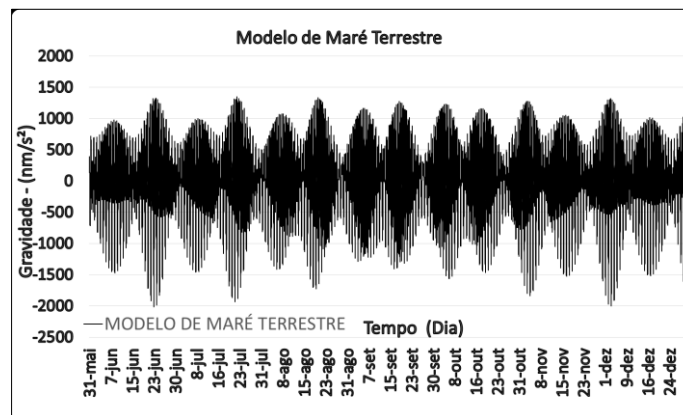
Tabela 2 - Dados de Amplitude e Fase obtidas pelo software ETERNA34.

Onda	Freq. Min.	Freq. Max	A_t (μgal)	FA	σ_{FA}	F ($^\circ$)	σ_F
Q ₁	0,501	0,911	4,1457	1,112	0,038	-4,809	1,940
O ₁	0,911	0,948	21,6523	1,174	0,008	0,271	0,379
M ₁	0,948	0,982	1,7020	1,198	0,114	-8,187	5,433
K ₁	0,982	1,024	30,4387	1,139	0,005	0,116	0,251
J ₁	1,024	1,057	1,7026	1,174	0,098	9,730	4,799
OO ₁	1,057	1,470	0,9314	1,173	0,273	3,467	13,349
2N ₂	1,470	1,880	1,9702	1,793	0,072	12,699	2,308
N ₂	1,880	1,914	12,3357	1,145	0,015	-4,607	0,748
M ₂	1,914	1,950	64,4277	1,162	0,003	2,082	0,149
L ₂	1,950	1,984	1,8212	0,316	0,114	26,505	20,609
S ₂	1,984	2,452	29,9724	1,149	0,007	0,476	0,329
M ₃ M ₆	2,452	7,000	1,1721	1,054	0,050	4,761	2,726

Fonte: Autoria própria (2017).

A Figura 6 apresenta o modelo de maré terrestre sintetizado através da soma de todas as componentes harmônicas calculadas.

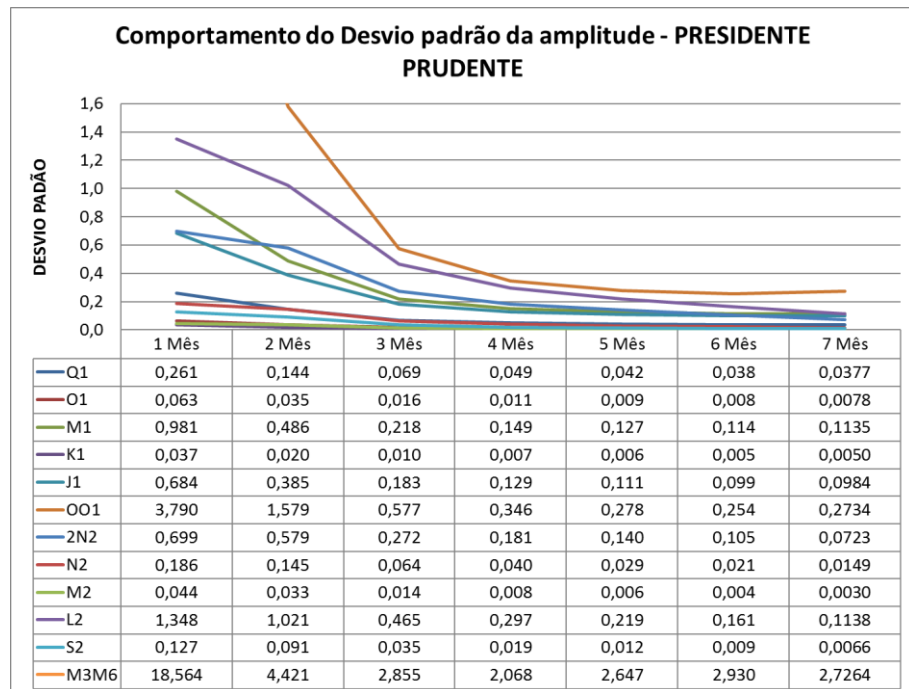
Figura 6 – Modelo de maré terrestre para cidade de Presidente Prudente



Fonte: Autoria própria (2017).

O comportamento da amplitude e da fase das componentes harmônicas foi estudado e comparado mês a mês. Para a amplitude das componentes M₂, K₁ e O₁, um desvio padrão com precisão satisfatória foi atingido no segundo mês de observação, permanecendo estável até o fim do período (Figura 7).

