

REGIMEN DE MAREA Y NIVEL DE REDUCCION DE SONDAJES

INICIO

❖ Tipos de marea

Para clasificar a la marea P. Van der Stok (1867) adoptó tres tipos principales, basados en el resultado obtenido al hacer el cociente entre la suma de las ondas diurnas K_1 y O_1 y las semidiurnas M_2 y S_2 . El resultado obtenido (F) será un número más pequeño que 1 si predominan las componentes semidiurnas y más grande que 1 si predominan las diurnas.

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2}$$

Posteriormente Courtier (1938) incrementó a cuatro los tipos de marea. Esta clasificación es la que se adopta mayormente en la actualidad y se explica a continuación:

- Si se cumple que $F < 0,25$; la marea es *semidiurna*. Se producen 2 bajamares y 2 pleamares por día, que alcanzan prácticamente la misma altura. Además los intervalos entre el pasaje de la Luna por el meridiano y la ocurrencia de la pleamar se mantienen aproximadamente constantes para una localidad. En nuestro país este régimen se observa desde Bahía Blanca hasta Tierra del Fuego.
- Si se cumple que $0,25 \leq F < 1,5$; la marea es *mixta preponderantemente semidiurna*. En la mayoría de los casos solamente se producen dos pleamares y dos bajamares por día, con una importante desigualdad diurna, aunque en ciertas ocasiones pueden presentarse una pleamar y una bajamar por día. Este último caso se produce cuando la declinación de la Luna es máxima. En nuestro país este régimen se observa en el Sector Antártico.
- Si se cumple que $1,5 \leq F < 3$; la marea es *mixta preponderantemente diurna*. Se producen tanto una pleamar y una bajamar por día (cuando la Luna alcanza su máxima declinación), como dos pleamares y dos bajamares con una importante desigualdad diurna (cuando la Luna pasa por el Ecuador).
- Si se cumple que $3 \leq F$; la marea es *diurna*. Se produce una pleamar y una bajamar por día.

Para ilustrar la influencia de los tipos de marea en una localidad se incluye la Figura 1 (Defant, 1961), que muestra las curvas de marea correspondientes a cuatro localidades. Estas curvas fueron confeccionadas realizando una predicción armónica, utilizando las componentes de marea presentadas en la Tabla 1. En esta última se calcula el tipo de marea (F).

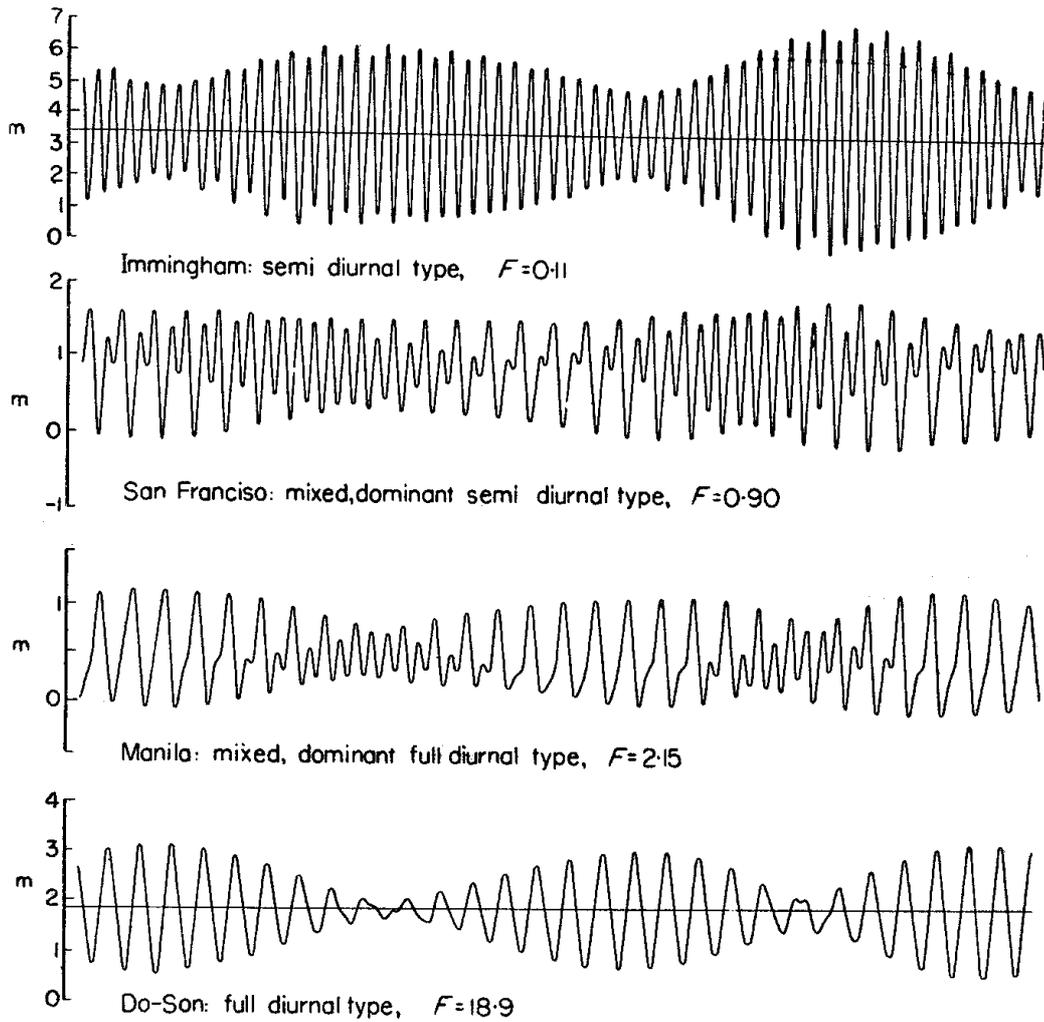


Figura 1 (Defant, 1961)

