

• **JUNTA DE INVESTIGACIONES TÉCNICAS** •

UNA POSIBLE EXPLICACIÓN DEL FENÓMENO DE LAS MAREAS

• TEORÍA ONDULATORIOCENTRÍFUGA ⁽¹⁾ •

— POR RAMÓN IRIBARREN CAVANILLES, INGENIERO DE CAMINOS

Continúa en el presente artículo el notable trabajo del Sr. Iribarren, y en él se describen, razonadamente, las objeciones que opone el autor a la teoría anfdrómica y a la explicación que de ella ha pretendido darse.

V

Visto todo lo anterior, vamos a indicar algo en relación con la teoría anfdrómica, empezando por ocuparnos del primer punto anfdrómico, que dicen comprobado, y alrededor del cual aseguran que giran las cotidales de la zona SE. de Inglaterra y de los Países Bajos.

Nos referimos al punto anfdrómico situado en la zona Sur del mar del Norte, y que puede verse en la figura 6.

El estudio de este primer punto anfdrómico, cuya existencia se estima comprobada por el mero hecho de que su altura de marea se creyó comprobar, primero, con la sonda, que era nula, y, posteriormente, con mareógrafos sumergidos, que era del orden de los 70 cm.; es de gran importancia, pues, su generalización a cuantos mares y océanos se ha creído conveniente, por avanzar la onda de marea en cierto sentido en una costa, y en el contrario, en la de enfrente, ha dado origen a la última teoría sobre las mareas, o sea a dicha teoría anfdrómica, de gran parte de la cual nos permitimos dudar.

De acuerdo con la teoría que hemos denominado ondulatoriocentrífuga, suponemos que la rama de onda originaria baja por el mar del Norte en dirección aproximada a la Norte-Sur, apoyándose, por la acción de la fuerza centrífuga compuesta, en las costas de Inglaterra, y vamos a comprobar si los resultados obtenidos, en esta hipótesis, concuerdan con la realidad mejor que el repetido punto anfdrómico.

En la figura 6' hemos dibujado, aproximadamente y de acuerdo con dicha teoría, el avance en planta de las cotidales que no se cortan en punto anfdrómico alguno, sino que ateniéndose, simplemente, a las leyes de propagación de todo movimiento ondulatorio progresivo, avanzan sensiblemente paralelas a sí mismas.

Hemos representado así la onda originaria que baja por el mar del Norte hacia el Sur y la reflejada, o que cruza con ella, en la zona de Calais y sube hacia el Norte.

Esta reflexión, o lo que es lo mismo, cruce de crestas de ondas, se verifica en la estrecha zona de Calais, a la que le corresponde el vientre de la reflexión, hacia la hora XI, por lo que la zona nodal será la determinada por las cotidales VIII y II (1) de cada una de dichas ondas.

Vemos que estas cotidales VIII y II, se cruzan, avanzando en direcciones contrarias, sobre el supuesto punto anfdrómico, y para mayor claridad hemos dibujado, en la figura 8, el perfil vertical del mar a lo largo de ellas.

Con este fin, hemos comenzado por dibujar, de acuerdo con la exponencial $h = h_2 e^{-\lambda x}$, las dos curvas exponenciales VIII que corresponden, respectivamente, a la pleamar en la costa inglesa y a la bajamar en la holandesa de enfrente, por ser la diferencia entre dichas cotidales, VIII y II, de seis horas lunares.

(1) Verificándose realmente dicho cruce hacia las XI,5, es probable que la nodal se aproxime más a las cotidales VIII,5 y II,5, pero estas precisiones no tienen importancia para el presente estudio global y nada más que aproximado del fenómeno.

(1) Véanse los números 2719, 2721, 2724 y 2727 de la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS.

Recordemos que, aproximándose la profundidad media de esta zona a $H = 20$ m., la celeridad es

$$C = \sqrt{gH} = \sqrt{9.81 \times 20} = 14 \text{ m./s.} = 50.5 \text{ km./h.},$$

$$\text{la semilongitud } L = CT = 14 \times 22\,350 = 313 \times 10^3 \text{ m.} = 313 \text{ km. y la relación } K = \frac{L_0}{L} =$$

$$= \frac{1\,564 \times 106}{133 \times 10^3} = 4\,990.$$

Tenida cuenta de que para la latitud $\lambda = 52^\circ$ resulta

$$A = \frac{2\omega\pi K \sin \lambda}{gT} = 82.3 \times 10^{-7}.$$

Estas cotidales, o líneas de igual hora de pleamar, sólo se extienden, en realidad, desde cada una de las costas hasta el punto O .

