

PREVISÃO ASTRONÔMICA ATRAVÉS DA OBSERVAÇÃO DAS MARÉS

WOJCIECH KULESZA

Universidade Federal da Paraíba

O estudo das marés constitui um complexo campo de pesquisa e aplicação da Geofísica e da Oceanografia. Elas, porém, fazem parte do cotidiano das pessoas que em nosso país vivem nas proximidades do mar. As populações litorâneas leigas fazem uso de um saber prático para poder prever seus eventos principais, relacionados principalmente com a pesca e a navegação. Para isso, como seria de esperar, recorrem aos movimentos do Sol e da Lua. Graças ao comportamento regular das marés ao longo do Atlântico Sul, elas facilmente identificam uma série de periodicidades que lhes são de extrema valia para sua sobrevivência. Porém, como sói acontecer, o currículo das escolas de 1ª ao 3ª graus fazem apenas uma breve alusão à influência gravitacional da Lua como causa das marés, sem procurar dar conta destas periodicidades⁽¹⁾. Além disso, as escolas próximas ao litoral, dispondo de um fenômeno periódico tão importante às suas vistas, não procuram fazer observações sobre o movimento das marés, mesmo aquelas que possibilitam, através de medidas da altura do mar numa estaca fincada na praia, o estudo das primeiras noções de funções periódicas e seus gráficos. Causalmente relacionadas com o movimento do sistema Terra-Sol-Lua, a observação sistemática das marés pode nos conduzir a inferência sobre este sistema que são passíveis de ser cotejadas com as efemérides astronômicas. Vale observar que esta concordância de um modo geral é apenas fortuita, devido à complexidade do fenômeno. No entanto, devido às peculiaridades geográficas de nosso litoral, podemos fazer inferências razoavelmente exatas do movimento do Sol e da Lua a partir da observação das marés (historicamente, uma das primeiras estimativas da massa da Lua foi feita utilizando-se a diferença de altura das marés, de modo semelhante ao cálculo que faremos mais adiante)⁽²⁾. Essa articulação de um movimento cotidiano com um fenômeno cósmico traz inúmeras implicações educacionais, principalmente no que se refere ao desenvolvimento de uma atitude científica, além de constituir um transdutor entre a linguagem dos pescados

res e cientistas, tornando mais previsíveis as incursões científicas destes últimos, bem como de seus banhos e pescarias de mar. Em seguida, mostraremos como é possível, partindo de um conhecimento de Física ao nível do curso básico da universidade, reconstruir os conhecimentos de nossa população litorânea sobre as marés, bem como suas limitações.

Inicialmente, vamos considerar o sistema Terra-Lua de uma forma estática, supondo a Terra coberta por uma camada uniforme de água de pouca profundidade comparada com o raio terrestre (Figura 1).

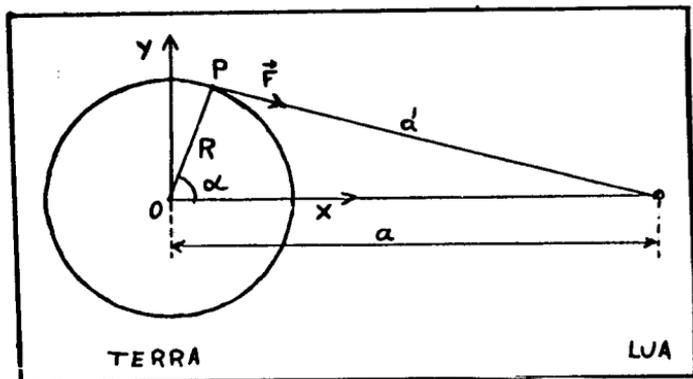


fig. 1

A força gravitacional exercida pela Lua sobre uma massa unitária, no ponto $P(x,y,z)$ da superfície terrestre, tem componentes:

$$F_x = G \frac{M_L}{d^2} \left(\frac{a-x}{d} \right)$$

$$F_y = - G \frac{M_L}{d^2} \left(\frac{y}{d} \right)$$

$$F_z = - G \frac{M_L}{d^2} \left(\frac{z}{d} \right)$$

onde G é a constante de gravitação e M_L é a massa da Lua.

