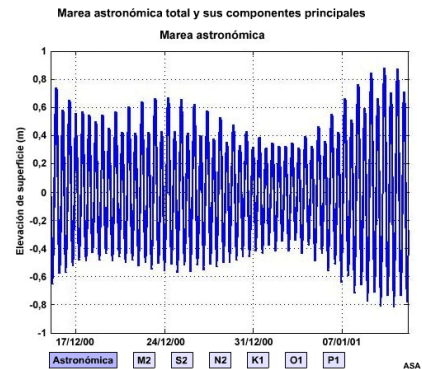
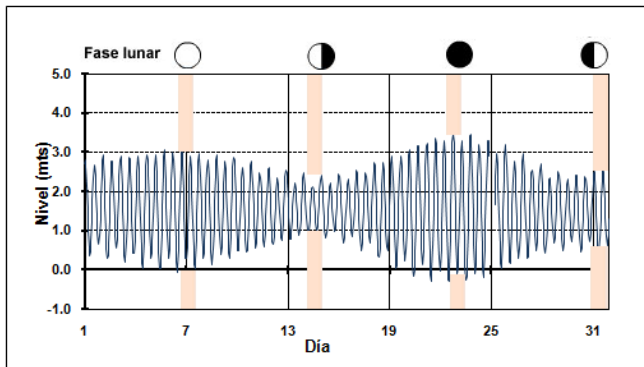
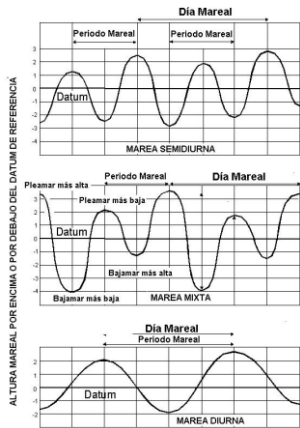


NIVEL DEL MAR Y RÉGIMEN DE MAREA EN LAS ESTACIONES MAREOGRÁFICAS DE COLOMBIA



Recopilado por:

Martha Cecilia Cadena
 marthac@ideam.gov.co

NIVEL DEL MAR Y RÉGIMEN DE MAREA EN LAS ESTACIONES MAREOGRÁFICAS DE COLOMBIA

1. INTRODUCCIÓN

El nivel medio del mar (NMM) no es constante en el transcurso de largos periodos de tiempo. Los cambios que experimenta, están relacionados con factores como movimientos verticales del suelo generados por procesos glaciales y fenómenos tectónicos o cambios en el volumen del agua de los océanos y de las corrientes oceánicas.

La medición del nivel del mar es aplicable en temas prácticos como la construcción de infraestructura costera, el transporte marino y la erosión costera. Las mareas y los cambios del nivel del mar influyen en muchos de los procesos biológicos y geológicos marinos y a largo plazo tienen incidencia sobre la ocupación de las costas y en los cambios del clima. El nivel del mar es un indicador importante, del Cambio climático y procesos relacionados, como el derretimiento glacial y la expansión térmica.

Las mareas son los movimientos periódicos de los mares que tienen amplitud coherente y una relación cíclica con alguna fuerza geofísica periódica. El factor predominante es la variación del campo gravitacional sobre la superficie terrestre debida a los movimientos planetarios regulares en las relaciones tierra-luna-sol, que generan las mareas gravitacionales. Además hay mareas débiles originadas por variaciones de la presión atmosférica y de las brisas marinas o vientos que van en dirección mar-tierra o viceversa, denominadas mareas meteorológicas.

El NMM, es el nivel medio del mar basado en valores horarios tomados durante un periodo de tiempo no inferior a un año, sin embargo para efectos geodésicos se requiere un registro de largo periodo, que permite establecer un patrón definido, de acuerdo con su frecuencia. Los residuos meteorológicos son los elementos que quedan después de diferenciar la marea astronómica de la meteorológica, e indican las variaciones atribuibles a ésta última.

2. MAREAS

2.1. DEFINICIÓN

La marea es "La variación periódica del nivel de un cuerpo de agua que asciende y desciende en respuesta a las interacciones gravitacionales entre el Sol, la Luna y la Tierra".

La marea astronómica se refiere al ascenso y descenso del nivel del agua producido exclusivamente por las interacciones gravitacionales entre la Tierra, la Luna y el Sol. Estas interacciones son periódicas y predictibles, mientras la marea meteorológica se refiere al ascenso y descenso del nivel del agua provocado por acción del viento y las fluctuaciones en la presión atmosférica.

