

EL MOVIMIENTO
EN EL MAR



EJEMPLAR 1

GC 201

.M 3

COA 1-10 # 625

GC 201

GC 2

o M3

g-2

ESTUDIOS SOBRE FISICA DEL GLOBO

EL MOVIMIENTO EN EL MAR

POR

JUAN MATEOS

INGENIERO GEOGRAFO Y CIVIL



SECRETARIA DE MARINA
UNIDAD DE HISTORIA
Y CULTURA NAVAL
BIBLIOTECA CENTRAL



SECRETARIA DE MARINA
UNIDAD DE HISTORIA
Y CULTURA NAVAL
BIBLIOTECA CENTRAL



MEXICO
1 9 4 6

Handwritten blue ink scribbles and numbers, possibly '833' and 'H. K. 11'.



SECRETARIA DE MARINA
UNIDAD DE HISTORIA
Y CULTURA NAVAL
BIBLIOTECA CENTRAL

OBRAS DEL MISMO AUTOR

- Métodos Astronómicos para Topógrafos y Exploradores. (Agotada).
- Tratado Elemental de Trigonometría Rectilínea y Esférica.
- Teoría de los Errores y Elementos de Cálculo de Probabilidades, con aplicaciones a la Geodesia y a la Astronomía.
- Explicación Elemental de las Teorías de Einstein sobre la Relatividad y la Gravitación.
- Compendio de los Fenómenos de la Radioactividad y Nociones sobre la Constitución de la Materia,
- Teoría Elemental de los Determinantes. (Lecciones dadas por el autor en su cátedra de Matemáticas en la Escuela N. de Ingenieros).



SECRETARIA DE MARINA
OFICINA DE BIBLIOTECA
Y PUBLICIDAD

EL MOVIMIENTO EN EL MAR



SECRETARIA DE MARINA
UNIDAD DE HISTORIA
Y CULTURA NAVAL
BIBLIOTECA CENTRAL

INTRODUCCION

El movimiento es el estado natural del universo. Es la esencia, la condición normal de todos los fenómenos. Ostensible u ocultamente, todo se mueve. El reposo absoluto no existe, la quietud es ilusoria. El movimiento nunca se extingue: se transmite o se transforma.

La actividad es inherente a la materia. Ya dispersa en partículas en el espacio, ya agrupada en tenues copos o en conglomerados compactos, o condensada en masas gigantescas, ejerce y sufre incesantes atracciones y repulsiones, rupturas y deformaciones.

Las sutiles nebulosas, perdidas en número prodigioso en los insondables abismos del cielo, se hallan en rápido giro o en vía de concentración, generadora de soles.

Las estrellas, en apariencia fijas en la forma de las constelaciones, están animadas de movimientos propios muy veloces y de una actividad interna, ora lenta, ora explosiva, manifiesta en el cambio gradual o repentino de su brillo.

La vía láctea, galaxía milmillonaria de estrellas, de la que forma parte nuestro sistema solar, está en vertiginosa rotación en torno de una línea que parece apuntar al **Sagitario** al mismo tiempo que avanza en el espacio en poderoso movimiento de expansión, fenómeno que todas las galaxías parecen ofrecer.

Surcan el espacio en todas direcciones, proyectiles y viajeros: bólidos, cometas, fotones, electrones, rayos cósmicos, y corrientes de energía en forma de partículas materiales, o, como la luz y el calor, en ondulaciones o vibraciones etéreas de fantástica velocidad.

Las manchas del sol y los accidentes visibles de su superficie: protuberancias, llamas, relámpagos, revelan grandes movimientos eruptivos y ciclónicos, signo de la tormentosa agitación de ese astro, cuya energía ha mantenido imperturbable durante millones de años, la marcha regular de los planetas en dilatadas órbitas.

La radiación solar rige invariablemente la física de la tierra y su actividad. De sus variaciones regulares o violentas dependen los estados del suelo, de la atmósfera y del mar, la temperatura, las brisas y los huracanes, las tempestades, las lluvias y la sequía, los meteoros extraordinarios con sus efectos sobre el tiempo, las tormentas magnéticas manifiestas en las auroras polares y en la perturbación de las ondas del radio; y es bien conocida su señalada influencia sobre los fenómenos biológicos, y, por ello, quizá también sobre los sociales.

La energía procedente del sol que el globo terrestre ha conservado al desprenderse de ese astro, vive despierta y activa en su masa, y aparece intensa en terremotos y erupciones volcánicas y en lentos hundimientos y elevaciones de la tierra; e incesante en poderosas e invisibles radiaciones hacia el espacio, en suaves oscilaciones que mecen el suelo y en oscuras trepidaciones que lo mantienen en continuo estremecimiento.

El movimiento es característico de la vida. Las funciones vitales se cumplen en los cuerpos en forma de contracciones, de palpitations, de vibraciones y de corrientes y circulación de flúidos. Los animales viven en continua locomoción aérea, acuática o terrestre. Los vegetales hunden sus raíces en el suelo, extienden sus tallos y sus ramas buscando apoyo en otros cuerpos, y sus semillas y su polen viajan en alas de los insectos y del aire. El ejercicio de la vida que es la lucha perenne por la conservación de los seres vivos y de su especie, es una continua agitación colectiva de magna intensidad.

El movimiento no cesa en el universo. La materia lleva en sí una invencible tendencia a persistir en él eternamente, por lo cual sigue siempre el trayecto de menor resistencia. Un cuerpo detenido por un obstáculo, o cede a éste su movimiento, o lo trasmite a sus propios elementos internos transformándolo en calor que es la agitación vibratoria de sus moléculas.

Aunque continuos en su existencia, todos los movimientos son rítmicos en su modo. Las revoluciones y rotaciones de los astros

son vueltas periódicas al punto de partida. La ondulación y la vibración son movimientos de vaivén. El viento sopla por ráfagas intermitentes. La locomoción animal es compasada. Los temblores son ondulaciones de la tierra. Los grandes fenómenos que ofrece la naturaleza se producen, alternan y varían en períodos, unos muy breves, otros seculares.

Considerado en sí mismo, el movimiento, esto es, el simple paso de un cuerpo de un lugar a otro y a otros sucesivamente, es un fenómeno admirable y profundamente misterioso. ¿Cómo se realiza? ¿Qué virtud, qué alma lleva la materia en sí que la impele hacia adelante y la hace perdurar en ese estado mientras no encuentra resistencia? ¿Qué cosa pierde un cuerpo y cede a otro cuando, sin cambio perceptible en sus propiedades, le comunica su movimiento? La velocidad con que necesariamente se efectúa todo cambio de posición es un complejo indisoluble de espacio y tiempo, de esos dos elementos cuya naturaleza es absolutamente inaccesible al entendimiento humano, de tal suerte unidos, que abstrayendo cualquiera de ellos, la noción de velocidad se desvanece.

La contemplación de los hechos universales de que los citados sólo son ejemplos, y de la grandeza y armonía de su conjunto, descubre en el movimiento un gran fenómeno fundamental, de la naturaleza, manifestación de un poder inescrutable que reside en todos los cuerpos y en todos los puntos del espacio.

El alto poder de la ciencia matemática ha descubierto y establecido en bellos y notables teoremas y principios las leyes teóricas del movimiento. Pero la observación y el estudio del fenómeno físico en la infinita variedad de móviles y de circunstancias que ofrece la naturaleza, sólo son posibles en condiciones especiales y con instrumentos adecuados, fuera del común alcance.

No hay esfuerzo mental ni de imaginación por intenso que sea, que nos permita comprender en un pensamiento definido la gigantesca magnitud de los cuerpos celestes y la enormidad de sus distancias y velocidades y formar un concepto claro y efectivo de su grandioso movimiento. La infinita pequeñez de los elementos atómicos y su impetuosa rotación en torno de su núcleo nos ponen en igual dificultad para concebir con lucidez la no menos asombrosa agitación que reina perenne en lo íntimo de la materia.

a muchas influencias externas e internas que rompen su equilibrio: acciones astronómicas sobre toda su masa, variaciones atmosféricas que agitan su superficie, fuerzas subterráneas que conmueven su fondo, en su seno, efectos biológicos de sus habitantes vegetales y animales.

Obrando todas estas causas, simultánea o sucesivamente, en diversas regiones del océano, y cada una según su propio modo, ejercen una acción conjunta que se manifiesta en movimiento de dirección, intensidad y ritmo múltiples. Agitación que, lejos de ser caótica y desordenada, obedece fiel y estrictamente a las rígidas leyes de la Física.

La descripción de estos notables fenómenos y su estudio metódico mantenido en su parte matemática en el grado elemental, forman la materia del presente opúsculo.

* * *

Dividiremos este estudio en tres partes dedicadas respectivamente a cada uno de los géneros de movimiento que se observan en el mar y se distinguen por sus muy especiales caracteres y por sus causas perfectamente definidas, a saber:

1º Agitación oscilatoria puramente superficial que se realiza en una masa de agua muy delgada en relación con la profundidad oceánica. Su período es muy corto, a veces sólo de algunos segundos. Debida a causas terrestres accidentales, irregulares en su intensidad y duración, es completamente imprevisible. Sus efectos, aunque en ocasiones muy intensos, son puramente locales. Esta agitación forma las OLAS.

2º Movimiento continuado, de transporte de masas líquidas de gran volumen que se abren paso entre las aguas circundantes, verdaderos ríos marinos de caudal enorme y de gran constancia y regularidad en su marcha. Originados por causas también terrestres, unas externas y otras residentes en el seno mismo de los mares, su influencia se extiende a grandes distancias en el océano, en la tierra y en el aire y obran notables e importantes fenómenos en la economía del planeta. Estos movimientos constituyen la verdadera actividad del mar. Son las CORRIENTES.

La naturaleza ofrece, sin embargo, un cuerpo que, así en su masa como en sus moléculas, muestra con gran claridad los modos y las propiedades del movimiento: el agua; y un campo inmenso y siempre accesible a la observación, donde esos fenómenos se ostentan con más persistencia, variedad y grandeza: el mar.

Dotada de singulares propiedades que la distinguen de los otros líquidos, el agua desempeña vitales funciones en la física del globo. De gran movilidad y escasamente compresible, se extiende fácilmente en todas direcciones, corriendo hacia los espacios deprimidos donde se acumula. Sus cambios de estado, casi incesantes, son fenómenos de movimiento molecular. Transformada en vapor invisible, se eleva de toda la inmensa superficie oceánica, y llevada por los vientos, vaga en las alturas por todas las regiones de la tierra portadora de un depósito de energía potencial que devuelve en forma actual cuando, condensada en lluvia, desciende por las laderas o se precipita en poderosas cascadas y corre por los ríos para restituírse al mar. En esta circulación jamás interrumpida, se advierten claramente dos de las leyes del movimiento: el ritmo y la persistencia. En su escurrimiento más o menos rápido, barre del suelo sus materiales y los transporta a grandes distancias y, al fin, al mar donde van a alimentar a los organismos que lo pueblan y a contribuir a la arquitectura oceánica. Su alta capacidad para guardar en su seno gran cantidad de calor, le permite conducirlo a muy remotas regiones y distribuirlo en vastos espacios del aire y de la mar donde modifica y templó las temperaturas y los climas. Se halla siempre en la composición de los cuerpos vivos formando la mayor parte de su volumen, y su presencia es indispensable para la existencia de los organismos. En toda la extensión y la profundidad de los océanos flota exuberante la vida. El agua, impregnada de materia orgánica, forma un verdadero plasma cuya composición (en cuanto a las proporciones relativas de sus sales), es análoga a la de los líquidos interiores de los organismos animales: indicios todos de que la naturaleza asignó al agua una importante función en el fenómeno profundamente oscuro del origen y mecanismo de la vida.

El océano, que cubre las dos terceras partes de la superficie de la tierra, está expuesto libremente en esa inmensa extensión,

PARTE PRIMERA

LAS OLAS

I

Causa de las olas.

El viento es la causa más constante y activa de la agitación del mar. Cuando reina tranquilidad completa en el aire, fenómeno raro y casi siempre precursor de una tormenta, el agua en perfecta calma semeja la superficie serena de un lago donde se retratan con precisión los objetos y los astros y reverbera brillante la claridad del cielo. Apenas se inicia el viento, la mar se inquieta, y según son el modo y la intensidad del soplo, la agitación ofrece diversas formas y aspectos, desde un leve tremor hasta la más furiosa tormenta.

El viento obra sobre la masa líquida por su empuje, por su choque y por su presión.

La forma más ligera de su acción, perceptible hasta en los estanques, es el cabrilleo: agitación que levanta en el agua arruguitas y surcos continuos en forma de media luna, cóncavos hacia el viento, en que la reflexión de la luz hace aparecer la superficie líquida trémula y brillante. Este bello movimiento vibratorio es obra del soplo leve de un viento manso y persistente.

El impulso del viento es muy sensible y no pocas veces poderoso. Soplando en sentido contrario al de la corriente de los ríos, detiene el descenso de sus aguas y determina un remanso de más o menos altura y duración. Se cita el caso memorable del 16 de noviembre de 1834 en que un fuerte viento del noroeste impelió

PARTE PRIMERA

LAS OLAS

I

Causa de las olas.

El viento es la causa más constante y activa de la agitación del mar. Cuando reina tranquilidad completa en el aire, fenómeno raro y casi siempre precursor de una tormenta, el agua en perfecta calma semeja la superficie serena de un lago donde se retratan con precisión los objetos y los astros y reverbera brillante la claridad del cielo. Apenas se inicia el viento, la mar se inquieta, y según son el modo y la intensidad del soplo, la agitación ofrece diversas formas y aspectos, desde un leve tremor hasta la más furiosa tormenta.

El viento obra sobre la masa líquida por su empuje, por su choque y por su presión.

La forma más ligera de su acción, perceptible hasta en los estanques, es el cabrilleo: agitación que levanta en el agua arrugitas y surcos continuos en forma de media luna, cóncavos hacia el viento, en que la reflexión de la luz hace aparecer la superficie líquida trémula y brillante. Este bello movimiento vibratorio es obra del soplo leve de un viento manso y persistente.

El impulso del viento es muy sensible y no pocas veces poderoso. Soplando en sentido contrario al de la corriente de los ríos, detiene el descenso de sus aguas y determina un remanso de más o menos altura y duración. Se cita el caso memorable del 16 de noviembre de 1834 en que un fuerte viento del noroeste impelió

las aguas del mar Báltico hacia su costa oriental donde se elevaron a 3.70 m. ocasionando inundaciones y daños de toda suerte.

