• JUNTA DE INVESTIGACIONES TÉCNICAS •

UNA POSIBLE EXPLICACIÓN DEL FENÓMENO DE LAS MAREAS

• TEORÍA ONDULATORIOCENTRÍFUGA [1] •

POR RAMÓN IRIBARREN CAVANILLES, INGENIERO DE CAMINOS

Sigue el autor su magnífica exposición del fenómeno de las mareas, ocupándose en este tercer artículo de la forma de las cotidales principales y de la marcha de éstas, desde su origen en el Pacífico y a través de todos los océanos, hasta las zonas en que las pérdidas de energía son tan grandes que prácticamente las hacen desaparecer.

III

En la exposición de la génesis y propagación del interesante fenómeno que nos ocupa, no nos hemos de limitar solamente a indicar la forma de avance en planta de las cotidales, efectuada aproximadamente en la figura 4', sino que, como consecuencia de los estudios desarrollados en el presente trabajo, vamos a pretender dibujar también, creemos que por vez primera, la forma en alzado o sección longitudinal de dichas cotidales.

La protuberancia ecuatorial pacífica, producida por las atracciones astrales lunar y solar, indicada esquemáticamente en la fig. 3.ª, podría quizás asimilarse, mejor aún que a la estela a que nos hemos referido anteriormente, a la aparentemente paradógica reflexión de una hipotética onda incidente, que no tuviese existencia real.

En la fig. 3.ª, una cualquiera de las dos ondas en que se resuelve la protuberancia que avanza, por ejemplo aquella cuya cresta es la $O\,P'$, puede considerarse como resultado de la reflexión, sobre el plano vertical de simetría $A\,B$, de la no existente onda incidente cuya cresta sería la recta indefinida de dirección $O\,E$ y que al avanzar, encontrándose constantemente con dicho plano reflejante $A\,B$, suministraría la energía necesaria para la formación de la semiprotuberancia apoyada en él y cuyo avance sería, a su vez, causa de la creación de la onda reflejada OP'.

El caso que nos ocupa es similar en todo al supuesto, con la única diferencia de que la energía no suministrada por la inexistente onda incidente es proporcionada, en cambio, por las atracciones astrales y su avance, que son así causa de la formación y avance de la protuberancia forzada, cuya forma, similar en principio y estáticamente, a la superficie equipotencial producida por dichas perturbaciones astrales, ha de adaptarse al dinamismo de su rápido avance, adoptando la forma de la reflexión expuesta.

Análogamente puede asimilarse dicha reflexión al cruce de dos ondas, de altura constante a lo largo de sus crestas $O\,P$ y $O\,P'$ y cuyas alturas, de cada una de ellas, se redujesen de dicho valor constante a cero desde O hasta E, así como en su tramo simétrico, comprendidos ambos dentro de la protuberancia.

Por todo lo cual, fácilmente se comprende que tratándose de pequeños movimientos, pues la altura de la onda de marea es una insignificancia en relación con su longitud, la altura de la protuberancia dinámica, en su vértice O, ha de ser el doble de la altura de cada una de las dos ondas $O\,P$ y $O\,P'$ en que se resuelve y cuyas alturas serían constantes, fuera ya de la protuberancia, si no existiese acción alguna de la fuerza centrífuga compuesta (2).

La acción de esta interesante fuerza, prácticamente nula en la zona de bajas latitudes que recorre la protuberancia, apenas modifica su altura ni sus condiciones de propagación a través del Pacífico central. En esta zona las atracciones astrales ejercen su acción preponderante y libremente.

---

(1) Además de algunas erratas, se ha deslizado en la $\frac{\partial x}{\partial x_0}$ del texto de la página 23 del artículo anterior, un error de signo cuya única insignificante consecuencia, que no modifica en nada los resultados obtenidos, es la desaparición de la tercera de las ecuaciones obtenidas de la condición de continuidad.

(2) Para evitar confusiones, quizás sea conveniente aclarar que la componente horizontal que hemos denominado j_c en el movimiento rectilíneo, o j_{cx} en el elíptico, así como las otras dos componentes, j_{cy} y j_{cz}, son las componentes de la fuerza centrífuga compuesta, igual y de signo contrario a la aceleración complementaria o de Coriolis.

En cambio, ya fuera de dicha protuberancia, la acción de la fuerza centrífuga compuesta se ejerce, también enérgica y libremente, sobre las dos ondas en que se resuelve aquélla, por lo que las crestas y senos de cada una de dichas dos ondas, se desnivelan adoptando la forma exponencial correspondiente a su latitud de propagación.

Volviendo a la fig. 3.ª y si suponemos materializado el plano vertical reflejante cuya traza horizontal es la recta indefinida de dirección $A\,B$, no se modifican las condiciones estáticas o dinámicas de producción o propagación de la protuberancia.

Si el astro o los astros perturbadores estuviesen quietos sobre el cénit del punto O, se produciría la protuberancia estática y de revolución de Newton, cuyo vértice estaría en O y cuya altura, o mejor dicho cuya diferencia de alturas máxima y mínima, sería del orden de los 75 cm. indicados al principio de este estudio.

Si el astro o los astros avanzan, moviéndose conjuntamente en el plano vertical $A\,B$, la protuberancia estática se transforma en la dinámica de reflexión que acabamos de explicar, dando origen a las dos ondas reflejadas $O\,P$ y $O\,P'$

Es más que probable que esta reflexión, que supone la transformación de la protuberancia estática en dinámica, duplique su altura por tratarse de reflexión o cruce de pequeños movimientos y también es posible que esta altura aumente aún algo por resonancia, pues es muy significativo que tanto en su origen, en las costas de Centroamérica, como en todo su recorrido a través del Pacífico, se retrase la protuberancia, como puede verse en la figura 4', unas tres horas, o sea aproximadamente un cuarto de período, respecto a su atracción productora.

Todo esto indica que la altura de la protuberancia, que aparentemente debiera ser menor que los 75 centímetros del elipsoide de Newton, puesto que el Pacífico, a pesar de sus grandes dimensiones, es menor que el hipotético océano que recubriría toda la superficie de la Tierra y supuesto para su determinación, tienda a duplicar su altura, al transformarse en dinámica mediante dicha reflexión o cruce, llegando a tener alturas del orden del metro y medio, o algo más, debido a la resonancia.

Dada la complejidad del fenómeno estimamos mejor que recurrir a cálculos de ilusoria aproximación, máxime si no olvidamos probables resonancias, afinar la altura de la protuberancia originaria, que suponemos ha de ser del orden del metro y medio, mediante la observación directa.

No sólo en lo que se refiere a la precisa determinación de esta altura en la protuberancia, sino en todo lo demás, estimamos de imprescindible necesidad una profusa y detallada recopilación de datos de observación, pues es tal la complejidad del fenómeno, debida además a la diversa profundidad y forma de los océanos, costas y plataformas continentales, a las reflexiones y resonancias más o menos parciales y a tantas y tan innumerables causas, que juzgamos vana pretensión su exacta determinación mediante el cálculo directo, que solamente podrá ser inapreciable y eficaz útil siempre que se fundamente en la observación y en hipótesis y teorías confirmadas por ésta.

Desgraciadamente, debido a las difíciles circunstancias actuales, no nos ha sido posible recopilar los datos necesarios y en la profusión deseable, para poder precisar todo esto, pero como en este estudio general no tenemos pretensión alguna de exactitud, nos litaremos a dar una idea de conjunto de la génesis y propagación de las mareas, dejando para futuros estudios de detalle y suficientemente documentados, el precisar mejor las cosas.