Aunque en términos científicos la palabra marea suele significar marea astronómica, en el uso corriente se utiliza para referirse a los cambios en el nivel del agua provocados por cualquier combinación de procesos astronómicos y meteorológicos.

2.1.2. CLASIFICACIÓN DE LAS MAREAS

El forzamiento astronómico de las mareas produce una periodicidad en su ascenso y descenso. La mayor altura alcanzada se denomina pleamar y la menor bajamar. La diferencia entre ellas equivale a la amplitud. El ascenso y descenso del mar en determinada zona requiere una entrada de agua en las horas previas a la pleamar y una salida en las horas siguientes, estos movimientos o corrientes mareales corresponden a los flujos (entrantes) y reflujos (vaciantes), respectivamente.

El intervalo medio entre pleamares o bajamares sucesivas es de 12 horas y 25 minutos aproximadamente, la hora de pleamar o bajamar se retrasa en 50 minutos entre un día y el siguiente y se relaciona con la luna, pues también ésta, se retrasa diariamente 50 minutos en su paso por el meridiano.

La duración media de un ciclo de marea corresponde a la mitad de un día lunar medio. Las alturas de dos pleamares o bajamares consecutivas son generalmente distintas. La desigualdad puede ser tan grande, que sólo parece que se presentara una pleamar y una bajamar cada día lunar, en lugar de dos, de allí se originan las mareas mixtas y diurnas.

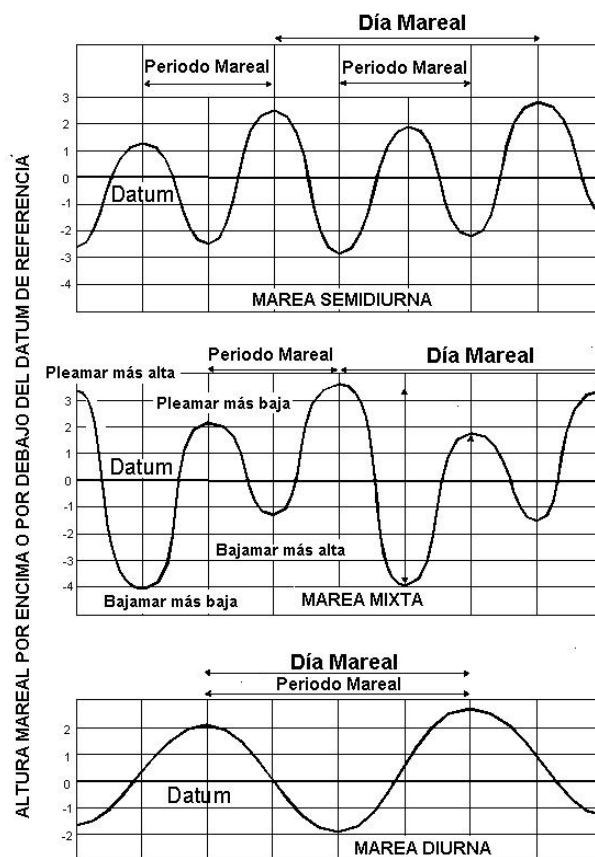


Figura 1. Distribución de las fases de la marea

La marea diurna, tiene una marea alta y una marea baja cada día lunar. La marea semidiurna, tiene dos mareas altas y dos mareas bajas con altura casi igual diariamente. La marea mixta se caracteriza por una evidente desigualdad diurna en la elevación de las pleamares y bajamares entre ciclos de marea sucesivos. (Fig. 1).

El día de marea (o día lunar) tiene una duración de aproximadamente 24 horas y 50 minutos. El día de marea dura más de 24 horas debido a que la Luna viaja en su órbita alrededor de la Tierra en la misma dirección en que gira la Tierra. En las 24 horas que tarda la Tierra en realizar una rotación completa de 360 grados, la Luna se desplaza un poco a lo largo de su órbita. Esto significa que la Tierra tiene que girar 12 grados más, antes de que el mismo lugar en la Tierra vuelva a estar orientado hacia la Luna. Una época de mareas corresponde a un período de 19 años o ciclo nodal lunar completo, requerido para pasar por una fase completa de las principales fuerzas generadoras de mareas.

Con el paso de los días se experimenta un cambio progresivo de las alturas y amplitudes mareales diarias. Ambas vuelven a repetirse después de transcurrir medio mes lunar. Esa fluctuación se constituye en una desigualdad semimensual y es lo que produce amplitud de mareas máximas (mareas vivas) o mínimas (mareas muertas).