| Localidad | Immingham (Este de Inglaterra) | | San Francisco (Estados Unidos) | | Manila (Filipinas) | | Do Son (Vietnam) | |
|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------|-----------------------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| | Latitud | Longitud | Latitud | Longitud | Latitud | Longitud | Latitud | Longitud |
| Coordenadas | 53° 38' N | 0° 11' W | 37° 48' N | 122° 27' W | 14° 36' N | 120° 57' E | 20° 43' N | 106° 48' E |
| Componente | Epoca G [°] | Amplitud H [cm] | Epoca G [°] | Amplitud H [cm] | Epoca G [°] | Amplitud H [cm] | Epoca G [°] | Amplitud H [cm] |
| M2 | 161 | 223,2 | 330 | 54,2 | 305 | 20,3 | 113 | 4,4 |
| S2 | 210 | 72,8 | 334 | 12,3 | 338 | 6,8 | 140 | 3,0 |
| N2 | 141 | 44,9 | 303 | 11,5 | 291 | 3,8 | 99 | 0,8 |
| K2 | 212 | 18,3 | 328 | 3,7 | 325 | 2,1 | 140 | 1,0 |
| K1 | 279 | 14,6 | 106 | 37,0 | 320 | 29,7 | 91 | 72,0 |
| O1 | 120 | 16,4 | 89 | 23,0 | 279 | 28,3 | 35 | 70,0 |
| P1 | 257 | 6,4 | 104 | 11,5 | 317 | 9,3 | 91 | 24,0 |
| $\frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2}$ | 0.11 | | 0.90 | | 2,15 | | 18,9 | |

Tabla 1 (Defant, 1961)

❖ Nivel de reducción de sondajes.

Generalmente durante los levantamientos hidrográficos los sondajes registrados, en distintas oportunidades y en una misma posición geográfica, difieren entre si. Suponiendo inexistentes a los errores propios de los instrumentos y métodos empleados, estas diferencias se deben al fenómeno de la marea. Esto exige que las profundidades así determinadas deban ser referidas a un nivel particular del mar conocido con el nombre de nivel de reducción de sondajes.

El nivel de reducción de sondajes o cero hidrográfico es una superficie, establecida en forma permanente, a la cual se refieren los sondajes de las cartas náuticas y las alturas de las Tablas de Marea.

Para no depender del conocimiento de la marea del lugar y poder tomar decisiones contando únicamente con la carta náutica se hace coincidir el nivel de reducción de sondajes con las más bajas bajamares ordinarias. De esta forma la carta náutica indica la profundidad de la zona cuando se está registrando la bajamar ordinaria más baja. La Figura 2 ilustra lo explicado.

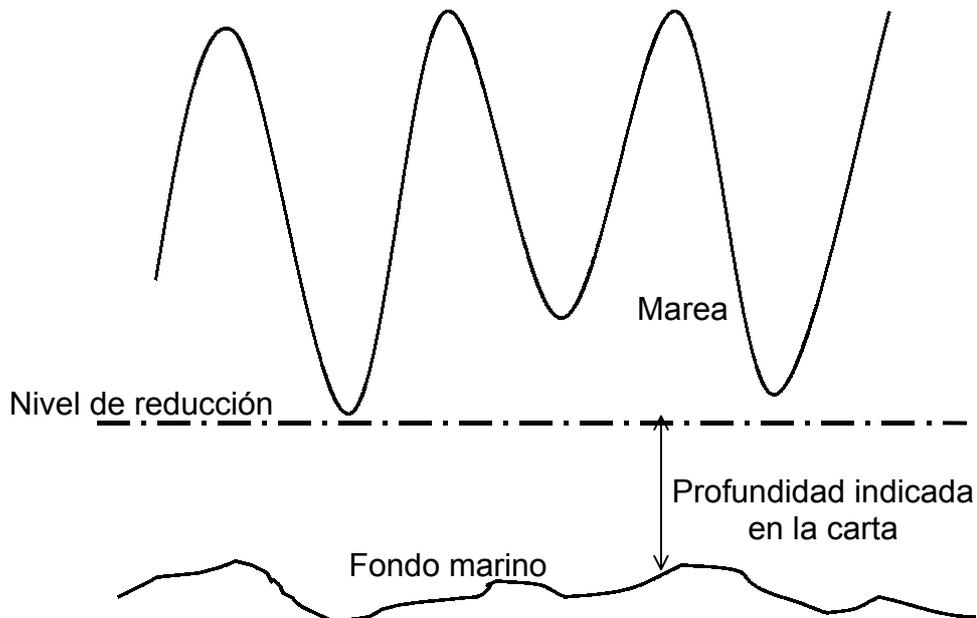


Figura 2

A continuación se hará una breve reseña sobre los criterios y antecedentes utilizados en la definición del nivel de reducción de sondajes.

En el año 1919, en el Congreso realizado por la Oficina Hidrográfica Internacional (OHI), se evidenció un interés por establecer normas internacionales que permitan la determinación del nivel de reducción de sondajes.

En sucesivas conferencias internacionales se establecieron las siguientes consideraciones para la determinación del nivel de reducción de sondajes:

1. Abandonar la idea de establecer un nivel de reducción internacional único e invariable calculado con una misma expresión matemática que satisfaga a todos los regímenes de marea.
2. Determinar el nivel de reducción de sondajes de acuerdo al régimen de marea de cada lugar.
3. Que su definición sea simple y de significado físico.
4. Que sea fácil de deducir tanto de las constantes armónicas como de las observaciones de marea.