Figura 7 – Comportamento do Desvio Padrão da Amplitude em Presidente Prudente



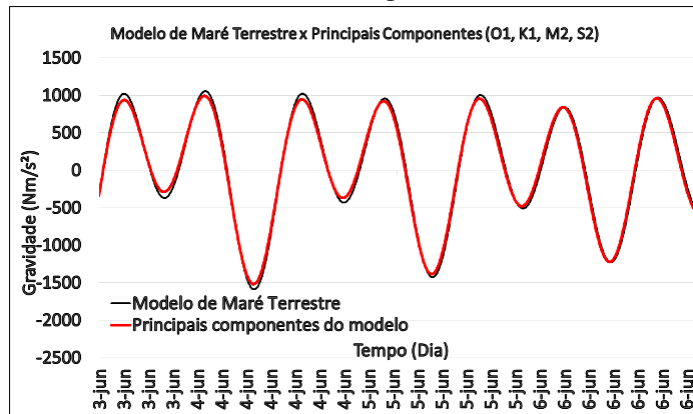
Fonte: Autoria própria (2017).

O desvio padrão para as amplitudes das outras componentes harmônicas tornou-se mais estável a partir do sétimo mês de observação, alcançando os melhores resultados. O mesmo não ocorreu com a fase das componentes, cujo período de observação se mostrou insuficiente, podendo-se inferir que um resultado mais preciso teria sido atingido se a série temporal de coleta de dados fosse maior.

Além disso, não foram incluídas correções de carga oceânica, carga atmosférica, temperatura, pressão e movimento do polo, fatores estes que influenciam diretamente nos resultados. Tais fatores serão considerados em estudos futuros.

As componentes O_1 , K_1 , M_2 e S_2 , retiradas dos dados gravimétricos, foram as que melhor se ajustaram ao modelo de maré terrestre, o que pode ser visto na Figura 8, onde se destacou um período de 3 dias, para melhor observação. Através dessa comparação, é possível concluir que essas são as principais componentes para geração do modelo de maré terrestre.

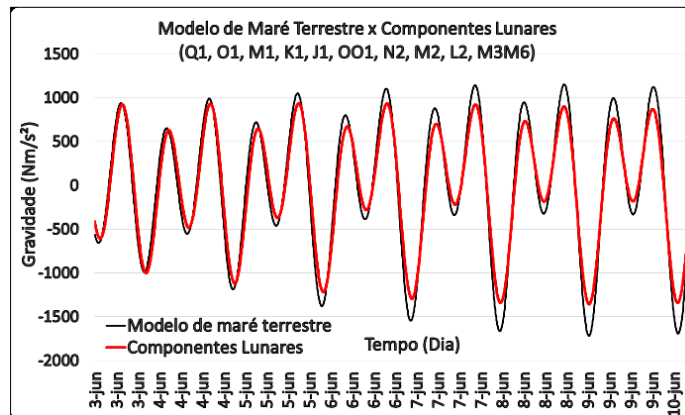
Figura 8 – Comparação entre o modelo de maré terrestre e as principais componentes retiradas da curva gravimétrica.



Fonte: Autoria própria (2017).

O fato de a Lua ser o principal astro perturbador da gravidade na Terra faz com que as componentes lunares tenham grande influência na geração do modelo. Por isso, na Figura 9, realizou-se uma comparação entre as componentes lunares extraídas dos dados gravimétricos e o modelo de maré terrestre. Entretanto, é possível observar pelo gráfico que o modelo gerado somente pelas componentes lunares se afasta muito do modelo de maré terrestre, fato este que não ocorreu na Figura 8, o que evidencia a importância de se considerar a componente solar S_2 .

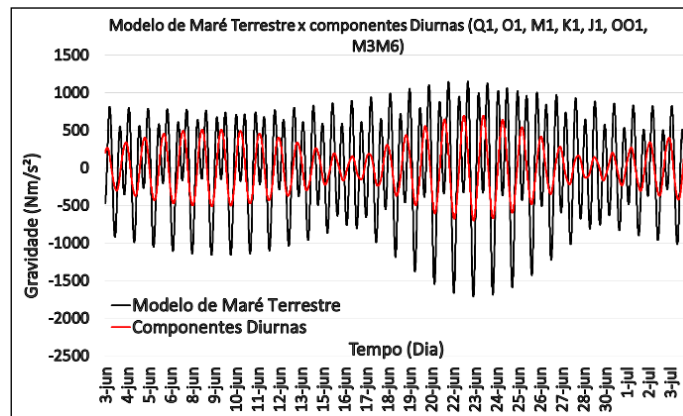
Figura 9 – Modelo de Maré Terrestre X Componentes Lunares.



Fonte: Autoria própria (2017).

A Figura 10 mostra, em um período selecionado, a curva das componentes diurnas sobrepondo-se ao modelo. Por esta comparação, é possível observar onde a influência das ondas diurnas é minimizada.

Figura 10 – Modelo de Maré Terrestre comparado com as Componentes Diurnas.



Fonte: Autoria própria (2017).

Por fim, considerando-se um modelo livre das interferências causadas pela carga oceânica e pelo movimento do polo, como realizado por Benedito (2016), e comparando-o com este modelo preliminar, vê-se que a diferença entre eles pode atingir um valor de até 4 μGals , ou 1,33 cm em sua componente vertical, diferença esta considerada expressiva e que torna este modelo interessante somente para fins educacionais.