Bástenos por ahora, y creemos que ya es suficientemente satisfactorio resultado, con comprobar que la génesis y propagación del fenómeno concuerda global y aproximadamente, tanto en planta como en su relieve, con los resultados que se obtienen de la aplicación de las ideas y cálculos expuestos.

Obsérvese que la altura media de la marea, en la zona costera de la América Central, abarcada por la protuberancia reflejada y delimitada aproximadamente por las cotidales IX, es del orden de los tres metros, salvo en la zona de Panamá y algunas otras en que, por la forma abocinada de las costas u otras circunstancias locales, a las que luego nos referiremos, se producen concentraciones de energía y consiguientes elevaciones de alturas. Esto indica que la altura real de la protuberancia originaria allí reflejada, al iniciar su marcha a través del Pacífico, se aproximará a la mitad de los tres metros de la reflexión citada, o sea al metro y medio.

En esto como en todo lo que sigue, al hablar de alturas de marea, nos referimos a las carreras medias aproximadas, desde luego correspondientes a la sicigia equinoccial supuesta, por lo que deben de aproximarse al doble de la unidad de altura y se refieren a cierta distancia de la costa, donde no sean prácticamente afectadas por las variables condiciones locales de las mismas.

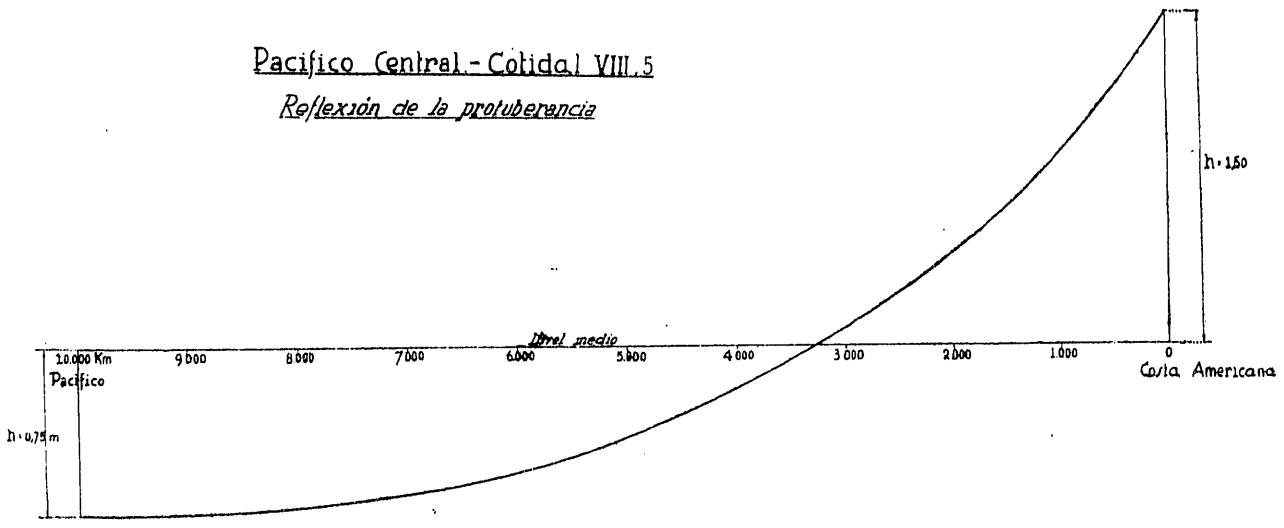
Debe hacerse resaltar también que dicha altura de reflexión, del orden de los tres metros, en las costas de la América Central del Pacífico, se reduce lógicamente al metro y medio de altura de la protuberancia originaria en cuanto ésta y las dos ondas en que se resuelven inician su marcha y luego van aumentando lenta pero continuamente las alturas de los extremos de dichas dos ondas, durante su propagación, apoyadas en las costas, llegando a elevarse de nuevo a cerca de los tres metros, tanto en el extremo Norte como en el Sur de las costas americanas, lo que prueba, como sucede en todo lo que seguire-

mos viendo, la eficaz acción de la fuerza centrífuga compuesta que aumenta con la latitud, en la forma expuesta. Es probable que la convergencia de las costas de América del Norte con respecto a la marcha de la protuberancia y de su onda correspondiente, y la divergencia de la del Sur, aumente algo las alturas correspondientes a aquellas costas y disminuya las de éstas.

También las carreras de marea en las zonas del Pacífico, próximas al recorrido de la protuberancia originaria, así como las correspondientes a la costa oriental australiana en las que se apoya, aumentando algo su altura, parecen comprobar que ésta es realmente del orden del metro y medio.

Con lo expuesto tenemos cuanto se necesita para determinar, en primera aproximación, la forma en alzado de todas y cada una de las cotidales, pues sabemos que la altura de la protuberancia originaria, de forma sensiblemente trocoidal, se aproxima a $2h = 1{,}5$ metros y que sus dimensiones en planta $O\,F$, $O\,E$ y simétricas, fig. 3.ª, son del orden de los 5.500 kilómetros.

Siendo la altura eficaz de cada una de las dos ondas $F\,P$ y simétrica $2h_0 = \frac{1{,}5}{2} = 0{,}75$ metros, la expresión $h_2 = h_0 \sqrt{\frac{2Ax_1}{1 - e^{-2Ax_1}}}$, determinada anteriormente, nos da la unidad de altura h_2 correspondiente a la zona costera considerada, pues la latitud media nos determina el valor de A, y x_1 es la distancia, medida según la cotidal, desde el punto similar al F, límite de la protuberancia y situado a 5.500 kilómetros del vértice O y la costa de apoyo.

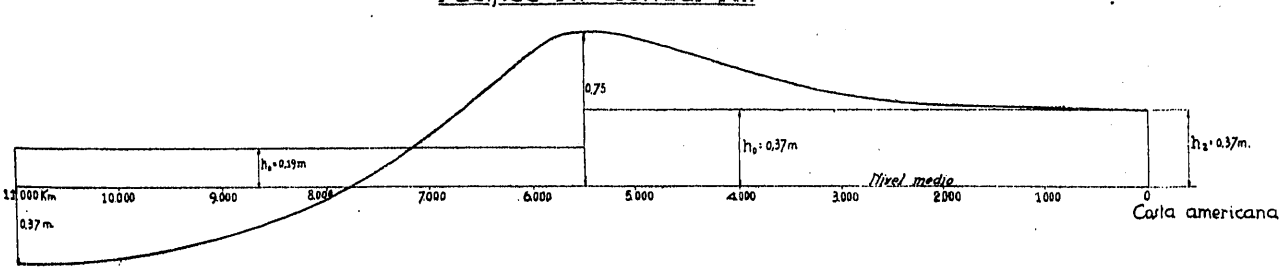


Calculada así esta unidad de altura h_2, que es del máximo interés por permitir su comparación con la realmente observada, se puede dibujar también el alzado de la parte de onda de libre propagación, cuya forma aproximada viene dada por la exponencial $h = h_2\, e^{-Ax}$ correspondiente a su latitud media.