2.1.3. NIVELES DE REFERENCIA RELACIONADOS CON LAS MAREAS

La elevación de las mareas se calcula tomando como referencia una elevación de base, nivel o plano de referencia de mareas, que cada país adopta según las características de cada costa. Los planos de referencia de mareas varían según el lugar y se definen en términos de cierta fase de la marea.

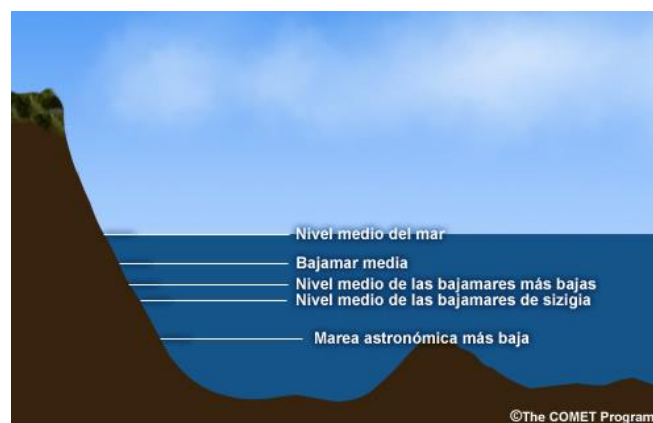


Figura 2. Planos de referencia de bajamar de uso común

Entre los valores de bajamar comunes se incluyen la bajamar media (el promedio de todas las bajamares), el nivel medio de las bajamares más bajas (la bajamar más baja en determinado día de marea) y el nivel medio de las bajamares de sizigia (la bajamar en sizigia). Existen niveles de referencia análogos correspondientes a las pleamares.

Los niveles de referencia se dan con respecto a puntos que se han medido y marcado sobre tierra firme mediante mojones. Debido a la gran variación de las mareas según las condiciones locales, todos los planos de referencia de mareas son locales y no se deben extender a grandes distancias.

2.2. CUANTIFICACIÓN DE LAS MAREAS

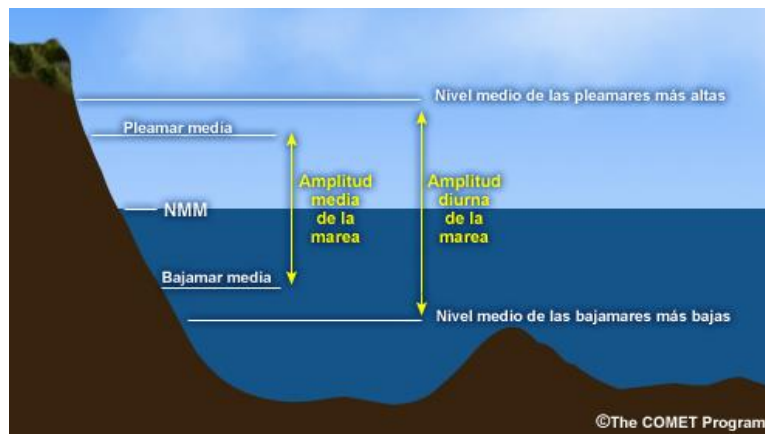


Figura 3. Amplitud de las mareas

La amplitud de las mareas varía desde insignificante hasta más de 10 metros y depende del lugar.

La amplitud de la marea en términos generales es la diferencia de altura entre pleamares y bajamares consecutivas. La amplitud media es la diferencia de altura entre la pleamar media y la bajamar media. La amplitud diurna es la diferencia entre el nivel medio de las pleamares más altas y el nivel medio de las bajamares más bajas.

La amplitud de las mareas depende de factores como la fase de la Luna, la época del año y la batimetría local.

