

INICIO **LA FUERZA DE MAREA Y SU VARIACIÓN TEMPORAL**

La fuerza de atracción gravitacional pura (F) entre dos cuerpos de masas m y m' que están separados por una distancia r, está dada por la ley de atracción gravitacional de Newton:

$$F = G \cdot \frac{m \cdot m'}{r^2} \quad [1]$$

donde G es la constante de gravitación universal, con un valor de:

$$G = 6,658 \cdot 10^{-8} \frac{\text{cm}^3}{\text{g} \cdot \text{seg}^2}$$

La fuerza F está dirigida a lo largo de la línea que une los centros de masa de los dos cuerpos.

La ecuación [1] se aplica a cuerpos cuyas dimensiones son muy pequeñas comparadas con la distancia r. Sin embargo se demuestra que la atracción gravitacional por unidad de masa (g'), en un punto externo de una esfera de densidad uniforme es:

$$g' = G \cdot \frac{M}{r^2}$$

donde M es la masa total de la esfera y r es la distancia de la unidad de masa al centro de la esfera. Esta ecuación es aplicable si la esfera está estratificada radialmente, es decir, que su densidad depende solamente de la distancia al centro.

Si se considera a la Tierra, en una primera aproximación, como una esfera con simetría radial, una unidad de masa situada al nivel del mar está sujeta a una atracción gravitacional absoluta de:

$$g'_0 = G \cdot \frac{M_T}{(a + z)^2}$$

donde a y M_T son el radio medio y la masa de la Tierra respectivamente, y z la elevación del nivel del mar.

Una unidad de masa en reposo relativa a la superficie de la Tierra experimenta no solamente la fuerza de atracción g' sino también está sujeta a la acción de la fuerza centrífuga (f_c) debida a la rotación de la Tierra alrededor de su eje. La resultante de ambas fuerzas es la atracción de la gravedad (g) (Figura 1), que se puede medir con un péndulo o más modernamente con gravímetros, aunque en rigor también los gravímetros registran la fuerza de marea. La gravedad varía con la latitud (φ), debido al cambio de intensidad de la fuerza centrífuga (f_c). La gravedad es máxima en los polos y disminuye hacia el Ecuador (Ω es la velocidad de rotación de la Tierra).

$$f_c = \Omega^2 \cdot R = \Omega^2 \cdot a \cdot \cos \varphi$$

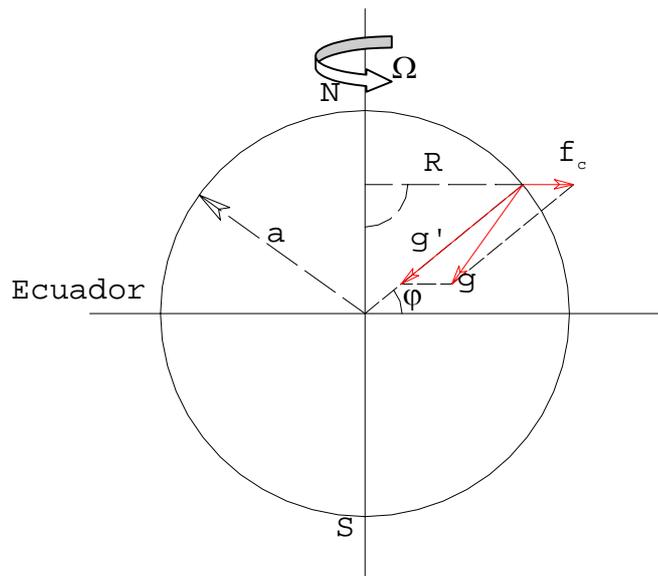


Figura 1

Hasta ahora se han presentado las grandes variaciones de g . Los accidentes topográficos en la superficie de la Tierra, conjuntamente con las variaciones en la densidad de la corteza y el manto en su interior, dan lugar a anomalías de la gravedad que modifican el valor de g .

La fuerza de atracción gravitacional terrestre mantiene a los mares confinados en la superficie terrestre, mientras que las atracciones gravitatorias de la Luna y el Sol provocan las mareas.

En apariencia, la Luna sencillamente se traslada en su órbita alrededor de la Tierra, pero en realidad ambas lo hacen alrededor de un centro común de masa o de atracción gravitacional G (Figura 2).

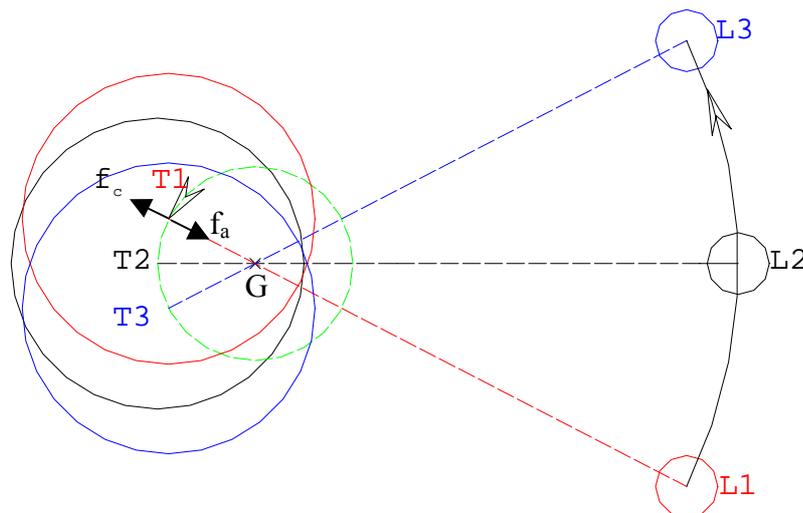


Figura 2

Los dos cuerpos celestes son mantenidos juntos por la fuerza de atracción gravitacional (f_a), siendo a su vez separados por una fuerza centrífuga (f_c) igual y opuesta (distinta de la f_c debida a la rotación de la Tierra sobre su eje), resultante de sus respectivas traslaciones orbitales alrededor del centro de masa del sistema Tierra – Luna (G).