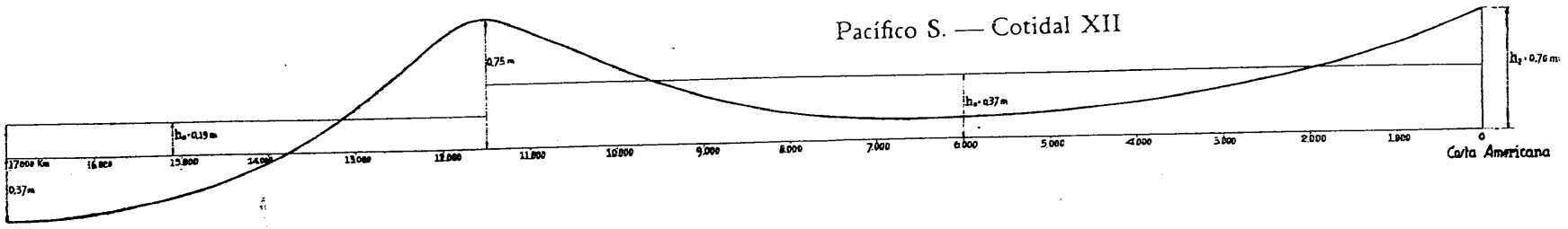
Queda así dibujado el alzado de la cotidal, tanto en su parte de libre propagación como en la correspondiente a la protuberancia forzada.

A simple título de ejemplos y solamente, repetimos, para comprobar la marcha general del fenómeno, hemos dibujado, ateniéndonos a las normas expuestas, los alzados de algunas de las cotidales del Pacífico que pueden darnos una idea de la forma y propagación de la protuberancia y de las dos ondas en que se resuelve.

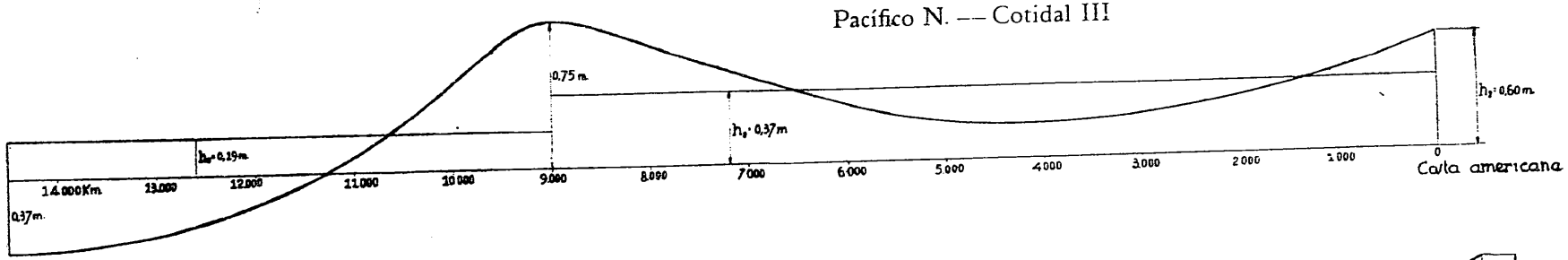
Estas cotidales del Pacífico, originarias principales de todas las demás, no son otra cosa que la sección $O\,P'$ de la fig. 3.ª, mejor detallada y modificada por la interesante acción de la fuerza centrífuga compuesta.



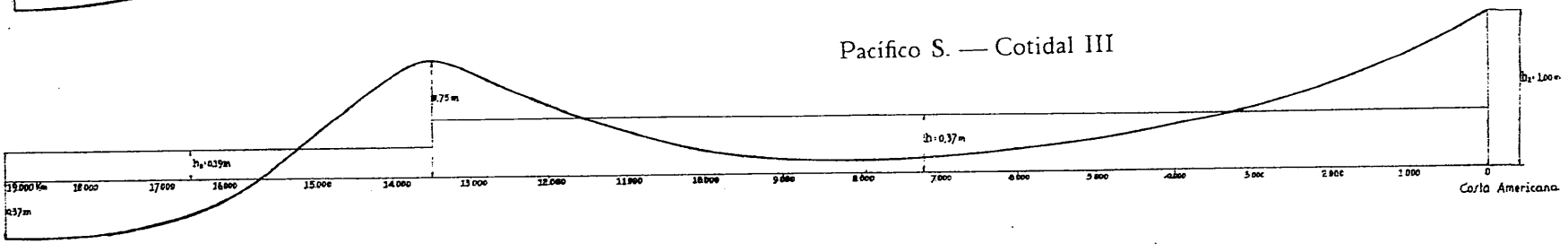
Pacífico S. — Cotidal XII



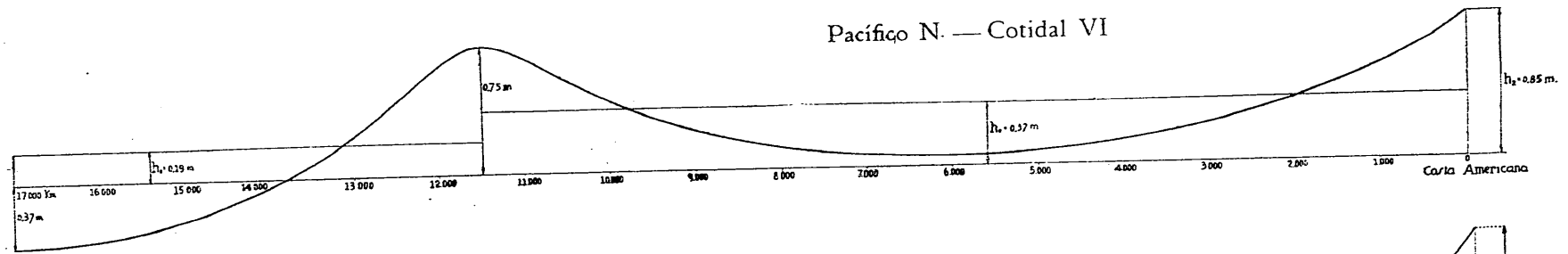
Pacífico N. — Cotidal III



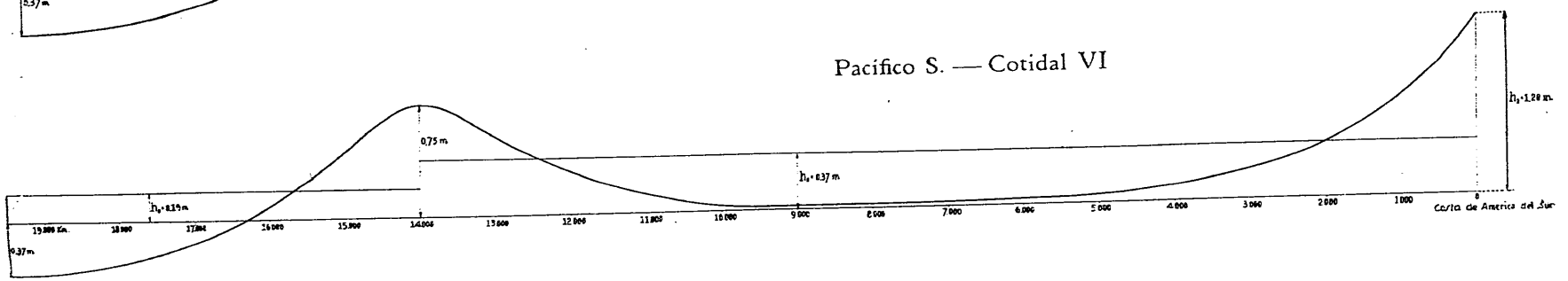
Pacífico S. — Cotidal III



Pacífico N. — Cotidal VI



Pacífico S. — Cotidal VI



Aparte de la cotidal de reflexión de la protuberancia que se verifica en las costas de Centroamérica hacia las ocho y media, o sea con las tres horas aproximadas de retraso que antes hemos indicado, hemos calculado, ateniéndonos a las normas expuestas, y dibujado, los alzados de las cotidales XII y III del Pacífico Norte y Sur, correspondientes al período de enderezamiento de la protuberancia, desviada inicialmente hacia el Sur por la oblicuidad de las costas reflejantes.

