

LAS MAREAS

Luis Pardillo Vela. 5 de febrero 2024

Detrás del fenómeno de las mareas hay una física y unas matemáticas muy complejas. Tanto que pensé si merecía la pena exponer este tema, pero me decidí porque hay algunos hechos relacionados con las mareas que muchos desconocen. Los cálculos matemáticos los podemos dejar atrás, pero algunos conceptos físicos no podemos obviarlos, al menos los más importantes, incluso así habrá que simplificarlos y utilizar estrategias de forma que todos podamos entenderlos.

El primer científico en proponer una explicación racional para las causas de las mareas fue el astrónomo y matemático griego Seleuco de Seleucia en el siglo II a.C. el cual ya teorizó que las mareas eran causadas por la Luna.

Y en el siglo XVII el astrónomo y matemático Galileo Galilei concluyó que en las mareas también intervenía la posición del Sol respecto a la Luna y la Tierra.

La teoría moderna de las mareas se basa en la ley de la gravitación universal de Isaac Newton, formulada en 1687.

Esta ley física nos dice que la fuerza atracción entre dos masas es igual producto de ellas y dividida entre el cuadrado de la distancia entre sus centros de masas, y todo ello multiplicado por la constante de gravitación universal G , es decir $F=G \cdot M \cdot m/d^2$.

Si hacemos cálculos tenemos que la Tierra es atraída por el Sol con una fuerza que es 178 veces la que ejerce la Luna sobre la Tierra, pero si hacemos los cálculos sobre una masa m de mar situada en la superficie de la Tierra resulta que la fuerza que ejerce la Luna es 2,2 veces la que ejerce el Sol sobre esa masa m de agua. Esto puede resultar chocante, pero ya advertí que la física y matemática que interviene en las mareas es muy compleja, pero lo cierto es que todos los que de alguna forma están interesados en las mareas, ya sea por el baño, pesca, marisqueo o actividades de recreo, saben que la Luna es el principal factor que influye en las mareas.

Antes de entrar en detalles técnicos veamos algunos términos sobre la marea.

- **Marea alta o pleamar**: momento en que el agua del mar alcanza su máxima altura.
- **Marea baja o bajamar**: situación opuesta, en la que el mar alcanza su menor altura.
- **Mareas vivas o de sicigia (o reunión)**. Es cuando la posición de los tres astros, Sol, Luna y Tierra se encuentran en línea y sus efectos se suman por lo que se producen las pleamares de mayor valor. Estas **Mareas vivas** se produce en Luna llena y nueva, llamadas "Marea viva de oposición" y "Marea viva de conjunción" respectivamente.
- **Mareas muertas o de cuadratura**: Es cuando la Luna y el Sol forman un ángulo de 90° con la Tierra, eso ocurre cuando la Luna está en cuarto creciente o menguante. En estos casos las fuerzas de atracción actúan en direcciones opuestas, lo que disminuye su efecto y la mayor atracción de la Luna se ve disminuida por efecto de la del Sol dando mareas de menor magnitud, *las mareas muertas*.

Pero aquí tenemos otra complicación física de las mareas, y es que la marea viva más alta no se produce exactamente el día de Luna llena o nueva ni la marea muerta menos alta en el día de Luna en cuarto menguante o creciente, ambas se producen

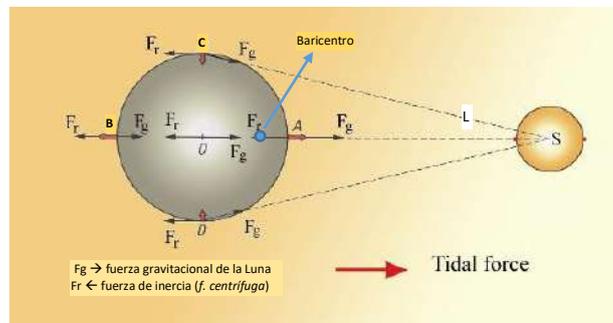
uno o dos días después, fenómeno que se denomina “**edad de la desigualdad de la fase**” y la explicación es compleja como extraño es su nombre.

Por otra parte, el movimiento de traslación de la Luna alrededor de la Tierra no es circular, es una elipse, siendo la Tierra uno de los focos, por lo que hay momentos en que se encuentra más lejos de la Tierra, **Apogeo** ($\approx 406\,000$ km), y momentos en que se encuentra más cerca, **Perigeo** ($\approx 356\,000$ km).