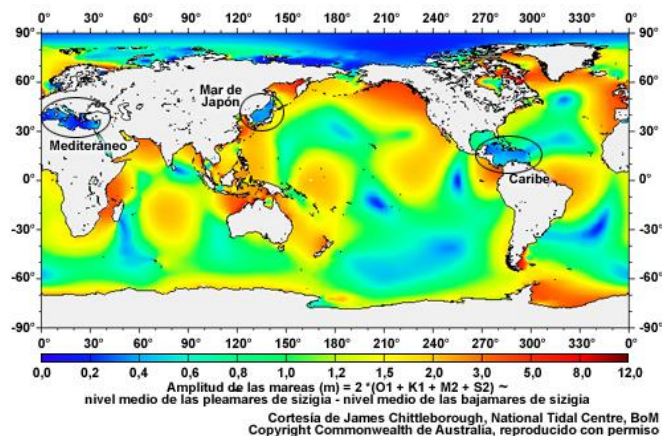


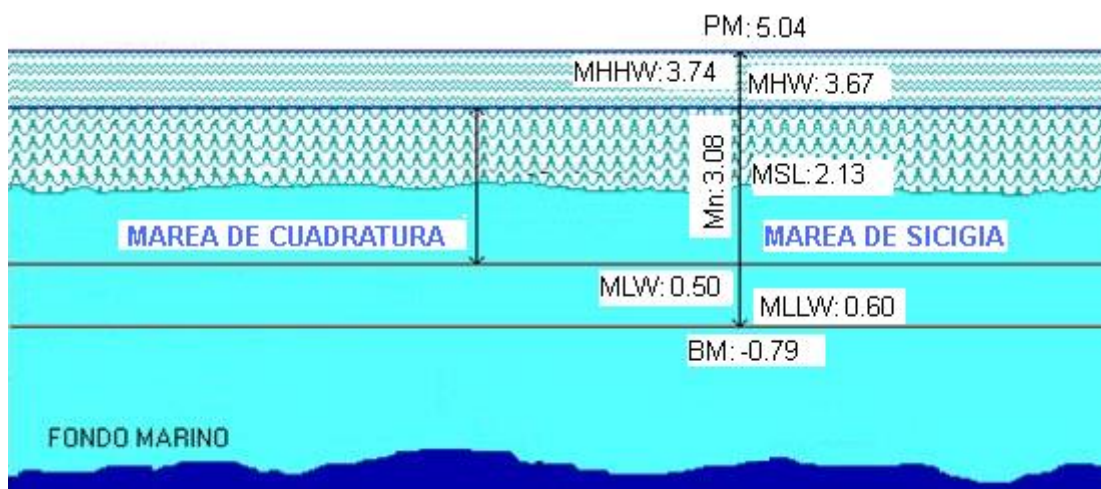
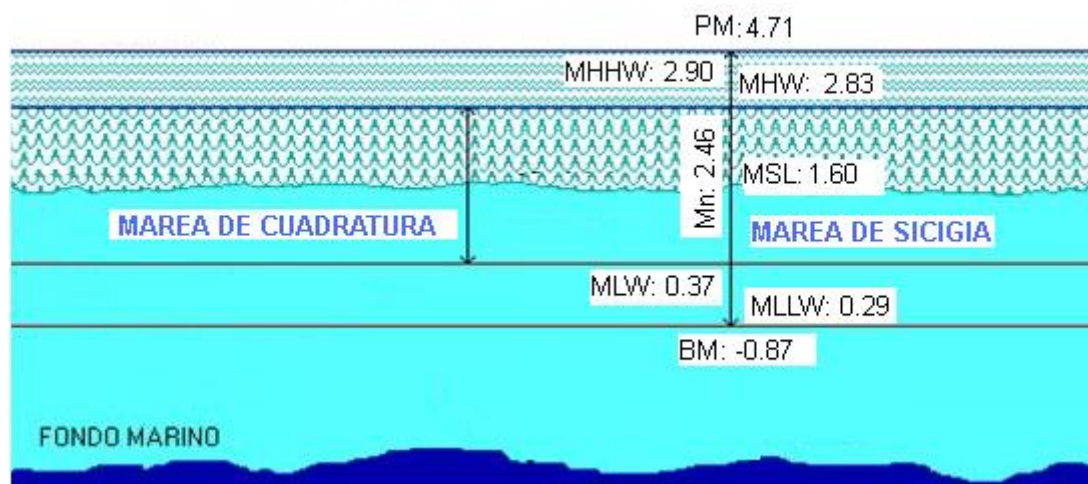
Figura 4. Amplitud de las mareas globales