También hemos dibujado las interesantes cotidales VI del Pacífico Norte y Sur, correspondientes al final de la carrera motriz de la protuberancia, atraída por los astros, a través del Pacífico.

Descrita ya breve y anteriormente la marcha de la onda del Pacífico Norte, ocupémonos de la del Sur.

Obsérvese que, de acuerdo con la realidad, las alturas correspondientes al tramo central de dichas cotidales III y VI del Pacífico Sur resultan muy pequeñas, como corresponde a las reducidas alturas reales de marea de estas zonas del Pacífico, en las que está situada la Polinesia.

La protuberancia forzada, de dimensiones conocidas aproximadamente, avanza a partir de las VIII, 5 hacia Occidente, siguiendo su vértice la línea sinusoidal antes descrita, y entre ella y la zona de libre propagación de las dos ondas, apoyadas en las costas americanas, existe la amplia zona central de pequeña altura de marea a que nos hemos referido.

Es posible que el establecimiento, en esta zona central de las cotidales, del que hemos denominado movimiento elíptico libre, disminuye su pendiente haciendo aumentar algo, aunque poco, sus reducidas alturas.

La parte de libre propagación de la onda del Pacífico Sur que nos ocupa avanza, apoyándose en su izquierda y aumentando de altura, de acuerdo con las cotidales, a medida que aumenta la latitud, corriendo a lo largo de las costas de América del Sur hasta llegar al cabo de Hornos, y propagándose hacia el Atlántico entre las costas del extremo Sur de América y la tierra de Graham.

Para determinar la forma en alzado de estas ondas que se propagan ya libremente, o sea, sin ser afectadas prácticamente por las atracciones astrales, pero variando de anchura debido a la forma de los continentes que las delimitan, partimos de la aproximada conservación de energía durante su propagación, pues las débiles velocidades medias moleculares, cuyo máximo se aproxima a

$$\frac{\pi h k}{T} = \frac{3{,}14 \times 0{,}75 \times 350}{22.350} = 0{,}037 \text{ m./s.}$$

son tan pequeñas, sus gradaciones tan suaves y las profundidades tan grandes, que el consumo de energía producido por la propagación de la onda oceánica es, prácticamente despreciable, salvo en algunos casos especiales.

Partiendo, pues, de esta conservación de la energía y siendo la semialtura eficaz de la onda originaria $h_0 = \frac{0{,}75}{2} \simeq 0{,}37$ m. en una anchura a, obtenemos la semialtura eficaz h_0, correspondiente a otra anchura a' de propagación, mediante la simple igualdad $E = \rho\, g\, L\, h^2_0\, a = \rho\, g\, L\, h'^2_0\, a'^2$, de donde obtenemos $h'_0 = h_0 \sqrt{\frac{a}{a'}}$, para luego determinar, como anteriormente se ha hecho, la semialtura de apoyo o unidad de altura en la costa $h_2 = h'_0 \sqrt{\frac{2\,A\,a'}{1 - e^{-2\,A\,a'}}}$ y la ecuación exponencial de la cresta $h = h_2\, e^{-A\,x}$.

Si la onda originaria o la onda y protuberancia originarias, están constituidas por varios tramos de ondas o sus sumas, de anchuras a_1, a_2, a_3, etc., y semialturas eficaces h_{01}, h_{02}, h_{03}, etc., podemos obtener la altura eficaz h'_0 mediante la expresión $E = \Sigma\, \rho\, g\, L\, a\, h^2_0 = \rho\, g\, L\, a'\, h'^2_0$, luego

$$h'_0 = h_0 \sqrt{\frac{\Sigma\, a\, h^2_0}{a'}}\ .$$

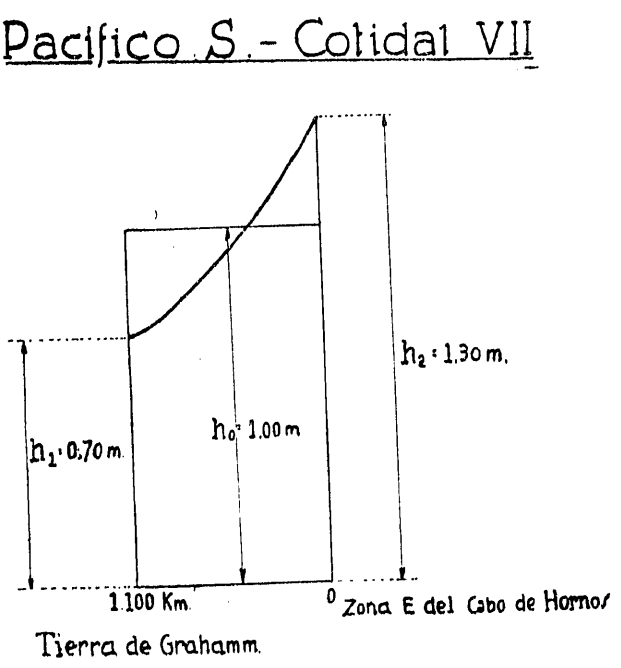
Todo esto no es más que bastante aproximado, pues supone que, como hemos visto al principio de este estudio, las semilongitudes L de la gran onda de marea son poco diferentes, del orden de los 4.500 km., debido a las grandes dimensiones de los cuadriláteros de avance, en relación con la profundidad media de los océanos.

Como hemos recordado, las semialturas eficaces de las dos ondas en que se resuelve la protuberancia del Pacífico son del orden de los 37 cm. en toda su longitud comprendida entre el vértice de la protuberancia y las costas de apoyo del extremo de cada onda. Si, como anteriormente se ha justificado, la semialtura de cada una de estas dos ondas, cuyo cruce constituye la protuberancia, decrece desde dichos 37 centímetros a cero en su extremo anterior, según la prolongación de la cotidal en planta, podemos admitir que la altura eficaz de este tramo se aproxima suficientemente a su mitad, o sea a unos 19 cm.

Estas alturas eficaces, que se refieren solamente a cada una de las dos ondas que al cruzarse constituyen la protuberancia y no al total de ésta, se han indicado en cada uno de los alzados de las cotidales correspondientes.

Cada una de las dos ondas en que se resuelve la protuberancia al final de su carrera motriz, a través del Pacífico (véanse las cotidales VI), queda prácticamente dividida en dos partes, o sea, por un lado, la protuberancia forzada, y por otro, cada una de las dos ondas libres en que se resuelve.

Al final de dicha carrera y dada su dirección de avance, casi la totalidad de la protuberancia baja por las proximidades de las costas orientales australia-



nas para integrarse a la onda que hacia las X inicia su paso entre Australia y el continente Antártico.

De las ondas de libre propagación, la del Pacífico Norte se propaga y muere en la forma expuesta anteriormente, y la del Sur, después de su recogimiento y concentración de energía, producido por las costas del continente Antártico, pasa el Atlántico, como se ha indicado.

