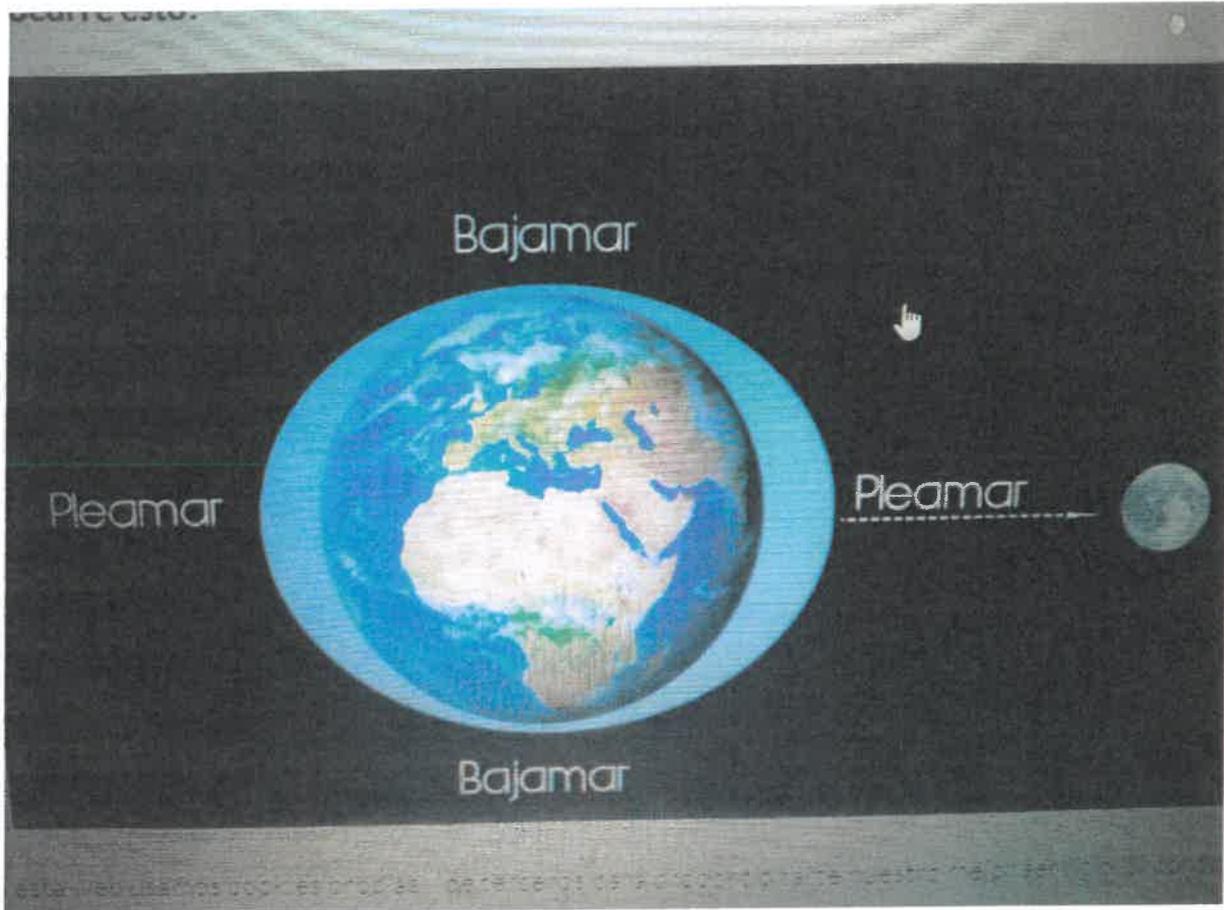


## NO NOS MAREEMOS CON LAS MAREAS,-



Paseando por cualquier playa o puerto de la costa, siempre he tratado de entender y buscar las causas de estos movimientos diarios de las variaciones del nivel de las aguas. Leyendo sobre el tema, he visto que se dice que, sobre todo la Luna y en menor medida el Sol, son los causantes de las mareas debido a la atracción gravitatoria que ejercen sobre las aguas de los océanos.

Dándole vueltas al tema he llegado a algunas conclusiones, que son las que expongo a continuación.

Voy a comenzar con una afirmación que en principio puede parecer extraña: "Las causas de las mareas no son las atracciones verticales que la Luna y el Sol ejercen sobre el agua de los océanos" No es la fuerza de atracción tirando hacia "arriba" su causante.