La acción del viento es un fenómeno del mismo género, pero en vastas proporciones, del que se observa cuando el golpe de una piedra que cae en el agua produce un hundimiento del líquido en el punto de caída seguido de una serie alternada de resaltos y concavidades, o de ondas que, en círculos concéntricos, se continúa y prolonga en la distancia: movimiento oscilatorio que se llama **undulación**.

Las masas líquidas que, impelidas del aire se elevan y se deprimen alternativamente en la superficie del mar, de un lago o de un río, se llaman en general, **ondas**, y si son de grande amplitud, **olas**.

Una masa atmosférica en movimiento sobre el agua produce un efecto semejante en la extensión del mar cubierta por la anchura de la corriente aérea. Las corrientes del aire no son en general horizontales ni tienen la misma intensidad en toda su anchura, ni su movimiento es continuo como ningún movimiento en la naturaleza lo es. Soplan por ráfagas más o menos duraderas y con fuerza desigual y periódica. De aquí su efecto inconstante y mudable, y vario en diversas regiones del océano.

El mecanismo de esta acción del viento no había sido fácil de comprender hasta que Helmholtz demostró que se rompe el equilibrio en la superficie de contacto de dos masas fluídas de distinta densidad si están animadas de velocidades diferentes, por lo cual, cuando el viento sopla, la superficie del mar no puede conservarse a nivel y se deforma. Entonces, el aire, por medio de la adherencia y rozamiento de sus partículas con las del agua, las arrastra y produce en la superficie del mar ese movimiento rítmico de elevación de unas masas líquidas y depresión de otras, que semeja un suelo en que alternan eminencias y oquedades cuya altura y profundidad aumentan con la fuerza del viento hasta figurar, a veces, valles y montañas.

El mismo fenómeno causa: entre las corrientes de aire superiores, la formación de ondas, o sea, de esa alternación de nubes y de espacios azules más o menos amplios que llamamos cielo **aborregado**; y en tierra, esas arrugas y desigualdades regulares que se observan en la superficie de los médanos y de las llanu-

ras arenosas, y las ondulaciones que las corrientes de agua dejan en los materiales movedizos de su fondo.

Acontece también, que, cuando a cierta profundidad se encuentran en contacto dos masas de agua animadas de diferente velocidad y que, ya sea por su desigual temperatura o por otra causa, por ejemplo su diferente contenido de sal, poseen distinta densidad, se rompe el equilibrio entre ellas y se forma oleaje submarino que se siente a veces en el exterior.

II

Generación y forma de las olas.

Se distinguen en las olas varios elementos que las caracterizan, figura 1: su **ápice, cúspide** o **cresta**, o parte, elevada, **c**; su **seno** o región más baja, **b**; su **longitud**, o distancia horizontal **l**, entre las cúspides o entre

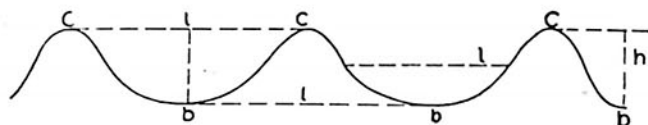


Fig. 1

los senos, o entre los puntos **i**, de igual fase de dos olas consecutivas; su **amplitud** o **altura h**, que es

la distancia vertical entre la cúspide y el seno; la **velocidad** con que **parecen** correr o transportarse; y el **período**, o tiempo que tarda una ola completa en pasar frente a un punto fijo.

Decimos que las olas parecen transportarse porque, efectivamente, el desalojamiento y la velocidad son sólo ilusión de nuestra vista. En realidad no son las masas de agua, sino el movimiento de sube y baja que las anima, lo que se propaga de un punto a otro de la superficie líquida. Movimiento e ilusión de que nos podemos dar cuenta muy exacta con el sencillo y fácil experimento que sigue: fijada en el suelo la extremidad de una cuerda flexible, y teniendo, como a tres metros de distancia, la otra extremidad en la mano, si movemos ésta rítmicamente de arriba abajo, la cuerda tomará una forma ondulada y parecerá con mucha claridad que sus ondas corren de la mano al suelo. Variando la fuerza y el ritmo de nuestro movimiento, haremos variar la longitud, la amplitud y la velocidad de las ondas o sea, el carácter de la ondulación, y, a pesar de todo, no dejaremos de

estar completamente seguros de la inmovilidad de las partes de la cuerda en el sentido de la propagación de sus ondas.

Veamos ahora, cómo el desequilibrio provocado en su superficie por las causas arriba señaladas, determina la ondulación en el mar. El movimiento de la masa líquida resulta naturalmente de los movimientos individuales de las partículas que la constituyen. El estudio matemático de la dinámica del mar ha llegado a la conclusión de que todas sus partículas describen con velocidad constante, órbitas circulares alrededor de centros fijos. En la fig. 2, que muestra una sección transversal de la ola, la línea AB representa la posición que guardan las partículas de agua $a_1, a_2, a_3 \dots a_8$ antes de empezar el movimiento, que suponemos se ha de propagar en el sentido de la flecha; y la curva A. C. D. E., las posiciones simultáneas que ocuparán cuando, terminado un período, va a comenzar el siguiente. Los círculos figuran las trayectorias que siguen las partículas en el sentido de las flechas.

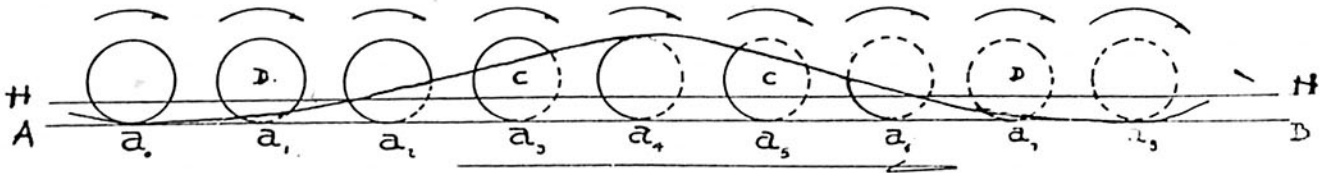


Fig. 2

En la transmisión del movimiento de izquierda a derecha, cada partícula comienza a moverse un poco más tarde que su vecina de la izquierda, de manera que tiene un atraso con respecto a ella; de lo cual resulta que al terminar un período cíclico, de las ocho partículas supuestas, la primera, a_0 , ha recorrido toda su trayectoria circular y ha vuelto, como se ve en la figura, a su posición primitiva, la partícula a_1 , ha recorrido sólo siete octavos de su carrera, y la partícula a_2 , las seis octavas de la suya y así sucesivamente, como lo indican las líneas llenas que marcan las porciones de la trayectoria que llevan recorridas las partículas, y las líneas de puntos, los arcos que les falta recorrer para cerrar su período. La penúltima, a_7 , no ha cubierto sino un octavo de su camino, y la última va a comenzar apenas, su movimiento.

Como se ve, la línea que reúne las posiciones a que han llegado las partículas en un mismo instante, ofrece la forma general del perfil de las olas, curva muy semejante al lugar llamado **trocoide**, del género de la cicloide. La observación encuentra, sin embargo, que el declive de las regiones C C, adyacentes al ápice o cúspide de la onda, es más fuerte que el de las partes D D, vecinas de su seno. Las distancias de estos puntos extremos a la línea H H, que representa el nivel del agua antes de levantarse el oleaje, son respectivamente, según Gaillard: (1)

$$a = \frac{h}{2} + 0.7854 \frac{h^2}{l} \quad \text{y} \quad b = \frac{h}{2} - 0.7854 \frac{h^2}{l}.$$

El movimiento de las partículas líquidas en una trayectoria cerrada tiene dos efectos: la oscilación en el sentido vertical, y un ligero desalojamiento de vaivén en el sentido horizontal que las hace avanzar un poquito en la región de la cúspide y retroceder otro tanto en la región baja, o de su seno.

La misma teoría concluye que en las capas líquidas inferiores a las superficiales los radios de las órbitas circulares van disminuyendo progresivamente al descender en un espesor de agua que fuera infinito; pero si, como realmente acontece, la profundidad, más o menos grande, es limitada, esa figura circular se torna elíptica cuyo eje menor, siempre vertical, se va reduciendo hasta anularse al fin, en el fondo.

La observación practicada con polvos de color de igual densidad a la del agua contenida en depósitos transparentes, ha confirmado la teoría permitiendo ver que las trayectorias de las partículas líquidas son elipses, tanto más aplanadas y pequeñas, cuanto más se aproximan al fondo.

Un viento persistente determina un cambio en el perfil de las olas, cuyo declive se pone más tendido en la parte expuesta al soplo que en la pendiente del lado opuesto; y por las arrugitas que cubren la superficie de ambos lados, se advierte una oscilación secundaria.

La acción prolongada del viento produce también, un avance o movimiento real del agua, porque la cúspide, parte más saliente y expuesta de las olas, recibe el golpe del aire que la lanza hacia adelante y cae sobre la pendiente opuesta del pliegue lí-

Gaillard D. D. Ware Action in relation to Engineering Structures.

quido. Así, los cuerpos flotantes participan de la oscilación vertical del agua y manifiestan algún avance horizontal, pero muy lento y de escasa significación.

III

Magnitud de las olas. Su medida.

En la mar donde todo, olas y embarcaciones, es inquieto y movedizo, faltan bases fijas de referencia para observar y medir con exactitud los elementos de las olas; así, se ha recurrido para ello, a procedimientos aproximativos como los que siguen.

Largando una cuerda provista en su extremo de un flotador, hasta que éste llegue a la cúspide $c c$, figura 3, de una ola, y el navío a la $c'c'$, de la inmediata, la longitud de la cuerda dará la de la ola, si la dirección de las crestas es perpendicular a la ruta, rr de la nave; si no, la dará el producto de esa longitud por el seno del ángulo α , que aquellas direcciones forman.

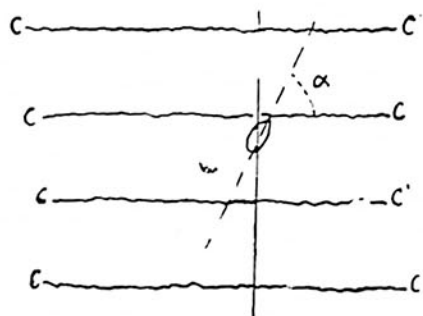


Fig. 3

Anotado el tiempo t , que emplea la cúspide de una ola en pasar de uno a otro de dos puntos señalados en el barco a la distancia d , el producto td , será la velocidad relativa entre la ola y el navío que, combinada con el debido signo, con la velocidad absoluta de éste, dará la de la ola.

La altura, o sea la distancia vertical entre el seno y la cresta de las olas, es bastante difícil de obtener a causa principalmente, del engaño que sufre la vista respecto a la dirección de la vertical en un barco que, al flotar entre las olas, guarda constantemente una posición más o menos inclinada que ilusoriamente se tiene por horizontal. El medio, poco exacto, que se emplea generalmente para determinar esa altura consiste, cuando la embarcación se encuentra en el seno de la ola, en buscar en ella un punto A , figura 4, desde el cual parezca que la cúspide cubre el horizonte HH , y medir la distancia AC , de ese punto a la línea de flotación, que será la altura buscada, pues que, a causa de la pequeñez de la distancia d , en relación con la del horizonte,

la dirección A B difiere muy poco de la horizontal, perpendicular a A C.

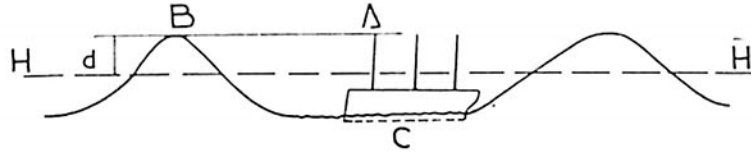


Fig. 4

La teoría matemática del movimiento oscilatorio establece para la velocidad de las olas en función de su longitud, la expresión $v = \sqrt{\frac{g}{2.17} l}$ en la que g es la aceleración de la pesantez; fórmula que, para la latitud media de la República se convierte en $V = 2.24 \sqrt{l}$.

Dada la definición de período, esto es, el tiempo que emplea una ola completa en pasar frente a un punto fijo, su valor será $p = \frac{l}{v}$.

De estas dos fórmulas se deduce fácilmente la relación entre los elementos de las olas y se puede expresar cada uno en función de los otros como sigue:

$$p = \frac{\sqrt{l}}{1.24} \quad p = \frac{v}{1.56} \quad l = 1.56 p^2 \quad l = \frac{v^2}{1.56}$$

IV

Altura de las olas.

La causa preponderante de la agitación del mar es el viento. Su fuerza es un factor de altísima importancia para determinar la altura del oleaje, especialmente en las regiones abiertas de alta mar. A causa del serio obstáculo para medir velocidades que opone un medio en continuo movimiento, la investigación de la influencia del aire, o de la relación entre su rapidez y la altura de las olas, es muy dificultosa, y sólo se han ofrecido para expresarla, algunas fórmulas empíricas, entre otras la de Zimmermann que es la más reciente y aplicable sólo a valores medios, a saber, $h = 0.65 v$, en que h es la altura de la ola en pies

y v , la velocidad del viento en millas por hora. Para la velocidad en kilómetros por hora, la altura será en metros, $h = 1.07v$.

La aplicación de esta fórmula al caso de las olas que levantara un huracán de 75 millas por hora, o sea, 139 kilómetros, daría para su altura 48.75 pies o 14.86 metros.

La extensión oceánica barrida por el viento influye también sobre la altura de las olas. Según los estudios de Stevenson (1), se puede calcular por la fórmula $h = 1.5 \sqrt{k}$ con h en pies y k , distancia de la costa expuesta al viento, en millas náuticas, fórmula aproximativa que falla para distancias cortas, pues entonces, el oleaje alcanza mayor elevación. Los resultados de la aplicación de la fórmula se pueden ver en la siguiente tabla.