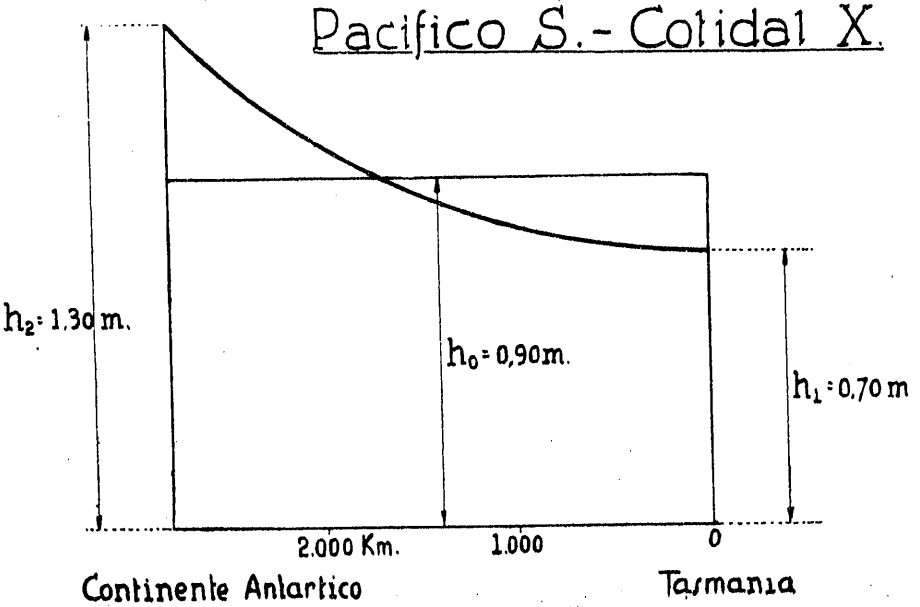
Conocida aproximadamente la energía de esta onda de libre propagación y la total de la protuberancia o suma de las partes de onda que la constituyen al cruzarse, podemos determinar, ateniéndonos a las normas indicadas, tanto las semialturas eficaces como los alzados de las cotidales VII y X del Pacífico Sur, que representan la salida de la onda originaria de dicho gran océano hacia otros océanos y mares.

Análogas normas se pueden seguir para determinar cuantos alzados de cotidales se deseen; pero tanto en los casos citados como simples ejemplos, como en todos los demás, hay que tener en cuenta otros factores, tales como las expansiones frontales o laterales, las reflexiones, resonancias, etc., por lo que, dada esta gran complejidad del fenómeno, los resultados obtenidos ni son ni pretenden ser, repetimos una vez más, más que aproximados, tanto en planta como en alzado, y solamente la detenida y detallada observación ha de permitir su ulterior afino.

La propagación hacia el Atlántico de la onda libre del Pacífico se produce con gran intensidad y altura de onda en toda su anchura (véase la cotidal VII del Pacífico Sur), pues, aunque la fuerza centrífuga compuesta tiende a apopar la onda, aumentando su altura, en las costas de Sudamérica, poco después de la cotidal VI, del citado gran océano, ya ha tocado la onda, en su propagación, el continente Antártico, dividiéndose en dos ramas, una que avanza hacia Occidente y otra hacia Oriente, que es la que penetra y se propaga directamente por el Atlántico.

La forma y orientación del gran saliente, que en el continente Antártico constituye la citada tierra de Graham, produce el recogimiento y consiguiente concentración de energía de esta rama de onda, en su extremo de la derecha que, por esta causa, desemboca en el Atlántico con bastante altura, también en este extremo.

Este importante tramo de onda desemboca en el Atlántico en forma similar a la onda que penetraría por la ancha boca de un puerto, propagándose después, manteniendo su altura en las costas de América por la acción de la fuerza centrífuga compuesta e incluso incrementándola muchísimo, principalmente sobre la gran plataforma continental que sirve de zócalo a las islas Malvinas y en la que se originan



grandes alturas y perturbaciones, por las causas que luego explicaremos.

En su extremo Sur, que hacia Oriente tiende a recorrer la costa del continente Antártico y principalmente a alguna distancia de sus costas, se mantiene, en principio, la altura producida por la concentración dinámica de energía que hemos expuesto, aunque, a la larga, tienda a disminuir debido a la continua acción de la fuerza centrífuga compuesta, que actúa en sentido contrario.

Antes de que esta disminución de altura adquiera gran importancia y algo antes de la hora X, se encuentra esta rama de la onda, en pleno océano Antártico y con la otra que ha circundado el continente Antártico, manteniendo, y muy posiblemente aumentando su altura de apoyo debido también a la acción de la fuerza centrífuga compuesta, tan intensa en estas regiones.

Después de verificado el encuentro de las dos ramas de la onda, la altura común tiende a aumentar en la zona del encuentro, formándose una protuberancia como consecuencia de la convergencia y consiguiente concentración de energía de las dos ondas que la constituyen, al encontrarse.

Una vez vueltas a soldar dichas dos ramas en que el continente Antártico había dividido a la onda originaria del Pacífico Sur, continúa su avance común por el Atlántico Sur, en cuyo centro aproximado del cual avanza hacia el Norte la protuberancia indicada.

Obsérvese que las grandes dimensiones del continente Antártico no son excesivas en relación, como siempre, con la longitud de la onda de marea, por lo que nos encontramos en un caso similar al de la ola que se abre para circundar un escollo, no demasiado grande para ella, volviéndose a soldar, después de pasado aquél, sus dos ramas para continuar el avance de la ola.

A primera vista pudiera parecer extraño que el encuentro de las dos ramas, se verifique entre las horas IX y X en lugar de verificarse hacia la hora III siguiente y en la zona diametralmente opuesta a aquélla en que la onda del Pacífico abordó al continente Antártico.

Esta aparente anomalía tiene su sencilla explicación, pues si la rama de onda que penetra en el Atlántico, entre el cabo de Hornos y la tierra de Graham, tuviese que extenderse, apoyada por la fuerza centrífuga compuesta en las costas de Suramérica, hasta la zona del continente Antártico correspondiente a la cotidal III, dicha fuerza centrífuga compuesta, actuando a lo largo de su cresta desde la enorme distancia de las citadas costas americanas, prácticamente anularía su altura en la repetida zona antártica correspondiente a la hora III.

Debido a esto, mal puede verificarse el encuentro en la zona del continente Antártico, a la citada hora aproximada III, entre la gran onda que avanza hacia Occidente y la prácticamente no existente, que avanzaría hacia Oriente.

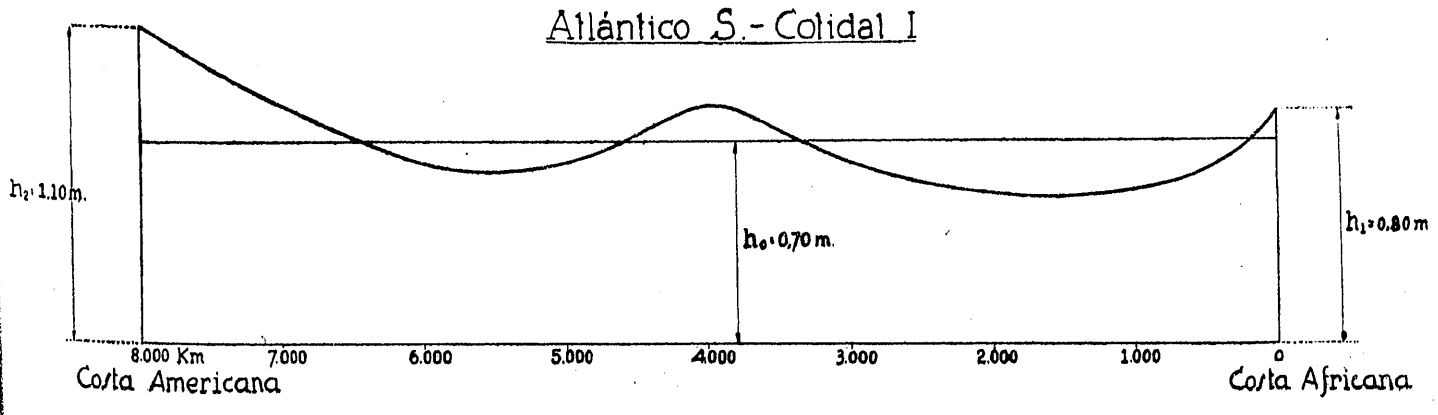
Lo que sucede es, simplemente, que la primera continúa su libre avance sin encontrar onda alguna con que unirse, hasta que, entre las horas IX y X siguientes, encuentra a la onda, todavía bastante alta por las causas explicadas anteriormente y que solamente hace unas dos horas acaba de doblar el saliente constituído por la tierra de Graham.