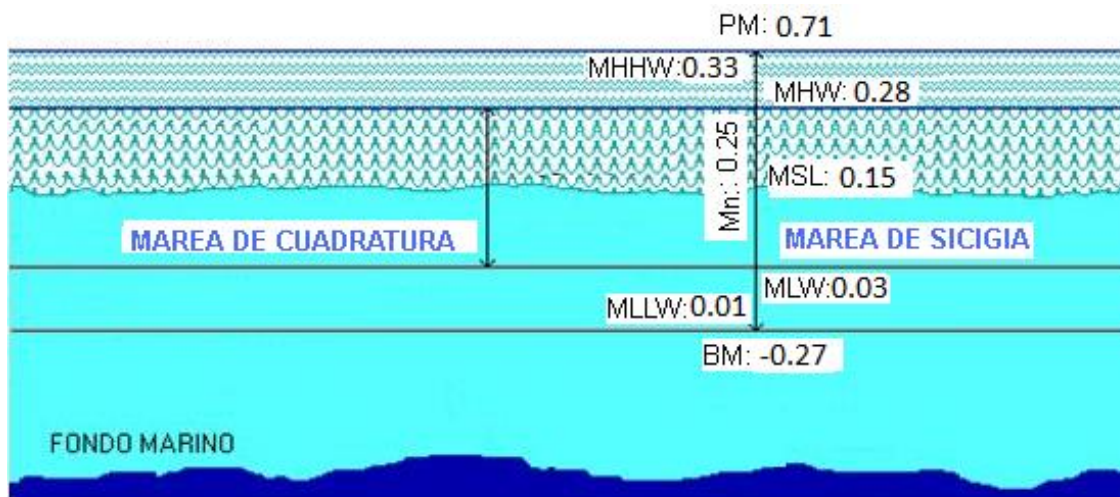
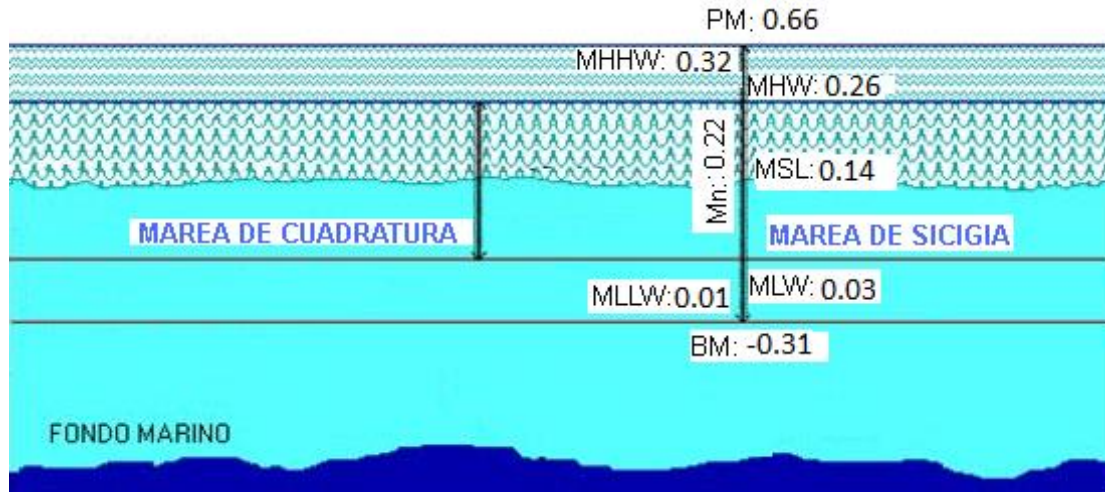
La menor amplitud de las mareas (menos de 50 cm) tiende a ocurrir en cuencas cerradas, como el mar Mediterráneo, el mar de Japón, el MAR CARIBE y el océano Ártico. No existe un patrón claro en relación con latitudes altas o bajas, ni tampoco con las costas orientales u occidentales.

En el caso de la mayor amplitud de las mareas, el patrón es incluso más variable. En el mapa global, las mareas más altas ocurren cerca del litoral, pero no se observa ninguna correlación evidente respecto a latitud, orientación de las costas o batimetría.

A continuación se muestran los valores promedio de los niveles de marea, para las estaciones de Tumaco (arriba), Buenaventura, Cartagena y San Andrés (abajo), de acuerdo con la información disponible (Fig. 5).

VALORES PROMEDIO DE LOS NIVELES DE MAREA





Convenciones:

- MSL: Nivel Medio del Mar
- MHW: Promedio de Pleamares
- MLW: Promedio Bajamares
- MHHW: Promedio Pleamares Máximas
- MLLW: Promedio Bajamares Mínimas
- Mn: Amplitud de la Marea
- PM: Pleamar Máxima
- BM: Bajamar Mínima

Figura 5. Valores promedio de los niveles de marea: Tumaco, Buenaventura, Cartagena y San Andrés.

2.3 MAREAS ASTRONÓMICAS: SISTEMA TIERRA-LUNA

2.3.1 Forzamiento del sistema Tierra-Luna

Las mareas astronómicas son producto del forzamiento de las atracciones gravitacionales entre La Tierra, la Luna y el Sol, y por lo tanto se ven afectadas por la rotación y la órbita de La Tierra y la órbita de La Luna. A medida que la Luna sigue la trayectoria de su órbita alrededor de la Tierra, ejerce cierta atracción gravitacional (Línea roja en el esquema). Debido a que los efectos de la gravedad disminuyen con la distancia, esta atracción gravitacional es mayor en el lado de la Tierra más cercano a la Luna y más débil en el lado de la Tierra más distante de la Luna.