Como $x, y, z \ll d$ colocamos:

$$F_y \approx - G \frac{M_L}{a^3} y$$

$$F_z \approx - G \frac{M_L}{a^3} z$$

simétricas como era de se esperar (a representa a distância média Terra-Lua).

No caso da componente x, que nos interessa, não posso igualar $d=a$, senão $x=0$. Faço então, $d=a-x$. Assim,

$$F_x = G \frac{M_L}{(a-x)^2} = G \frac{M_L}{a^2 (1 - \frac{x}{a})^2} = G \frac{M_L}{a^2} (1 + \frac{2x}{a})$$

A diferença ΔF entre a força exercida pela Lua na superfície e a exercida no centro da Terra ($x=y=z=0$), vale:

$$\Delta F_x = \frac{2 G M_L}{a^3} x$$

$$\Delta F_y = - \frac{G M_L}{a^3} y$$

$$\Delta F_z = - \frac{G M_L}{a^3} z$$

Notando que ΔF_y e ΔF_z são do mesmo tipo da atração gravitacional exercida pela Terra no ponto P, escrevemos:

$$\Delta F_x = - \frac{G M_L}{a^3} x + 3 \frac{G M_L}{a^3} x$$

O primeiro termo, semelhante às componentes y e z, aumenta o valor de g, mas muito pouco, pois $\frac{M_L}{a^2} \ll \frac{M_T}{R^2}$. De qualquer forma, não provoca nenhuma assimetria. Já o segundo termo faz com que haja um campo de força em direção à Lua, de valor absoluto máximo para $|x|=R$, mas sentidos opostos em $x=R$ e $x=-R$.

Graficamente, assim podemos visualizar o resultado:

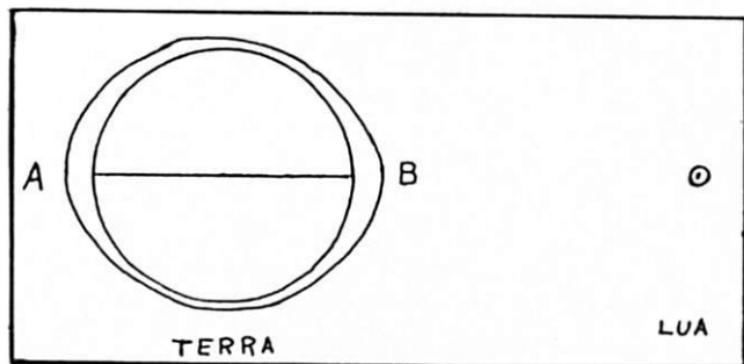


fig 2

Haverá, portanto, a formação de duas protuberâncias de água em A e B, na linha que une o centro da Terra ao centro da Lua. Podemos estimar a altura dessas protuberâncias considerando que um elemento de massa estará em equilíbrio na superfície. A força que a Lua exerce sobre ele no ponto A será:

$$\Delta F = \frac{2 G M_L R}{a^3}$$

no sentido da Lua. A força devida à Terra, vale:

$$\frac{G M_T}{r^2}$$

e a variação de F com r, vale:

$$\frac{2 G M_T}{r^3} \Delta r$$

Portanto, para que o elemento de massa esteja em equilíbrio, ele terá que se deslocar de tal modo que

$$\Delta F = \frac{2 G M_L R}{a^3} = \frac{2 G M_T \Delta r}{r^3}$$

como $\Delta r \ll R$, temos $r = R$ e assim

$$\Delta r = \frac{R^4 M_L}{a^3 M_T}$$

Substituindo as grandezas pelos seus valores numéricos, obtemos

$$\Delta r = 36 \text{ cm}$$

valor muito menor ao que é normalmente observado em nossas praias, que é da ordem de 2m. Voltaremos mais tarde a este ponto.