Tenemos así, en definitiva, que, si como se observa, las alturas de marea, en estas zonas de las costas inglesa y holandesa son del orden de 1,80 m., van disminuyendo rápidamente a medida que nos alejamos de ellas según las cotidales, anulándose o, tenida cuenta de las diferencias entre la teoría y la realidad, haciéndose muy pequeñas en el centro, o sea a unos 100 kilómetros de cada una de ambas costas, donde, en realidad existe un punto absolutamente nodal, O , pero no anfdrómico, pues en él las alturas tienden a anularse o a hacerse muy pequeñas, sin que

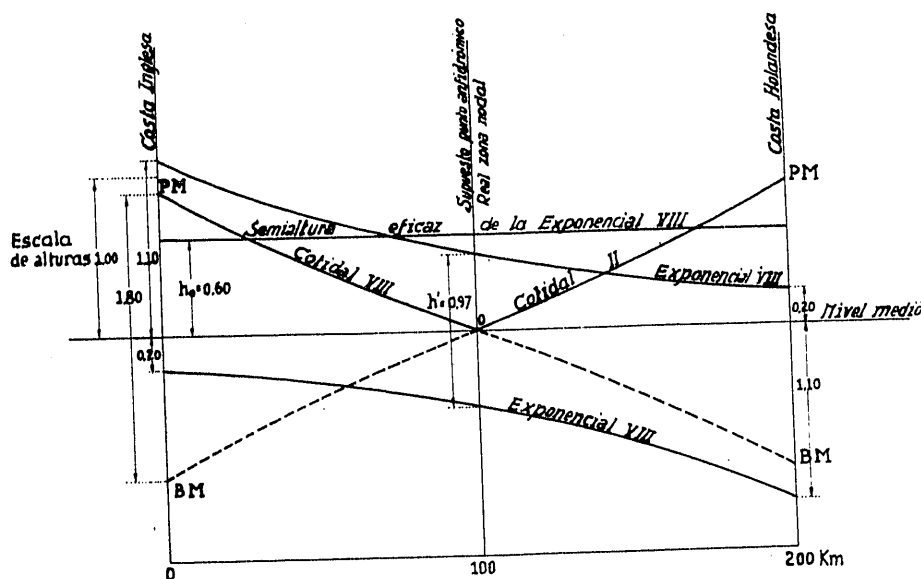


Fig. 8. — Mar del Norte. Supuesto punto anfdrómico.

podemos dibujar dichas exponenciales VIII, correspondientes, repetimos, a la pleamar en la costa inglesa y a la bajamar simultánea en la holandesa de enfrente.

Con objeto de que las alturas de marea resultantes, en ambas costas, se aproximen a los 1,80 m. observados, se han dibujado, después de algunos tanteos, las exponenciales correspondientes a una semialtura en las costas $h_2 = \frac{2.20}{2} = 1.10$ m., que, como

en la costa opuesta, produce una semialtura $h_1 = 0.20$ metros, la semialtura resultante se aproximará a $1.10 - 0.20 = 0.90$, ó sea la semialtura observada.

Restando, o mejor dicho, sumando algébricamente ambas exponenciales simultáneas, obtenemos la cotidal II.

esto compruebe nada, como a continuación veremos, en relación con el supuesto giro de las cotidales, que en realidad no giran alrededor de él, sino que lo cruzan, dirigiéndose hacia el SO. la onda originaria y hacia el NE. la reflejada.

En efecto: como se fundamenta en la teoría anfdrómica, el giro de las cotidales se produce como consecuencia de la superposición de dos oscilaciones estacionarias de direcciones cruzadas y distinta fase.

La anfdrómica se acentúa si las direcciones de ambas oscilaciones son normales y si su decalaje de fase es de 90° , por lo que vamos a ocuparnos de este interesante caso.