Cuando una marea de sicigia coincide con la Luna en perigeo, se suman ambos factores provocan mareas muy altas, mareas vivas de perigeo, y ocurre 6 a 8 veces al año. **Pero como también influye el Sol, tenemos que dentro de las mareas vivas (sicigia) de perigeo hay dos casos con valores máximos** y son las que se producen en los equinoccios de otoño y primavera, cuando el sol se encuentra alineado con el ecuador, dando lugar a las mayores mareas, **sicigias en perigeo con el Sol en equinoccio**, esta combinación es menos frecuente, ocurre cada ≈ 18 años (2015→2033).

Ahora vamos ya a explicar cómo se producen las mareas.

Si tenemos **Sol, Luna y Tierra alineados en ese orden** las atracciones de ambos se **suman** y se producen mareas altas vivas, **pero ¿qué ocurre en el mar situado en las antípodas?** lo lógico sería pensar que se contraiga (marea baja), **pero no, también hay marea alta. La explicación no es simple, ya lo advertí, y para explicarla vamos a suponer solo el sistema Tierra-Luna con la Tierra totalmente rodeada por un mar, y con la situación hipotética de que la Tierra y la Luna estén quietas.** Entonces sobre el mar solo actuaría la fuerza de atracción de la Luna y esta será más fuerte en el punto más cercano a la Luna, que llamaremos A, provocando ahí un abultamiento del mar, es decir una marea alta, que irá disminuyendo a medida que nos alejamos de A **y en la antípoda B la atracción de la Luna ya estaría actuando pegando el mar a la Tierra, se formaría por tanto una marea baja; ese es el razonamiento que hacemos al pensar que si en A es alta en la antípoda B será baja.** Pero resulta que la Luna no está simplemente girando alrededor de la Tierra, **hay algo que muchos desconocen y que es fundamental para las mareas, y es que la Tierra y la Luna están girando una alrededor de la otra**, aunque el centro de giro (baricentro) está en el interior de la Tierra, se adentra un 25% del radio, **y este giro de la Tierra dentro del sistema Tierra-Luna produce una “fuerza de inercia” o “fuerza centrífuga”** que tira del mar hacia afuera en el sentido del giro, es como la sensación que sentimos cuando un coche gira con velocidad en una curva o lo que sentimos en ciertas atracciones de feria. **Pues bien, en el punto A más cercano a la Luna, la fuerza de atracción lunar es más fuerte que esa “fuerza centrífuga” provocando ese abultamiento hacia la Luna, una marea alta. Pero en el punto B o antípoda, la “fuerza centrífuga” es mayor al estar más alejado del centro de giro y ser menor la fuerza de atracción de la Luna al estar el punto antípoda más lejos, el resultado es una fuerza que aleja el mar de la Tierra, otra marea alta como ocurre en A. La fuerza resultante en A o en B es la que se denomina fuerza de marea.**



Veamos ahora como se producen las mareas bajas. Supongamos que A y B sean el Este y Oeste de la Tierra, pues bien, sean los puntos C y D el Norte y Sur, ahí ocurrirá que se produce una diferencia vectorial entre la “*fuerza centrífuga*” y la fuerza de atracción lunar, dando como resultado una fuerza que tira del mar hacia el interior de la Tierra, es decir, una marea baja, tanto en C como en D.

En principio esas cuatro posiciones A y B de mareas altas y C y D de bajas, son fijas en el sistema Tierra-Luna, **y como la Tierra está girando sobre si misma, pasará por esos puntos A, B, C y D cada 24 encontrándose con marea alta, baja, alta y baja en un día.** Pero resulta que la Luna tampoco está quieta, y en lo que la Tierra gira los 360° de un día, la Luna ya se ha desplazado en su órbita y la Tierra tiene que girar 12,5° más para que un mismo punto de la Tierra vuelva a estar orientado frente a la Luna, y esos 12,5° representan unos 50 minutos, siendo esta la causa del retraso de las mareas con respecto al día anterior. Este retraso de 50 minutos entre mareas es una aproximación que se ve afectada por factores astronómicos y de geografía local. **Hemos visto cuatro mareas, dos altas y dos bajas al día, que es lo más habitual,** pero hemos partido de un supuesto muy simple “**con toda la Tierra completamente cubierta por una mar**”, pero la realidad es muy distinta, hay mares abiertos y mares cerrados, continentes y costas de muy distintos tipos, profundidades y topografías diferentes, bahías, ensenadas, golfos y muchas variables que juegan un papel muy importante en la producción de las mareas, tal es así que no todos los lugares de la Tierra experimentan las mismas condiciones mareales de dos altas y dos bajas. **Hay tres tipos de mareas, la más frecuente, la que la mayoría conocemos,** se denomina marea **semidiurna**, ya que el ciclo entre dos mareas o dos mareas bajas ocurre aproximadamente cada 12 horas y 25 minutos. Son comunes a lo largo de las costas orientales de América del Norte y Australia, la costa oeste de África y la mayor parte de Europa.