Até agora consideramos tudo parado. Considerando agora a rotação da Terra em torno do seu próprio eixo e supondo AB um diâmetro equatorial, um observador em A cruzará com 2 marés altas e 2 baixas por dia, com períodos constantes de 12 horas. Temos aí a origem da chamada componente semi-diurna da maré: temos 2 por dia. Como a Lua também se move em torno da Terra na mesma direção (ambas revolucionam em torno do Sol) são necessários cerca de 50min de rotação da

Terra para o ponto A voltar à posição inicial em relação à Lua, o que faz o período da maré semi-diurna ser de 12h25min. Os dados da Tabela 1 representam a diferença de tempo entre duas preamares sucessivas no porto de Cabedelo, PB, nos primeiros dias de março de 1984.

Tabela 1 - Diferença de tempo entre duas preamares sucessivas em Cabedelo, Março/1984.

12 h 12 min	12 h 18 min
12 h 18 min	12 h 53 min
12 h 51 min	12 h 17 min
12 h 19 min	12 h 15 min
12 h 12 min	12 h 15 min

Com estes dados obtemos um valor médio de 12h 23min, bem de acordo com o valor astronômico de 12h25min. Além disso, como as preamares sempre se atrasam de um dia para o outro, podemos prever que a Lua se atrase de 50min, de um dia para o outro, para nascer!

Tal como o Sol no decorrer do ano, a altura da Lua varia durante o mês de 27,2 em 27,2 dias, com uma declinação ao Norte e ao Sul aproximadamente igual à declinação do Sol ($23\frac{1}{2}$). Este fato modifica a altura das marés do mesmo dia, conforme vemos na Figura 3.

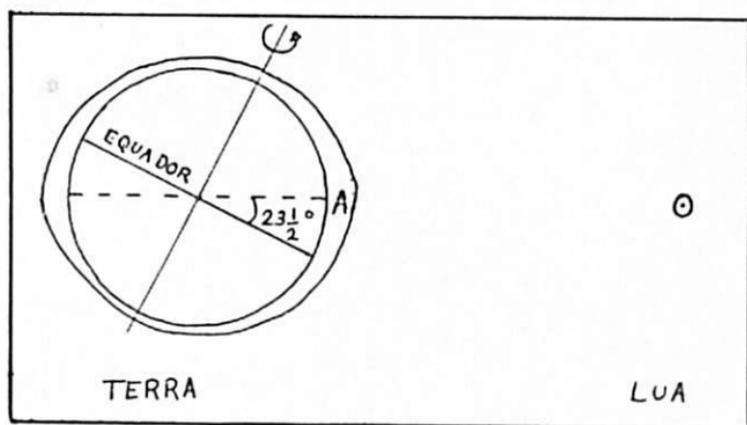


Fig 3

Um observador situado no ponto A (sobre o Trópico de Câncer) cruzará com preamares de alturas diferentes, verificando assim a chamada desigualdade diurna das marés⁽³⁾. Esta será máxima na posição do dia

grama e terá um período de aproximadamente 14 dias entre máximos. Esta desigualdade será mínima quando a Lua estiver no plano do Equador, repetindo-se o fato aproximadamente 14 dias depois. A Figura 4 representa a altura da maré em função do tempo para os primeiros dias de março e 14 dias depois. Como era de se esperar, foi nestes dias do mês de março que se verificou a desigualdade diurna máxima!