<u>k millas</u>	<u>Pies</u>	<u>Metros</u>
20	7	2.13
50	11	3.35
100	15	4.57
200	21	6.40
500	34	10.26
1000	47	14.33

Afirman los observadores que la elevación de las ondas que, en circunstancias ordinarias levantan los vientos fuertes, es de 3 a 4 metros, y las de tempestad llegan en término medio, a 5.50; y no faltan navegantes que dicen haberlas visto de 9 a 13 y aun más altas todavía, habiéndose registrado una sola observación de más de 15.

Dadas las causas de la agitación marina, la altura de las olas debe variar de un mar a otro y ser mayor en aquellos de profundidad más grande, de superficie más accesible al viento y de aguas más ligeras. Esto explica que en el océano Antártico que cubre casi un hemisferio de la tierra, y es, por ello, el más abierto al libre soplo de los vientos, el oleaje alcance alturas extraordinarias; que en las regiones del cabo de Hornos y del de Buena Esperanza llegue a 15 y hasta 18 metros y que las ondas del Atlántico, inferiores a éstas, sean más altas que las del Mediterráneo, mar muy estrecho; y que haya lagos en que se eleven más que en ciertos mares, como los golfos cerrados

(1) Stevenson Thos Constructions of Harbors

parcialmente por cadenitas de islas; y que sean tan bajas las del mar Caspio, circuido totalmente, y de aguas muy densas a causa de su alto contenido de sal.

La altura del oleaje, que tiende a aumentar cuando refresca el viento, no excede, sin embargo, de cierto límite. Su duración, o la persistencia de su soplo, produce un efecto acumulado que, al principio con cierta rapidez que más tarde se modera, va aumentando la altura de las olas hasta cierto máximo que adquiere al cabo de varias horas, tal vez no más de cuarenta y ocho, según un estudio teórico de Borgen (1). Por su interposición a manera de pantalla, cada ola protege a la inmediata contra la plena acción del aire; el efecto del soplo no puede, pues, acumularse indefinidamente, a la larga se establecen un régimen regular y una altura media de las olas que depende en cada caso de la intensidad y de la inclinación del viento. Las cúspides de algunas olas que logran elevarse sobre el nivel general de las demás, al golpe directo del aire, se deshacen en partículas finísimas que saltan en polvo iridiscente llamado **rocío del mar**. Se dice que el viento **corta** las olas y que el mar **humea**.

Se ha buscado la relación que existe entre la longitud de onda, o sea la distancia entre los ápices de dos olas consecutivas, y su altura. Los resultados han sido varios y sin precisión, como se ve en la siguiente tabla formada por Gaillard.

Altura	Relación
De 0.6 a 1.5	30
1.8 a 3 0	25
3.0 a 6.0	20
6.0 a 9.0	17

El valor medio y más frecuente de esta relación es de 20 a 1. Así las cúspides de olas de 5 metros de alto se siguen a distancia de 100 metros. Como el viento, por su fuerza y dirección, hace inclinar el cuerpo de las olas abatiendo con ello su cúspide más o menos, esas circunstancias tienen mucha influencia sobre la proporción entre su altura y su intervalo. Considerando esta influencia, las observaciones de Schott le han dado para esa relación los valores aproximados que siguen:

(1) Autor citado en un artículo sobre Oceanografía de Geodetic and Coast Survey de los Estados Unidos.

Viento moderado	33
Viento fuerte	18
Viento tormentoso	17 a 13.

Zimmermann, ya citado, da la siguiente fórmula: $l = 3.55 \sqrt[3]{v^4}$ con l , longitud de onda, en metros y v velocidad del viento, en metros por segundo.

En cuanto a la velocidad relativa entre las olas y el aire, se observa que, por regla general, cuando refresca, el viento es más veloz que las olas, y cuando éstas han adquirido su altura máxima y se ha establecido el régimen regular, su longitud y, por tanto, su altura, crecen y su velocidad excede a la del viento. Zimmermann propone la siguiente fórmula para esa relación de velocidades: $v = 2.356 \sqrt{V^4}$ en que v es la de la ola y V , la del viento en metros por segundo.

V

Influencia de la profundidad

Se notará que en las fórmulas que hemos apuntado, relativas a las dimensiones de las olas no figura la profundidad del mar. Se han estudiado y desarrollado en el supuesto de que el agua no tiene movimiento en el fondo, lo cual sólo acontece en las altas profundidades. En los bajos, en la cercanía de las costas y de los arrecifes la forma de las olas se aparta de la trocoide y las partículas líquidas tienen en el fondo, sensible movimiento horizontal. Así, en estas circunstancias la longitud de la onda y su altura muestran diferencias que dependen de la profundidad, siendo de notarse que este elemento, profundidad, es el factor predominante para determinarlas.

La investigación matemática ha podido establecer, sin embargo, relaciones entre la longitud y la velocidad de la onda y la profundidad del mar, que permiten calcular una de ellas cuando se conocen las otras dos. Así, con la observación de la longitud de las ondas y su velocidad aparente, que son fenómenos superficiales perceptibles, se ha calculado la velocidad media del Atlántico meridional, y la del Pacífico entre el Japón y San

Francisco y entre Australia y el Perú. Una ondulación de 200 metros de longitud en un mar de 3,000 metros de profundidad recorre 21.80 metros por segundo o 78.66 kilómetros por hora. Se admite que esta es la velocidad media del oleaje de tempestad en los océanos.

La proximidad del fondo modera la longitud de onda y la velocidad de su propagación y determina formas más agudas en su perfil, lo cual explica las mares más gruesas y pesadas que encuentran los navegantes en los parajes menos hondos (200 metros) de la meseta continental. (1)

Cuando la marejada de la alta mar llega a las playas o a las regiones de la costa cuya profundidad va disminuyendo gradualmente, las olas se vuelven más y más cortas y de perfil más escarpado y retardan su marcha. Las olas que las siguen las alcanzan y, pasando sobre su superficie tersa, con menor rozamiento, rebasan su altura y se derraman en cascada espumosa sobre el lado opuesto sembrando la playa de conchas y de arena. Se dice entonces que se **quiebra** o **revienta** la ola o que **se rompe** el mar.

Se ha hecho observar que el rozamiento entre el agua y el fondo es muy ligero e insuficiente para oponer resistencia que cause el retardo de las olas, y se ha emitido esta otra explica-



Fig. 5

ción de su rompimiento. Sabemos que sobre los bajos fondos crece la altura de las olas, lo que indica que las partículas líquidas van describiendo trayectorias u órbitas de mayor amplitud. Al ir disminuyendo la profundidad, el espesor de agua no

(1) Se llama *meseta* o *plataforma* continental una forma notable y general en la topografía submarina, una zona cuya profundidad aumenta con más o menos rapidez, pero *gradualmente*, desde la costa hasta un límite que con cierta arbitrariedad, se ha convenido en fijar en doscientos metros, y cuya anchura, como es natural, varía mucho en las diversas regiones continentales. Es la profundidad a que pueden llegar los rayos de la luz solar, que favorecen la existencia y el desarrollo de muchas especies vegetales y animales explotables. Desde esa línea sinuosa, *isobata* (del griego *isos*, igual, y *bathos*, profundidad) de 200 metros de hondura, el fondo de los mares desciende con irregularidad y mayor pendiente.

va siendo bastante para alimentar el volumen creciente de la onda; hay un **déficit** que se señala por una oquedad, en su frente **a**, figura 15, que dejando sin sustentación a la cúspide, su agua se desploma y cae adelante de la ola. Me atrevo, sin embargo, a pensar que en las costas de fuerte inclinación así como en los bajos y arrecifes cuyo suelo está formado por políperos y erizado de puntas y de aristas pétreas, el movimiento del agua halla grande resistencia que se muestra por una reventazón incesante. El pie de los peñascos y de las escarpaduras naturales, de las escolleras, de los rompe olas y de otras obras artificiales en el mar es sitio de activas y perennes rompientes.

VI

Espuma. Resaca

El movimiento incesante de las olas que de día y de noche se rompen en las playas y contra las rocas de la costa; si es manso, mece y pule los guijarros y agita las arenas que, por su mutuo roce, se reducen a fino polvo; y si violento, mina los cantiles y tritura y arrastra sus despojos.

La agitación del agua en contacto con el aire determina la mezcla de estos flúidos bajo la forma de innumerables burbujas cuya acumulación constituye la espuma, compañera casi constante del oleaje, y que, a causa de la menor densidad del gas, flota y sube a la superficie a coronar las olas.

La viscosidad del agua marina y su contenido de materia orgánica facilitan en alto grado la formación de la espuma que nunca se produce en el agua dulce. La vida de las burbujas depende de la evaporación más o menos rápida de su envoltura líquida. Así, en el mar cuando la atmósfera está fría y alta la columna barométrica, la espuma es más abundante y persistente porque en ambos casos la presión exterior impide la explosión de las burbujas.

La espuma del mar deja en la superficie de los cuerpos que toca una costra salina que se llama **adarce**.

Cuando la onda, en su marcha, ha invadido la ribera y terminado su fase ascensional, se retira hacia el mar con movimiento acelerado más o menos violento que se llama **resaca**.

VII

Movimientos submarinos

La agitación de las aguas superficiales transmitida a la masa subyacente, debe sentirse, sin duda, en la profundidad. Por experimentos de laboratorio se ha encontrado que el movimiento del agua penetra a una distancia de 300 a 350 veces la altura de las ondas, lo cual aplicado al mar, conduciría a la conclusión poco probable de que la ondulación de seis metros de alto, por ejemplo, tendría efectos más o menos intensos a 2,100 metros de profundidad. La serie continua y prolongada de olas submarinas detenidas por las pendientes y desigualdades de escollos situados a 50 y más metros de hondura ocasionan saltos y remolinos que se manifiestan en el exterior por oleaje más o menos violento. Algunas mares de leva, de que hablaremos más adelante, se atribuyen a esta causa.

Se han visto aguas tintas y enturbiadas por abundantes despojos arrancados de profundidades de 100 a 130 metros; y aun se señalan en fondos hasta de 500, los montículos y arrugas en la arena como huellas de oscilaciones ligeras, afirmación que, para ser admitida, debía describir los medios para practicar tan difícil observación. El desarrollo y perfección de la náutica submarina permitirá, tal vez, con el tiempo estudiar mejor este interesante problema.

Se sabe que los flúidos, según el principio de Arquímedes, ejercen sobre los cuerpos flotantes y sobre los sumergidos un esfuerzo de abajo a arriba llamado presión hidrostática, merced al cual no se hunden los primeros, y los segundos conservan su posición en el seno del líquido. Se ha observado recientemente que bajo las olas de una mar agitada, la presión hidrostática se aumenta hasta el punto de poner a los barcos submarinos en dificultad para sumergirse y los obliga a tomar más lastre del necesario, el cual cuando la nave ha llegado a profundidad donde reina la presión normal, resulta excesivo y es serio obstáculo para la emersión.

Es también digno de notarse el efecto de esta variación en el empuje hidrostático sobre los torpedos situados en determinado punto y sujetos por amarras a una masa pesada que

descansa en el fondo del mar. El paso de una alta ola sobre esa masa determina un empuje que la levanta y le permite flotar durante unos momentos y recorrer una corta distancia arrastrando el torpedo que se va a situar más adelante. Si esta dislocación ligera se repite con la continuación o la reaparición del temporal, el desalojamiento podrá adquirir una magnitud sensible y llevar el torpedo a una situación peligrosa para los navegantes.

VIII

Clases de olas y de oleaje.

Olas de transporte.—Cuando la superficie tranquila del agua recibe repentinamente una masa adicional de líquido, se producen unas olas de carácter muy particular. Las constituyen eminencias que no alternan con depresiones, olas con sólo cresta y sin seno, que avanzan sobre la superficie, en progresión, no aparente, sino real, y sin oscilación, pues que cuando encuentran cuerpos flotantes los trasportan a distancia donde los abandonan sin llevarlos de nuevo hacia atrás. Se llaman **olas de transporte**. Su velocidad obedece a la fórmula $V = \sqrt{g(p-h)}$ en que g es la aceleración de la pesantez y p y h , la profundidad del mar, y la altura de la ola contada desde la superficie del agua tranquila. Insignificantes estas olas en alta mar, son de efectos muy notables en las costas donde la profundidad va decreciendo.

Dado el modo de generación de estas olas de transporte, el rompimiento de las ordinarias de oscilación, al dejar caer delante de ellas su cascada líquida, determina las más veces formación de ondas de aquella especie, cuyo movimiento **real** de avance va a aumentar la agitación del agua y sus sensibles efectos.

Olas forzadas y olas libres.—Las olas consideradas hasta aquí son las olas generales provocadas por el viento y mantenidas por la persistencia y modo más o menos vario de su acción. Son, por lo tanto, olas irregulares en su forma y en su marcha. Se llaman **olas forzadas**.

Cuando las olas forzadas cesan de recibir el impulso que las originó, recobran su carácter y forma normales de acuerdo con las leyes mecánicas de la oscilación y en virtud de la inercia,

prosiguen su marcha rítmica regular en tanto que no encuentran obstáculo o resistencia que agote el poder del impulso original. Así, recorren distancias muy considerables. Se llaman **olas libres**.

Mar de leva.—En tiempo de serenidad atmosférica completa aparecen en medió del océano, ondas largas y profundas que se siguen a doscientos y trescientos metros de distancia, y con majestuosa e imponente regularidad pasan sobre un mar azul para perderse en la lejanía del horizonte. De corta elevación, silenciosa, blanda y sin espuma, esta marejada, después de recorrer muchas millas, llega a veces a las riberas y va a romperse en los acantilados o a morir en las playas, en remotos parajes de la costa donde reina tiempo bonancible. Este movimiento es secuela y remanente de la agitación que han puesto en el agua vientos anteriores tormentosos. Se llama **mar de fondo** o **de leva**. Sus ondas ostentan toda su grandeza cuando ha sido muy fuerte y regular el viento que las levantó y ha soplado pertinaz del mismo rumbo. Son las ondas forzadas que esos temporales han originado y que, al través de la distancia y bajo la calma restablecida, se han tornado ondas libres regulares.

El mar de fondo se produce de preferencia en las regiones donde soplan vientos iguales y uniformes, como los alisios, capaces de transmitir su regularidad a las oscilaciones. Es frecuente en el otoño, bajo el trópico de Cáncer y casi constante en el mar Caribe.

A causa de la grande regularidad del balance y del cabeceo que produce en los navíos, el mar de leva es en alto grado incómodo y desapacible para los navegantes. Se dice que es la causa más eficaz del mareo.