Tomando como origen de coordenadas un nodo que se efectúa según el eje de las y , en la larguísima

de ambas oscilaciones, las ecuaciones generales de la onda de marea que nos ocupa, en la que la sobre-elevación del nivel medio $\frac{\pi r r'}{2L} = \frac{\pi h^2 k}{2L}$ es despreciable, serán (1):

$$\begin{cases} x = x_0 \\ y = y_0 + 2r_1 \sin \pi \frac{t}{T} \cos \pi \frac{y_0}{L} \\ z = z_0 - 2r'_1 \sin \pi \frac{t}{T} \sin \pi \frac{y_0}{L} \end{cases}$$

Las ecuaciones referentes a la onda estacionaria, cuya oscilación se efectúa según el eje de las x , de-

En virtud del principio de la simple superposición de estos pequeños movimientos, cuyas amplitudes son reducidísimas en relación con la longitud de las ondas, obtenemos las ecuaciones del movimiento resultante, totalizando los desplazamientos moleculares:

$$\begin{cases} x = x_0 + 2r_2 \cos \pi \frac{t}{T} \cos \pi \frac{x_0}{L} \\ y = y_0 + 2r_1 \sin \pi \frac{t}{T} \cos \pi \frac{y_0}{L} \\ z = z_0 - 2r'_1 \sin \pi \frac{t}{T} \sin \pi \frac{y_0}{L} - 2r'_2 \cos \pi \frac{t}{T} \sin \pi \frac{x_0}{L} \end{cases}$$

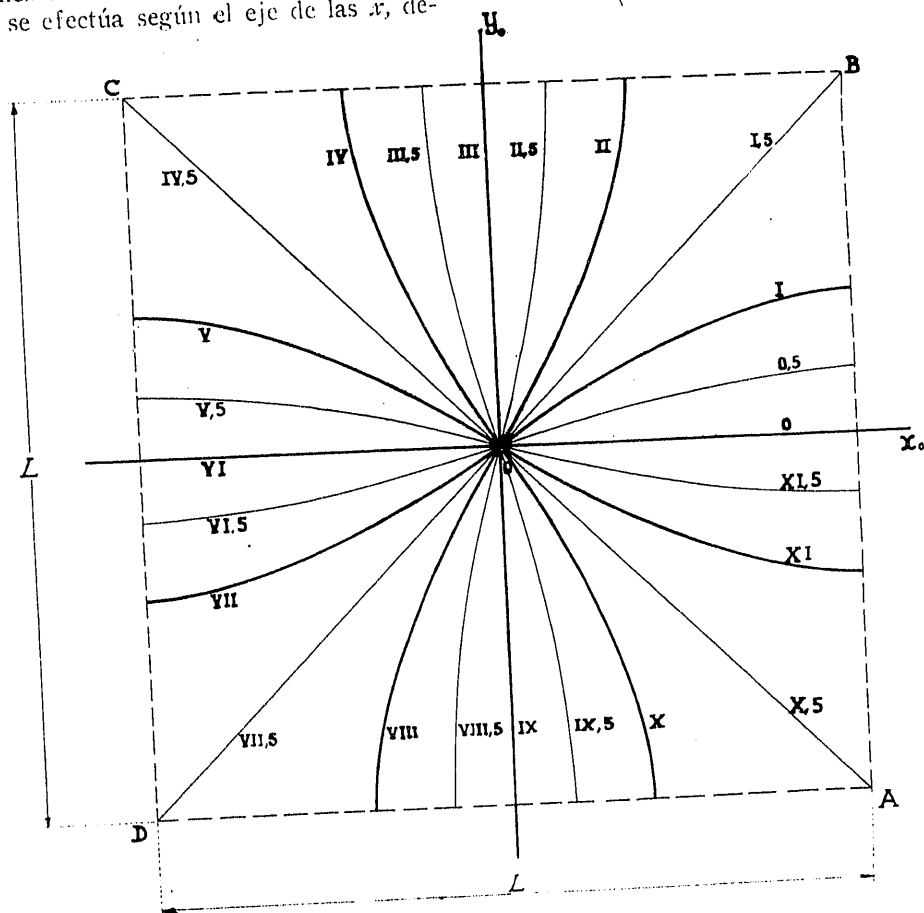


Fig. 9.— Punto anfidrómico.

calada 90° respecto a la anterior, serán también:

$$\begin{cases} x = x_0 + 2r_2 \cos \pi \frac{t}{T} \cos \pi \frac{x_0}{L} \\ y = y_0 \\ z = z_0 - 2r'_2 \cos \pi \frac{t}{T} \sin \pi \frac{x_0}{L} \end{cases}$$

(1) Véase "De la houle et du clapotis", por Saint Venant y Flamant, *Annales des Ponts et Chaussées* de mayo de 1888, y el estudio de Saintlou publicado en el número IV de 1928 de dichos *Annales*. Las notaciones empleadas y sus valores respectivos son los indicados al principio del presente estudio general.