Las circunferencias cuyos centros son T1, T2 y T3 representan una sección de la Tierra en el Ecuador, girando alrededor del centro de masa G. Por otra parte L1, L2 y L3 representan a los centros de masa de la Luna girando alrededor de G (Figura 2).

Resumiendo la Tierra y la Luna viajan a lo largo de trayectorias curvas a través del espacio, permaneciendo en promedio constante su distancia de separación. El centro de gravedad del sistema Tierra - Luna sigue aproximadamente una órbita elíptica alrededor del Sol. Sobrepuesto a esta traslación la Tierra y la Luna se mueven en órbitas aproximadamente circulares alrededor de su centro común de gravedad. La fuerza que da lugar a la aceleración centrípeta asociada a este movimiento relativo es la atracción gravitacional mutua entre la Tierra y la Luna.

Luego si M_L , representa la masa total de la Luna, M_T la correspondiente a la Tierra y d la distancia media entre sus centros, se tiene que:

$$\begin{aligned} M_L \cdot a_L &= G \cdot \frac{M_L \cdot M_T}{d^2} \\ M_T \cdot a_T &= G \cdot \frac{M_L \cdot M_T}{d^2} \end{aligned} \quad [2]$$

donde a_L y a_T son los aceleraciones centrípetas de los centros de la Luna y la Tierra relativas a su centro común de gravedad.

Las ecuaciones anteriores se pueden expresar como:

$$\begin{aligned} -M_L \cdot a_L + G \cdot \frac{M_L \cdot M_T}{d^2} &= 0 \\ -M_T \cdot a_T + G \cdot \frac{M_L \cdot M_T}{d^2} &= 0 \end{aligned}$$

Estas últimas ecuaciones se pueden considerar como una expresión de balance de fuerzas donde los términos $(-M_L \cdot a_L)$ y $(-M_T \cdot a_T)$ se interpretan como fuerzas centrífugas, luego:

$$f_c = G \cdot \frac{M_L \cdot M_T}{d^2}$$

Girando la Tierra y la Luna alrededor de su centro de masa común, la fuerza centrífuga producida está siempre dirigida hacia afuera del centro común de orbitación (G). Todos los puntos sobre o dentro de la Tierra, que actúan como un cuerpo sólido coherente, son afectados por la fuerza centrífuga (f_c). Al estar el centro de masa de la Tierra siempre en el lado opuesto a la Luna respecto al baricentro del sistema, cualquier punto dentro o sobre la Tierra estará siempre afectado por una fuerza centrífuga dirigida en sentido opuesto a la Luna (Figura 2). Es importante destacar que la fuerza centrífuga derivada de la rotación diaria de la Tierra sobre su eje no tiene ninguna participa

ción en el análisis de la fuerza generadora de marea. Se demuestra gráficamente que durante el movimiento de orbitación alrededor de G, excluyendo la rotación sobre su eje, cualquiera de los puntos de la superficie terrestre describirá una trayectoria circular del mismo radio que el de la órbita de su centro de masa alrededor del baricentro G (Figura 3)

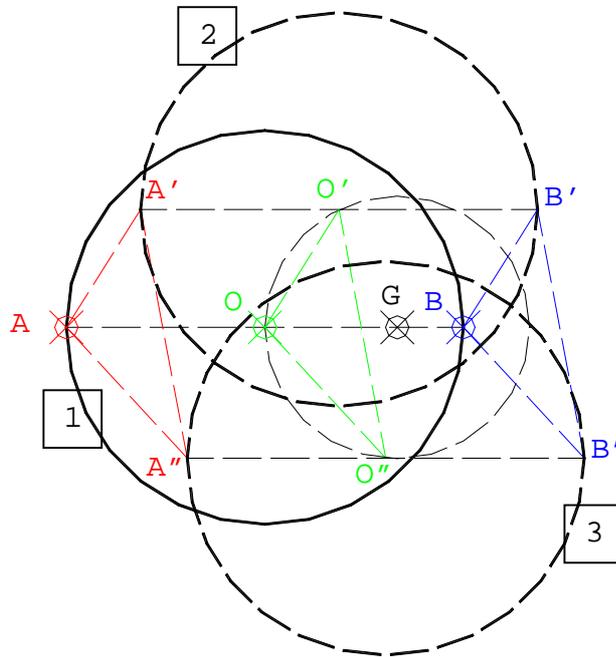


Figura 3

La Figura 3 muestra los puntos A, B y O de la Tierra en la posición inicial [1]. Al girar alrededor de G llega a la posición [2] y los puntos mencionados se trasladan a las posiciones A', B' y O' respectivamente. Al continuar girando se llega a la posición [3] y los puntos ocupan las posiciones A'', B'' y O'' respectivamente. Así quedan determinados los triángulos AA'A'', BB'B'' y OO'O'', que se demuestra son iguales. Al ser los triángulos iguales están inscriptos en circunferencias de igual radio, lo cuál implica que la fuerza centrífuga que actúa en cualquier punto de la Tierra es la misma.

Mientras que la fuerza centrífuga es de la misma intensidad para cualquier punto de la Tierra, la fuerza gravitacional externa producida por otro cuerpo astronómico, puede ser distinta en distintos puntos debido a que conforme con la Ley de Newton, varía en relación inversa con el cuadrado de la distancia entre las masas gravitacionales. Luego la **fuerza generadora de marea debida a la Luna** es la resultante de la fuerza centrífuga causada por el movimiento de la Tierra alrededor del centro de masa del sistema Tierra – Luna y de la fuerza de atracción gravitacional de la Luna. Su intensidad es variable por las diferencias de distancia desde los distintos puntos de la superficie terrestre al centro de masa de la Luna.