Ondas de fondo.—Llámanse también, ondas de fondo unas olas que llegan de la larga y se propagan en el seno de las aguas sin que en las capas superficiales se advierta el movimiento. Pero si encuentran un bajo fondo, se detienen bruscamente y se levantan con empuje horizontal muy violento que pone a las embarcaciones en peligro de zozobrar.

Ocurre a veces en el mar, una agitación en forma de pequeñas olas de diversas direcciones que, al cruzarse, producen un rumor perceptible a gran distancia. Se llama **trapisonda**.

Interferencia. Borrascas.

Donde los vientos soplan con intermitencia, por ráfagas, con intensidad cambiante, saltando súbitamente, como en los ciclones, de un punto a otro del horizonte, el agua, forzada por tan variados impulsos, se levanta en olas de dirección, velocidad y altura correspondientes, que se cruzan, se alcanzan, chocan y provocan una agitación caótica y tumultuosa.

Estas diversas causas hacen surgir a veces varios sistemas simultáneos de olas que concurren y se complican para generar el fenómeno llamado **interferencia** que viene a completar y a agrandar en extremo el impulso y el desorden del oleaje hasta hacerlo tempestuoso. Los movimientos oscilatorios de las olas de cada sistema se combinan o componen entre sí mecánica y geoméricamente.

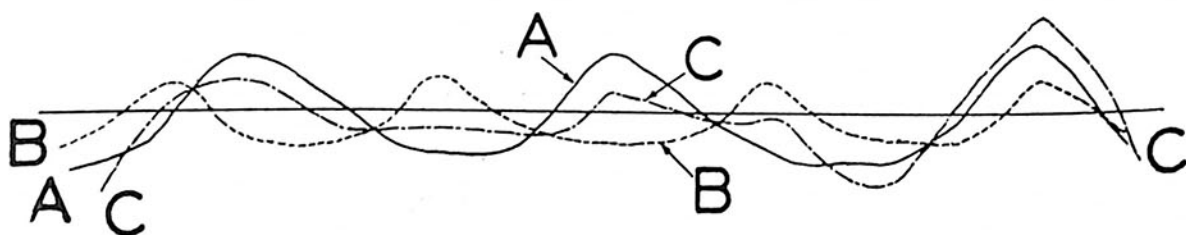


Fig. 6

En la figura 6, la curva C, representativa de las olas de interferencia, que no hay que confundir con la trocoide, y es también, semejante a la senoide, se obtiene sumando algebraicamente las alturas que simultáneamente tienen en el mismo punto las olas componentes A y B. Si sus movimientos son de sentido contrario, sus velocidades disminuyen o se destruyen, pero tanto en estas como en las de igual sentido, la adición algebraica de sus ordenadas modifica la altura resultante y a veces la aumenta considerablemente (1). El caso extremo, o la máxima elevación del agua, ocurre cuando las cúspides de las olas y sus senos se forman en el mismo punto y se sobreponen. Entonces el oleaje se vuelve formidable. En el caso de compensación completa de los

(1) No es rara en las playas de Acapulco, donde la llaman "corral", esta adición de alturas o sobreposición de las cúspides de dos olas que, por la anulación mutua de sus velocidades contrarias, aparecen estacionarias y durante largos segundos envuelven a los bañistas en grande masa de agua poniéndolos en alarma y hasta en peligro.

efectos contrarios, el mar parece sosegarse en algunos parajes mas para reanudar poco después su desordenada y furiosa agitación.

Acontece en ocasiones que los sistemas de olas combinadas son de períodos diferentes o de tal modo dislocados uno respecto del otro, que la sobreposición de las ordenadas genera series de ondas casi regulares seguidas de otras de mayor altura.

Cuando el agua de las grandes olas se ve impedida de continuar su movimiento por su encuentro con costas desiguales o escarpadas, retrocede en virtud de una reflexión sobre ellas y propaga su ondulación en sentido inverso creando así otro sistema de olas de igual período, que entra en interferencia con el directo.

No debe confundirse este movimiento de retroceso por reflexión sobre un obstáculo con el que hemos llamado resaca que es la simple retirada o regreso del agua que ha consumado su marcha ascensional por agotamiento del impulso que la elevó.

En las costas de contorno curvo, como las de ciertos golfos, la reflexión o retroceso se produce en las varias direcciones normales a ese contorno, las interferencias se multiplican y se complican y la mar se levanta verdaderamente terrible. Esta es la causa de las tormentas tan temidas de los marinos en las inquietas aguas del mar Cantábrico.

X

Olas de temporal.

En tiempos, asaltan las costas dos clases de grandes olas que obran en ellas efectos de notable intensidad.

Las unas, que llamaremos de "temporal," son resultado de hondo y rápido descenso de la presión atmosférica acompañado de fuerte viento en dirección de tierra, que determina, como en un gran barómetro, inusitada elevación en el nivel del agua, movimiento que se resuelve en la violenta invasión de las costas por olas de grande altura. Estos asaltos se hacen sentir con mucha intensidad en las riberas bajas de aguas poco profundas y en los parajes expuestos a las tormentas tropicales. A sus efectos, casi siempre devastadores, contribuyen los vientos con su fuer-

za; y con su masa y velocidad, hasta los cuerpos flotantes como los despojos de los naufragios. Vallaux refiere que el temporal que en 1876 azotó las playas de la bahía de Bengala, visitada varias veces por estas tormentas, segó más de 200,000 vidas (1).

A este género de trastornos en la presión atmosférica se deben las perturbaciones de naturaleza ciclónica que aparecen anualmente a la entrada del otoño en nuestras costas del Pacífico y se conocen con el nombre de **Cordonazo de San Francisco**. Su aproximación se anuncia en el mar por pesadas olas del sur, y en el aire, por elevación de su temperatura y copiosas lluvias. Después se desarrollan con prontitud y energía. El barómetro baja al principio lentamente, y luego con mucha rapidez, a veces tanta, que se ha registrado un descenso de un centímetro y medio en cuarenta minutos. El viento sopla con violencia de huracán y derriba árboles y casas y desmantela las embarcaciones haciendo zozobrar a las pequeñas. La tormenta dura desde cuatro horas hasta cuatro días.

La perturbación aparece cerca de Acapulco, pasa al oeste del cabo Corrientes y continúa hacia el norte, a Mazatlán y a la Paz. Penetra en el golfo de California llegando a Altata y a Guaymas y otras veces sigue al poniente de la península y alcanza a la Ensenada y aun a San Diego.

XI

Olas sísmicas.

Débense las olas de la otra clase a los movimientos sísmicos y a las erupciones volcánicas submarinas.

La manifestación de los fenómenos sísmicos en general es una ondulación progresiva: sacudimientos verticales, otros horizontales que parten de un centro subterráneo y ondas que se propagan por el suelo, por el aire y por el mar.

En el mar, la naturaleza y la condición del medio moderan los fenómenos sísmicos sin modificarlos en sus caracteres esenciales. Una conmoción repentina en el fondo provoca en la masa líquida perturbaciones que se transmiten hacia arriba como vi-

(1) Vallaux C. Les raz de marée, Matériaux pour l'étude des calamités.

braciones longitudinales de período corto y con velocidad cercana a la del sonido, y también en la superficie como vibraciones transversales que se propagan a considerable distancia y muchas veces con efecto poderoso.

Se manifiestan las primeras, u ondas verticales, cuando alcanzan a los navíos, por un golpe seco, duro y violento como el que produciría el choque de la embarcación contra un bajo o un arrecife. Todo se estremece a bordo y los objetos caen; luego se siente un movimiento ondulatorio y como sacudimientos que inclinan el barco y hasta lo detienen; se ve el agua saltar en chorros verticales y la mar agitarse en oleaje vivo y desordenado que semeja la ebullición. Se percibe un estremecimiento o una vibración parecida a la que sufre una nave que da sobre un cuerpo flotante, como los restos abandonados de un buque perdido o un animal marino.

A la ilusión del choque con un escollo se debe que muchos de estos accidentes ficticios figuren en las cartas marinas antiguas, como reales y peligrosos para la navegación.

El temblor marino se muestra otras veces, por una fuerte ondulación pasajera que turba momentáneamente la calma de una mar serena. Cuenta el experimentado marino inglés William Allingham (1) que el 18 de julio de 1886 una ola solitaria tremenda se acercó con gran velocidad y pasó sobre el barco Khyher haciendo en él gran estrago; y el 15 de enero de 1896 el vapor Termópilas recibió tres pesadas olas que arrasaron su castillo de proa, estando el mar antes y después de este accidente tan terso como un estanque y bajo una ligerísima brisa del sur. El mismo autor refiere que en marzo del mismo año, una ola solitaria de forma piramidal con cresta plana coronada de espuma y de 17 metros de alto, alcanzó con gran velocidad al vapor Casapedia, causándole gruesas averías.

Las segundas, u ondas transversales, son imperceptibles en alta mar. Se hacen sentir en las costas cuando, al encontrar la resistencia de los bajos fondos, su movimiento se torna vertical y determina la formación de grandes olas cuya altura depende, como es natural, de la intensidad del sismo y de la erupción volcánica a que se deban, pero principalmente, de la configura-

(1) William Allingham. A Manual of Marine Meteorology.

ción de la costa. Su efecto, aunque de corta duración, es siempre desastroso.

Una hora después de que la ciudad de Lisboa fué devastada por el formidable sacudimiento de su suelo en el memorable terremoto de 1775, la llegada de una serie de grandes olas 10 a 20 metros más altas que la más elevada pleamar de aquel puerto, vino a consumir su destrucción. Las olas que el terrible sismo levantó llegaron a Cádiz con una altura de 20 metros; y las de la famosa erupción del Krakatoa en 1883, se elevaron a 23.

Estos fenómenos sísmicos, de mecanismo todavía muy misterioso, se manifiestan también, por una retirada súbita del agua que descubre grande extensión del fondo y lo deja en seco durante un tiempo más o menos largo, para regresar a deshora en alta onda de velocidad impetuosa que pasa más allá de su nivel primitivo inundando la ribera y barriando cuanto encuentra.

Se dice que en el temblor de Catania, en 1896, el mar se retiró a 2,000 brazas, y se han registrado casos en que ha retrocedido varias millas (1). En 1586, la onda de regreso en el Callao, llegó con ímpetu irresistible; derribó árboles y casas, y levantó y arrastró navíos a gran distancia.

La duración de estos fenómenos varía mucho: desde unos cuantos minutos hasta largas horas. Se cuenta que en el temblor de Santa de 17 de junio de 1678, el mar se retiró hasta donde alcanzaba la vista y no regresó sino después de veinticuatro horas ocasionando grandes inundaciones. (1)

En aquellas costas, el paso de las ondas sísmicas queda señalado casi siempre por escombros y cadáveres y por modificaciones en el suelo que, unas veces se deprime y las más, se levanta, como aconteció en el temblor de 1822 que elevó la costa, de un modo permanente, a uno y medio metros sobre su antiguo nivel.

Se cree que causa estos fenómenos una dislocación del fondo del mar: hundimiento o elevación. En el primer caso, el agua se retira llamada por el vacío producido por la depresión; en el segundo, el volumen líquido desalojado rebosa y se extiende en derredor. El carácter del fenómeno inicial, ya sea la retirada del agua o bien su afluencia hacia la costa, depende, tal vez, de la distancia de ésta a la región del mar conmovida, distancia que se cuenta a veces por millares de millas.

(1) Jhon Milne Earthquakes and Earth Movements.

En ciertas ocasiones el mar se retira y regresa gradualmente, como aconteció cuando el 4 de diciembre de 1854 fué destruído el puerto de Acapulco. El agua oscilaba subiendo y bajando a intervalos más o menos largos sin que en el mar se advirtiera señal alguna de oleaje. Parecía una marea mansa que se repitiera varias veces por hora. Esto ocurre cuando las ondas, provocadas por una conmoción y mantenidas largo tiempo por su inercia, recorren grandes distancias convertidas en olas de oscilación, libres. Hay casos en que sólo se percibe su advenimiento por las variaciones de altura que repentinamente aparecen en los mareógrafos, o aparatos automáticos, indicadores en los puertos del nivel del agua que oscila con las mareas.

Son capaces de atravesar los grandes océanos. Milne (1) afirma que la onda impulsada por el temblor de Iquique el 9 de mayo de 1877 se sintió desde la Nueva Zelandia al sur, hasta el Japón y el Kamschaetka al norte, después de cruzar el Pacífico; y que, si no hubiera sido por la interposición de los continentes de América y de Eurasia, la onda se hubiera sentido en toda la extensión del globo. Es bien sabido que los viejos del Japón conocen tan bien los caracteres de las olas que llegan de Sudamérica, que anuncian por la prensa desgracias acaecidas probablemente, veinticuatro horas antes, en aquellas remotas regiones. Las ondas que provocó el temblor ocurrido en 11 de noviembre de 1922 en el Carrizal, frente a las costas de Chile, se registraron en San Francisco después de catorce horas que emplearon en recorrer 4,900 millas; en San Diego, distante 4,500 millas, después de trece horas; y en Honolulu, después de quince horas, en un trayecto de 4,900 millas. El memorable temblor de Sismoda, Japón, del 22 de diciembre de 1854 originó solamente dos olas apenas de 0.50 metros de altura que, con velocidad respectivamente de 701 y 638 kilómetros por hora, llegaron a San Francisco y a San Diego con un intervalo de 35 minutos entre una y otra. Con estos datos se calculó la profundidad del Pacífico entre esos puntos, que resultó de 4,000 metros, según una fórmula de Airy.

Los sismos del océano parecen ser efecto de la actividad volcánica. La violenta y repentina conmoción, el calor, el desprendimiento de gases, el ruido, la muerte de los peces, el cambio,

(1) Milne Obra citada.

alguna vez, del color del agua, son signos indudables de esa acción.

Así, las regiones del globo donde se registran con más frecuencia estas ondas sísmicas y su pavoroso efecto son aquellas donde es más viva la actividad volcánica, como el mar Caribe, las costas occidentales de América, las de Asia en el Pacífico, como el Japón, y también el Mediterráneo y el archipiélago Malayo. Así como en los continentes, hay en los océanos parajes y regiones donde los fenómenos sísmicos son frecuentes y aun habituales pero, salvo en ciertos sitios privilegiados, los sacudimientos se transmiten y se perciben en toda la extensión oceánica.