El encuentro se verifica, pues, realmente, entre esta última rama de onda y la que ha circundado hacia Occidente el continente Antártico, pero correspondiente no a la misma onda del Pacífico Sur, sino a la que le precedió un período antes.

Así puede verificarse el encuentro real de las dos ramas de onda, que constituyen la protuberancia del Atlántico Sur.

Esta protuberancia es similar, en cierto modo, aunque contraria, a la protuberancia ecuatorial del Pacífico, que anteriormente hemos descrito, pues ésta es una protuberancia que se resuelve en las dos ondas por ella creadas y que avanzan divergiendo, y la del Atlántico Sur, por el contrario, es una protuberancia constituída por dos ondas que convergen en su avance.

Dicha protuberancia del Atlántico Sur y la con-



vergencia de la onda con las costas africanas del SO. son la causa de que la onda de marea, aunque de no gran altura, pueda avanzar de Sur a Norte en las costas atlánticas del Africa austral, que es la única amplia región del Globo donde avanza la onda de marea en sentido opuesto al que parece corresponder al de la fuerza centrífuga compuesta, de pequeña intensidad aquí por ser pequeña la latitud de estas costas africanas.

También puede influir, en esta propagación, la reflexión a que luego nos referimos, en las costas del continente Antártico, de la protuberancia originaria.

Si el apoyo de la onda africana del hemisferio Sur se verificase en las costas americanas de enfrente, distantes unos ocho mil kilómetros, según las cotidales, para mantenerse las alturas observadas es la costa africana, se requerirían alturas bastante mayores que las observadas en las costas americanas de enfrente.

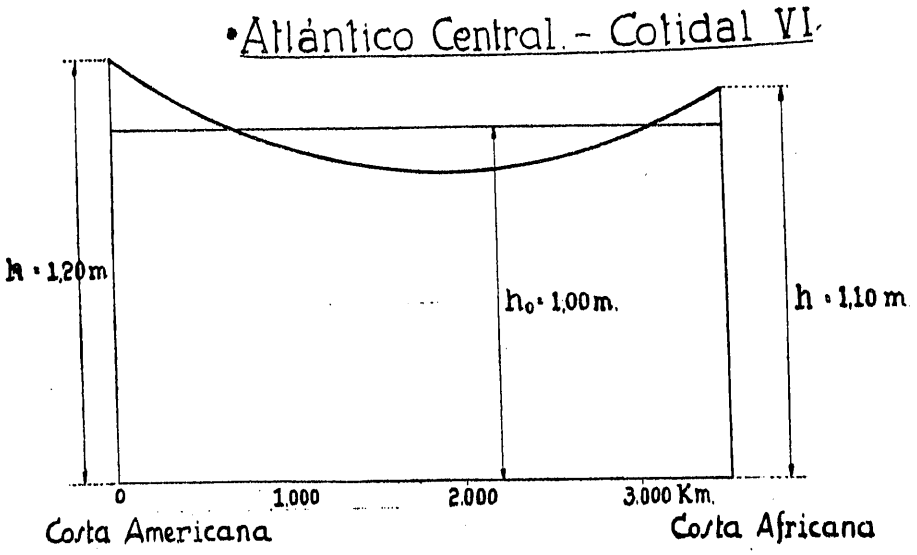
En cambio, si como parece probable, el apoyo se verifica en la protuberancia dinámica central y tenida cuenta de que la convergencia de la onda eleva también sus alturas en la costa africana, muy lógicamente las cotidales de esta región pudieran tener la forma aproximada a la cotidal I, del Atlántico Sur que hemos dibujado como ejemplo aproximado correspondiente a esta zona oceánica y cuya altura eficaz se ha determinado ateniéndose a las mismas normas que luego se explican para la cotidal III del Atlántico Norte. Además de la reflexión indicada, de la protuberancia originaria, también puede cooperar eficazmente en la elevación de alturas correspondientes a las proximidades de la costa africana, e indicadas en la citada cotidal, la reflexión de la onda que hacia dicha hora I se verifica en las costas del Sureste, Sur e incluso Suroeste africanos y cuyo lógico efecto de duplicar las alturas en las costas puede mantenerse y propagarse durante algunas horas después.

Obsérvese también que, en estas costas africanas, la altura tiende a disminuir a medida que la onda avanza, puesto que de una altura de casi dos metros, en las proximidades del cabo de Buena Esperanza, se reduce a un metro en la costa Norte del golfo de Guinea, probablemente como consecuencia de la disminución de altura de la protuberancia, de cierta importancia hacia las X, cuando es también grande la convergencia de las ondas que la forman, y que disminuye luego, a medida que disminuye dicha convergencia, anulándose prácticamente en las proximidades del Ecuador, como puede verse en la cotidal VI del Atlántico Central. También debe influir en esta disminución de alturas de la onda, en las costas africanas, la acción contraria, aunque débil en estas pequeñas latitudes, de la fuerza centrífuga compuesta.

Por el contrario, en las costas Sudamericanas, y dejando para explicar más adelante las enormes alturas locales que se observan en la zona situada sobre la gran plataforma continental de las islas Malvinas, la altura de marea aumenta siempre debido a la fuerza centrífuga compuesta, favorable en este caso, de poco más de un metro, en la zona costera de Montevideo, a cerca de dos metros y medio en la de Pernambuco. Sin la patente acción de la fuerza centrífuga compuesta, este aumento sería inexplicable, pues la rama de onda que penetra en el Atlántico, al Sur del cabo de Hornos, iría perdiendo altura al expansionarse en su avance y prácticamente se anularía en las costas próximas a Pernambuco.

La protuberancia atlántica disminuye de altura, como hemos indicado, a medida que se aproxima al Ecuador, y prácticamente se anula, siendo sustituída por una verdadera escisión de la onda después de rebasado aquél y expansionarse, dicha onda, en el Atlántico Norte, continuando la propagación de dos cortas ramas de ondas. La principal, apoyada por la fuerza centrífuga compuesta en las costas de Africa, y la secundaria y de pequeña importancia, en las de América.

La rama africana, de las dos ramas en que la protuberancia central divide a la onda del Atlántico Sur, aumenta de altura después del gran recogimiento y consiguiente concentración de energía producida poco después de la hora IV, como consecuencia de la gran convergencia de la costa Norte del golfo de Guinea, incrementada además, como explicaremos después, por la amplia plataforma continental que se extiende más al Sur de Dakar, donde



adquiere ya, el extremo de la onda, alturas algo mayores que los dos metros.