Siguiendo un razonamiento similar se determina la **fuerza generadora de marea debida al Sol**, como la resultante de la fuerza centrífuga causada por el movimiento del centro de masa del sistema Tierra - Luna en su órbita alrededor del Sol y de la fuerza de atracción gravitacional del Sol.

Si en la Figura 2, ω es la velocidad angular de la línea que une los centros de la Luna y la Tierra, las aceleraciones centrípetas son:

$$\begin{aligned} \text{para la Luna} \quad a_L &= \omega^2 \cdot GL1 \\ \text{para la Tierra} \quad a_T &= \omega^2 \cdot GT1 \end{aligned} \quad [3]$$

De las ecuaciones [2] se tiene que:

$$M_L \cdot a_L = M_T \cdot a_T$$

Reemplazando según [3]

$$M_L \cdot \omega^2 \cdot GL1 = M_T \cdot \omega^2 \cdot GT1$$

$$GT1 = \frac{M_L}{M_T} \cdot GL1 \quad [4]$$

Pero de la Figura 2 se tiene que:

$$GL1 = T1L1 - GT1 \quad [5]$$

Reemplazando [5] en [4] se tiene que:

$$GT1 = \frac{M_L}{M_T} \cdot (T1L1 - GT1)$$

$$GT1 = \frac{M_L \cdot T1L1 - M_L \cdot GT1}{M_T}$$

$$GT1 \cdot (M_T + M_L) = M_L \cdot T1L1$$

$$GT1 = \frac{M_L}{M_L + M_T} \cdot T1L1 \quad [6]$$

Reemplazando en [6] :

$$M_T \text{ por } 5.97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

$$M_L \text{ por } 7.35 \cdot 10^{22} \text{ kg}$$

$$T1L1 \text{ por } 384400 \text{ km}$$

Se tiene que la distancia del centro de la Tierra al centro de masa (GT1) es 4670km, aproximadamente dos tercios del radio de la Tierra.

A continuación se calcula la fuerza de marea debida a la Luna en los puntos A, B y O de la Figura 4.

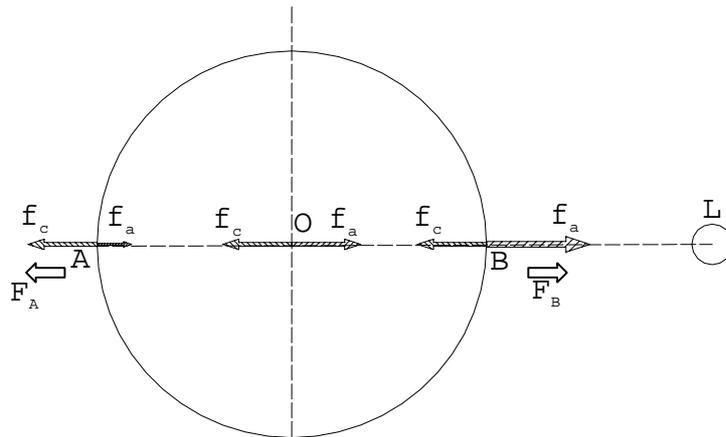


Figura 4

Fuerza de marea por unidad de masa en el punto A:

$$F_A = f_a - f_c$$

$$F_A = G \cdot \frac{M_L}{(d+a)^2} - G \cdot \frac{M_L}{d^2}$$

donde :

- M_L es la masa de la Luna
- d es la distancia OL entre el centro de la Tierra y el centro de la Luna.
- a es el radio medio de la Tierra
- f_a es la fuerza de atracción gravitatoria debida a la Luna
- f_c es la fuerza centrífuga debida al movimiento de la Tierra alrededor del centro de masa del sistema Tierra - Luna

Fuerza de marea por unidad de masa en el punto O:

$$F_O = f_a - f_c$$

$$F_O = G \cdot \frac{M_L}{d^2} - G \cdot \frac{M_L}{d^2}$$

$$F_O = 0$$

Fuerza de marea por unidad de masa en el punto B:

$$F_B = f_a - f_c$$

$$F_B = G \cdot \frac{M_L}{(d-a)^2} - G \cdot \frac{M_L}{d^2}$$

Si se determina la fuerza de marea en distintos puntos de la superficie de la Tierra, se obtiene una distribución de las mismas como muestra la Figura 5.

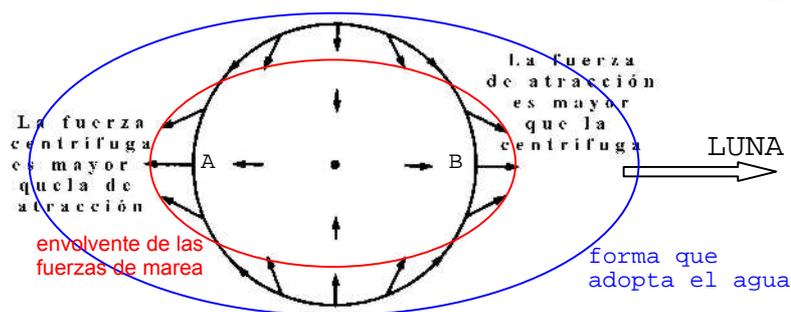


Figura 5

Es importante observar que la influencia de la atracción gravitacional de la Luna se superpone a los efectos de la atracción gravitacional propia de la Tierra. Aún cuando la gravedad terrestre se halla siempre presente, no tiene participación alguna en la fuerza generadora de marea. La fuerza que eleva las aguas es la que se ejerce sobre un punto de la superficie terrestre como resultado de la presencia de la Luna a una distancia promedio de 384400 km, su módulo es de apenas unas nueve millonésima parte de la fuerza de gravedad terrestre ejercida desde su centro a unos 6376 km. La fuerza que provoca el ascenso y el descenso de marea debida a la Luna es en consecuencia absolutamente insuficiente para "levantar" las aguas de la Tierra contra su propia fuerza de atracción. Debido a esto, las mareas son producidas por aquella componente de la fuerza generadora de marea que actúa arrastrando las aguas de la Tierra horizontalmente sobre su superficie hacia los puntos sublunar y su antípoda. Debido a que la componente horizontal no se opone en forma alguna a la gravedad terrestre, puede arrastrar libremente las partículas del agua sobre la superficie de la Tierra. La componente horizontal de la fuerza de marea es efectivamente la generadora de las mareas.