XII

Apaciguamiento del mar.

Es muy interesante y digna de mayor estudio la calma inmediata del oleaje cuando se vierten poco a poco en el agua cuerpos grasos o petróleo. Se ha creído que la materia interpuesta obraba a modo de lubricante para destruir el rozamiento y la adherencia entre el líquido y el aire, explicación difícil de aceptar en atención a que no es el rozamiento la causa de las olas. Por el contrario, la interposición, entre esos dos flúidos, de cuerpos extraños capaces de producir fuerte rozamiento, como el lodo y las yerbas marinas, contribuye visiblemente a moderar la agitación. El mar de los Sargazos está siempre sosegado. Al congelarse el agua en los mares polares, la aparición de los cristaltitos de hielo es seguida inmediatamente de una notable calma de las olas.

La gran desproporción, al menos aparente, entre la sencilla aplicación de las grasas y su notable efecto inmediato sobre las fuerzas del mar es difícil de comprender y hace pensar que entran en juego fuerzas muy grandes como son las acciones intermoleculares. Los aceites no penetran en el agua, se extienden rápidamente sobre su superficie en película elástica extremadamente delgada que, de dos maneras y por dos de sus propiedades físicas, su tensión superficial y su viscosidad, oponen resistencia al movimiento.

La forma más o menos aguda del ápice de las olas depende de la mayor o menor tensión superficial del líquido en que se forman. Así, siendo la del aceite como la mitad de la del agua, disminuirá mucho, y aun suprimirá el rompimiento, efecto de la inestabilidad de las cúspides muy agudas. A su vez, como la viscosidad del aceite excede a la del agua, se opone a la persistencia de las olas pequeñas, que se amortiguan y se apagan prontamente, lo que impide su acumulación y crecimiento y su transformación en olas de grande magnitud.

Según otra teoría, parece que las grasas impiden la adherencia del aire con el agua, y llenando la multitud de arrugitas que tapizan la superficie de las olas, la ponen tersa y el aire resbala sobre ella sin arrastrar el líquido. Obrando el viento, en general, oblicuamente sobre la ola, su acción se descompone en una fuerza horizontal que pasa deslizándose sobre la grasa sin levantar el agua, y en otra vertical hacia abajo que deprime la ola impidiendo el movimiento de las partículas ascendentes, *a*, figura 7, en un lado de la ola y favoreciendo el de las que descienden en el lado opuesto, *b*.

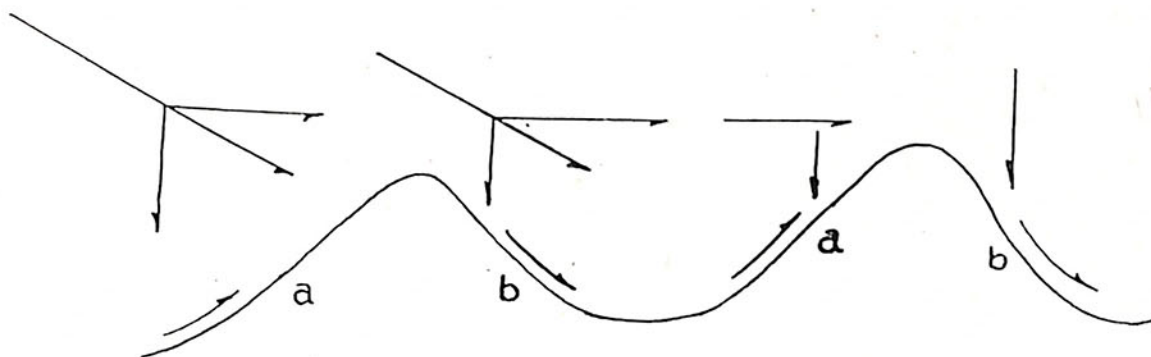


Fig. 7

Sean cuales fueren la causa y el mecanismo de la acción de las grasas, el resultado, conocido desde hace siglos, es cierto y ha entrado en la práctica de la navegación. La experiencia ha indicado que el aceite de los peces es más eficaz que los minerales y que aun el agua de jabón produce algún efecto.

Se ha observado que la lluvia y el granizo abaten las olas. Algunos creen que la bruma y la neblina aumentan su altura y otros, que las apaciguan, pero parece que esos meteoros proceden de otras causas independientes que al mismo tiempo ocasionan uno y otro de esos estados del mar.

XIII

Energía de las olas. Su acción vertical. Sus efectos.

La fuerza de las ondas que, en alta mar se hace sentir por la facilidad con que levantan los más pesados navíos y juegan con ellos, se manifiesta en las costas y en los arrecifes por efectos de intensidad formidable y de magnitud gigantesca. Los millares de metros cúbicos de agua que en tiempos de borrasca se lanzan del mar en tropel sobre los acantilados y escarpaduras de la costa, bruscamente detenidos en su avance por esos obstáculos, gastan su provisión de fuerza en vigoroso movimiento vertical que las lleva en impetuoso ascenso a 10, 20 y hasta 50 y más metros de altura.

La tendencia de las olas a resolver en movimiento vertical su ímpetu contrariado por obstáculos, se hace visible: en pequeño, cuando una nave encuentra una ola apenas perceptible, que se eleva, inunda la cubierta y cala a los tripulantes; y en alta escala, cuando levantan peñas y objetos de 8 a 10 toneladas de peso a 20 y 22 metros de altura o, como ocurre con frecuencia con los materiales de vastas dimensiones y pesada mole, ya naturales, ya fabricados, que se emplean en la formación y en la defensa de los puertos. Stevenson cita (1) el formidable efecto de las olas que, en una tormenta ocurrida en Wick en 1872, arrancaron de sus cimientos una masa de concreto de 1,800 toneladas que defendía el extremo vuelto al mar, de un rompeolas y lo transportaran al interior de la dársena; y otra mayor, de 2,600 toneladas, que sustituyó a la primera, corrió la misma suerte en el temporal de 1877. Todos los autores citan los furiosos asaltos que sufren el faro de Bell Rock en la costa de Escocia y el de Eddystone que, en toda su altura, de 52 metros y a veces más arriba del fanal, se ve envuelto por el agua. Con una presión que llega a 30 toneladas por metro cuadrado, las olas empujan y transportan rocas y objetos de gran peso a distancias considerables, y con la repetición incesante y rápida de sus embates como en redoblado cañoneo, hacen temblar el suelo a varios kilómetros tierra adentro. Su masa, acrecida con la de los

(1) Stevenson *The Construction of Harbors*, ya citada.

guijarros y de las piedras pesadas que arrastran en el fondo y levantan en su movimiento vertical, hace de las olas verdaderas ametralladoras de formidable poder destructor, sobre todo cuando les ayuda el viento con su fuerza y su dirección. Así, demoliendo en unos sitios, trasportando y depositando materiales en otros, obran notable transformación en la arquitectura del contorno continental. Actividad que en general regulariza esa línea porque la acción, destructora en los salientes o cabos de la costa, es constructora en sus concavidades o senos donde deposita los materiales de que a aquéllos despoja; trabajo que tiende a borrar o a moderar las sinuosidades del litoral.

Mr. A. Berget, en su interesante obra "Les problemes de l'océan," dice que los efectos intensos de las olas se deben a la gran energía que las anima, producto de su masa por la enorme velocidad, de 25 y más kilómetros por hora conque llegan de la larga. Con el debido respeto al distinguido escritor, me permito observar que no es la masa de agua de las olas la que tiene esa velocidad, la cual sólo es aparente. La velocidad que se observa es la de la **sucesión de elevaciones** que sufre el agua en cada punto y que se va transmitiendo de uno a otro. Los intervalos y por tanto la rapidez de sucesión de estos movimientos, se revela por el período de la onda y por su longitud, o distancia que separa dos crestas consecutivas, extensión que tiene que recorrer el **estado de movimiento** para que una ola, o la elevación del agua, suceda a la precedente. De donde resulta que el producto de la masa por el cuadrado de la velocidad aparente, no mide la energía de las olas.

El análisis matemático muestra que esa energía se compone de dos partes: la energía cinética, o sea, la del movimiento en sus órbitas, de las partículas líquidas, y la energía potencial debida a la altura del centro de gravedad de la masa de agua sobre su nivel normal. Se encuentra que prácticamente estas dos formas de energía son iguales. Se ha expresado su suma en función de la altura y de la longitud de las ondas, en la siguiente fórmula cuyas constantes numéricas he modificado para que el resultado se obtenga en kilográmetros, cuando se emplee el metro para medir la altura h y la longitud l , de la onda. Así, se tiene para la potencia de cada metro de anchura de la ola:

$$p = 128.14 \, l h^2 \left(1 - 4.935 \frac{h^2}{l^2} \right) \text{ en kilográmetros.}$$

Aplicándola a una ola de 50 metros de longitud y 5 de altura, obtendremos $P = 152326$ kilográmetros, que, si la ola tuviera 50 metros de ancho se elevaría a 7616300, potencia con que el mar se lanzaría sobre esa extensión de la costa. Cantidad muy considerable que no debe sorprendernos si reflexionamos que, si las simples corrientes de aire, cuando soplan con violencia, son capaces de ejercer enorme presión, de arrasar bosques desarraigando corpulentos árboles, de derribar sólidos edificios, de destruir navíos y de otros desastres que se registran durante los ciclones y los huracanes, es muy natural que el agua, de masa muy superior a la del aire, tenga la potencia suficiente para obrar los asombrosos efectos que contemplamos en la mar.

PARTE SEGUNDA

LAS CORRIENTES

SECCION I

LEYES DE LAS CORRIENTES

I

La atmósfera y la mar.

El mar es, como la atmósfera, una masa fluída continuamente expuesta a gran variedad de acciones que perturban su equilibrio y la mantienen en perpetuo movimiento. Así como en el aire hay un sistema regular de circulación reconocido por millares de observaciones, así en la mar, bajo el poder de causas persistentes y generales, se producen movimientos progresivos que trasportan sus aguas en masa formando corrientes muy caudalosas y de gran regularidad.

Al contemplar las grandes corrientes que constituyen la circulación oceánica y considerar las causas o influencias generadoras de esos movimientos, no se debe olvidar que están determinadas necesariamente por las leyes ineludibles de la Física.

Entre la atmósfera y la mar se ejerce una acción recíproca tan íntima, que los fenómenos que ofrece una de estas masas fluídas responden puntualmente a los que ocurren en la otra. Estas acciones mutuas son principalmente térmicas y dinámicas.

La atmósfera comunica sus variaciones de temperatura a la superficie del océano y la pone en turbulencia; el océano, a su vez, transmite al aire sus cambios de temperatura y pone en con-

moción sus capas inferiores. La radiación del calor atmosférico influye sobre la temperatura del mar, y la evaporación concentra, y las lluvias diluyen su disolución salina y modifican la densidad del agua. El océano, al regular la temperatura y la humedad del aire distribuye en su seno la presión y, con ello, determina las trayectorias de sus tormentas. Encrespado, el mar, como superficie rugosa, estorba y aun detiene la marcha de los vientos o cambia su dirección y su velocidad; y la reacción del aire ocasiona en el agua una corriente.

II

Causas generales y leyes de las corrientes.

Después de interesante y antigua controversia sobre el origen de las fuerzas que ponen en movimiento esas enormes masas líquidas, la opinión, apoyada en estudios matemáticos, parece haberse uniformado para reconocer el poder del aire como factor principal, y el soplo de los vientos más asiduos y regulares y de dirección fija, como la causa más constante de las principales corrientes del océano.

El aire que pasa sobre la superficie del mar, por el rozamiento y por su adherencia con el agua, impulsa éste líquido en su marcha progresiva y en su misma dirección. Mantiene este movimiento la persistencia del soplo, y cuando éste amaina o cesa, la masa líquida, en virtud de su inercia, continúa su avance en tanto que la fuerza impulsora interrumpida no renace y reanima y conserva la corriente. Esta acción de los vientos regulares y de dirección fija se ha ejercido sin tregua sobre los mares durante centenares de siglos, y sus efectos acumulados han estabilizado el régimen de sus corrientes principales.

Se aduce en contrario a esta explicación que, por ser la densidad del aire mucho menor que la del agua, su masa no puede adquirir la energía suficiente para mover una masa líquida muy superior a la suya; pero si se recuerda que la velocidad del viento es más grande, y su cuadrado todavía mayor, que la de las corrientes marinas, se verá que sí puede haber compensación entre los factores, m y v^2 , de la fuerza viva, y el viento

alcanzar la necesaria para dar ser en el agua a esos movimientos.

La movilidad del agua, tan grande que la más leve brisa estremece y pone en vibración su superficie, hace los mares muy sensibles a una variedad de influencias que, capaces de alterar su equilibrio y originar corrientes, son, sin embargo, menos poderosas que los vientos y obran más bien como perturbadoras. En ocasiones, no sólo ayudan a determinar corrientes, influyen también para mantenerlas.

Una desigualdad en la presión atmosférica en dos regiones apartadas de la superficie oceánica origina una corriente de una hacia la otra. Al punto que ocurre una diferencia de densidad entre dos masas marinas, se produce entre ellas un transporte de materia para restablecer el equilibrio.

Las causas más perceptibles de la variación de densidad en el agua son la diferencia de su temperatura y la distinta proporción de su contenido de sal.

En la dilatada superficie de los mares, expuesta libremente al viento y a la intensa radiación solar, casi a plomo en las regiones tropicales, y muy persistente en los largos días del verano en las zonas templadas, se produce una intensa y copiosa evaporación que, concentrando sensiblemente la disolución salina, aumenta su densidad. Las lluvias abundantes y la contribución de agua dulce de los ríos caudalosos que continuamente afluyen a la mar debilitan, por el contrario, esa disolución y la tornan más ligera.

El calor que, por una parte dilata el agua y, por otra, activando la evaporación, la enfría y aumenta su proporción de sal, tiene por efecto resultante ya el aumento, ya la disminución de su densidad, pero siempre aparece el segundo efecto predominante en los mares de la zona tórrida.