Durante la Segunda Conferencia Internacional de Hidrografía realizada en Mónaco en 1926, se acordó que el Datum de Marea (cero de marea) debe ser el mismo que el nivel de reducción de sondajes de la carta náutica. Además debe ser tan bajo que sólo rara vez las bajamareas desciendan por debajo de él. En esta conferencia el Servicio Hidrográfico Británico, con algunas salvedades, propuso utilizar la siguiente regla práctica para determinar el nivel de reducción de sondajes:

"El nivel elegido debe ser tal que la marea no descienda de él N veces en un año de declinación lunar media". El valor de N se fijaría por acuerdo internacional. El Servicio de Hidrografía Naval Argentino propuso determinar el valor de N de acuerdo al tipo de fondo, mayor para fondos blandos que para fondos duros.

Durante la V reunión Panamericana de Consulta sobre Cartografía, en el Subcomité de Mareas, celebrada en Santiago de Chile en octubre de 1950, el Sr. Marciano A. Balay, presentó una nueva propuesta para determinar el nivel de reducción de sondajes. El Sr. Balay se desempeñó desde los comienzos del Servicio de Hidrografía Naval como jefe de Hidrografía y Mareas, antes de la creación del Departamento de Oceanografía, siendo uno de sus últimos cargos el de Asesor de la Jefatura de la Institución.

Esta propuesta cumplía con la mayoría de los requisitos solicitados por la OHI en esa época. En la misma se definió el nivel de reducción de sondajes como "el límite inferior de las más bajas bajamareas ordinarias".

Esta definición supone que las más bajas bajamareas ordinarias se ajustan razonablemente a una Distribución Normal, constituyendo la media aritmética menos el desvío standard el límite inferior de las mencionadas bajamareas. Para seleccionar a las más bajas bajamareas ordinarias se tuvo en cuenta la definición de régimen de marea dada por M. A. Courtier (1938) la cual establece que la marea puede clasificarse en cuatro regímenes perfectamente definidos de acuerdo al valor del resultado del cociente entre las principales semiamplitudes de las ondas diurnas (O_1 y K_1) y semidiurnas (M_2 y S_2).

Del estudio realizado por M. A. Balay (1951), surgen las siguientes definiciones de niveles de reducción de sondajes teniendo en cuenta las más bajas bajamareas ordinarias de los distintos tipos de marea.

1) Semidiurno

"Límite inferior de la media de las bajamareas de sicigias".

2) Desigualdades diurnas (equivalente a mixto preponderantemente semidiurno)

a) Tipo bajamareas iguales

"Límite inferior de la media de todas las bajamareas".

b) Tipo pleamareas iguales

"Límite inferior de la media de las bajamares de sicigias".

c)Tipo gran creciente o gran bajante

"Límite inferior de la media de las bajamares de sicigias trópicas".

3)Mixto (equivalente a mixto preponderantemente diurno)

"Límite inferior de la media de las bajamares de sicigias diurnas y semidiurnas"

4)Diurno

"Límite inferior de la media de las bajamares de sicigias trópicas"

Debido a lo expuesto el Servicio de Hidrografía Naval adoptó las siguientes definiciones de nivel de reducción de sondajes, en concordancia con el tipo de marea existente en nuestras costas (Glosario de las Tablas de Marea).

Zona del Río de la Plata: Límite inferior de la media de todas las bajamares.

Zona Cabo san Antonio a Canal Beagle: Límite inferior de la media de las bajamares de sicigias.

Zona Antártica: Límite inferior de la media de las bajamares de sicigias trópicas.

Cuando la longitud de la serie de mediciones es corta, no se pueden aplicar las definiciones dadas anteriormente, por lo que Balay propuso adoptar una Fórmula Armónica Alternativa que brinda la diferencia de altura entre el nivel medio del mar y el nivel de reducción de sondajes, de acuerdo con el régimen de marea. En esta fórmula se considera que las mayores bajamares ordinarias se producen cuando se ponen en fase las principales ondas componentes de marea. Esto se logra sumando las semiamplitudes (H) de las principales ondas componentes de la marea, luego se tiene:

1)Régimen Semidiurno

$$H_{M2} + H_{S2} + H_{N2} + H_{K2}$$

2) Régimen de Desigualdades Diurnas (equivalente a mixto preponderantemente semidiurno)

a)Tipo bajamares iguales

$$H_{M2} + H_{S2} + H_{N2}$$

b)Tipo pleamares iguales

$$H_{M2} + H_{S2} + H_{N2} + H_{K1} + H_{O1}$$

c)Tipo gran creciente o gran bajante

$$H_{M2} + H_{S2} + H_{K1} + H_{O1} + H_{P1}$$

3) Régimen Mixto (equivalente a mixto preponderantemente diurno)

$$H_{M2} + H_{S2} + H_{K1} + H_{O1}$$

4) Régimen Diurno

$$H_{M2} + H_{S2} + H_{K1} + H_{O1} + H_{P1}$$

Como no se disponía de observaciones de marea lo suficientemente largas como para utilizar la primer definición propuesta por Balay, un 80% de las determinaciones de niveles de reducción de sondajes fueron calculadas con la Fórmula Alternativa Armónica.

La aplicación de la mencionada fórmula, para esa época en la que no había posibilidades suficientes de cálculo, no debe entenderse como un error o una doble definición sino simplemente como un método que permite una aproximación a la definición originalmente dada.

La definición de nivel de reducción presentada por Balay no fue aceptada por la mayoría de los estados miembros de la OHI. El Servicio de Hidrografía de Gran Bretaña desarrolló este método comprobando que puede originar alturas negativas del orden de los 30cm (OHI, 1963). A pesar de esto, en esa época, esta definición era tan buena como cualquier otra, pues en todos los casos se debían buscar aproximaciones debido a los extensos cálculos que demandaban casi todas las definiciones.

Otro de los aspectos cuestionables de esta definición es que postula que las más bajas bajamares ordinarias se ajustan a la Distribución Normal. Esta distribución supone a la marea como un suceso puramente aleatorio. En realidad la marea está compuesta en su mayor parte por una componente determinística (marea astronómica) y otra aleatoria (onda de tormenta), lo que provoca que el ajuste a la Distribución Normal no sea óptimo.