En cualquier punto de la superficie terrestre, la fuerza de marea producida por la atracción gravitacional de la Luna, puede ser separada o resuelta en dos componentes: una normal a la superficie terrestre, y otra tangente a la misma. Esta segunda componente, conocida como componente de tracción o de "arrastre" es el verdadero mecanismo generador de mareas. Esta fuerza horizontal es nula en los puntos directamente "debajo" de la Luna y su antípoda, a causa de que precisamente en dichos puntos la fuerza de atracción de la Luna se ejerce normalmente a la superficie terrestre, coincidentemente con el vector gravedad de la Tierra. El agua que se halla acumulada en esas posiciones procedente de otros puntos de la Tierra arrastrada por la componente horizontal de la fuerza de marea debida a la Luna, tenderá a mantenerse estacionaria en esa configuración de "abultamiento" de marea (Figura 5).

Entonces, existe una activa tendencia del agua a ser drenada desde otros puntos de la superficie terrestre hacia el punto sublunar A, en la Figura 5, y su antípoda B, para ser "amontonada" en esos dos abultamientos. Sobre una franja alrededor de la superficie terrestre, ubicada a 90° del punto sublunar, la componente horizontal de la fuerza gravitatoria lunar (tangente a la superficie terrestre) es prácticamente nula, debido a que se halla equilibrada con la fuerza centrífuga (como en el centro de la Tierra), de modo que la resultante total de la fuerza generadora de marea es normal a la superficie terrestre y dirigida hacia adentro de la Tierra. Esto determina una tendencia a la formación de una depresión de las aguas a lo largo de esta franja. La expresión "tendencia del agua" utilizada en relación con la fuerza generadora de mareas, procura generalizar el concepto de la representación real de la fuerza de marea en cada punto de la Tierra como determinando una "envolvente", ya que la elevación y descenso de las aguas se hallan condicionados por una gran cantidad de factores.

Si las aguas oceánicas respondieran absolutamente a las direcciones y magnitudes de esas fuerzas de tracción en todos los puntos de la superficie terrestre, se formaría la superficie matemática de un esferoide, como "envolvente" de la fuerza generadora de marea en cada punto. El eje mayor coincidiría con la dirección Tierra - Luna, y su eje menor perpendicular al anterior, con los dos abultamientos y depresiones de marea ubicadas en las direcciones del eje mayor y menor respectivamente. Desde un punto de vista exclusivamente teórico, la rotación diaria de la Tierra respecto de esos abultamientos y depresiones, puede ser supuesto como la causa de la alternancia local de las mareas.

A medida que la Tierra rota una vez cada 24 horas, podría idealmente esperarse hallar una pleamar seguida de una bajamar en el mismo lugar 6 horas más tarde, luego una segunda pleamar 12 horas después, otra bajamar a las 18 horas, y finalmente otra pleamar al final de las 24 horas. Tal sería el caso en una Tierra completamente cubierta de agua con profundidad uniforme, sin continentes, solamente sometida a la componente horizontal de la fuerza generadora de marea de origen lunar, manteniéndose constantes las distancias y posiciones relativas del Sol y la Luna, y no habiendo otras influencias aceleradoras o retardadoras afectando los movimientos del agua de la Tierra. Obviamente esta situación está muy lejos de la real.

En primera instancia, la acción lunar (representada por la envolvente de la fuerza generadora de marea) está acompañada de otra similar de considerablemente menor amplitud (intensidad) producida por el Sol. La fuerza ejercida por el Sol es también una composición de su atracción gravitacional, y de la fuerza centrífuga derivada de la traslación del sistema Tierra - Luna alrededor del centro de masa del sistema Tierra - Sol. A causa de la enorme diferencia de la distancia media al Sol (150.000.000 km) respecto de su similar a la Luna (384.400 km), la influencia de esta última es de intensidad aproximadamente 2,5 veces mayor que la de aquel.

Por otra parte existen un amplio rango de variables astronómicas en la generación de mareas, comenzando por las variaciones de las distancias al Sol y la Luna, los ángulos de inclinación de las órbitas terrestre y lunar respecto del Ecuador terrestre, las superposiciones de las acciones lunar y solar, las relaciones variables de la fase lunar, etc. Algunos de los principales tipos de marea resultan de esas influencias puramente astronómicas.

Se conoce con el nombre de Fases de la Luna a los diferentes aspectos que presenta la Luna para un observador terrestre durante un mes sinódico. Cuando la Luna se halla en conjunción, es decir entre la Tierra y el Sol, presenta al observador su parte oscura y se llama Luna nueva o novilunio. Al avanzar sobre su órbita muestra progresivamente su cara iluminada por el Sol, presentándose con la forma de un segmento de círculo, primero muy delgado y después cada vez más ancho. Cuando recorre el primer cuarto de órbita (para un observador de la Tierra que está a 90° del Sol), se muestra en forma de semicírculo situado a la izquierda de su diámetro y se dice que está en cuarto creciente o primer cuarto. Cuando la Luna se halla en oposición (a 180° del Sol) aparece como un círculo completo y se llama Luna llena o plenilunio. Comienza a decrecer y cuando recorrió tres cuartos de su órbita (para un observador de la Tierra que está a 270° del Sol) se muestra en forma de semicírculo a la derecha de su diámetro y se llama cuarto menguante (Figura 6). La Luna siempre presenta la misma cara a un observador ubicado sobre la Tierra, pues el movimiento de rotación sobre su eje tiene la misma duración que su movimiento alrededor de la Tierra.