La formación de conchas de la prodigiosa cantidad de moluscos que pueblan la mar es causa no despreciable de la sustracción de su sal. Las materias sólidas, producto del trabajo de disolución y deslave que las lluvias y las aguas corrientes efectúan incansables en la tierra y que los ríos transportan y, en profusas cantidades, vierten continuamente en el océano, se habrían acumulado en el transcurso de los siglos y espesado sus

aguas hasta saturarlas de sal y convertirlas, tal vez, en un medio letal para muchos peces.

Sin embargo, abstrayendo las variaciones ligeras y más bien superficiales, efecto de las contingencias meteorológicas, lluvia, evaporación, frío, calor, sobre el agua marina, su composición en conjunto es muy constante y uniforme en todos los mares.

¿Qué ha sido, pues, de esa enorme masa de materiales que la evaporación no puede sustraer del mar, ni agente alguno devolver a su origen en la tierra? Se cree que los organismos vegetales y animales que, en infinito número pueblan los océanos, los recogen y se apoderan de ellos, para formar el esqueleto de los peces, las conchas de los moluscos, las madréporas, los arrecifes de coral y los grandes bancos que, por obra del tiempo, han crecido y siguen creciendo y consolidándose en islas y en tierras firmes.

La temperatura del agua, el viento y la presión atmosférica influyen muy sensiblemente sobre el nivel del mar de la misma manera que, en menor grado y en áreas limitadas, lo hacen la evaporación y la precipitación pluvial. Las “altas” y las “bajas”, como llaman los meteorologistas los estados de presión, fuerte y débil, en ciertas regiones del aire, producen elevaciones y depresiones en las extensas áreas marinas subyacentes y ocasionan, por lo tanto, movimientos considerables en el agua. Se ha observado en diversos lugares del globo que a una variación de un milímetro en la altura barométrica corresponde un cambio de 13.2 milímetros en el nivel del mar.

Las masas de agua más densas en cierta región oceánica descienden a causa de su mayor peso y dejan un vacío adonde afluyen, para llenarlo, las masas más ligeras de otra región distante, formando una corriente superficial. En tanto, las primeras, en su descenso, impulsan y fuerzan las capas inferiores a diri-

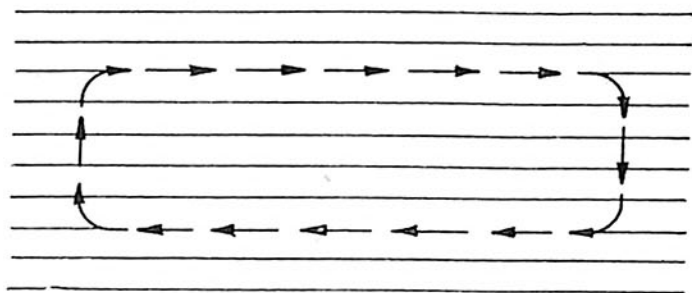


Fig. 8

girise en corriente submarina y ascendente hacia la otra región para reemplazar a las que desde allí corrieron por la superficie. La figura 8 representa en esquema esta circulación.

Se comprende, según esto, que reinando en las regiones ecuatoriales y subtropicales las condiciones que, según expresamos arriba, producen la disminución de densidad en el agua, y en las regiones polares, las que la aumentan, las corrientes superficiales han de dirigirse en general del ecuador hacia los polos y en sentido contrario las profundas.

En su camino de una región a la otra, las aguas van encontrando condiciones ambientes que modifican de modo gradual y continuo su densidad. Enfriándose las más calientes al cruzar por las regiones de más baja temperatura, empobreciéndose las más saladas al mezclarse con las que lo son menos, las más ligeras se tornan más densas, y al contrario las más pesadas, y así se restablecen sin cesar las condiciones primitivas y se mantiene la circulación.

Como hecho general, a la acción de los vientos se debe la circulación oceánica horizontal, o sea, el movimiento de las capas superficiales; a las diferencias de densidad o de presión, la circulación vertical.

Las leyes del equilibrio exigen que a toda corriente flúida, sea en el aire, sea en el agua, corresponda otra corriente de regreso del mismo caudal; de aquí que las corrientes marinas se muestren siempre por pares.

Por lo regular, las corrientes superficiales son calientes, o sea, de temperatura más alta que la de las aguas que las encauzan, y las profundas, más frías. Regla que, como veremos después, ofrece notables excepciones.

Se observa, en general, que si la temperatura de una corriente en ciertos parajes del océano es superior a la que tendría naturalmente el agua en esas latitudes, la corriente viene del ecuador, y si es inferior, viene de la región polar.

Cuando una corriente encuentra otra corriente, un bajo fondo o una costa que la embaraza o la detiene, su dirección cambia, a veces hasta invertirse, lo cual origina las corrientes llamadas de **reacción**. Efecto que se observa en los golfos y en los senos de la costa cuando las aguas circulan en su proximidad. La figura 9 da idea de esta desviación.

La rotación diurna de la tierra que, según se sabe, desvía las trayectorias de los móviles, a la derecha en el hemisferio norte y a la izquierda en el hemisferio austral, obra poderosa y continuamente para modificar la dirección de las corrientes.

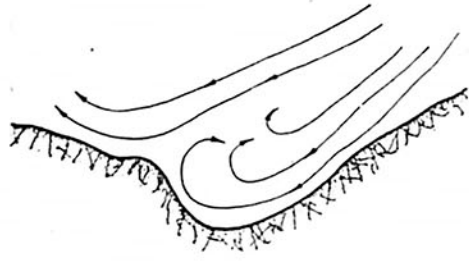


Fig. 9

La disminución de densidad en las aguas que bañan las costas, ocasionada por la considerable cantidad de agua dulce que en ellas vierten los ríos, origina corrientes superficiales de las riberas hacia el alta mar.

La evaporación, incesante en la inmensa extensión de los océanos, que diariamente les quita más de 400 kilómetros cúbicos del líquido, se produce con intensidad variable en sus diversas regiones según son la temperatura del agua y las condiciones atmosféricas que reinan en ellas. La precipitación en lluvia que restituye al mar las grandes cantidades de agua sustraídas en forma de vapor, ocurre también en parajes diversamente situados, donde el estado de la atmósfera es propicio a su condensación. Así, en unos lugares la elevación del nivel del agua causado por la lluvia, y en otros, su depresión por falta del líquido evaporado, determinan, de los primeros hacia los segundos, corrientes locales de dirección y duración irregulares y cambiantes.

III

Descubrimiento y estudio de las corrientes

Hasta aquí hemos apuntado las causas principales de las corrientes en general y señalado las que ocasionan desequilibrio parcial en el agua y, en consecuencia, movimientos locales de menor importancia en regiones limitadas del océano. Digamos ahora cómo descubren los marinos la existencia de las corrientes y cómo determinan sus caracteres.

La falta de puntos de referencia en el horizonte del mar y la inestabilidad de los barcos, aun puestos a la capa, son obstáculos para determinar con precisión el rumbo y la velocidad

de las corrientes y aun su existencia. No hay movimiento relativo entre una embarcación y el agua que corre llevándola consigo, como no la hay entre un aeróstato y el aire donde flota. Para los aereonautas no existe el viento aun cuando sea un huracán. La historia de la navegación registra centenares de accidentes y hasta de desastres, especialmente en los buques de vela, debidos a la desviación de su ruta por una corriente no percibida o erróneamente indicada en las cartas marinas. Usase de varios recursos para descubrir y estudiar las corrientes.

Se sabe que en la práctica de la navegación se emplean dos métodos para determinar la posición de un buque en alta mar. El astronómico, o más exacto, que consiste en medir la altura del sol o de otros cuerpos celestes, y también la de la luna, o sus distancias a otras estrellas, sirviéndose para estas observaciones del sextante, de los cronómetros y de las señales por radio que regularmente emiten los observatorios, y en someter estos datos al cálculo que da por resultado la latitud y la longitud del punto. O el método **por estima** menos preciso, pero el único aplicable cuando el cielo está cubierto, que consiste en medir por medio de la barquilla y de la corredera, las distancias recorridas por la nave en cada uno de los rumbos que sigue en su derrota y que la brújula señala. La sucesión de estas líneas de longitud y dirección obtenidas de este modo, forma la trayectoria, más o menos sinuosa en los buques de vela según la afecten el viento y el oleaje, o poco apartada de la recta en circunstancias favorables, como en la navegación por vapor.

Es hecho general que la posición del punto obtenida por medio de la observación astronómica y que es, por ello la más exacta, difiera de la determinada por estima; diferencia que, cuando no es muy grande, puede atribuirse a los errores inevitables inherentes a uno y otro procedimiento, pero que, si es de alguna consideración es, con grande probabilidad, efecto de una corriente. Si B, figura 10, representa la posición observada a que ha llegado un barco que, partiendo de A y navegando en el rumbo paralelo a A C, como lo indican sus proyecciones a a a' ; y C su posición estimada; la línea CB es el efecto de una corriente que sin cesar ha arrastrado en su dirección CB, las aguas en que navegaba esa embarcación. El camino realmente recorrido por ella es la línea AB, resultante, según la regla del paralelo-

gramo, del rumbo AC, en que el piloto ha mantenido su quilla y de la dirección paralela a CB, de la corriente.

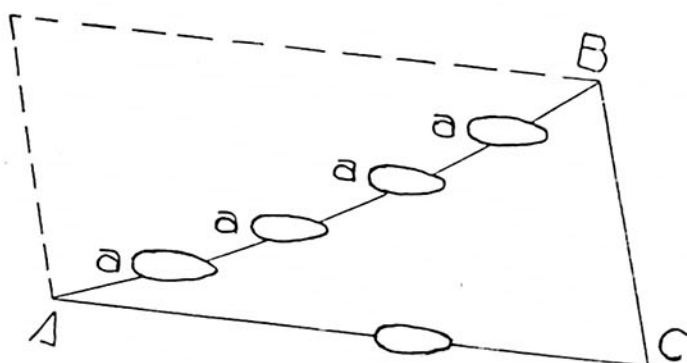


Fig. 10

Es difícil discernir los casos en que la desviación anotada, procede de observaciones defectuosas o es efecto de una corriente real y verdadera. La repetición de las observaciones, la constancia de sus resultados, la conformidad de los datos recogidos por diferentes observadores y, en fin, la larga práctica y el buen juicio de los marinos pueden contribuir a la acertada solución de este problema. Por regla general, dictada por el hábito y la práctica, cuando la diferencia entre las posiciones calculada y estimada, pasa de cinco minutos y es bastante regular en dirección y en magnitud y, especialmente, si va acompañada de cambio en la temperatura y en la densidad del agua, se puede afirmar, estudiando siempre atentamente y con mucho circunspección las circunstancias, que existe una corriente.

Conviene recordar, como hecho establecido, que las corrientes sólo son sensibles en alta mar, así como las mareas sólo se advierten en la costa; y que las primeras predominan en aquellas regiones en que las causas de las mareas parecen ejercer débil influencia merced a condiciones peculiares locales y donde por tanto, el mar muestra marcada disposición a la quietud.

Advertiremos de paso que, a diferencia de los vientos, que se designan según la dirección de donde llegan, las corrientes se distinguen por el rumbo adonde se dirigen, de modo que los vientos **vienen**, las corrientes **van**, y así se dice, por ejemplo, el aire **sopla del noroeste**, la corriente **tira al sur**.

En las embarcaciones fondeadas pueden estudiarse las corrientes superficiales por medio de la corredera. Es ésta un cordel como de 250 metros de largo dividido por nudos de color, generalmente rojo, en partes iguales de 47 pies y medio que caben 120

veces en una milla marina de 1852 metros de extensión. Una de sus extremidades va arrollada a un carrete fijado a bordo, y la otra, unida firmemente a un flotador puesto en el agua a merced de la corriente. Arrastrado por ella, el flotador tira de la cuerda, con lo cual sus nudos van corriendo por la mano del observador o por otro punto fijo. Contando el número de los que han pasado durante medio minuto, se obtiene en millas por hora, (1) la velocidad de la corriente. Su rumbo o **tiro** es la dirección del cordel tomada con la brújula.

Es práctica antigua y muy usada todavía, el confiar al océano cuerpos ligeros insumergibles que, llevados por las corrientes, pueden dar mucha luz acerca de su existencia y de su dirección si se tiene cuidado de depositar en su interior relación clara del barco, de su origen y de la fecha y de la posición geográfica del punto en donde fueron abandonados. Las botellas, muy económicas y fáciles de cerrar herméticamente, son muy a propósito para el objeto; pero pequeñas, confundidas con el azul brillante del mar, sólo se hacen visibles cuando, llegadas a la costa, el vaivén de las olas las deposita en las arenas de una playa. Muy pocas son, pues, las que cumplen su misión. Algunos navegantes escalonados entre Inglaterra y sus antípodas, acostumbraban arrojar diariamente a medio día una botella al mar, de ninguna de las cuales se ha vuelto a tener noticia.

Para estar en lo posible, a salvo de las causas accidentales de pérdida de los flotadores y de desviaciones de su ruta, buscando su compensación y eliminando su efecto en el conjunto, es racional multiplicar el número de esos aparatos y la frecuencia de su empleo haciéndolo sistemático. Para el efecto, se han lanzado a la mar, por series y a intervalos determinados, cuerpos más perceptibles por su aspecto exterior y su mayor tamaño, debidamente lastrados para que su parte emergida no ofreciera blanco sensible al viento que pudiese apartarlos de su ruta. Han consistido en esferas de cobre y en barriles.

En 1885 Alberto, príncipe de Mónaco, lanzó al mar, desde su yate "Hirondelle", 180 de estos aparatos en una línea de 170 millas al noroeste de las islas Azores recorrida en 36 horas; el año siguiente, entre el 1º y el 15 de septiembre, arrojó 510 bo-

(1) Puesto que medio minuto es $\frac{1}{120}$ de una hora, y el espacio entre los nudos $\frac{1}{120}$ de una milla.

tellas en un trayecto de 450 millas en el meridiano 20° oeste de Greenwich y al norte de España; y un año después, envió a la mar más de 900 de estas mensajeras.

El 30 de julio de 1893 en un punto a $8^{\circ} 29'$ de latitud norte y $24^{\circ} 20'$ de longitud oeste, el barco "St Enoch" confió al mar una botella que fué pescada el 20 de marzo de 1896 a los $60^{\circ} 15'$ de latitud norte y $1^{\circ} 15'$ de longitud oeste. En el sentir de algunos marinos experimentados, esta viajera, flotando en la corriente de Guinea, fué conducida por ella rumbo al este, entró luego en la corriente ecuatorial del sur que la arrastró al oeste, pasando entre las islas de Barlovento, hasta el punto final de su dilatada travesía, en las islas Shetland.