Sin embargo, en algunas costas, factores locales como la topografía submarina y la forma de la costa, pueden influir en el patrón de las mareas y dar lugar a tener un patrón denominado **mixto**, que también son dos altas y dos bajas, pero con notoria diferencia de altura entre las dos altas y entre las dos bajas. Son típicas de la costa del Pacífico de América del Norte, costa de Chile, mar del Caribe, y otros lugares al este de África y Asia. **El caso menos frecuente es el denominado diurno**, una marea alta y una marea baja por día, comunes en el Golfo de México, a lo largo de la costa oeste de Alaska, y en partes del sudeste asiático.

Ya vimos por qué hay, mareas vivas y mareas muertas, pero eso de 2,5 m de diferencia entre alta y baja en las mareas vivas o los solo 0,8 m en las mareas muertas a lo que estamos habituados en Canarias, no tiene nada que ver con otras zonas de la Tierra. Así la Bahía de Fundy, en Canadá, tiene mareas de hasta 17 m, en Mont Saint-Michel en Francia 14 m, o en Kimberley en Australia 12 m, en el lado contrario tenemos los mares cerrados como el Mediterráneo con máximos de 0,5 m, y 0,2 en el Báltico.

¿Y qué pasa? ¿no es la misma Luna y Sol para todos? Los datos de los modelos físico-matemáticos con la Luna y el Sol para una Tierra con un mar que la rodee totalmente dan una altura de marea de ≈ 1 m, pero **aun siendo cálculos excesivamente complejos, son solo un modelo con un mar continuo**, aplicable a mareas en medio del Pacífico o del Atlántico, pero que nada tienen que ver con la realidad de las costas, donde influyen muchísimos factores como la topografía del fondo marino con su forma y profundidad, la geometría y forma de la costas, la presencia de bahías, estuarios y ensenadas, la convergencia de corrientes marinas, la latitud geográfica, los efectos por resonancia, mares abiertos o cerrados y muchísimos más factores. Todos ellos influyen dando la realidad de los resultados tan dispares que acabamos de ver, como los 17 m de la Bahía de Fundy o los solo 0,5 m del Mediterráneo o 0,2 m del Báltico.

Pero aparte de la influencia de la Luna y el Sol o la influencia geográfica, que es importantísima localmente, no podemos olvidar la influencia meteorológica, que también es importante, así la baja presión barométrica de una borrasca, hace que la marea suba unos centímetros extras, o que la presión alta de un anticiclón la rebaje unos centímetros, concretamente una variación de 1 milibar, respecto a los 1013 de la presión normal, podría representar un cambio de 1 cm en el nivel del agua, es lo que se conoce como el efecto «barómetro inverso», siendo su influencia más notoria en mares cerrados. También influye la velocidad y dirección del viento, sobre todo en costas poco profundas. A estas influencias se les denomina **marea meteorológica**. Las mareas altas de Venecia (*acqua alta*) están muy influenciadas por la marea meteorológica.

¿Y con todas estas dificultades cómo es posible predecir las mareas de cada día? Precisamente por esa extrema dificultad, las predicciones de mareas no se realizan por cálculos ni se usan potentes ordenadores. De forma muy simple y eficaz se calculan de forma empírica a partir de una serie temporal de datos obtenidos a lo largo de muchos años por los mareógrafos, aparatos que miden en tiempo real la altura de las mareas y que están instalados en puertos y lugares de interés. **Pero a esa tabla de predicción obtenida siempre se le debe añadir la influencia de la presión barométrica ya comentada, 1 cm por milibar**, así una borrasca de 993 mbar podría elevar la marea en 20 cm y un anticiclón de 1033 mbar podría rebajarla en 20 cm.

Y un apunte sobre la fuerza de marea, la Luna no tiene mares, pero la Tierra también

ejerce fuerza de marea sobre ella y ésta es la que en tiempos geológicos fue frenando la velocidad de rotación de la Luna y terminó acoplando o sincronizando el movimiento de rotación de ella con el de la rotación de la Tierra, llamado *rotación sincrónica* o *acoplamiento de marea*, siendo esta la causa por la que siempre vemos la misma cara de la Luna desde la Tierra, ya que tarda el mismo tiempo en dar una vuelta alrededor de la Tierra que en girar sobre su propio eje.