Se conoce con el nombre de mes sinódico al tiempo transcurrido entre dos conjunciones sucesivas Luna - Sol (29,5307 dsm, Figura 6). Es obvio que los cambios en las posiciones relativas de

la Luna y el Sol respecto de la Tierra, a lo largo del ciclo lunar mensual de las fases (mes sinódico), determinarán una variación de las influencias de atracción lunar y solar.

Se define en cronología al día como el periodo de tiempo empleado por un cuerpo celeste para girar en torno a su eje. El día terrestre es más corto o más largo según se emplee como referencia el Sol u otra estrella. El día sidéreo es el tiempo que tarda la Tierra en realizar un giro en relación a una estrella. El día solar es el intervalo entre dos pasos sucesivos del Sol por el meridiano del lugar, presentando una duración distinta según la época del año debido a la variación de la velocidad de la Tierra en su órbita. Para todos los fines civiles y para muchos fines astronómicos se toma la media aritmética del día solar a lo largo de un año, y se la conoce como día solar medio (dsm), con una duración de 24 horas.

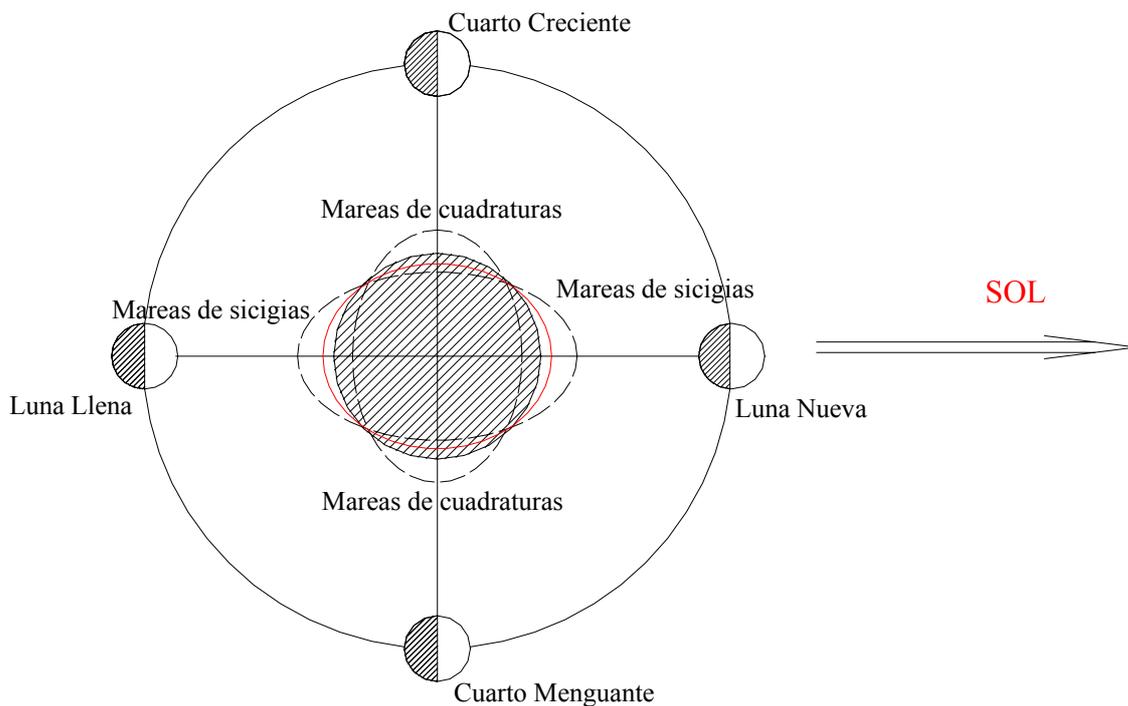


Figura 6

Cuando la Luna se halla en sus fases nueva y llena (conocidas como sicigias) las acciones lunar y solar se refuerzan mutuamente. Debido al incremento de la fuerza combinada de marea, las pleamares y bajamares observadas son más altas y más bajas respectivamente que los valores medios. Esto significa que la amplitud de la marea será mayor en todas las localidades donde se observen pleamares y bajamares de sicigias. Las mareas de sicigias son conocidas como spring tides.

En cuadraturas de cuarto creciente y cuarto menguante, el Sol y, la Luna ejercen sus atracciones separados 90° uno de otro, de modo que sus fuerzas tienden parcialmente a contrarrestarse. Consecuentemente los valores máximo y mínimo de la fuerza generadora de marea se presentan disminuidos, con lo que las alturas de las pleamares y bajamares serán menores, y mayores respectivamente que los valores medios. Las mareas de cuadraturas son conocidas como neap tides.

En la Figura 6 la circunferencia central de línea llena representa la Tierra vista desde el Polo Norte. Las dos elipses de líneas punteadas representan las envolventes de la fuerza de marea producida por la Luna en las posiciones de sicigia (Luna llena y nueva), y cuadraturas (Luna en cuarto

creciente y menguante). La elipse en línea llena de color rojo representa la envolvente de la fuerza de marea producida por el Sol en la posición señalada.

Debido a que la Luna sigue una trayectoria elíptica (Figura 7), su distancia a la Tierra varía en unos 50.000 km en el curso de un mes anomalístico. El mes anomalístico es el tiempo transcurrido entre dos pasajes sucesivos de la Luna por el perigeo (27,5546 dsm).