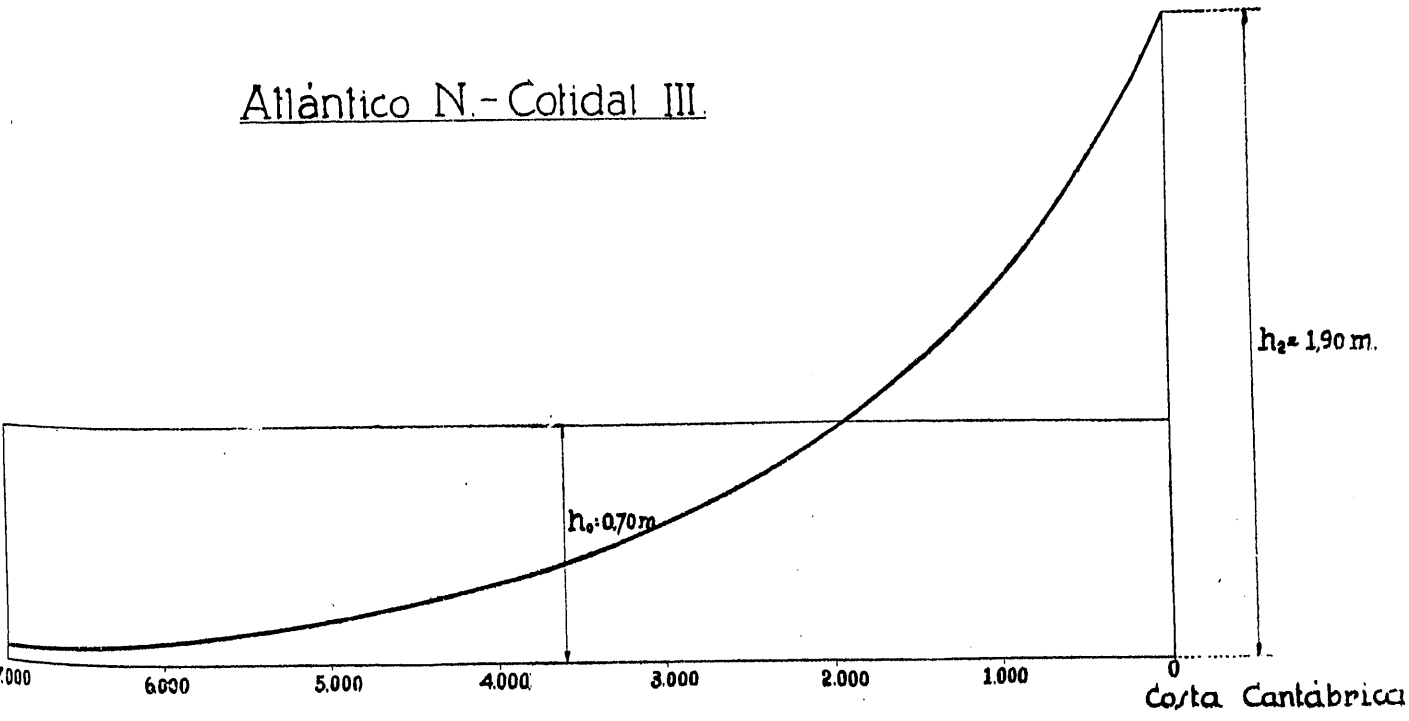
Rebasado ya el Ecuador, la fuerza centrífuga compuesta actúa sobre esta rama de onda, libremente propagada, hacia su derecha, y como consecuencia de ello, lenta pero continuamente, sus alturas aumentan, llegando a tener tres metros en la costa atlántica del Norte de Africa; unos cuatro metros, en la costa cantábrica española; cerca de los seis metros, en las costas de la Bretaña francesa, y aun después de desgajados los importantes tramos de la onda que penetra en el mar de Irlanda y Canal de la Mancha, conservan alturas del orden de los cuatro metros en algunos puntos de las costas atlánticas de Irlanda y Norte de Escocia, y aun todavía después de ceder otro importante tramo de onda, que desciende hacia el Sur por el mar del Norte y de producir las ondas giratorias alrededor de Islandia y las Islas Feroe, que también explicaremos más adelante, mantiene alturas del orden de los dos metros y medio en las costas de Noruega, para ir a perderse, finalmente, en el gran océano glacial Artico.

Este aumento y mantenimiento de alturas comprueban, una vez más, la eficaz intervención de la fuerza centrífuga compuesta, en la propagación del interesante fenómeno que nos ocupa.

Como otro fehaciente ejemplo de la importancia de esta fuerza centrífuga, así como de la certeza de las ideas y grado de aproximación de las fórmulas deducidas, hemos determinado también el alzado de la cotidal III del Atlántico Norte, cuya semialtura de apoyo, en la costa cantábrica española, coincide sensiblemente, como las de todas las demás cotidales determinadas, con su correspondiente unidad de altura.

Para determinar la altura eficaz h_0 de esta cotidal, así como de las cotidales I y VI del Atlántico, ya dibujadas, hemos partido, como se ha indicado, de la casi total conservación de la energía de la onda y protuberancia del Pacífico Sur al propagarse, pues después de circundado el continente Antártico, en la forma expuesta, y haber perdido una pequeña parte de su energía, derivada por las costas surorientales de Africa hacia el Índico, vuelve a concentrarse la mayor parte de dicha energía originaria, en el Atlántico Sur para pasar y propagarse después por el del Norte.

El tramo central de esta onda del Atlántico Norte, de poca altura, por estar ya lejos de las costas europeas de apoyo, separado del que hemos visto perderse en el océano glacial Artico entre las costas de Islandia y las de Noruega, avanza hacia Groenlandia y las costas americanas, en las que se va reflejando hasta la hora XII, produciendo alturas de reflexión, o sea doble de las originarias, del orden de los dos metros, y sigue avanzando hacia el Sur, después de dicha reflexión, por las costas del golfo de Méjico y de las Antillas, entre las que amortigua su ya escasa energía para acabar de morir en las proximidades del Amazonas hacia la hora VIII, donde también viene a confluir, hacia la misma hora, la rama de onda, prácticamente aislada y que ha doblado el Cabo de San Roque en las proximidades de Natal, produciendo, conjuntamente, una altura, pro-



bablemente duplicada por reflexión y aumentada, como veremos, por la amplia plataforma costera del orden de los tres metros.

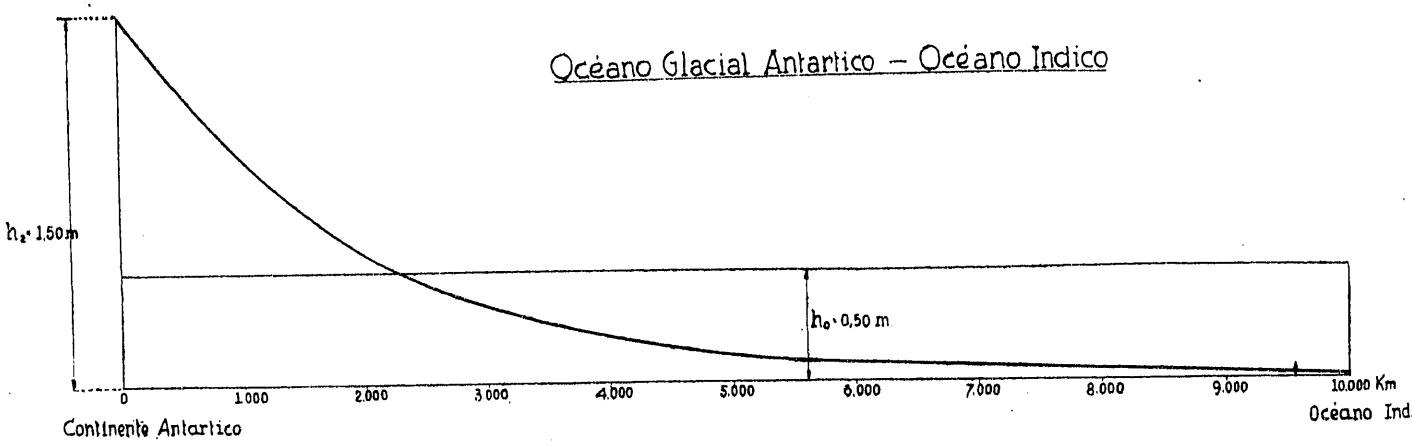
Posiblemente, después de rebasada esta zona del Amazonas, continúa la onda procedente del Atlántico Sur, propagándose también hacia las Antillas y el golfo de Méjico, en cuya complicada zona producen complejos, aunque débiles movimientos, ambas ondas, que allí están ya próximas a su extinción.