Por otro lado, la elección de las más bajas bajamares ordinarias no prevé eliminar de las mismas el aporte de la onda de tormenta que en muchos casos modifica sustancialmente su valor, influyendo en el resultado final.

Además la Fórmula Armónica Alternativa, utilizada cuando no se dispone de datos suficientes, puede dar un nivel de reducción más alto respecto del fondo, frente a la menor bajamar obtenida mediante una predicción armónica efectuada con todas las ondas componentes durante un ciclo completo de marea (19 años).

Desde 1926 el Servicio Hidrográfico de Gran Bretaña viene proponiendo determinar el nivel de reducción coincidente con la más baja bajamar predicha en un período de 19 años. Como este cálculo no era factible de realizar en esa época, se plantearon distintas soluciones alternativas que se aproximaban a la definición anterior (por ejemplo la diferencia de altura entre el nivel medio y el nivel de reducción para las bajamares medias de sicigias puede ser expresada como la suma de las siguientes semiamplitudes $H_{M2} + H_{S2} + H_{K1} + H_{O1}$).

En el prólogo del Vol.1 de la Edición de 1964 del Admiralty Tide Tables fue anunciado que el LAT (Lowest Astronomical Tide) era el mejor criterio de nivel de reducción de sondajes razón por la cual se lo adoptaba en Gran Bretaña y su implementación se realizaría gradualmente.

Algunos de los países que hoy apoyan la adopción del LAT como nivel de reducción de sondajes son: Australia, Canadá, Chile, Dinamarca, España, Estados Unidos, Filipinas, Francia, Grecia, India, Nueva Zelanda, Omán, Paquistán, Reino Unido y Sudáfrica. Por otro lado Alemania está de acuerdo con esta propuesta pero recomienda que en zonas tales como el Báltico donde la marea no tiene un efecto importante no debería utilizarse. Por otra parte Portugal si bien no se opone a la adopción de esta definición, manifiesta que no ve ninguna ventaja en su aplicación. Holanda expresa que le gustaría ver argumentos prácticos más convincentes en favor del LAT. Japón no adoptará el LAT pues considera que no mejorará la seguridad en la navegación y creará únicamente un volumen de trabajo suplementario.

La OHI (1988) publicó que: "debido a que LAT es el menor Datum de la Carta de aplicación universal, con el mérito adicional de eliminar todos los valores negativos en la Tablas de Marea, se recomienda su adopción como objetivo a largo plazo, para ser considerado cuando surja la oportunidad de un cambio".

En el Anexo A de la Circular del BHI N° 30/1996 se recomienda nuevamente la adopción del LAT ya que este representa el nivel más bajo de marea en condiciones meteorológicas medias y bajo cualquier combinación de condiciones astronómicas. Además recomienda que su cálculo sea realizado durante un período mínimo de 19 años, utilizando las constantes armónicas derivadas de observaciones de un mínimo de un año.

En la nota de respuesta a la Circular del BHI N° 30/1996 el SHN expresa que la adopción del LAT es una buena solución para la mayoría de los casos. Sin embargo en ciertas zonas donde el nivel del agua desciende frecuentemente por debajo del LAT debe permitirse una adaptación. Esta última fue sugerida pensando en aquellas localidades donde el efecto de la onda de tormenta es igual o mayor que la amplitud de marea astronómica.

En la Tabla 2 se brinda una comparación entre el método de Balay y el LAT.

| Localidad | Cota del LAT con respecto al Nivel de Reducción de la zona |
|-----------------|--|
| Buenos Aires | 0.08m |
| Mar del Plata | 0.10m |
| Puerto Belgrano | 0.00m |
| Puerto Madryn | -0.21m |

Del análisis de la tabla anterior surge que en Buenos Aires, Mar del Plata y Puerto Belgrano no haría falta modificar la posición del actual nivel de reducción sino simplemente cambiar la definición. Por otra parte en Puerto Madryn es necesario modificar el nivel de reducción pues existe la posibilidad de la presencia de bajamares negativas en las Tablas de Marea.

❖ Reglas básicas para la obtención del nivel de reducción de sondajes

(Admiralty Manual of Hydrographic Surveying; Volumen II – Capítulo 2 – “*Tides and Tidal Streams*”; 1969 – Publicado por: The Hydrographer of the Navy)

1. El nivel de reducción debe coincidir con el cero de la carta náutica. Si su determinación requiriera de un largo tiempo de observaciones de mareas, el comienzo de los sondajes no debe ser demorado, y se calculará el nivel de reducción como resultado del primer día de observaciones de marea.
2. Los cambios del nivel de reducción dentro del área a sondear dependen de las distintas amplitudes de la marea. Cuando entre dos niveles existe un desnivel de más de pie, debe agregarse un nuevo nivel de reducción entre ambos.
3. Los retardos en el desplazamiento de la onda de marea entre dos localidades no influyen en las diferencias existentes entre los correspondientes niveles de reducción. Los retardos deben ser

considerados en la reducción de los sondeos, produciéndose los errores máximos en media marea.

❖ **Cómo cambia el Datum de marea en una costa abierta**
(Admiralty Manual of Hydrographic Surveying; 1969)

La figura 3 muestra como varían la media de las bajamares de sicigias (Mean Low Water Spring, MLWS) y la media de las pleamares de sicigias (Mean High Water Spring, MHWS), a lo largo de una línea imaginaria de costa de una longitud de 120 Km.