El perigeo es el punto más cercano a la Tierra, de una órbita descrita alrededor de ésta, cuando la Tierra es el centro de atracción. En la terminología mareológica se suele utilizar esta expresión para señalar al punto de la órbita de la Luna más cercano a la Tierra. Su opuesto es el apogeo.

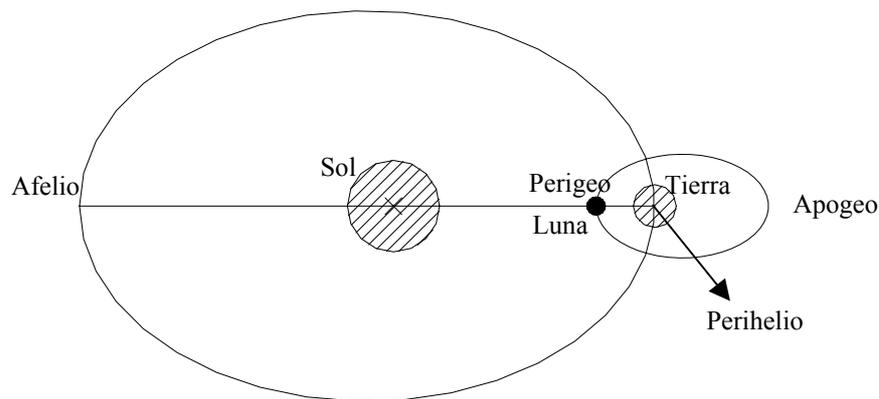


Figura 7

La fuerza de marea sobre el agua que cubre la Tierra varía en relación inversa con el cubo de la distancia Tierra Luna. Luego una vez por mes, cuando la Luna se halla en el perigeo, la fuerza generadora de marea es mayor que el promedio, produciéndose una marea de mayor amplitud. Aproximadamente dos semanas después, cuando la Luna se halle en el apogeo, se produce una situación inversa a la anterior con mareas de menor amplitud. En el caso del Sol ocurre algo similar pero con periodicidad anual (año anomalístico). Un año anomalístico es el tiempo transcurrido entre dos pasajes sucesivos de la Tierra por el afelio o por el perihelio (365,2596 dsm). El perihelio es el punto más cercano al Sol de una órbita descrita alrededor de éste, cuando el Sol es el centro de atracción. En la terminología mareológica se suele utilizar esta expresión para señalar al punto de la órbita de la Tierra más cercano al Sol. Su opuesto es el afelio (Figura 7).

Cuando coinciden aproximadamente en el mismo instante el perigeo, el perihelio, y la Luna nueva o llena, se producen mareas de considerablemente mayor amplitud que las usuales. Cuando coinciden aproximadamente en el mismo instante el apogeo, el afelio, y el cuarto creciente o menguante, se producen mareas de considerablemente menor amplitud que las usuales.

Antes de continuar con el desarrollo del tema se explicará brevemente el concepto de esfera celeste. Para el estudio del movimiento aparente de los astros y para posibilitar su observación, resulta útil suponerlos proyectados sobre una esfera cuyo centro es el centro de la Tierra y de radio unitario. La tierra se representa como el punto centro de la esfera y los astros por la intersección, con la esfera celeste, de la recta que une el centro de la Tierra con el centro del astro. Las órbitas de los astros quedan representadas por la intersección del plano que las contiene con la esfera celeste.

La vertical del lugar (dirección del vector gravedad) corta a esta esfera en dos puntos que se llaman Cenit (Z) y Nadir (N) (Figura 8). Al plano perpendicular a la vertical que pasa por el punto de observación O (sobre la Tierra) se lo llama horizonte. Así como a la vertical se la visualiza con la línea de la plomada, al horizonte se lo materializa mediante un plano "nivelado" que pasa por el lugar de observación.

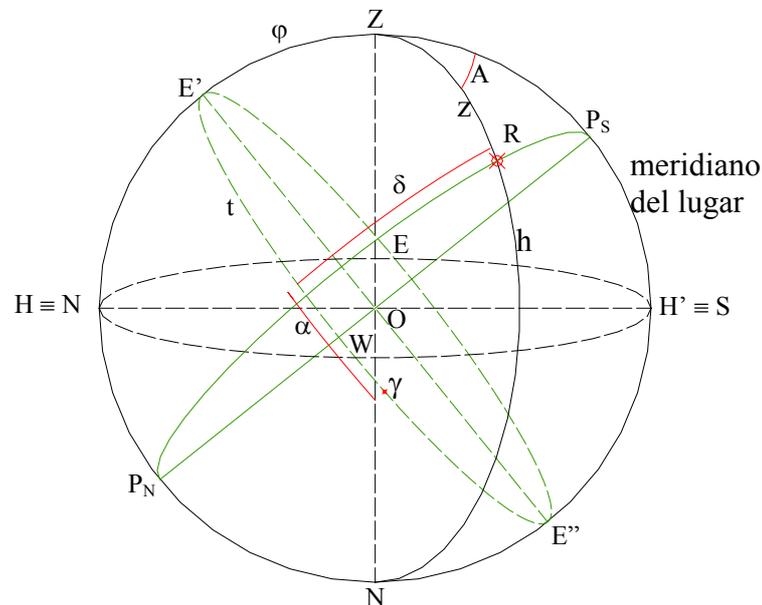


Figura 8

Observando el cielo todo sucede como si las estrellas giraran solidarias a la esfera celeste, la cual rota alrededor de un eje que la corta en dos puntos (polos celestes). En nuestro caso el Polo elevado es el Sur (P_S). En rigor se definen los polos (P_S y P_N) como la intersección sobre la esfera celeste de una paralela al eje de rotación de la Tierra que pasa por el punto de observación O.