Para demostrar esto vamos a poner dos ejemplos, el primero será calcular la relación entre la fuerza de atracción ejercida por el Sol sobre un litro de agua de mar y la fuerza ejercida sobre ese mismo litro por la Luna. Al ver el resultado, comprobaremos que no es la atracción directa de estos dos astros sobre el agua solamente lo que puede ser la causa de las mareas.

A continuación veremos la relación entre el tiempo que pasa entre dos pleamares sucesivas y el paso de luna por el meridiano. Con este ejemplo veremos que existe una relación entre ambos fenómenos, pero no explica tampoco que haya dos pleamares durante un día, cuando la Luna realiza

un solo pase al día por el meridiano, y también tiene lugar una pleamar en el extremo opuesto de la Tierra, no enfrentado con la Luna.

Vamos a calcular las fuerzas de atracción del Sol y de la Luna sobre un objeto que tenga una masa de 1 kg., por ejemplo un litro de agua.

Sabiendo las distancias a la Tierra tanto la del Sol como la de la Luna y sus respectivas masas, no hay más que aplicar la Ley de Gravitación universal, y estas dos fuerzas son  $F_s = K \cdot M_s \cdot 1 / D_s^2$  y  $F_l = K \cdot M_l \cdot 1 / D_l^2$ . Los valores de estas dos fuerzas se obtienen sustituyendo en estas fórmulas los valores de las masas y distancias del Sol y de la Luna. Obtenemos,  $F_s = 0,0059$  N y  $F_l = 0,000034$  N, y de ahí,  $F_s / F_l = 173$ . Es decir, el Sol ejerce aproximadamente una atracción 173 veces mayor que la Luna sobre cualquier elemento que esté en la Tierra, por ejemplo sobre el agua de los océanos.

Se sabe que la influencia de la Luna en las mareas es mayor que la del Sol, luego no es solo la atracción vertical de estos dos astros la causante de las mareas, si esto fuera así la principal causa de las mareas sería la atracción gravitatoria del Sol, y la de la Luna sería despreciable.

El estudio y cálculo completo de las mareas es muy complicado, por lo que para su comprensión se hacen diversas simplificaciones, y poco a poco se van añadiendo supuestos nuevos más generales..

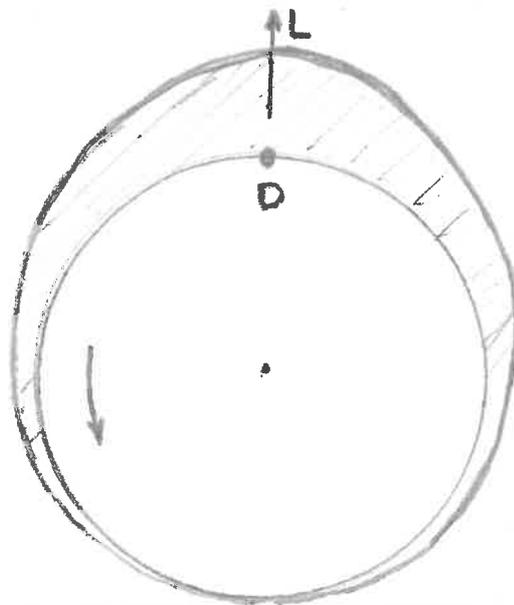


Figura 1.-

Si pensásemos que la atracción vertical de la Luna (y también la del Sol) puede ser la causa de las mareas fijémosnos en la figura 1. Para simplificar, solo estudiaremos en principio el caso de la Luna. Tenemos a Donosti (D) en un momento, enfrentado a la Luna (L), y si toda la Tierra estuviera cubierta por una lámina de agua, en el supuesto de que la marea es producida solamente por la atracción "vertical" de la Luna, y esta atracción produjera instantáneamente su efecto, habría un abultamiento del nivel del agua apuntando hacia la Luna en ese instante.

Esto es lo que se llama pleamar. Doce horas más tarde la Tierra habría girado media vuelta y el abultamiento se produciría en el punto opuesto a Donosti, (Figura 2) donde tendríamos una bajamar, y 24 horas más tarde Donosti estaría enfrentado de nuevo a la Luna y tendríamos la siguiente pleamar.