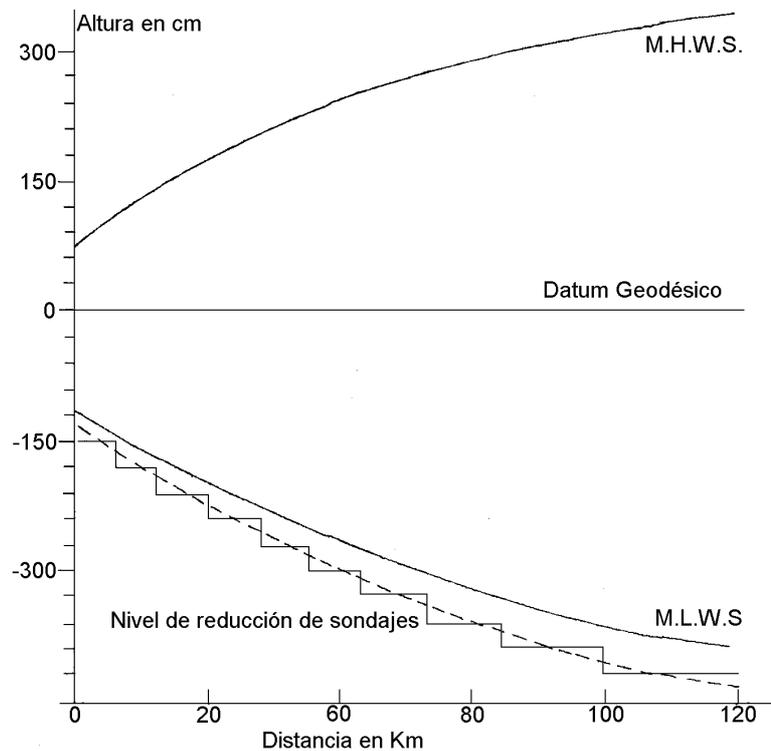


Figura 3

Como se observa la amplitud de la marea varía aproximadamente 5m desde el Km 0 hasta el Km 150, lo que motiva la variación del nivel de reducción de sondajes la zona, representado por la línea de puntos que sigue a la curva del M.L.W.S.

Sin embargo en la práctica es suficientemente preciso variar el nivel de reducción de sondajes utilizando una serie de “planos de reducción de sondajes”, separados altimétricamente entre sí por un desnivel igual o menor que un pie, que siguen la forma de la curva de nivel de reducción de sondajes.

Se recuerda que el Datum de marea (cero de mareas) debe coincidir con el nivel de reducción de sondajes adoptado para la zona.

En la Figura 3 las alturas están referidas al Datum Geodésico, que en nuestro país es el cero del Instituto Geográfico Militar (IGM)

❖ **Cómo cambia el Datum de marea en el estuario de un río.**
(Admiralty Manual of Hydrographic Surveying; 1969)

Las condiciones de la marea varían rápidamente cuando la configuración de la costa y la pendiente del fondo marino influyen en la amplitud de la marea. Se puede esperar esta situación en el estuario de un río (Figura 4).

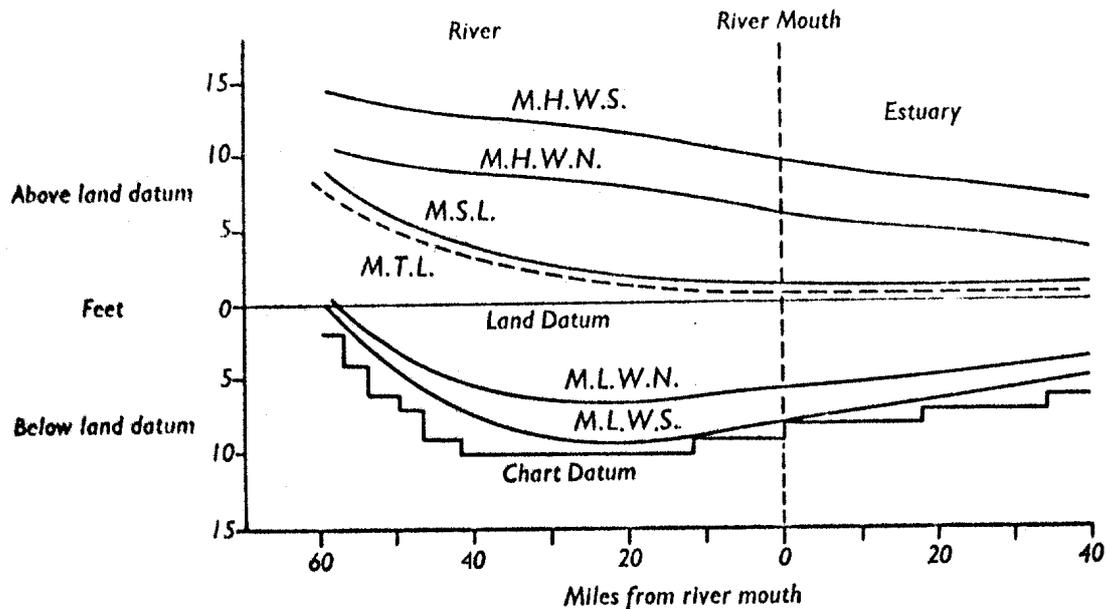


Figura 4

- MHWS: pleamar media de siciquia
- MHWN: pleamar media de cuadratura
- MSL: nivel medio del mar (media aritmética de alturas horarias)
- MTL: nivel de media marea (media aritmética de pleamares y bajamares)
- MLWN: bajamar media de cuadratura
- MLWS: bajamar media de siciquia

Al avanzar río arriba desde la desembocadura, la amplitud de la marea aumenta en un comienzo, las pleamares son más altas y las bajamares más bajas. Esto continúa hasta alcanzar un punto donde la topografía del fondo impide que las bajamares caigan más bajo. Río arriba de este punto se incrementan las alturas de las de las bajamares. En la Figura 4 se observa que este incremento es mayor en siciCIAS que en cuadraturas. Así siguiendo río arriba puede ser alcanzado un punto donde el nivel del MLWN coincida o incluso caiga debajo que el MLWS.