Esa línea de los polos (P_S y P_N) forma con la vertical del lugar un plano llamado meridiano del lugar. El plano perpendicular a este último se lo llama primer vertical, que intercepta al horizonte en los puntos cardinales este (E) y oeste (O).

En rigor, los polos P_N y P_S no están absolutamente quietos a través del tiempo, pero se supone que se considera un eje de rotación instantáneo.

El plano perpendicular a la línea de los polos que pasa por el punto de observación O se llama Ecuador, y se corta con el meridiano del lugar en los puntos E' y E'' sobre la esfera celeste.

El ángulo E'OZ es la latitud geográfica del punto de observación, que se considera positiva en el hemisferio norte y negativa en el sur.

Dado un astro cualquiera R se define como plano horario al que pasa por el mismo y la línea de los polos. Este plano horario varía con el movimiento aparente (de este a oeste), a velocidad casi constante. Al ángulo que forma con el meridiano del lugar (es el meridiano del plano del dibujo) se lo llama ángulo horario t.

Mirando desde el P_N hacia el P_S se mide el ángulo horario t en el sentido de las agujas del reloj coincidente con el movimiento aparente.

El plano vertical que pasa por el astro (contiene a la vertical del lugar y al astro) forma con el meridiano del lugar un ángulo A denominado acimut astronómico. Se lo mide convencionalmente desde el polo elevado en el sentido de las agujas del reloj (S.W.N.E).

El arco z (ZR) es la distancia cenital al astro, que se podría medir con un teodolito (es complementario del ángulo de altura h , medido desde el plano del horizonte).

El ángulo que forma la dirección del astro con el ecuador es la declinación δ , se la considera positiva en el hemisferio norte y negativa en el sur. Para las estrellas es un valor casi constante (varía $1''$), fundamentalmente por el movimiento de nutación de la Tierra (una variación periódica en la inclinación del eje de la Tierra provocada por la atracción gravitacional del Sol y de la Luna).

La otra coordenada casi fija de las estrellas es la ascensión recta α . Se la mide como un arco sobre el ecuador celeste desde el Punto Vernal γ (intersección de la eclíptica con el ecuador celeste) hasta el plano horario, en sentido contrario a las agujas del reloj mirando del P_N al P_S .

En el Punto Vernal γ el Sol pasa de tener declinación negativa a declinación positiva, y es el equinoccio de primavera para el hemisferio norte y de otoño para el sur (aproximadamente el 21 de marzo). Es la intersección de la eclíptica (órbita del Sol) con el ecuador celeste.

La ascensión recta de las estrellas varía lentamente aumentando alrededor de $50''$ por año debido fundamentalmente al movimiento de precesión de la Tierra. Los equinoccios no son fijos porque el plano del ecuador gira en relación al plano de la eclíptica; completa un giro cada 25868 años solares medios. El movimiento de los equinoccios en la eclíptica se llama precesión de los equinoccios.

El Sol, la Luna y los planetas tienen ascensión recta y declinación más variable que las de las estrellas.

El plano de la órbita lunar se halla inclinado unos $5'$ respecto del plano de la eclíptica. La eclíptica se halla inclinada unos $23,5'$ respecto del Ecuador celeste.

La Figura 9, sin guardar proporciones, muestra el ecuador celeste (color negro), la eclíptica (color rojo) y la proyección de la órbita de la Luna sobre la esfera celeste (color azul).

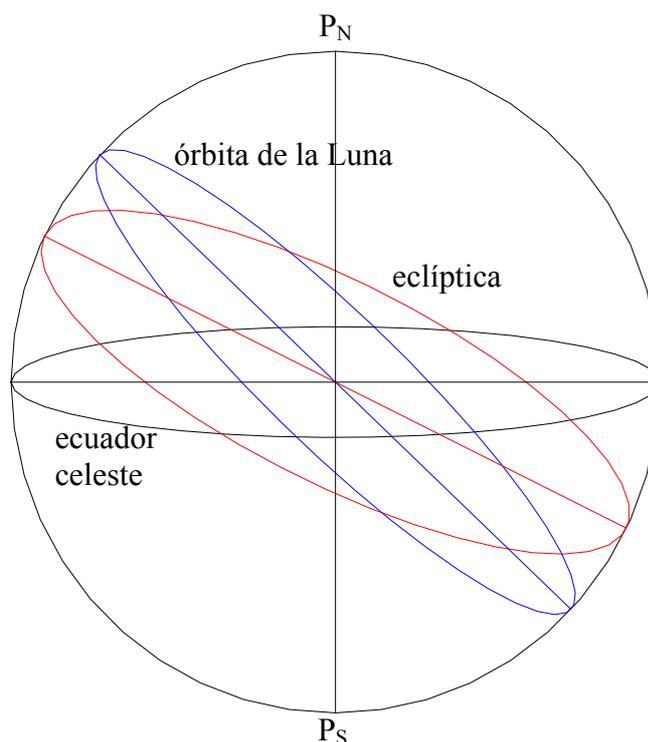


Figura 9

Esta geometría determina que en el curso de un mes trópico la Luna pasa de posiciones de máximo apartamiento del ecuador celeste hacia el norte y hacia el sur. Se define como mes trópico al tiempo transcurrido entre dos pasajes sucesivos de la Luna a través del ecuador celeste en el mismo sentido (27,3217 dsm). Dos veces por mes la Luna cruza el Ecuador. Esta condición se muestra en la Figura 10, donde se observa la forma elíptica que adopta el agua.

Cuando la Luna tiene una declinación distinta de cero la elipse de marea está inclinada y comienzan a ocurrir diferencias entre las alturas de las pleamares y/o bajamares diarias. Este fenómeno se conoce con el nombre de desigualdad diurna.

En la Figura 10 el punto B se halla bajo el abultamiento de marea. Medio día después, es el punto B' el que se halla bajo el abultamiento, pero la altura de la marea no es, obviamente, la misma que en B.