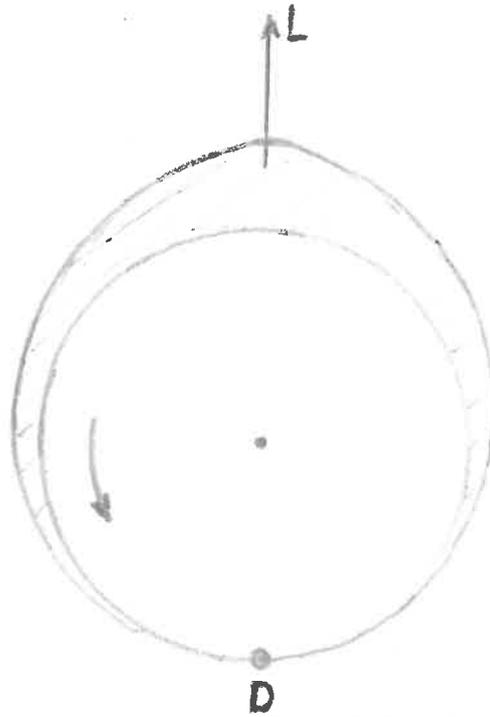


Figura 2.-

Esto no es exactamente así porque la Luna también gira en el mismo sentido, dando una vuelta completa de  $360^\circ$  alrededor de la Tierra cada 28 días aproximadamente. Cada día  $360^\circ/28=13^\circ$ , por lo que la pleamar en Donosti sería no después de 24 horas, sino después de 24 h. más  $24/28=0,85$  horas, es decir 24 h:50 m., debido a que la Luna también ha avanzado esos  $13^\circ$ . Ver la figura 3.

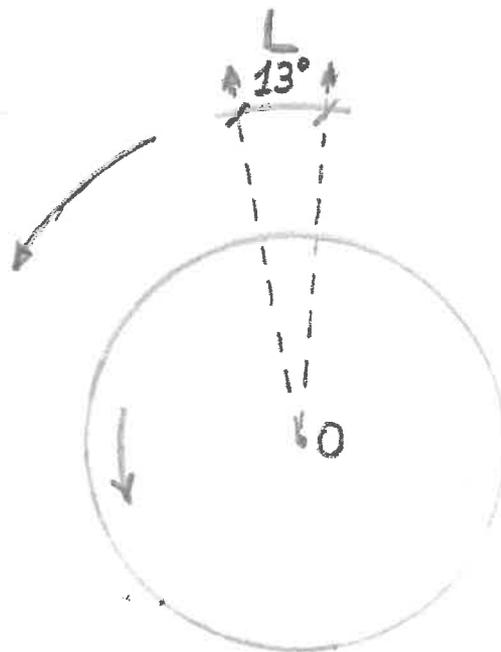


Figura 3.-

Comparando este resultado con lo que ocurre en la realidad, vemos que aparentemente esto si nos explica que haya pleamares cada 24 h. 50 m., luego parece que no andamos del todo descaminados.

Concretamente en Donosti el 30 de abril de 2021 hubo una pleamar a las 7,32 y el 1 de mayo hubo otra pleamar 24 h. 50 m. después, a las 8,22. Esos días, el paso de la Luna por el meridiano fué aproximadamente dos horas y media antes de las pleamares. Esto es debido a que aunque la Luna esté en el lugar más propicio para que se produzca la pleamar, debido a la inercia del agua, se necesita un tiempo de respuesta para que este agua se desplace hasta el punto donde tiene lugar la pleamar.

No debemos cantar victoria, pues entre estas dos pleamares hubo otra aproximadamente en el tiempo medio entre las dos. Nos hemos quedado cojos, con la aceptación de que las mareas son debidas a la atracción vertical de la Luna sobre las aguas de los océanos, solo explicamos parte de lo que sucede. Concretamente hubo otra pleamar a las 19,53 del día 30 de abril, que no es explicable solamente con lo que hemos visto. Es decir que si las pleamares se debieran a la atracción vertical de la Luna sobre al agua de los océanos, estas tendría lugar cada 24 h. 50 m. aproximadamente y en realidad suceden cada 12 h. 25 m. Hay pleamar en el lado opuesto de la Luna, es decir, el ascenso del nivel de las aguas no se puede deber solo a la atracción vertical ejercida por la Luna.