❖ **Medición de marea para la determinación del plano de reducción en un área extensa, donde las características de la marea son desconocidas.**

No es sencillo establecer un plano de reducción de sondajes adecuado que cubra una extensa costa donde las características de la marea son desconocidas. La información de marea se debe obtener a medida que se progresa en la investigación y los niveles de reducción deben ser obtenidos y transferidos gradualmente a lo largo de la costa. Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Se instala un mareógrafo a unas 10 Km del borde del área a sondar.
2. Mediante mediciones en este mareógrafo a lo largo de por lo menos 29 días, se determina el Plano de Reducción.
3. En la primera oportunidad se instala otro mareógrafo a 10 Km costa arriba del anterior, transfiriéndosele el datum de la carta (nivel de reducción de sondajes) desde el primer mareógrafo.
4. Si las diferencias de niveles medios entre ambos mareógrafos son mayores de 1 pie, o si las dos curvas son de muy distinta forma, o si los retardos son grandes, se instala un mareógrafo intermedio.
5. A medida que progresa el relevamiento se continúan instalando mareógrafos según 1), 2), 3) y 4).

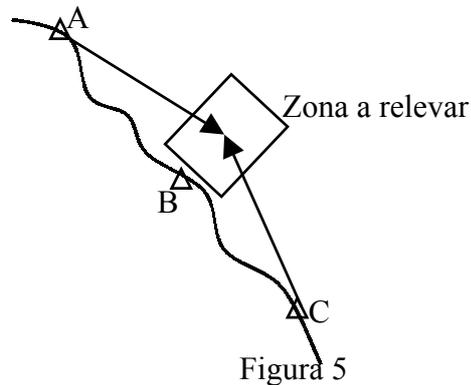
❖ **Método de obtención del plano de reducción de sondajes en un relevamiento, en orden de preferencia**

1. Si el plano de reducción se halla ya establecido se lo recobrará, mediante una nivelación geométrica.
2. Si el plano de reducción se halla ya establecido en lugar cercano al área a sondar, se lo transferirá al área de estudio.
3. En caso de no cumplirse 1) ó 2), deberá establecerse el plano de reducción por algún método conocido.

❖ **Determinación del plano de reducción por interpolación entre dos planos conocidos.**

De las cartas de mayor escala, de las Tablas de Marea, y de los Servicios Hidrográficos, es posible obtener los planos de reducción y su vinculación con un sistema local de nivelación. Luego se vinculan estos puntos fijos al cero del mareógrafo o mareómetro que se utiliza en la reducción de sondajes, mediante una nivelación geométrica..

Donde el Plano de Reducción haya sido establecido a intervalos regularmente cercanos, se lo puede interpolar. Por ejemplo, se supone que se necesita encontrar un plano para una localidad B conociendo los planos de A y C (Figura 5).



Se sabe que:

- El nivel de reducción de sondajes en A pasa a 235cm por debajo del cero del IGM.
- El nivel de reducción de sondajes en C pasa a 162cm por debajo del cero del IGM.
- La distancia entre A y el centro y el centro de la zona a relevar es 20,4 Km.
- La distancia entre C y el centro y el centro de la zona a relevar es 19,6 Km.

Luego :

$$(20,4 \text{ Km} + 19,6 \text{ Km}) \frac{(235 \text{ cm} - 162 \text{ cm})}{19,6 \text{ Km}} x$$

Finalmente la cota del nivel de reducción de sondajes en B, por debajo del cero del IGM será:

$$162\text{cm} + \frac{19,6\text{Km} \cdot (235\text{cm} - 162\text{cm})}{20,4\text{Km} + 19,6\text{Km}}$$

❖ Transferencia del plano de reducción cuando la marea es semidiurna.

Se transferirá el nivel de reducción de sondajes desde una estación denominada patrón, donde se conoce el nivel de reducción, a otra denominada secundaria. Para ello como mínimo se deben medir, simultáneamente en ambas estaciones, 4 bajamares consecutivas y las 3 pleamares intermedias en/o cerca de sicigias (Figura 6). La principal razón por la cual se eligen las mareas de sicigias es que sus amplitudes serán grandes comparadas con las variaciones causadas por los fenómenos meteorológicos.

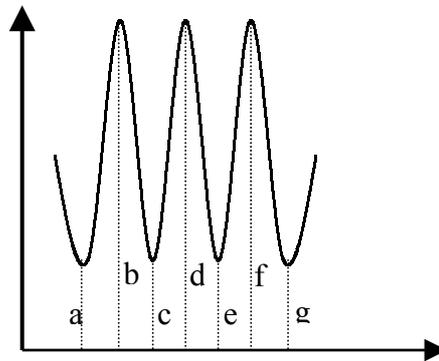


Figura 6

A continuación se calcula el nivel de media marea de 4 maneras diferentes:

$$h_1 = \frac{(a + b + c + d)}{4}$$

$$h_2 = \frac{(b + c + d + e)}{4}$$

$$h_3 = \frac{(c + d + e + f)}{4}$$

$$h_4 = \frac{(d + e + f + g)}{4}$$

Luego se calcula el valor medio de los h_i .

$$h = \frac{(a + 2b + 3c + 4d + 3e + 2f + g)}{16}$$

$$h = \left[\frac{(a + 3c + 3e + g)}{8} + \frac{(b + 2d + f)}{4} \right] \cdot \frac{1}{2}$$

El primer término de la expresión entre corchetes de la ecuación anterior es una bajamar media (MLW) y el segundo es una pleamar media (MHW). Luego:

$$MLW = \frac{(a + 3c + 3e + g)}{8} \quad [1]$$

$$MHW = \frac{(b + 3d + f)}{4} \quad [2]$$

Las expresiones [1] y [2] minimizan los efectos de las desigualdades diurnas.