Esta situación da lugar a la ocurrencia de dos mareas diarias de distinta altura en pleamares o bajamares sucesivas. Este tipo de marea que muestra una fuerte desigualdad diurna se conoce como marea mixta.

En la Figura 10 el punto C se halla en una zona de bajamar. Medio día después, en el punto C' se produce una pleamar, generándose una onda de marea diurna (una sola pleamar y bajamar por día).

En la Figura 10 un observador en el Ecuador ve, en el día, dos pleamares de igual altura.

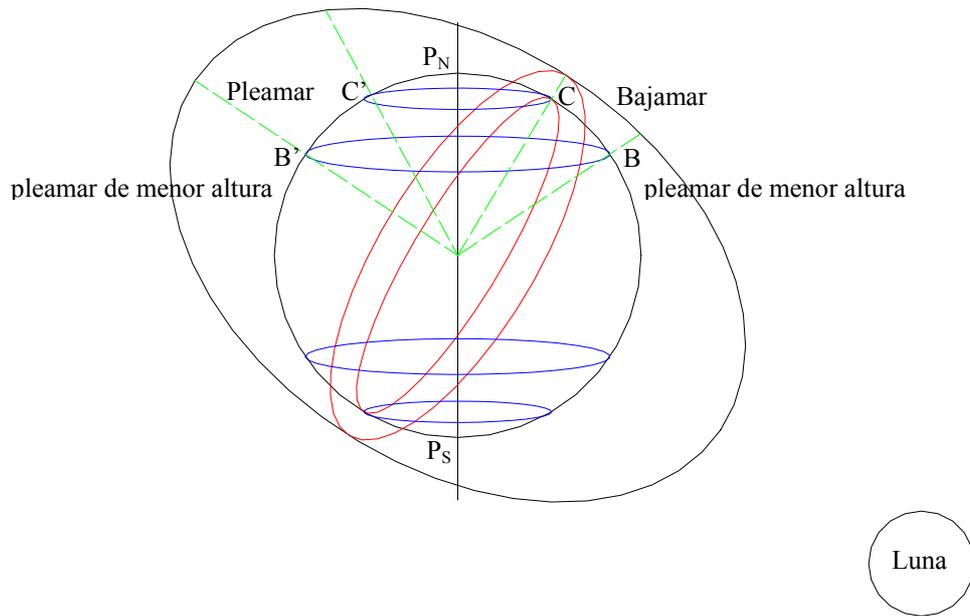


Figura 10

La Figura 11 muestra las curvas de marea para un observador con la Luna con declinación nula y para observadores en el punto B y C de la Figura 10. Para estos dos últimos la declinación de la Luna es distinta de cero.

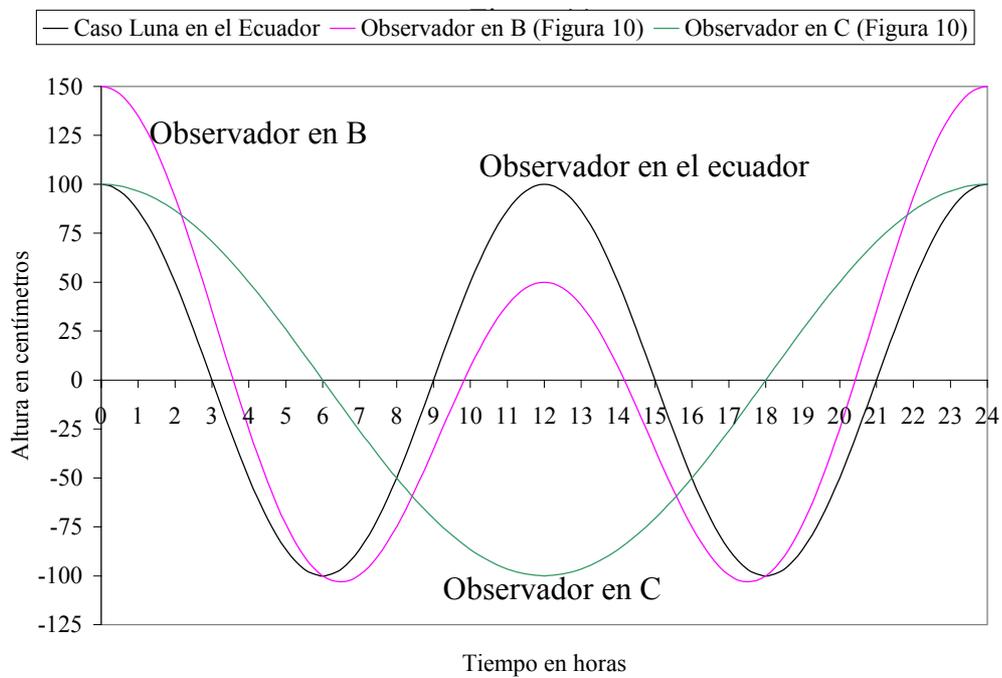


Figura 11

Un razonamiento similar se puede hacer con la variación de la declinación del Sol. Se define como año trópico al tiempo transcurrido entre dos pasajes sucesivos del Sol por el punto Vernal (365,2422 dsm)

Las respuestas oceánicas a la fuerza de marea son demasiado complicadas y no suficientemente localizadas para que la amplitud de marea diurna sea cero en el Ecuador, así como para poder explicar completamente con la Figura 10 la variación de la marea con la latitud.

Entre los ciclos astronómicos de mayor duración que afectan a las mareas se destacan:

- ✓ El ciclo de regresión de los nodos de la Luna de aproximadamente 18,16 años.
- ✓ El ciclo de Metón de repetición de las fases lunares de 19 años julianos.
- ✓ El ciclo de Saros de repetición de los eclipses de Luna y de Sol de 18,03 años.