Para ver lo que ocurre en realidad pensemos en como aumenta o disminuye el nivel del agua en un pantano. Si con las compuertas de desagüe cerradas, los rios aportan agua, el nivel sube, si se abren las compuertas sin aportación de agua, el nivel baja. La cantidad total de agua no varia, en un momento dado, el total del agua está en los rios aguas arriba más la que está en el pantano, luego está toda en el pantano y sube el nivel, y por fin, al abrir las compuertas, si cerramos las entradas de los rios, parte queda en el pantano bajando su nivel y el resto es agua desaguada. El movimiento del agua en el pantano es horizontal, y al desplazarse horizontalmente el nivel sube donde se acumula, no hay ninguna fuerza que tire verticalmente hacia arriba del agua del pantano.

En los océanos la cantidad total de agua no varia prácticamente, hay desplazamientos horizontales y esto hace que donde se acumula suba el nivel y al contrario, en los lugares de donde proviene este descienda.

El que el aumento del nivel del agua de los océanos y de los mares se deba a desplazamientos horizontales es la causa de que en los llamados mares interiores como el Mediterráneo o el Báltico no haya prácticamente mareas. El Mediterráneo en concreto tiene una extensión de 3.500.000 km<sup>2</sup>, Para que el nivel del agua subiese una media de 1m. (lo que en el Cantábrico ocurre todos los días), si todo se debiese a agua que atraviesa el estrecho de Gibraltar, tendrían que entrar por el estrecho 3.500 km<sup>3</sup> en un poco más de 6 horas, que es el tiempo entre bajamar y pleamar. Como el estrecho tiene una anchura de 14 Km. y una profundidad media de 0,6 Km. su sección es de 8,4 Km<sup>2</sup>. Sabiendo que la velocidad es el caudal dividido por la sección, obtendríamos una velocidad de 69 km/h.

En Alicante las mareas suelen ser de unos 10 cm. con lo que la velocidad es 10 veces menor.

Es necesario encontrar cuales son esas fuerzas horizontales que desplazan las aguas de unos lugares a otros produciendo las mareas.

Vamos a tratar de encontrar una explicación simplemente cualitativa de las causas de las mareas, pues como hemos dicho, son muchos los factores que intervienen en su formación y es larguísimo, y prácticamente imposible acecarse a una explicación cuantitativa.

Para simplificar empecemos solamente estudiando la influencia de la Luna.

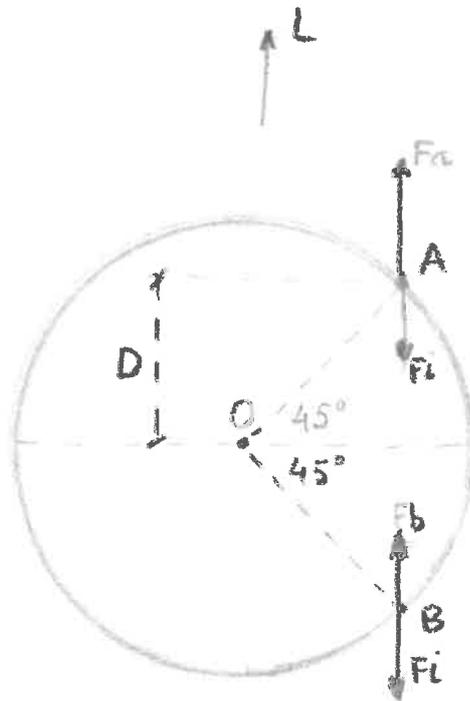


Figura 4.-

En la figura 4 hemos representado las fuerzas que se ejercen sobre el agua de los océanos en dos puntos de la Tierra, en el punto A está en el hemisferio que apunta hacia la Luna y en el B en el que apunta en sentido contrario. Hemos tomado estos puntos en un lugar intermedio a  $45^\circ$ .

Como hemos dicho antes, para simplificar supondremos que todo se da en el mismo plano, ecuador de la Tierra y órbita de la luna.

Como queremos ver como se desplazan las aguas respecto de la Tierra, tenemos que tomar a la Tierra como referencia y no al espacio absoluto, es decir tenemos que considerar las fuerzas de inercia que en este caso son las centrífugas, debidas a que la Tierra está girando alrededor de la Luna.

En sentido absoluto no es la Luna la que gira alrededor de la Tierra, ni la Tierra la que gira alrededor de la Luna. Tanto la Tierra como la Luna giran alrededor del centro de gravedad del conjunto Tierra-Luna (C), que está a 4.668 km. del centro de la Tierra. (fig 5).