Figura 5. Fuerzas generadoras de mareas. Sistema Tierra-Luna

A medida que la Luna se desplaza en su órbita alrededor de la Tierra, todo el sistema Tierra-Luna rota alrededor de un eje que es el centro de masa colectivo del sistema, que no coincide con el centro de la Tierra, sino que está desplazado hacia la Luna.

El movimiento oscilatorio que la Tierra describe alrededor de este eje genera una fuerza centrífuga que es opuesta y equivalente a la atracción gravitacional de la Luna. Debido a que la Tierra es una masa sólida, la fuerza centrífuga es igual en cualquier parte del globo, (flechas amarillas). La fuerza centrífuga es menor que la fuerza gravitacional en el lado orientado hacia la Luna, pero es mayor en el lado opuesto a la Luna. Si sumamos las fuerzas centrífuga y gravitacional en cada lado de la Tierra, el resultado es una fuerza neta. Dicha fuerza neta produce dos abultamientos de agua en la Tierra: una en el lado de la Luna y otra en el lado opuesto a la Luna.

2.3.2 El sistema Tierra-Luna-Sol

Aunque el Sol está mucho más lejos que la Luna, es bastante grande y también ejerce una atracción gravitacional sobre el sistema Tierra-Luna y contribuye a la formación de un abultamiento de agua de marea.

Las explicaciones sobre las fuerzas gravitacional y centrífuga de la Luna también aplican al Sol. Por consiguiente, en la Tierra se forman abultamientos de agua en el lado del Sol y

en el lado opuesto al Sol, de la misma manera que se forman en el lado de la Luna y opuesto a la Luna. Sin embargo, la intensidad que aportan las fuerzas solares a los abultamientos de agua de marea son solo la mitad de las fuerzas lunares aproximadamente.

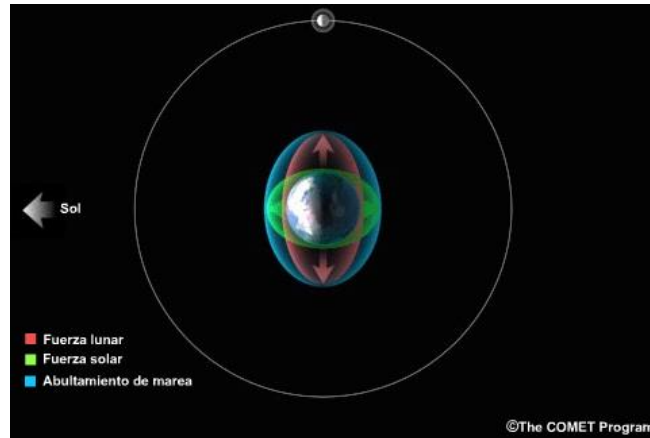


Figura 6. Fuerzas generadoras de mareas. Sistema Tierra-Luna-Sol

2.3.3 Alineación planetaria: MAREAS DE SICIGIA Y CUADRATURA

Cuando La Tierra, La Luna y El Sol quedan alineados, las fuerzas gravitacionales se suman produciendo mareas de mayor amplitud: pleamares más altas y bajamares más bajas de lo normal, denominadas mareas de sicigia. Si por el contrario, la Luna se encuentra a 90 grados respecto de la alineación de la Tierra y el Sol, los efectos de la Luna y del Sol no se suman y en consecuencia, la amplitud de la marea alcanza un mínimo. Las pleamares son más bajas de lo normal y las bajamares son más altas de lo normal, a este fenómeno se le denomina mareas de cuadratura.

Durante un ciclo lunar, la Tierra, la Luna y el Sol se alinean en dos ocasiones: la primera en luna nueva y la siguiente en luna llena, por consiguiente, las mareas de sicigia ocurren dos veces cada 29 días. Lo mismo ocurre con las mareas de cuadratura, presentes dos veces en cada ciclo lunar, cuando la luna está en cuarto creciente y cuarto menguante.