Un tramo de dicha onda del Atlántico Norte penetra por el estrecho de Davis y mar de Baffín, yendo a morir al océano glacial Ártico, que pudiéramos denominar tumba de la Marea, si, plagiando a Whewell, denominamos cuna de la misma a la zona del Pacífico de la América Central, donde se forma la protuberancia, originaria principal del espectacular fenómeno que estudiamos.

cia originaria que produce en dichas costas, alturas que no llegan a los dos metros y que se reduce a algo menos del metro y medio en las costas de Tasmania.

La pequeña altura inicial de la rama de onda del Pacífico Sur que avanza hacia Occidente en las costas del continente Antártico (véase el alzado de la cotidal VI) hace que la altura, en las proximidades de dichas costas y a pesar de tener cuenta de su convergencia y enérgica acción de la fuerza centrífuga compuesta en estas grandes latitudes, no sea exageradamente grande, en su principio, por lo que probablemente no rebasará mucho de los dos metros y medio en el extremo Sur de la cotidal X. La enérgica acción de la fuerza centrífuga compuesta irá aumentando esta altura, que posiblemente rebasará los tres metros a la hora IX siguiente.

De no ser por la acción de dicha fuerza centrífu-



Hay que hacer notar que, a pesar de la pequeña altura de la onda incidente, se llega a alturas de 14 metros en el fondo de la bahía de Fundy y de la ría de San Lorenzo, en el Canadá, debido principalmente, como más adelante detallaremos, a la amplia y suave plataforma costera que rodea a esta zona y al eficaz abocinamiento de dichas bahía y ría, y algo parecido, que luego explicaremos, sucede en las costas francesas del Canal de la Mancha, en la amplia plataforma continental de las Malvinas y en algún otro lugar del Globo.

Para terminar con esta rápida visión de conjunto del origen y propagación mundial de las mareas, sigamos a la rama de la onda del Pacífico Sur, que después de desgajada de la otra por el continente Antártico, poco después de la hora VI, avanza hacia el Oeste, penetrando en la zona Sur del Indico, entre Australia y el citado continente Antártico.

En la zona oriental de Australia avanza hacia el Sur, ya independizada de las atracciones astrales que rápidamente se alejan, gran parte de la protuberanga compuesta y debido al abrigo producido por el propio continente Antártico, las alturas, que rápidamente disminuirían a su alrededor, serían prácticamente nulas hacia la hora IX citada.

A pesar de dichas grandes alturas en las costas del continente Antártico, y debido también a la intensa acción de la repetida fuerza centrífuga compuesta, las alturas decrecerán rápidamente a lo largo de las cotidales de esta amplia zona, anulándose prácticamente en la región central del Indico, distante del continente Antártico más de nueve mil kilómetros, medidos según la cotidal correspondiente, por ejemplo la VII, que también dibujamos, aproximadamente y con todo género de reservas, pues no nos ha sido posible, repetimos, debido a las difíciles circunstancias actuales, proporcionarnos alguno de los interesantísimos datos referentes a las mareas en las costas de dicho continente Antártico.

Precisamente esta zona oceánica antártica es de la mayor complejidad en lo que a la propagación de la marea se refiere, pues la llegada a ella de los res-

tos de la protuberancia originaria y su posible reflexión en las costas del citado continente, pueden modificar sensiblemente la forma de las cotidales.

También hubiera sido quizás preferible no dibujar en la figura 4' el extremo Sur de las cotidales, en planta, correspondientes a las VIII y IX siguientes al paso de la otra onda por el extremo Norte de la tierra de Graham, pues la llegada de ambas ondas, de direcciones contrarias, sobre la gran plataforma costera de esta zona, es probable produzcan, en ella, grandes perturbaciones.

Después de la reflexión sufrida hacia la hora I, por el extremo Norte de la onda antártica, de que nos ocupábamos, en las costas surorientales de Africa, y que produce una altura de reflexión, o sea doble de la incidente, que se eleva, siempre por la acción de la fuerza centrífuga compuesta, de algo más del metro y medio, en la zona de Buena Esperanza, a cerca de los cuatro metros en las costas de la zona del canal de Mozambique, sigue más al Norte del Ecuador la propagación de la onda incidente junto con la reflejada, que no hemos dibujado en su origen africano para no complicar la figura y que después de concentradas por la forma cóncava del mar de Omán, en cuyo fondo vuelven a tener más de dos metros y medio de altura, continúa su marcha hacia Oriente, en esta zona de baja latitud Norte y por consiguiente de, aunque pequeña, contraria fuerza centrífuga compuesta, por lo que disminuye hasta menos del metro la altura de la onda en la zona de Ceilán.

En las costas africanas y arábigas, situadas más al Norte del Ecuador, la acción de la fuerza centrífuga compuesta, también contraria, disminuye la altura de la onda de los cuatro metros, antes indicados, en la zona del canal de Mozambique, a menos de dos metros en las costas de la Somalia oceánica, para volver a aumentar después por la concentración indicada en el mar de Omán o golfo arábigo.

Rebasada Ceilán y después de que una rama de la onda penetra en el golfo de Bengala, produciéndose su probable concentración y reflexión hacia las III, en su fondo de amplias plataformas continentales y donde vuelve a alcanzar por todo ello muy grandes alturas, superiores a los cuatro metros, continúa su avance hacia Oriente, produciendo pequeñas alturas en las zonas Sur de Sumatra y Java, donde no rebasa mucho del metro de altura, yendo a morir o perderse entre estas islas y Australia.

En estas zonas del océano Indico en general, penetra una pequeña parte de los restos de la protuberancia originaria que, en el día de sicigia equinoccial supuesto, viene a parar, como hemos indicado, hacia las islas Salomón y que, después de propagarse por los mares comprendidos entre Australia y la Indochina, penetra en ellas, complicando sus movimientos y dando, por las razones que luego veremos, importancia a la onda diurna.

En las costas del océano Indico, existen, pues, tres probables reflexiones.

La primera y más importante tiene lugar en las costas surorientales y occidentales de Africa, produciendo una amplia zona cotidal a la I y retrasando el avance de las cotidales anteriores. Las otras dos tienen probablemente lugar en los fondos del golfo arábigo y del mar de Bengala, hacia las horas V y III, respectivamente.

No es necesario hacer resaltar que, en esta breve descripción general del fenómeno de las mareas, que confirma las ideas y fórmulas expuestas, no nos hemos ocupado más que de las ondas que pudiéramos denominar principales, sin ocuparnos de otros fenómenos secundarios, tales como los producidos por las ondas reflejadas, por las oscilaciones estacionarias de más o menos importancia, las resonancias y por otras varias circunstancias, que pueden alterar lo expuesto en ciertas zonas y de cuyos efectos nos ocuparemos en futuros estudios de detalle.