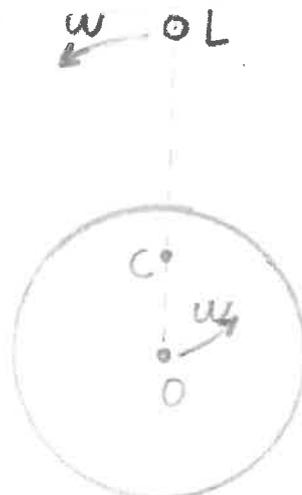


Figura 5.-

El centro de gravedad del conjunto describe una elipse alrededor del Sol cada 365 días, y tanto el centro de la Tierra como el de la Luna describen unas trayectorias sinuosas que se aproximan y se alejan de esta elipse como se vé en la figura 6. En dicha figura está representada la eclíptica en trazo continuo, recorrida por G (centro Tierra-Luna) de izquierda a derecha; en línea de trazos se representa la trayectoria sinuosa de O (centro de la Tierra). Las cuatro figuras parciales representan posiciones relativas de eclíptica, Tierra y Luna de semana en semana.

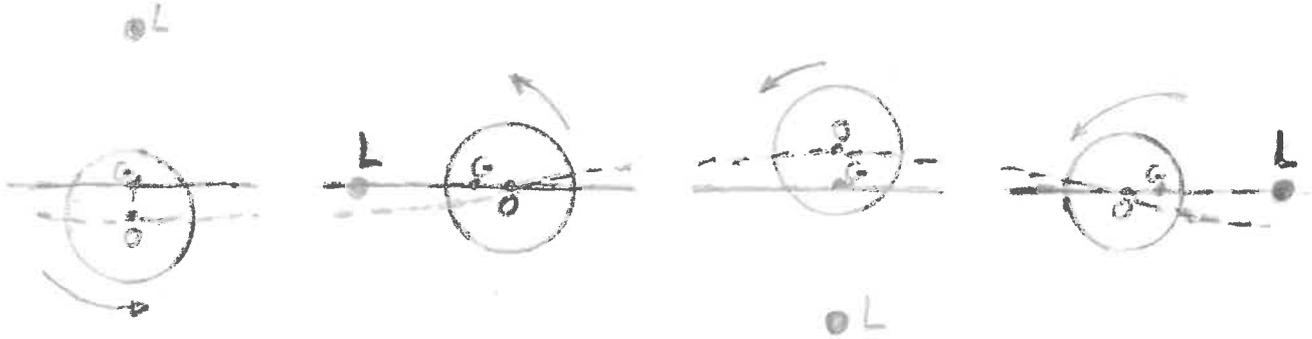


Figura 6.-

Los movimientos de la Tierra son entonces los siguientes: el centro de gravedad del conjunto Tierra Luna desplazándose alrededor del Sol describiendo la eclíptica, giro de la Tierra alrededor de G cada 28 días y giro alrededor de su centro O cada 24 horas.

Volvamos a la Figura 4 y llamemos  $AL=d_a$  a la distancia del punto A a la Luna y  $BL=d_b$  a la distancia de B a la Luna. Vemos que  $d_b > d_a$ .

OL es la distancia media a la Luna=380.000 km, B y A están respectivamente a  $D=6.600 \cdot \sin 45^\circ = 4.686$  km. más lejos y más cerca de la Luna que el centro de la Tierra, siendo 6.600 Km. el radio de la Tierra. Con estos números y aplicando la ley de gravitación universal, obtenemos las fuerzas de atracción que ejerce la Luna sobre un litro de agua en los puntos A y B obteniendo  $F_a=0,0000348$ N. y  $F_b=0,0000332$ N.

Según la mecánica sabemos que el centro de gravedad de un sólido se mueve como un punto material de masa la total del cuerpo, impulsado por la resultante de todas la fuerzas ejercidas sobre cada uno de sus puntos situados en el centro. Luego las fuerzas centrífugas ejercidas sobre un litro de agua tanto en A como en B, son las que se ejercerían como si ese agua estuviera toda en el punto O girando alrededor del centro de gravedad Tierra-Luna. La fuerza centrífuga vale en este caso  $F_c=m \cdot W^2 \cdot D$ , m es 1 kg, W es  $360^\circ$  en 27,5 días y  $D=4.686$  km. obtenemos  $F_c=0,000034$  N. Por lo tanto  $F_a - F_c = F_b = F_t = 0,0000008$  N.