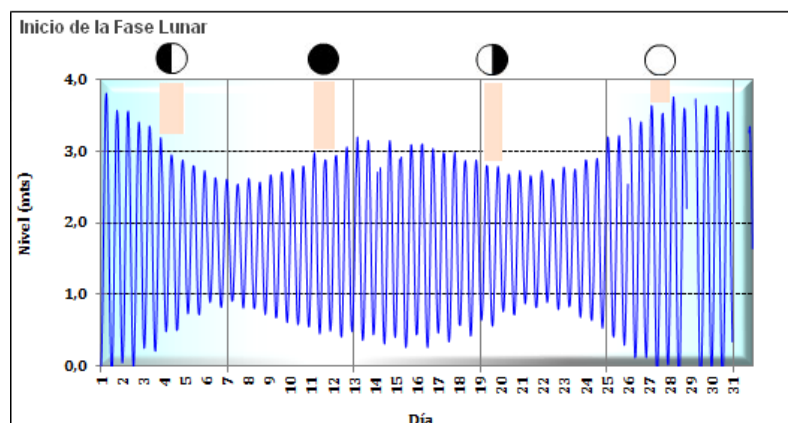


Figura 7. Serie temporal de los ciclos de mareas de cuadratura y de sicigia en el mes de Octubre de 2015 en Tumaco-Nariño (Arriba), mes en el que se alcanzaron casi 4 m de altura de la marea, provocando inundación costera durante el 27 y 28 de octubre, por la coincidencia de la luna llena con el perigeo, un evento El Niño de intensidad fuerte y un sistema de baja presión asociado.

De acuerdo con la figura, en Tumaco, las mareas de cuadratura ocurren durante el cuarto creciente, a mitad del mes, y nuevamente durante el cuarto menguante hacia el fin de mes y tienen una amplitud de metro y medio. Las mareas de sicigia ocurren en luna nueva y luna llena, cuando la Tierra, la Luna y el Sol están alineados. La amplitud de la marea en ese momento alcanza los 3 metros.

2.3.4 Declinación de la Luna: MAREAS ECUATORIALES y TROPICALES

La declinación de la Luna, se refiere al cambio constante de posición de esta con relación al Ecuador terrestre. Este efecto se debe a la inclinación del eje de rotación de la Tierra respecto al plano de la órbita lunar. A medida que la Luna describe su órbita alrededor de la Tierra, en un periodo de 27 días, su posición en el cielo se desplaza y pasa del norte al sur del Ecuador.

Los cambios en la declinación de la Luna influyen en la frecuencia y la amplitud de las mareas. Cuando la Luna está sobre el Ecuador, los abultamientos del agua de marea también están centrados sobre el Ecuador, lo cual tiende a producir mareas semidiurnas.

Esta configuración geométrica de la Tierra y la Luna crea un régimen global de mareas conocido como mareas ecuatoriales. Durante las mareas ecuatoriales, todas las mareas tienden a exhibir desigualdades diurnas menores, independientemente del lugar.

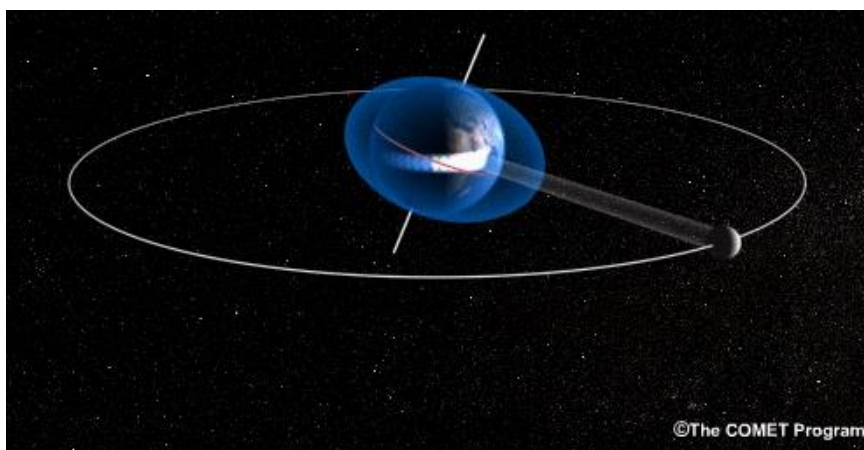


Figura 8. Ciclo mensual de cambios en la declinación de la luna – Día 9.

Se producen mareas tropicales cuando la Luna alcanza su máxima declinación al norte o al sur del ecuador, lo cual tiende a producir mareas con desigualdades diurnas mayores, o mareas diurnas.

2.3.5 Distancia Tierra-Luna

La variación en la distancia Tierra-Luna, afecta la magnitud de las fuerzas generadoras de marea. Cuando la luna está más próxima a la tierra (perigeo), estas fuerzas aumentan y las mareas son de mayor amplitud, por el contrario, cuando se encuentra más lejana (apogeo) se reducen y la amplitud disminuye.

3. Variabilidad real de las mareas

3.1 Componentes armónicos de la marea

Las características de las mareas varían con el tiempo y el lugar, pero los mecanismos de forzamiento son regulares y predecibles. Además del forzamiento astronómico primario de las mareas, mucha de su variabilidad se debe a los efectos batimétricos y a la fuerza de Coriolis.