CONCLUSÃO

Este estudo cumpriu seu objetivo ao gerar um modelo preliminar de maré terrestre com dados gravimétricos coletados na estação geodésica de Presidente Prudente - SP. Conclui-se que as componentes O_1 , K_1 , M_2 e S_2 , retiradas dos dados gravimétricos, são as principais componentes para geração do modelo de maré terrestre. Além disso, observou-se a importância de se considerar a componente solar S_2 na geração do modelo preliminar de maré terrestre, pois, considerar somente as componentes lunares não produziu um bom resultado.

Observou-se também que, um curto período de observações (período inferior a seis meses) só permite separar, com suficiente precisão, componentes cujas frequências angulares sejam bastante diferentes (FRANCO, 1997), portanto, a fase dos componentes harmônicos necessitaria de um maior período de observação para melhor determinação, o que possibilitaria o desenvolvimento de um modelo mais acurado.

Por fim, conclui-se que este modelo não é suficientemente preciso para aplicações profissionais, já que não leva em conta a influência da carga oceânica, pressão atmosférica, temperatura, movimento do polo, entre outros. Estes fatores, embora importantes, não foram considerados por não fazerem parte do escopo deste estudo, podendo ser considerados em estudos futuros.

Preliminary determination of the earth tidal model for Presidente Prudente/SP

ABSTRACT

The periodic variation in the level of the earth's crust due to the influence of gravitational forces exerted by the Sun and the Moon is called Earth Tide. Recently, studies of different types of water have become more important for accurate orbit determination of satellites, in the increased of precision measurement and the study of elastic properties of the earth. This study aims to determine a preliminary earth tide model for Presidente Prudente in state of São Paulo-Brazil using gravimetric data collected between May and December 2013. Software compatible with the gPhone gravimeter was used in data analysis and determination of harmonic components. Comparisons were made between the tide model and groups of Lunar and diurnal components. It was concluded that the main components for the generation of the earth tide model were O_1 , K_1 , M_2 and S_2 . Finally, it was observed that the non-consideration of the ocean load and the polar movement on the earth tide model causes it to present a discrepancy of up to 4 μGals or 1.33cm in its vertical component, this difference is considered significant and makes this model interesting only for educational purposes.

KEYWORDS: Earth tide. Geophysics. Gravity meters. Gravimetry.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES/Brasil – projeto 01-P-04376-2015) pelo apoio financeiro. Agradecem também ao professor Dr. Denizar Blitzkow e à Dr^a Ana Cristina Oliveira Cancoro de Matos pelo fornecimento de informações em modelamento geofísico e por todo o suporte dado.

REFERÊNCIAS

AGNEW, D. C. **Earth Tides**. University of California San Diego, CA, USA. Elsevier B.V. p 163 -191. 2007.

BENEDITO, P. M. P. **A influência da carga oceânica nos modelos de maré terrestre - estudo de caso em Cananeia, Valinhos e Presidente Prudente**. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2016.

COSTA, D. S. **Variação do Nível Médio do Mar - Técnicas para a Avaliação**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

FRANCO, A. S. **Marés: fundamentos, análise e previsão**. Ed. Diretoria de Hidrografia e Navegação, Niterói-RJ. viii, 268p: il, 1997.

GEMAEL, C. **Introdução à Geodésica Física**. 2^aed. Curitiba, PR: Editora da UFPR, 2002. ISBN 85-7335-029-6.

ICET – International Center for Earth Tides. ETERNA34. Disponível em: <http://www.bim-icet.org/>. Acesso em: 2017.

MELCHIOR, P. **The Tides of the Planet Earth**. [S.l.]: Pergamon Press, 1983.

MESQUITA, A. R., FRANÇA C. A. S. Sumário de Marés Oceânicas, Notas de Aula Preparadas para o Curso de Observacion Y Analysis Del Nivel Del Mar. 1996.

VAN CAMP, M., VAUTERIN. P. Tsoft: Graphical and Interactive Software for the Analysis of Time Series and Earth Tides. **Computers & Geosciences**. p. 631-640. 2005. DOI: 0.1016/j.cageo.2004.11.015.

WAHR, J. M. Body tides on an elliptical, rotating, elastic and oceanless earth. **Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society**, 1981.

YU, H. J.; Guo, J. Y.; Li, J. L.; Mu, D. P.; Kong, Q. L. Zero Drift and Solid Earth Tide extracted from Relative Gravimetric data with Principal Component Analysis. **Geodesy and Geodynamics**, vol. 6, n° 2, p 143 -150. 2015.

Recebido: 07 set. 2016

Aprovado: 03 ago. 2017

DOI: 10.3895/rbgeo.v5n3.5419

Como citar: BENEDITO, P. M. P.; ALBARICI, F. L.; TRABANCO, J. L. A. Determinação preliminar do modelo de maré terrestre para Presidente Prudente/SP. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 5, n. 3, p. 420-432, jul/set. 2017. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Plínio Marcos Piccin Benedito

Est. Estância Árvore da Vida, 000, CEP 13176-050, Sumaré, São Paulo, Brasil.

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