Si proyectamos estas dos fuerzas sobre el plano horizontal de la Tierra,  $F_1 = F_t \cdot \cos 45 = 0,00000057$  N. Ver figura 7.-

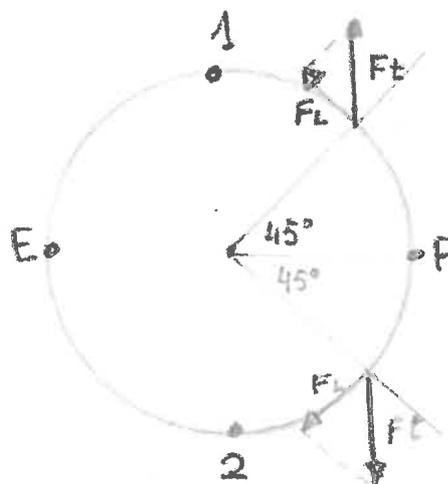


Figura 7.

Estas fuerzas horizontales  $F_l$  tienden a desplazar el agua hacia el punto 1 en el hemisferio que da hacia la Luna, y hacia el punto 2 en el otro hemisferio, que son los puntos de las dos pleamares, y en E y F se dan las bajamares. En el hemisferio izquierdo ocurre lo mismo. Las componentes verticales de las fuerzas  $F_t$  solo hacen disminuir un poco el peso del agua. Su valor es de 0,00000057 N. y el peso del litro de agua es 9,8 N.

Añadiendo las fuerzas centrífugas, hemos hallado como explicar que se da una pleamar en el punto opuesto a la Luna. Tanto la atracción directa de la Luna como la fuerza centrífuga, son causadas por la Luna, pero como vemos no solo hay que tener en cuenta la atracción directa sobre el agua, sino también la atracción sobre toda la Tierra.

Si hacemos lo mismo con el Sol, la fuerza horizontal que se obtiene es  $F_s=0,00000026$  N y  $F_l/F_s=2,19$ . La Luna ejerce sobre las mareas una acción más de 2 veces mayor que la ejercida por el Sol.

Cuando el Sol, la Luna y la Tierra están alineadas (Luna nueva y Luna llena) estas dos fuerzas se suman  $F_l+F_s=0,00000083$  N. sin embargo cuando están en cuadratura, (cuartos creciente y menguante), estas fuerzas se oponen  $F_l-F_s=0,00000031$  N.  $F_l/F_s=2,68$  que es la relación entre la fuerza máxima y mínima ejercida horizontalmente sobre los océanos. El 19 de mayo, cuarto creciente, la amplitud de la marea en Donosti fué de 1,50 m. el día 26 de Luna llena esta amplitud fué en Donosti de 4,10 m. La relación entre estas amplitudes es  $4,10/1,50=2,73$  cantidad muy próxima a 2,68. Parece que a pesar de la simplificaciones efectuadas, nos hemos acercado algo a la realidad.

En el caso del Sol no hemos tenido en cuenta el centro de gravedad del conjunto Tierra Sol, pues al tener una masa mucho mayor que la Tierra, el centro de gravedad del conjunto de los dos astros es practicamente el centro del Sol.

Como hemos dicho, lo visto hasta ahora no es del todo exacto, pues tanto los desplazamientos de la Tierra como su rotación, no tienen lugar en un mismo plano, los océanos tienen impedidos los movimientos por los continentes, el espesor del agua no es el mismo, y un largo etc. Por lo que los números obtenidos solo hay que tomarlos como una aproximación, pero lo que sí vale es el razonamiento general cualitativo.

Las mareas son producidas por las atracciones gravitatorias del Sol y de la Luna sobre el agua de los océanos, combinadas con las fuerzas centrífugas debidas a las atracciones de ambos astros, que en primer lugar hace girar a la Tierra alrededor del Sol dando una vuelta cada año, y en segundo lugar que hace girar a nuestro planeta alrededor del centro de gravedad Tierra-Luna una vuelta cada mes.

La rotación de la Tierra alrededor de su eje no tiene influencia en las mareas, pues las fuerzas centrífugas producidas por esta rotación son perpendiculares al plano horizontal y no tienen componente horizontal, solamente hacen disminuir el peso del agua en una pequeña cantidad.

Antton del Campo

Ingeniero Industrial