La combinación de los diferentes mecanismos de forzamiento astronómico descritos, crean la marea astronómica total. Mediante el análisis armónico de los niveles del agua observados durante largos períodos, en un punto de observación, se puede diferenciar la contribución de cada mecanismo individual, estos elementos se denominan componentes de la marea, dentro de los cuales pueden mencionarse los siguientes:

- M2, describe las fuerzas gravitacional y centrífuga generadas por la rotación del sistema Tierra-Luna.
- S2, representa la contribución de la atracción gravitacional del Sol.
- N2, describe los cambios en la distancia entre la Tierra y la Luna.
- K1, O1 y P1 describen los cambios en la declinación del plano Tierra-Luna-Sol.

Normalmente se utiliza el concepto del espectro, para la determinación de períodos escondidos de las series de tiempo, para la investigación de las leyes de la estructura de frecuencias o para la modelación y pronósticos de los procesos.

De acuerdo con el análisis armónico, los cambios complejos del nivel del mar se presentan como la suma de una serie de ondas regulares, cada una de las cuales tiene carácter de oscilaciones simples armónicas. Entonces, utilizando el análisis espectral se pueden determinar todas las componentes de una serie de nivel del mar o armónicas.

Con la ayuda de un filtro, se pueden extraer todas las armónicas de una serie inicial del nivel del mar, separando las oscilaciones no periódicas, aislando así, la marea meteorológica de la marea astronómica.

Utilizando el análisis armónico también se pueden determinar las amplitudes y fases de todas las componentes armónicas para cada punto de observación.

El estudio del movimiento celeste del sistema Sol-Luna-Tierra es complejo debido que en él se analizan las influencias en los componentes principales de otros períodos moduladores correspondientes a períodos de 1 mes, 1 año, 8.85 años, 18.61 años y 21 000

años. El efecto de la modulación divide a las mareas en períodos cercanos a 1 y 2 ciclos por día.

3.2 Efectos meteorológicos en las mareas

Además de las mareas astronómicas, el viento y las fluctuaciones en la presión atmosférica también provocan cambios en el nivel del agua. Estos cambios se refieren a las mareas meteorológicas. Para determinar la marea meteorológica, simplemente se resta o se sacan los residuos entre la marea astronómica pronosticada y la marea observada. Aunque la amplitud típica de la marea meteorológica es menos de un metro, puede predominar en la marea total en aquellas regiones donde las mareas astronómicas no son muy fuertes.

3.3 Componentes armónicos de la marea en las estaciones mareográficas de Colombia.

En las estaciones de BUENAVENTURA y TUMACO, el mayor aporte en la formación de la marea está dado por el componente M_2 denominado la principal lunar, de lo que se infiere que el tipo de oscilaciones de la marea es semidiurno. En Buenaventura, el porcentaje de las oscilaciones no periódicas no es mayor al 5% y en Tumaco, cercano al 20%. Las oscilaciones son similares, pero registran amplitudes distintas de acuerdo con su posición geográfica. En Buenaventura, el porcentaje de las oscilaciones no periódicas no es mayor al 5% y en Tumaco, cercano al 20%. En cuanto a las fases de la marea, son muy parecidas, y por esta razón las bajamares y pleamares prácticamente se presentan al mismo tiempo.

En las estaciones de CARTAGENA y SAN ANDRÉS, el mayor aporte en la formación de la marea está dado por las componentes diurnas K_1 y O_1 y las componentes semidiurnas

M_2 y N_2 . En Cartagena, el porcentaje de las oscilaciones no periódicas no es mayor al 25% y en Tumaco, cercano al 20%.

Referencias Bibliográficas:

Diccionario Hidrográfico Internacional (inglés/español):

http://www.loria.fr/projets/MLIS/DHYDRO/outils/site_edition/byproducts/Tout_Martif_en_e_s.html

Tide and Current Glossary de NOAA (inglés):

<http://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/glossary2.pdf>

Glosario de Términos Oceanográficos (español):

<http://bcs.cicese.mx/glosario-OceFis/index.html>

<http://eddy.uvigo.es/Docencia/MOF/MOF-7.html>

<http://www.cibernautica.com.ar/imagen/grasisi.gif>

Introducción a las Mareas Oceánicas

https://www.meted.ucar.edu/training_module.php?id=301

IDEAM. Estudio sobre la Determinación de las Componentes Armónicas de la marea y descripción de su comportamiento en diferentes puntos de las Costas Colombianas. METEO/003. Bogotá. 2010.