Luego de calcular en ambas estaciones MLW y MHW se determina la amplitud media como diferencia de ambas. En la estación patrón la amplitud media es $R=MHW-MLW$ y en la secundaria $r=MHW-MLW$.

Se calcula en ambas estaciones el nivel medio observado utilizando días enteros. Se denota con M' al resultado obtenido para la estación patrón y con m' al nivel medio observado de la estación secundaria. El nivel medio asignado a la estación patrón se lo denota con M (es el que figura en las Tablas de Marea).

Todos los elementos calculados se pueden volcar en la Figura 7.

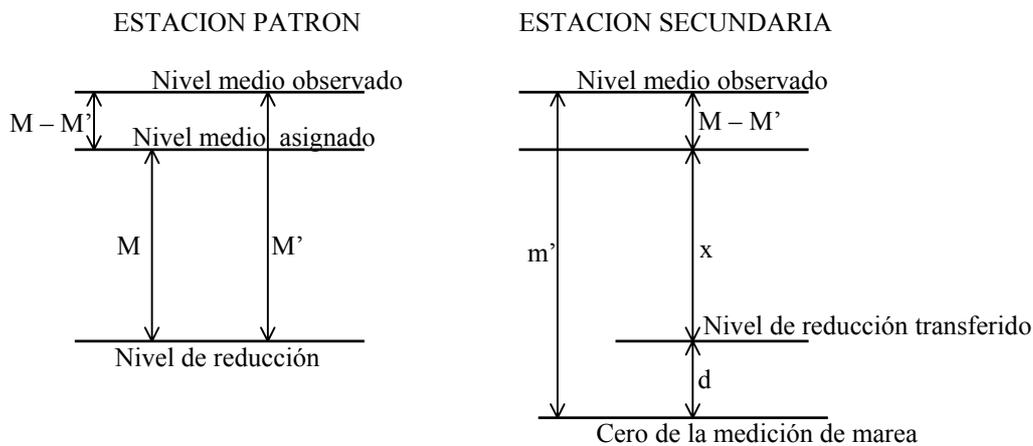


Figura 7

Para construir la altimetría de la estación secundaria se supone que la diferencia entre el nivel medio observado y el asignado en la estación primaria se mantiene en la estación secundaria. Además se plantea la siguiente relación:

$$\frac{R}{r} = \frac{M}{x}$$

$$x = \frac{M \cdot r}{R}$$

Finalmente :

$$d = m' - (M' - M) - \frac{M \cdot r}{R}$$

❖ **Transferencia del plano de reducción cuando la marea es diurna.**

Deben obtenerse componentes armónicas en ambas estaciones.

Para marea semidiurna se utilizaba:

$$d = m' - (M' - M) - M \cdot r/R ; \text{ en la cual:}$$

m' = Nivel medio observado en la estación secundaria
 M' = Nivel medio observado en la estación patrón
 M = Nivel medio en la estación patrón
 R = Amplitud media en la estación patrón
 r = Amplitud media en la estación secundaria

Para la marea diurna se utiliza la siguiente ecuación:

$$d = z' - (Z' - Z_0) - Z_0 \cdot h/H \quad \text{donde:}$$

z' = Nivel medio observado en la estación secundaria
 Z' = Nivel medio observado en la estación patrón
 Z_0 = Nivel medio asignado en la estación patrón
 H = Amplitud media en la estación patrón.
 h = Amplitud media en la estación secundaria.

Las amplitudes medias se calculan sumando las siguientes amplitudes obtenidas en los análisis armónicos realizados en las estaciones patrón y secundaria:

$$[H_{M2} + H_{S2} + H_{K1} + H_{O1}]$$

❖ **Transferencia del plano de reducción con pocas horas de observaciones.**

Observando solamente una pleamar y la bajamar siguiente, en la estación secundaria, se puede determinar su nivel de reducción, comparando estas mediciones con una predicción en una estación patrón.

Se procederá como sigue:

- 1) Obtener la amplitud observada en la estación secundaria.
- 2) Obtener nivel de media marea en la estación secundaria.
- 3) Obtener de las tablas de marea la amplitud predicha para ese mismo día la estación patrón.
- 4) Calcular la razón: (amplitud observada en la estación secundaria) / (amplitud predicha en la estación patrón).
- 5) Estudiar las mareas predichas en el puerto patrón de las tablas de marea, seleccionando un día en que la bajamar predicha esté cerca del nivel de reducción de sondajes.
- 6) A la amplitud predicha en la estación patrón para aquel día, se le aplica la razón obtenida en 4), para obtener la amplitud equivalente en la estación secundaria.
- 7) El nivel de reducción de sondajes de la estación secundaria se obtiene restándole al nivel de media marea observado la mitad de la amplitud equivalente obtenida en 6).

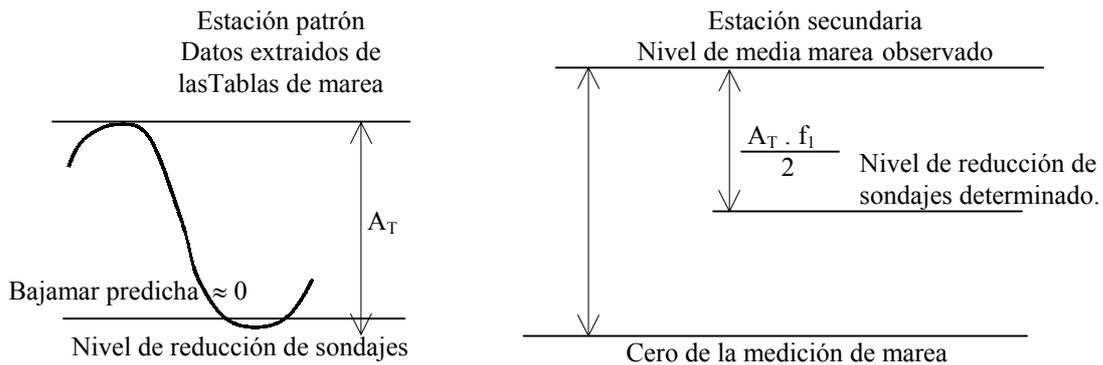


Figura 8

En la figura 8 se observan las operaciones realizadas.