Llevados, según se cree, por un témpano de hielo, arribaron a las costas de Groenlandia varios objetos pertenecientes a un barquito llamado "La Jeannette" que, en viaje de exploración de las regiones árticas en 1881, pereció en el mar de Behring aplastado por los hielos.

IV

Corrientes profundas.

Las corrientes submarinas se estudian, ya sea por la observación directa de su velocidad y de su rumbo, o bien indirectamente aplicando las leyes del movimiento de los flúidos a ciertos datos que se observan.

El primer método se sirve a veces de una vasija que, lastrada por el agua y suspendida por una cuerda a un flotador de superficie, se mantiene a la profundidad que se desea explorar. El movimiento visible del flotador sigue el del cuerpo sumergido e indica la marcha de la corriente profunda que lo impele.

Para el mismo fin se han empleado varios mecanismos. Entre otros, un molinete, como el que se usa en los ríos, provisto además, de una rosa náutica guiada y movida, como en los buques, por una aguja fuertemente imanada. Las aspas en hélice, del aparato, puestas en rotación por la corriente, transmiten su movimiento a un contador de vueltas. Puestos en libertad y paralizados desde el barco en momentos oportunos las aspas y la aguja magnética, el número de revoluciones registrado por el con-

tador en ese espacio de tiempo permite calcular la velocidad de la corriente. Un índice señala en la rosa náutica su dirección.

Otro artificio consiste en un péndulo que, libre para moverse en todas direcciones, oscila a impulso de la corriente en el plano de su rumbo y con una amplitud que depende de su velocidad. Un mecanismo de relojería que levanta y baja alternativamente el punto de suspensión del péndulo, permite que, al descender, una punta que forma su extremidad inferior, marque su orientación y su separación de la vertical en la cera que tapiza un cuadrante; datos de los que se deducen el tiro y la velocidad de la corriente.

Hay otros aparatos que se sirven de la electricidad y de la fotografía y que nos limitamos sólo a mencionar porque su descripción cabe sólo en obras especiales sobre exploración marina.

El método teórico o indirecto para el estudio de las corrientes de profundidad consiste en medir en dos estaciones, y a diversos niveles en su vertical, la temperatura del agua, y, por medio de su riqueza en sal, su densidad; y en calcular con estos datos las presiones en esos puntos: procedimiento análogo al que se emplea en la atmósfera por medio de las alturas barométricas y del termómetro, para el estudio de los vientos.

V

Barcos errantes.

Muchos barcos que en los azares de la navegación han sucumbido a su encuentro con un bajo, o un arrecife, o al embate de las olas y de las ráfagas de un ciclón, abandonados de sus tripulantes y sin gobierno, han vagado en el océano a la ventura, y, a veces, llevados por las corrientes, han recorrido luengas distancias en viaje lento y solitario. Son dignos de mención algunos casos.

El barco "Fannie Wolston", abandonado en octubre de 1891 cerca del cabo Hatteras, había caminado 3460 millas en 426 días cuando se le vió en medio del Atlántico donde se cree se hundió.

La goleta "W. L. White", perdida en la memorable tormenta de marzo de 1888, fué abandonada un poco al oriente de la misma

costa, En su viaje de 5910 millas que duró 310 días, fué señalada cuarenta y cinco veces; encalló, al fin, en la isla Haskeir, una de las Hébridas.

El "Wyer G. Sargent", entregado a su suerte cerca del mismo fatídico cabo Hatteras el 31 de marzo de 1891, recorrió en 615 días una sinuosa trayectoria, verdadero laberinto de 5500 millas. Se le vió, por último, el 6 de diciembre de 1892 a media distancia entre el cabo de las Tempestades y el estrecho de Gibraltar.

Una barca italiana "Vicenzo Perrotta", desamparada en septiembre de 1887 a 600 millas al noroeste de las Bermudas, caminó al suroeste y después de 536 días y viaje de 295 millas, tocó al fin, en la isla de San Salvador adonde la ventura condujo hace 452 años las carabelas de Colón.

Es muy notable el caso del "Ada Iredale", barco de hierro que, en octubre de 1876 fué abandonado en el Pacífico del sur a causa del incendio de su cargamento de carbón. Llevado hacia el oeste por la corriente ecuatorial del sur en 240 millas, un barco francés lo encontró después de ocho meses y lo remolcó a Tahití. Extinto el fuego en mayo de 1878, se le pudo reparar y, con otro nombre, se hizo de nuevo a la mar. (1)

Estas historias hacen pensar en el peligro posible de encontrar uno de estos despojos errantes que, en noches oscuras y con mar gruesa, no se dejan sentir ni aun en muy estrecha proximidad.

VI

Corrientes verticales y submarinas.

Como ejemplo del modo de generación de algunas corrientes y de la existencia de corrientes submarinas y de movimientos verticales, consideraremos las que ocurren en el mar Rojo y en el Mediterráneo.

El mar Rojo.—Este angosto mar interior comprendido entre latitudes iguales a las de nuestra República, extiende sus mil

(1) Estas notas son extracto de las noticias sobre los barcos perdidos, de la obra de William Allingham Manual de Meteorología Marina.

millas entre las áridas costas y las ardientes arenas del Africa oriental y de la Arabia por donde no corre ningún río que en él derrame sus aguas. Su estrechez, el aire seco, caliente y no saturado que pasa sobre su superficie caldeada por los vivos rayos del sol que ninguna nube detiene, son causa incesante de una intensa y enorme evaporación, mayormente en los meses de verano. El agua, sustraída de este modo que, cayendo en lluvia, pudiera moderar el calor sofocante y la sequedad de las estériles comarcas ribereñas, llevada por los vientos va a precipitarse en copiosas lluvias a muy lejanas regiones. Ni una sola gota regresa a este mar.

Si no fuera porque el agua del Océano Indico, penetrando por el estrecho de Babelmandeb, repone la que una evaporación, incesante en miles de años, ha ido sustrayendo, el volumen líquido del mar Rojo habría disminuído, y su proporción de sal aumentado notablemente: hechos que no ha registrado la observación.

Se nota que el nivel del agua en la región del Istmo de Suez es como 60 centímetros más bajo que en la boca de Babelmandeb. Se atribuye este fenómeno a la temperatura y a la evaporación.

Siendo la latitud de Suez (30°), muy superior a la del estrecho (13°), mil millas distante al sur, la temperatura del agua debe ser más baja en aquel punto y su densidad mayor. La evaporación en el océano Indico, alimentador del mar Rojo, llega en ciertos parajes a $2\frac{1}{2}$ centímetros por día, pero el Capitán Maury supone que en este mar interior sólo sea de la mitad o 1.25 y que el avance del agua oceánica sobre él sea de 20 millas en 24 horas. Con esta velocidad, la masa de agua que penetra por el estrecho de Babelmandeb invierte 50 días en llegar al istmo. Al paso que la onda camina hacia el norte, sufre una evaporación que abate su nivel un centímetro y cuarto cada día, abatimientos que sumándose producen al final del viaje, la disminución observada de $50 \times 1.25 = 62$ próximamente. Este desnivel entre dos regiones extremas produce en la superficie del mar Rojo un declive que, por necesidad física, determina una corriente. Por otra parte, la evaporación ha enfriado el agua y aumentado su densidad por el enriquecimiento en sal. El líquido, por esta causa más pesado que en la boca de Babelmandeb, desciende y va, en corriente submarina, rumbo al sur y devuelve así al océano el exceso de su sal. Si así no fuera, agrega el Capitán

Maury, el agua cargada en grado creciente y saturada de sal, después de los siglos transcurridos habría precipitado en el fondo un grueso estrato de sus cristales.

El Mediterráneo.—Algo fundamentalmente semejante ofrece el Mediterráneo con la diferencia de que la latitud y otras condiciones geográficas, la acción de los vientos y de la temperatura sobre la intensidad de la evaporación y la afluencia de algunos ríos compensan, aunque de manera insuficiente, las pérdidas de agua debidas a esta causa.

No hay duda de que las aguas normalmente saladas del Atlántico penetran en el Mediterráneo por el estrecho de Gibraltar, formando una corriente portadora de copiosa cantidad de sal y que, dada la profundidad de ese paso y su angostura, es muy veloz y caudalosa. Esta corriente se asocia con otra corriente submarina de sentido inverso que restituye al océano la sal que, a causa de la evaporación, quedaría en exceso y de otro modo se habría acumulado en el fondo de ese mar interior.

El estrecho de Gibraltar.—Desde tiempo muy antiguo, cuando antes de la apertura del canal de Suez la navegación en el Mediterráneo era poco activa y no se empleaba el vapor, los buques de vela encontraban notable resistencia para avanzar hacia el poniente. En su diario de a bordo del 8 de marzo de 1855 anota el teniente W. Granville Temple del barco Levante de Estados Unidos que se dirigía hacia América, que en la rada de Almería, donde había fondeado, encontró, muchas embarcaciones que esperaban una ocasión para moverse hacia el oeste, y se le informó de que a lo menos mil veleros se hallaban detenidos entre estos parajes y Gibraltar. Algunos de ellos, después de seis semanas, apenas habían podido llegar a Málaga de donde la corriente los había hecho retroceder. En los tres meses anteriores ninguna embarcación había logrado salir al Atlántico.

Cita el ilustre oceanógrafo Maury (1) el siguiente relato que en el año de 1712 hizo el Dr. Hudson a la Philosophical Society: “Mr. de l’Aigle, comandante del navío Fénix, de Marsella, dando caza a un barco holandés que a Holanda se dirigía, lo alcanzó en la estrechez que media entre Tánger y Tarifa y le lanzó una andanada que lo hundió inmediatamente, no sin haberse salvado antes la tripulación. Algunos días después, el barco, con su car-

(1) Geografía Física del Mar. Pág. 183

gamento de aceite y de aguardiente, surgía de las aguas en la proximidad de Tánger, a distancia cuando menos de cuatro leguas del paraje en que se había ido a pique.” ¿Quién arrastró este barco hacia el poniente y al fin lo levantó hasta la superficie? No podría ser otra causa sino la profunda corriente submarina compensadora de la superficial que llegaba del Atlántico.

VII

Surcos de marea.

Antes de estudiar la circulación oceánica y describir las grandes corrientes que la forman, citaremos el misterioso movimiento llamado “surcos de marea”.

Humboldt, el sabio explorador, y otros navegantes han observado en las zonas tropicales del Atlántico y del Pacífico, una extraña conmoción del agua cuya verdadera causa no ha sido dable descubrir. En tiempo sereno aparecen, y turban la completa calma de la mar unas bandas estrechas a manera de surcos y arroyuelos, por donde el líquido corre veloz con un ruido, perceptible a gran distancia, que recuerda el mugir del agua al despeñarse entre las rocas de los ríos. Semejantes a los efectos de un conflicto de mareas, se llamó a estas bandas “surcos de marea”. Se cree, sin embargo, que proceden de causas más poderosas desconocidas todavía.

Estas corrientes llegan de diversos rumbos con grandes velocidades que se han observado hasta de sesenta millas por hora. Desde que se descubren a distancia de cuatro o cinco millas hasta que, después de cruzar la ruta del barco, se pierden de vista del lado opuesto, transcurren sólo unos cuantos minutos. Al dar en los costados de las naves, las conmueven vivamente amenazando abatirlas, pero el agua sólo se rompe y salta abundante inundando la cubierta; pocos momentos después la mar recobra su calma y su anterior tersura. Refiere el Capitán Arquít del barco “Comet” que, al cruzar por las tres millas que cubrían las aguas agitadas de esta suerte, todos a bordo sintieron un singular movimiento como si la quilla se arrastrara en una masa blanda de lodo.

En las regiones ecuatoriales el fenómeno se presenta con imponente magnitud. En la calma de esos mares aparecen a deshora en gran número y con diversas direcciones, eminencias en forma de rollos envueltos en espuma que avanzan rodando furiosos y rugientes y, en terrible confusión parecen convertir el mar en enorme caldero en tumultuoso hervor. El creciente rumor y la repentina aparición de esas fuerzas que, a veces, turban la quietud y el silencio de la noche y la marcha serena de una nave en una mar sin olas, deben infundir temor; pero la tormenta es efímera y pronto se convierte ese sentimiento en profunda admiración por la hermosura del mar y la grandeza de las fuerzas naturales.

Se había creído que, en su encuentro con los barcos, los surcos de marea podrían desviarlos de su ruta, pero al comparar después de algunas horas su posición astronómica con la estimada, no se ha encontrado diferencia sensible que indique el efecto de una corriente. Se cree que el espacio de tiempo que duran las naves bajo la acción de los surcos es demasiado corto para que sus aguas pudieran llevarlos en su dirección a distancia apreciable.

SECCION II

DESCRIPCION DE LAS CORRIENTES Y DE SUS EFECTOS

VIII

Las corrientes ecuatoriales y la corriente antártica.

La acción del viento para impeler y conducir las aguas superficiales se señala visiblemente en la concordancia que muestran las cartas marinas entre los vientos dominantes en el globo y las grandes corrientes de la mar.

Los vientos que, según se sabe, son constantes, periódicos o variables, transmiten estos caracteres a las corrientes que originan.

Los de mayor constancia y regularidad son los que soplan del oeste en las latitudes mayores de 40°, notablemente en el hemisferio sur; y los alisios que reinan en los de 30 a 35° a uno y otro

lado del ecuador y llegan, del nordeste en el hemisferio norte, y del sudeste en el hemisferio austral. Los primeros generan la gran corriente antártica, los últimos, las grandes corrientes ecuatoriales.

Entre los vientos periódicos figuran los monzones, a saber, los vientos que corren alternativamente en un sentido y en el opuesto con período, ya de meses como los que soplan en el océano Indico, o bien de horas como las brisas de tierra y mar.

Los vientos variables, efecto de estados atmosféricos accidentales, producen movimientos irregulares y caprichosos y en general locales y de poca importancia y extensión.

Agregaremos de paso, que son también parte activa en la generación de corrientes de esta especie ciertas condiciones peculiares de los mares interiores, de los golfos y de la configuración de las costas.