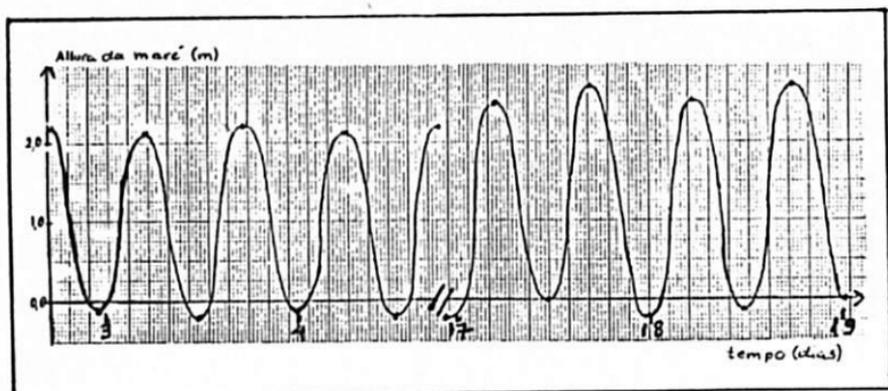


fig. 4

Vamos agora considerar a influência do Sol. O raciocínio é análogo, somente que, devido à enorme distância da Terra ao Sol, seu efeito é um pouco menor que a metade do da Lua ($5/11$). Assim, a protuberância produzida pela ação gravitacional do Sol será $\Delta r = 16$ cm. Consideramos então o efeito total como uma superposição das ações do Sol e da Lua. Esperaremos portanto que o nível d'água seja maior quando os efeitos dos dois astros se somam, isto é, quando estão em conjunção (lua nova) ou oposição (lua cheia). São as chamadas marés de Lua ou marés vivas. As menores marés se darão nas quadraturas, quartos crescente e minguante. No mês de março, no porto de Cabedelo, as maiores marés ocorreram nos dias 17 e 18 (2,7m), exatamente em época de Lua cheia (2,2m na Lua nova), enquanto as menores (1,7m) ocorreram exatamente quando a Lua começava sua fase crescente ou minguante. Pela menor amplitude das ondas que se somam nas quadraturas, esperamos também uma maior incerteza no período entre as marés. De fato, no dia 10, quarto crescente, a diferença de tempo entre duas preamares sucessivas foi de 13h 29min, que contrasta vivamente com os períodos nos primeiros dias de março, época de Lua nova.

A declinação do Sol também se faz sentir. Como mostramos no

caso da Lua, a declinação tende a diminuir a altura das marés e portanto esperaremos uma altura maior durante os equinócios. De fato, as maiores marés de 1984 ocorreram nos dias 17, 18 de março e 26 de setembro (2,7m), enquanto na época dos solstícios, durante as sizíngias, as marés não passaram de 2,4m. Podemos prever através da maré quando está chegando a primavera!

Outra coisa que observamos em 1984 é que, de janeiro a junho as preamares de Lua cheia sempre foram superiores às preamares de Lua nova, enquanto que de julho a dezembro ocorreu o inverso. A mudança se deu nos solstícios, quando as marés foram aproximadamente iguais. Vemos portanto que a constância da direção do eixo da Terra em relação ao plano da órbita Terra-Sol, nos faz distinguir a Lua nova da Lua cheia, dependendo da época do ano. Este fato é utilizado pelos pescadores, pois certas pescas são melhores com Lua cheia e maré baixa, enquanto outras são melhores na Lua nova e maré baixa.

Outra alteração observável da altura das marés é devida à variação da distância Terra-Lua, dando origem à chamada maré de perigeo. Quando se conjugam um solstício, uma sizíngia e um perigeo da Lua, temos a chamada maré grande, que varre nossas ruas litorâneas (meses de março a setembro).

Como vimos, a teoria de equilíbrio não dá conta da altura das marés. Mesmo que incluamos a ação centrífuga devido à rotação do sistema Terra-Lua, o que diminuiria a aceleração da gravidade na superfície terrestre de aproximadamente $\omega^2 R$, onde ω é a velocidade angular da Terra, teríamos uma correção mínima na altura da protuberância. Dessa forma não damos conta da altura das marés observadas, que no Brasil chegam a atingir 8m, no Maranhão (a altura das marés é sempre referida à média anual das baixamares mais baixas). Acontece que a onda progressiva ao encontrar os continentes, baías, golfos, etc., é perturbada, produzindo oscilações forçadas estacionárias com fraco amortecimento, que podem entrar em ressonância com a onda exterior e alcançar alturas consideráveis (até 15m). No caso do Atlântico Sul, devido à geografia da costa, tanto da América como da África, este fenômeno só se manifesta de forma notável localmente. Vale lembrar que o problema como um todo é extremamente complexo e nossas considerações só se aplicam ao nosso caso (sempre que a componente semi-diurna seja predominante, o que pode ser verificado analiticamente)⁽⁴⁾. Outra dificuldade é que, pelo nosso modelo, esperaríamos que a Lua levantasse a maré, isto é, que quando ela estivesse no zênite, teríamos a preamar máxima, o que não se verifica⁽⁵⁾. No entanto, num sistema estacionário, esperaríamos que a diferença de tempo entre os máximos (nas sizíngias) fosse aproximadamente constante, fazendo com

que o retardo se mantivesse fixo. De fato, conforme podemos verificar na Tabela 2, as preamares ocorreram aproximadamente nos mesmos horários, o que é uma coisa notável e muito bem aproveitada pelos pescadores para programarem suas viagens.