Es fácil ver que las proyecciones horizontales de las trayectorias moleculares son elipses cuya excentricidad va aumentando a medida que nos alejamos del centro de coordenadas y que se reducen a rectas verticales para $x_0 = \frac{L}{2}$, y horizontales para

$y_0 = \frac{L}{2}$, por lo que el cuadrado ABCD (figura 9) puede estar constituido por los bordes de un recipiente que contenga al líquido en movimiento.

Para determinar las cotidales, o sea los lugares

geométricos instantáneos de los máximos de z , tenemos:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{2\pi r'_1}{T} \cos \pi \frac{t}{T} \sin \pi \frac{y_0}{L} + \frac{2\pi r'_2}{T} \sin \pi \frac{t}{T} \sin \pi \frac{x_0}{L} = 0,$$

de donde

$$\operatorname{tg} \pi \frac{t}{T} = \frac{r'_1 \sin \pi \frac{y_0}{L}}{r'_2 \sin \pi \frac{x_0}{L}}$$

que, para cada valor de t , nos determina la cotidal correspondiente.

En las proximidades del centro de coordenadas, o sea para pequeños valores de x_0 e y_0 , la ecuación de las cotidales se reduce a:

$$\operatorname{tg} \pi \frac{t}{T} = \frac{r'_1}{r'_2} \times \frac{y_0}{x_0},$$

lo que nos indica que la variación de situación de las cotidales, alrededor de dicho punto, es proporcional a la fase $\varphi = \frac{\pi t}{T}$, representada en la figura 9.

De aquí el nombre de anfdrómico, o recorrido a su alrededor, que recibe el citado punto.

En el supuesto, generalmente aproximado, de que la amplitud de ambas oscilaciones cruzadas sean iguales, o sea, $r'_1 = r'_2$, hemos representado la situación de las cotidales, que durante cada período dan una vuelta completa alrededor del punto anfdrómico, correspondientes a cada media hora lunar, o sea a valores de t , que se diferencian en $\frac{T}{6}$.

Se hace así visible el giro de las citadas cotidales alrededor de dicho punto, giro que es también fácil representar para cualquier valor de la relación $\frac{r'_1}{r'_2}$.

Como hemos indicado ya, la proyección horizontal de la trayectoria molecular en el punto anfdrómico $\left\{ \begin{matrix} y_0 = 0 \\ x_0 = 0 \end{matrix} \right.$ es la elipse cuyas ecuaciones paramétricas son:

$$\begin{cases} x = 2 r_2 \cos \pi \frac{t}{T} \\ y = 2 r_1 \sin \pi \frac{t}{T} \end{cases}$$

por lo que las velocidades en el repetido punto y sus

proximidades han de ser forzosamente giratorias, dando una vuelta completa por período, si la anfdrómica existe realmente.

Irrefutable prueba de que el fenómeno estudiado en el mar del Norte se reduce al simple cruce de ondas y no a su giro alrededor de punto anfdrómico alguno, nos la proporciona el hecho comprobado de que las corrientes, en sus proximidades, no son giratorias, sino que, manteniéndose sensiblemente en la dirección NE.-SO., o sea en la del avance de ambas ondas ondulatoriocentrífugas, sólo varían periódicamente de sentido e intensidad, llegando a alcanzar sus valores máximos, descendente y ascendente, hacia las horas VIII y II, como corresponde al cruce explicado, no al giro de ondas (I).

Careciendo de datos para comprobarlo, y siempre a reserva de las diferencias entre la teoría y la realidad, en estos complejos fenómenos, solamente indicaremos que dichos valores máximos de las corrientes totalizadas de ambas ondas, pueden aproximarse

$$a v = 2 \frac{\pi h' K}{T} = \frac{3,41 \times 0,92 \times 4.990}{22.350} = 0,68 \frac{m}{s},$$

por ser la distancia vertical entre ambas exponenciales, determinada en la figura 8 y correspondiente al punto O, $2 h' = 0,97$ m.

Si los rozamientos no ejercen efectos preponderantes, dichas corrientes deben aumentar en las proximidades de las costas, donde la citada vertical entre exponenciales aumenta, pero es preciso advertir que variarán bastante según las zonas en que se observen.

En los demás puntos de la figura 8, excepto en el absolutamente nodal O, no se anulan las alturas de marea, aunque las fases son opuestas, pues las alturas de las exponenciales originarias, que hay que restar, son desiguales. En las costas todo se pasa como si una onda progresiva se propagase sobre otra estacionaria de mucha menor altura.