$f_1 = (\text{amplitud observada en la estación secundaria}) / (\text{amplitud predicha en puerto patrón por las tablas de marea})$.

$A_T \cdot f_1 = \text{amplitud que debería haber en la estación secundaria el mismo día en que la bajamar predicha en la estación patrón es casi igual a 0}$.

❖ **Determinación del nivel de reducción de sondajes en ríos.**

Los criterios utilizados suelen variar de acuerdo con las características de los ríos. Como ejemplo se establecerá una metodología para determinar los Ceros Hidrométricos en la Hidrovía Paraguay – Paraná. Se adoptarán dos procedimientos distintos, uno para el Río Paraná y otro para el Río Paraguay. Ambos procedimientos se fundamentan en el mismo tratamiento estadístico de la información, difiriendo solamente en la longitud de las series temporales utilizadas.

En el Río Paraná debido a la influencia de los aprovechamientos hidroeléctricos se ha producido en los últimos años una modificación de su régimen. En este caso se utilizarán series continuas de los últimos 30 años de niveles diarios del río.

Para el Río Paraguay se utilizarán las mayores series temporales que se dispongan preferentemente mayores de 50 años.

El procedimiento estadístico que se desarrolla a continuación es válido para estaciones ubicadas como mínimo 200km agua abajo del último aprovechamiento hidroeléctrico u otra obra de contención construida sobre brazos o tributarios importantes de la vía navegable. En este último caso deberán tenerse en cuenta las distintas variables hidrológicas vinculadas a la obra de aprovechamiento hidroeléctrico mencionado. Si bien esta situación no se da en la actualidad debe tenerse en cuenta para tiempos futuros.

El criterio adoptado para determinar los Ceros Hidrométricos consiste en establecer un nivel de agua correspondiente a una duración del 90% en un año seco, que surja de una recurrencia de 10 años.

A continuación se describe brevemente la metodología para llevar a la práctica esta última definición.

Se realizará un análisis de consistencia de las series limnimétricas seleccionadas, que consistirá básicamente en correlaciones de medias aritméticas mensuales entre localidades especialmente escogidas, para un mismo período de observación.

Se calcula para cada año la altura que cumpla con la condición que sólo el 10% de la totalidad de las mismas sean menores o iguales a ella.

Con las series temporales obtenidas en el punto anterior, utilizando la ecuación general propuesta por Jenkinson (1955) conocida como GEV (Generalized Extreme Value), se determina la altura correspondiente a un período de retorno de 10 años. Se utilizará la función de distribución acumulativa que mejor ajuste a las serie dadas.

Cuando existan lugares donde no se disponga de una serie de registros suficientemente largos, se completarán los mismos. Para ello se utilizarán series limnimétricas para un período común de registro de la estación a completar y de otra cercana (a menos de 100km de distancia), que posea una larga serie de observaciones. Al período común de observaciones se le ajusta una recta por el método de mínimos cuadrados. Si el coeficiente de correlación lo permite, la ecuación de la recta obtenida y las alturas de la serie larga permitirá completar la serie corta. Este cálculo podrá también realizarse con dos localidades, una aguas arriba y otra aguas abajo de la localidad que se desea completar la serie. El resultado final resultará de un promedio ponderado, donde los pesos se adjudicarán inversamente proporcionales a las distancias entre las localidades.

Los Ceros Hidrométricos determinados deberán ser relacionados a las nivelaciones generales de los países respectivos. En una etapa posterior deberán ser vinculados entre sí, aunque este hecho sea independiente de los requerimientos hidrográficos con fines náuticos y portuarios.

La ecuación general propuesta por Jenkinson (1955) conocida como GEV (Generalized Extreme Value) es :

$$y = a(1 - e^{-kx})$$

donde a y k son parámetros condicionales, x es la variable reducida $-\ln(-\ln(2m-1/2N))$, N es el tamaño de la muestra y m es la posición gráfica de Weibull.

Esta ecuación describe adecuadamente la familia de distribuciones de valores extremos conocidas como:

- Fisher - Tippet (1928) Tipo I o Gumbel (Gumbel, 1958) si $k=0$.
- Fisher - Tippet (1928) Tipo II si $k<0$.
- Fisher - Tippet (1928) Tipo III si $k>0$.

❖ Referencias Bibliográficas

ADMIRALTY MANUAL OF HYDROGRAPHIC SURVEYING (1969). Vol. II. "Tides and Tidal Streams". Published by the Hydrographer of the Navy.

ADMIRALTY TIDE TABLES (1964). Vol. 1. Published by the Hydrographer of the Navy.

BALAY M.A. (1951). "La cota del plano de reducción de sondajes en un lugar". Dirección General de Navegación e Hidrografía.

COURTIER A. (1938). Marees. Serv. Hydr. Marine, París.

DEFANT ALBERT, (1961). Physical Oceanography. Volume II. Pergamon Press.

GUMBEL E.J., (1958). Statistics of Extremes. Columbia University Press, New York.

JENKINSON A.F. (1955). The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 81, 158 - 172.

OHI (1963). Revista Hidrográfica, Junio, 1963.

OHI (1988). Especificaciones Cartográficas de la OHI y Reglamentos de la OHI para las Cartas Internacionales (INT). Publicado por la OHI, Mónaco. MP-004.

SCHUREMAN PAUL, (1988). Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides, Coast and Geodetic Survey, Special Publication No. 98, 317 p.

TABLAS DE MAREA. Publicación Anual, H-610. Servicio de Hidrografía Naval.