Como observação final, é preciso dizer que em Cabedelo não há mareógrafo e portanto todos os dados foram retirados da tabela de marés do Departamento Nacional de Portos e Vias Navegáveis - DNPVN - para o porto de Cabedelo, utilizada para a operação do porto, que não é dos mais profundos. Assim mesmo, fizemos observações "a olho nu" nas proximidades que, descontando-se o "estabelecimento de porto" de 40 min na hora indicada pela tabela, confirmaram as características apresentadas. Espera-se com este trabalho estimular a construção de mareógrafos para uso didático.

Tabela 2 - Horário das preamares nas sizígias de 1984 no porto de Cabedelo.

Fonte: DNPVN

LUA NOVA	LUA CHEIA
23h 30min	23h 16min
23h 13min	23h 49min
23h 18min	23h 28min
23h 16min	23h 04min
23h 20min	23h 22min
22h 55min	23h 03min
23h 25min	23h 28min
23h 11min	23h 07min
22h 55min	23h 12min
23h 18min	22h 44min
22h 58min	22h 48min
22h 41min	23h 06min
23h 15min	

NOTAS

- (1) É absolutamente incrível como são desprezados os sistemas naturais e cotidianos no ensino de Ciências. O estudo de modelos abstratos representa nas ciências exatas o mesmo papel nefasto do ensino livresco de humanidades.

- (2) Citado por Thomas W.B. Kibble, "Mecânica Clássica", São Paulo, Polígono, 1970, p. 123.
- (3) A diferença entre as alturas da preamar no ponto P e a altura no Equador (ver Figura 1), será proporcional ao $\cos \alpha$, o que dá uma variação máxima de 10% (para $\alpha = 23,5^\circ$) entre as alturas de duas preamares sucessivas e portanto, no nosso caso, da ordem de 20 cm. Assim, podemos também avaliar a declinação da Lua pela observação das marés.
- (4) Ver a respeito, Luiz Lozano Calvo, "Introducción a la Geofísica", Madrid, Paraninfo, 1972, p. 123. O leitor interessado poderá recorrer à excelente bibliografia em português produzida pela Marinha do Brasil, da qual recomendo, embora possa haver publicação mais recente, o livro texto de marés de Alberto dos Santos Franco, "Curso de Hidrografia para Oficiais", Marinha do Brasil, Diretoria de Hidrografia e Navegação, 1964.
- (5) É importante observar que em nosso modelo, embora partamos de uma situação estática, estamos pressupondo a rotação da Lua em torno da Terra. Assim, a configuração esboçada na Figura 2 só se mantém instantaneamente e, decorrido um lapso de tempo, a água acabaria por se acumular em frente à Lua, formando uma única protuberância em B. O que faz com que a configuração se mantenha estacionária é justamente o deslocamento da Lua em torno da Terra. Dessa forma, teríamos a ocorrência de duas marés por mês (o período de rotação da Lua em relação à Terra) com as protuberâncias estritamente alinhadas com a passagem meridiana da Lua. Introduzindo agora a rotação da Terra em torno de seu próprio eixo, que faz com que haja a formação de duas marés por dia, a situação muda de figura, pois nesse caso é a componente tangencial e não mais a radial, a principal responsável pelo surgimento das marés. Naturalmente, esta verdadeira força de arrasto se anula quando da passagem meridiana da Lua, fazendo com que haja uma defasagem entre essa passagem e a ocorrência da maré cheia (o intervalo de tempo médio expressando essa defasagem nas sizígias para um determinado local é o que se denomina "estabelecimento de pôrto") constituindo portanto, na teoria do equilíbrio, a explicação básica desse fenômeno. Agradeço a um referee desta Revista por ter me chamado a atenção para este ponto fundamental no que se refere à teoria moderna das marés.