Como una comprobación más de lo expuesto se puede hacer notar que la semialtura eficaz de la onda originaria, que es la que hemos denominado exponencial y que baja hacia el Sur apoyada en las costas de Inglaterra, vale, según hemos indicado al principio de este estudio general, y siendo $A = 82,3 \times 10^{-7}$ y $x_1 = 200$ km. $= 2 \times 10^5$ m.

$$h_0 = h_2 \sqrt{\frac{1 - e^{-2 A x_1}}{2 A x_1}} = 1,1 \sqrt{\frac{1 - e^{-3,29}}{3,29}} = 0,60 \text{ m.}$$

Debido a la concentración de energía, originada por la forma de embudo de esta zona del mar del

(1) Por la causa expuesta anteriormente, dichas horas pueden aproximarse a las VIII,5 y II,5.

Norte, que la estrecha de los 200 kni. indicados para la región de las cotidales VIII y II, a unos 35 kilómetros en la zona de reflexión de Calais, esta

semialtura aumentará a $0,60 \sqrt{\frac{200}{35}} = 1,43$ m. Luego

la altura será $2 \times 1,43 = 2,80$ m., que, por la reflexión, se duplica, obteniéndose, en definitiva y para la zona de Calais, la altura de $2 \times 1,86 = 5,72$ metros, algo inferior a los 6,6 m. observados en ambas costas.

Esta, relativamente pequeña, diferencia, es indudablemente debida a que, más propiamente que reflexión, hay cruce de ondas de distinta altura a través de dicho Paso.

La existencia de las zonas nodales de la pequeña onda estacionaria, sobre la que cabalgan las costeras, de mucha mayor altura, se comprueba también por el hecho de que, en las zonas nodales, próximas a las repetidas cotidales VIII y II, las cotidales se aproximan, y, en cambio, lógicamente se alejan, en la zona ventral próxima a las XI. En estas reducidas profundidades hay ya sensible consumo de energía en el avance de las ondas.

El fenómeno se reduce, por todo lo expuesto, y en su esencia, al cruce de dos ondas, que avanzan según las sencillas y suficientemente aproximadas leyes de la teoría trocoidal, en direcciones sensiblemente opuestas.

La particularidad especial del fenómeno estriba, simplemente, en que la fuerza centrífuga compuesta eleva la altura de cada una de estas ondas en su extremo correspondiente, casi anulándolas en el otro, y dando, como resultado del avance visible en sentido contrario de las cotidales en cada una de sus costas opuestas, la apariencias, nada más que la engañosa apariencia, de un giro que no se verifica en realidad, por muy seductoras teorías que se desarrollen para explicarlo.

Aunque todo es posible bajo el Sol, y en nuestro caso también bajo la Luna, ¿no es extraño que según la teoría anfídromica, representada en la figura 6, las líneas cotidales que, según aseguran, giran alrededor del punto anfídromico, salten bruscamente casi 180° desde la hora VI a la VII, o bien su centro de giro se desplace, también casi instantáneamente y entre las mismas horas, varios centenares de kilómetros, para pasar al nuevo punto anfídromico que ha sido necesario situar, para explicar los hechos según dicha teoría, mucho más al Norte?

Si esto es extraño, en este primer caso particular que aseguraban fehacientemente comprobado, lo es aún mucho más en sus arbitrarias generalizaciones oceánicas en las que, los supuestos puntos anfídromicos, distan entre sí muchos millares de kilómetros y de cuya imposible comprobación de su existencia podemos tener una idea con sólo indicar que

sus profundidades no son ya del orden de 20, sino de varios millares de metros, en donde ni la sonda ni los mareógrafos sumergidos han podido dar resultado alguno aceptable.

La existencia del segundo punto anfídromico del Mar del Norte, situado al SO. de Noruega (véase la figura 6), es probablemente tan irreal como la del que acabamos de ocuparnos, pues la casi nula carrera de marea, comprobada en esta zona, se explica también, perfectamente, sin recurrir a onda giratoria alguna.

La onda progresiva Atlántica (véase figura 6'), que después de doblar el extremo Norte de Escocia tiende a descender por el mar del Norte, apoyada por la fuerza centrífuga compuesta, en las costas de Gran Bretaña, tóca a la costa noruega entre las horas XI y X (véase también la figura 4'), desgajándose así una importante rama de onda que, apoyada también por la fuerza centrífuga compuesta, en las costas de Noruega, avanza hacia el Océano Glacial Ártico, aumentando de altura, desde medio metro, en la zona del primer contacto con dicha costa, en las proximidades de Stavanger y Bergen, hasta cerca de tres metros en el extremo Norte de Noruega, debido, indudablemente, a la tan repetida acción de dicha fuerza centrífuga, que va aumentando con la latitud.

Por ahora nos interesa especialmente la otra rama de la onda que, apoyada también en las costas de la derecha de su avance, o sea en las de la Gran Bretaña y no en las de Noruega, desciende hacia el mar del Norte.

Siendo la altura de marea observada en el NE. de Escocia del orden de los 4,50 m., la altura correspondiente a la zona de contacto en las costas de Noruega, a la que antes nos hemos referido, resulta ser de $2h = 2h_2 e^{-Ax} = 4,5 \times 0,11 = 0,49$ m., por ser $e^{-Ax} = 0,11$, tenida cuenta de que A resulta valer $40,9 \times 10^{-7}$ para la latitud $\lambda = 58^\circ$ y la profundidad media $H = 100$ m. de esta amplia zona de la plataforma continental, y observando también que la distancia entre estas costas inglesas y las de enfrente, noruegas, se aproxima a $x_1 = 550$ kilómetros $= 55 \times 10^4$ m.

Este resultado, que comprueba nuevamente las teorías expuestas, explica muy satisfactoriamente las causas de la pequeñez de la altura de marea en esta zona de las costas noruegas, altura que lógicamente se ha de reducir aún más hacia el Sur de Stavanger, debido a que por ir adentrándose la onda en la gran plataforma costera, que sirve de amplio zócalo a las islas británicas, las profundidades van disminuyendo, por lo que, siempre debido a la fuerza centrífuga compuesta, tienden a aumentar; de acuerdo con la observación, las alturas de marea de la costa de la Gran Bretaña y a disminuir las de las costas noruegas.

Esta disminución se acentúa aún más, anulando casi la carrera de marea, debido a la expansión lateral que sufre este débil extremo de la onda, originada por la divergencia de las costas del extremo Sur de Noruega y a la profundidad del canal submarino, de más de 300 m. de calado, que rodea a las costas de este extremo Sur, por todo lo cual se comprende, sin recurrir a punto anfídromico ni a giro alguno de ondas a su alrededor, que las alturas de marea de esta zona marítima comprendida entre Stavanger y el Cabo Lindesnes sea prácticamente nula.

Si por todo lo expuesto no creemos en la existencia real de los dos únicos puntos anfídromicos que se decían comprobados, ¿cómo no vamos a dudar de muchas de sus arbitrarias y supuestas generalizaciones oceánicas?

Obsérvese también la arbitraria complicación y bruscas discontinuidades de marcha de las líneas cotidales anfídromicas en todo el globo, y en especial en algunas zonas, como la del Norte del Atlántico, que comprende a las islas núcleo de marea de Islandia, islas Feroe y al Norte de Escocia, y la lógica sencillez y continuidad de la que resulta como aplicación de la teoría expuesta.

Si, según las propias experiencias de Harris, es preciso que toda costa tenga una longitud igual o superior al cuarto de la longitud de onda, o sea $\frac{L}{2}$ para que pueda producir su reflexión y consiguientemente el movimiento estacionario, ¿cómo es posible

que Islandia, y más aún las Feroe, puedan originar anfídromía alguna?

Además, todas las amplias experiencias de laboratorio realizadas para pretender demostrar la posibilidad de la teoría anfídromica, se han reducido esencialmente a comprobar la posibilidad de la onda estacionaria "Clapotis" o "seiche" o chapoteo, en las formas más complejas de recipientes, e incluso cuando a éstos les falta parte de su contorno, para luego, como hemos visto, basándose en el cruce de dos de estas ondas estacionarias o de chapoteo, de distinta fase, llegar a la conclusión de la onda giratoria alrededor de su correspondiente punto anfídromico teórico.

Lo anteriormente expuesto estimamos que prueba suficientemente que, si bien es posible la onda estacionaria o simple balanceo del líquido en recipientes de laboratorio o en algunos lagos, no lo es en grandes mares y menos aún en los océanos, en los que la fuerza centrífuga compuesta desnivela los simplistas y regulares movimientos necesarios para la formación y mantenimiento de este delicado movimiento estacionario.

Así como se han observado frecuentes "seiches" en algunos lagos, ¿se ha observado alguna en los grandes océanos en cuyas costas tantos mareógrafos hubieran podido registrarlas?

Por lo tan brevemente expuesto, se comprende que nos permitamos dudar de gran parte de la teoría anfídromica, y en especial de la artificiosa explicación que se ha pretendido dársele.