La gran corriente antártica circula en todo el planeta, y las ecuatoriales reinan en todos los mares. Fuera de estos movimientos, cada océano tiene su sistema propio de circulación. En todos ellos las corrientes forman circuitos cerrados y van, las del hemisferio norte, en el sentido del reloj, y en el contrario, las del hemisferio sur. La parte central de estos circuitos es una región de inmovilidad donde se acumulan las yerbas marinas que el agua no puede trasportar. Son principalmente las algas llamadas **sargazos**. Depósitos de que más adelante hablaremos.

Es bien conocido el origen de los vientos alisios. El aire, calentado por el mar y por el suelo de la zona tórrida, se dilata y aligera, y se eleva dejando tras sí un vacío que, para restablecer el equilibrio, viene a llenar el aire más denso de las regiones polares de ambos hemisferios. La rotación diurna de la tierra desvía estas corrientes polares de sus trayectorias de menor resistencia, que serían los meridianos, inclinándolas hacia el oeste; de donde resultan: en el hemisferio boreal, los **alisios del nordeste**, y en el austral, los **alisios del sudeste**.

Pasando estos últimos sobre la mayor extensión oceánica que cubre el hemisferio austral, no encuentran obstáculo ni resistencia, y conservan su poder y su regularidad. Son, pues, más fuertes y más constantes que los del nordeste que, cruzando por la región en gran parte continental del hemisferio norte, son parte en los efectos que las tierras producen en la atmósfera y

sufren modificaciones variables en su fuerza y estabilidad. Al pasar, por ejemplo, sobre los inmensos desiertos africanos, se detienen a causa de la aspiración o movimiento ascensional que ejerce en el aire el calor de sus llanuras áridas y ardientes. El propio efecto se produce en la India donde al calor solar se agrega el que deja en libertad la copiosa precipitación pluvial de esas cálidas regiones.

Corrientes ecuatoriales.—Obediente el agua del mar a la acción incesante de estos vientos, que la impulsan, cada uno en su dirección, sigue la de su resultante que va próximamente hacia el oeste, y forma en todos los mares, a uno y otro lado de la zona de las calmas atmosféricas (1), las dos grandes corrientes ecuatoriales, ambas superficiales y calientes: la del norte que se extiende entre los paralelos de 9 a 20 grados norte, y la del sur, doblemente veloz, entre las latitudes de 15° sur a 29° norte. La velocidad de la última alcanza, a veces, en su límite boreal 4 millas por hora. Entre estas dos corrientes, y para restablecer el equilibrio, pasa en sentido contrario, esto es, tirando al este, la **contracorriente ecuatorial**, profunda y tibia (26°).

Las masas de aire que, elevándose en la zona ecuatorial por virtud del calor reinante allí, prosiguen su marcha en corriente superior hacia los polos y alimentan a los alisios, forman los vientos llamados **contra alisios**: A causa de la menor presión que encuentran en los altos estratos de la atmósfera, se dilatan y, por tanto, se enfrían y tornan más densas, y van inclinándose hacia abajo al mismo tiempo que, por efecto de la rotación de la tierra, se van desviando gradualmente: en el hemisferio norte, hacia la derecha, y hacia la izquierda en el austral, esto es, hacia el oriente en ambos hemisferios. Llegadas a latitudes superiores a 40°, soplan en las capas bajas francamente del oeste.

Corriente antártica.—En la región extratropical del sur, los vientos contra alisios, por la misma causa que los alisios del sureste, adquieren mayor fuerza y estabilidad y determinan en el océano austral la gran corriente antártica del oeste que circunda todo el planeta en la zona de 40°. El poder de estos vientos que el célebre Maury, y con él todos los marinos, llaman

(1) Las calmas atmosféricas de esta zona ecuatorial se deben al encuentro de los vientos alisios de uno y otro hemisferio que, por su mutua oposición a su avance, se detienen, y bajo la influencia del calor reinante en esta región del globo, se elevan, e inician de nuevo la corriente superior hacia los polos causa y principio de esos mismos vientos regulares y perpetuos.

“bravos vientos del oeste”, obra en este inmenso océano efectos de notable intensidad. Su soplo duro y tenaz durante varios días, sobre una dilatada extensión marina libre, provoca en el agua tremenda agitación. Las olas, de una notable regularidad de formas y de una magnitud que en ningún otro mar se observa, se siguen con mucho orden y grande rapidez, en una marcha de imponente grandeza. La altura de sus cúspides arredondadas y cubiertas de espuma, alternando con sus senos muy deprimidos, hacen más viva la semejanza de este indescriptible oleaje con hondonadas y montes coronados de nieve. Lo cual, unido a la violencia del viento húmedo y frío, hace tan justamente temible a los navegantes la vuelta del cabo de Hornos rumbo al oeste.

Las grandes corrientes a que nos hemos referido hasta aquí, a saber: la antártica y las ecuatoriales del norte y del sur, son generales y reinan en todo el globo; la primera, libremente en ese mar austral abierto y casi sin islas; y las segundas, con la limitación que les opone su encuentro con los continentes, las islas y otras corrientes. Vamos a describir ahora las que son propias de cada uno de los otros océanos.

CORRIENTES DEL ATLANTICO

Indicadas en la figura 11

IX

Atlántico del Norte

Corriente del Labrador.—Una corriente salida de la bahía de Baffin por el estrecho de Davis, y otra, procedente de la costa oriental de Groenlandia, reúnen sus heladas aguas que, avanzando hacia los bancos de Terranova y, siguiendo luego por la costa de los Estados Unidos hasta la Florida, forman la corriente del Labrador, de color verdoso, lenta en su marcha (de 6 a 10 millas por día) y portadora de bancos de hielo. Al entrar estas masas sólidas en las aguas menos frías de latitudes más bajas, se funden, y abandonan y depositan en ellas las materias térreas y las rocas que habían aprisionado al congelarse en las regiones árticas. Se cree que este es el origen de los bancos de Terranova.

Corriente del Golfo.—Llegada la corriente ecuatorial del sur a la altura del cabo San Roque en el Brasil, se bifurca. Una rama se dirige hacia el sur paralelamente a la costa oriental de Sud-

américa, y la otra, hacia el noroeste según va el litoral de las Guayanas y de Venezuela. Pasada esta región, encuentra la corriente ecuatorial del norte con la que se reúne, y acrecido así el volumen de sus aguas, penetra en el mar Caribe y luego, en el seno mexicano para formar el caudaloso río marino llamado

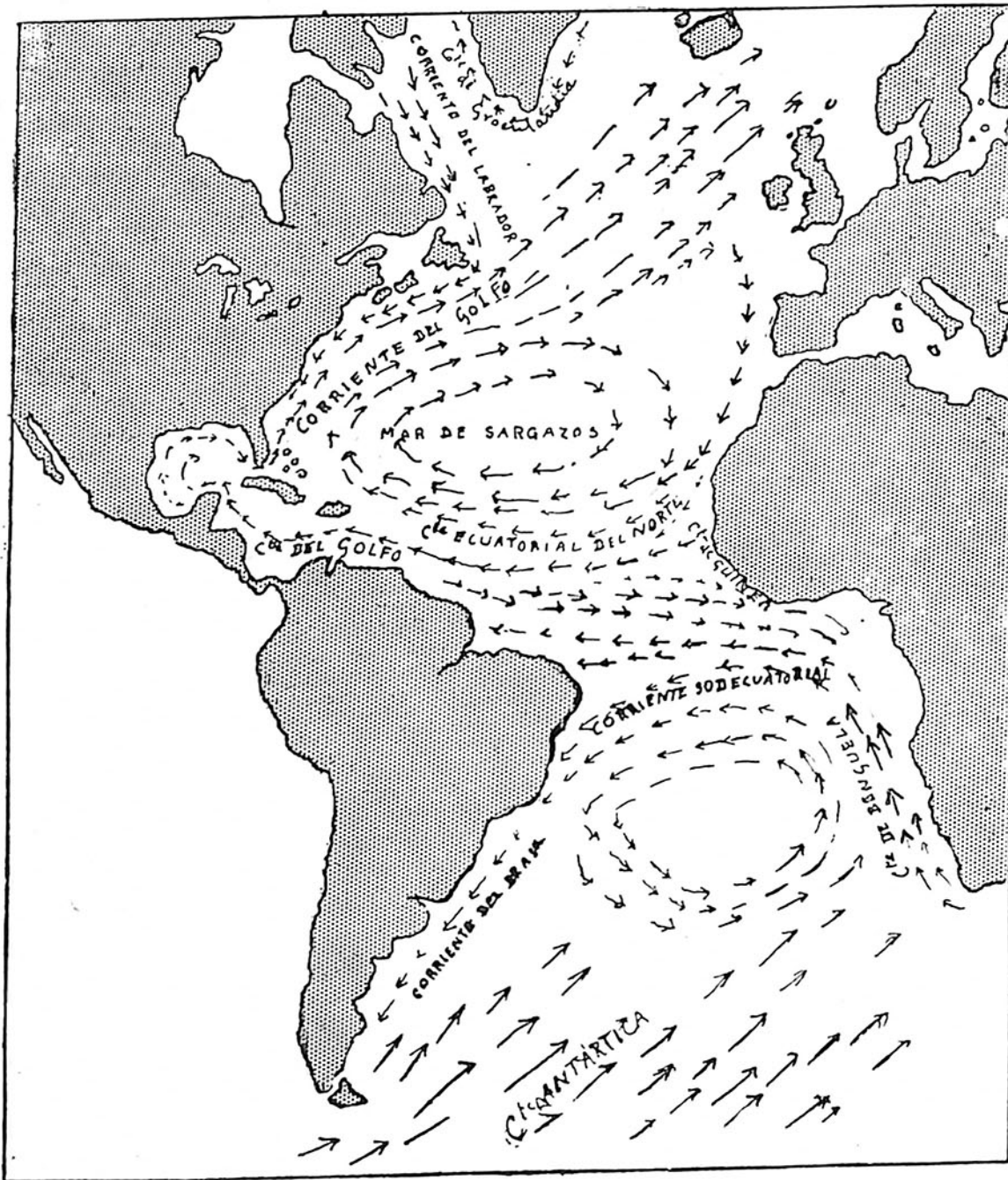


Fig. 11

corriente del Golfo que rodea la costa de este anchuroso mar interior, de donde sale por el canal de la Florida para seguir rumbo al norte en un trayecto de 200 millas hasta el cabo Hatteras. En estos parajes vuelve su dirección hacia el nordeste y,

después de pasar frente a la costa del Labrador y los bancos de Terranova, se aleja de nuestro continente, y ayudada por los vientos del oeste que en esas latitudes reinan, corre al europeo y avanza hacia las islas Británicas, Noruega e Islandia para hundirse luego en las regiones árticas de la Nueva Zembla y del Spitzberg. Pero, antes, una parte de sus aguas se desvía hacia el mar Cantábrico y, con el nombre de **corriente de las Canarias**, tuerce su camino hacia el sur costeano la península Ibérica y se reúne con la corriente ecuatorial del norte, cerrando así el circuito del Atlántico boreal en cuyo interior se encuentra la extensa área de reposo llamada **mar de Los Sargazos** comprendida en el triángulo de las islas Canarias, las Azores y las del cabo Verde. Es una acumulación de las prolíficas yerbas marinas (**fucus natans**), tan compacta, que a la vista aparece como tierra firme y retarda sensiblemente la marcha de las naves. Vista por primera vez en el memorable viaje de Colón, sus compañeros, con grande alarma, creyeron que marcaba el término de su viaje. A causa de la semejanza de los frutitos de esta yerba con las uvas, llamadas **sarga** en portugués, recibió este nombre, transformado en sargazo.

En el paso de la Florida, angosto y poco profundo, mide la corriente 50 millas de ancho, hondura de 350 brazas y velocidad que la estrechez de su cauce ha elevado a 5 millas por hora. A la altura de las islas Bahamas, prisionera entre la corriente fría del Labrador por el oeste, y una parte de la ecuatorial del norte por levante, mantiene su estrechez, pero conforme avanza, su anchura crece y su profundidad disminuye. Frente al cabo Hatteras, mide transversalmente 120 millas. Salida al océano libre, muestra en su velocidad y en su dirección, irregularidades que las mudanzas del viento y de la presión barométrica le imparten. En la angostura de la Florida siente el efecto de las mareas que hacen variar casi en una mitad, su máximo avance diario.

La corriente del Golfo reviste caracteres peculiares muy dignos de atención. Es una capa relativamente superficial de agua caliente y muy salada que se desliza en una masa oceánica de agua fría y constituye un río gigantesco que transporta cada hora, de la zona tropical a las regiones polares, un volumen de agua de 90,000 kilómetros cúbicos. Su temperatura en invierno frente a las costas de Terranova excede a la del mar adyacente en 11 y a veces, hasta en 17 grados.

Su carácter verdaderamente notable es la perfecta claridad con que se destaca de la masa oceánica en que se desliza y la precisión con que se marcan sus orillas, especialmente la que mira a tierra. El azul intenso de sus aguas de procedencia tropical, contrasta a simple vista con los tintes más claros del océano y con el verde sucio de las aguas litorales. Ni la inquietud continua del mar, ni la agitación intensa del oleaje son poder suficiente para borrar esa línea de separación de las aguas, reveladora de una resistencia o repugnancia para mezclarse y confundirse, semejante a la que se muestra entre el agua y el aceite.

Fuera del contraste tan notable entre el color azul obscuro de la corriente del Golfo, formada por aguas tropicales tibias y ricas en sal, y el tinte verde aceituna de la corriente del Labrador característico de los mares polares de donde procede, teñidos por incontables diatomeas; la línea de separación de una y otra corriente, llamada la **pared fría**, se marca por una línea rizada, ondulacioncita muy perceptible en tiempo sereno.

Cuenta W. Allingham (1) que el capitán de un barco que había roto un bloqueo, perseguido por otro y a punto de ser alcanzado, vió esta línea y, atravesándola, entró en la corriente favorable que pronto lo alejó de su perseguidor retardado por la otra.

A las diferencias de color, de transparencia y de temperatura, se agregan las de densidad y de riqueza en sal, y tal vez otras condiciones físicas o químicas aún desconocidas, que dan al agua de la corriente un estado molecular propio y una especial viscosidad. Son bien sabidas de los constructores navales la actividad y la rapidez con que las aguas del golfo de México y del mar Caribe atacan las placas de cobre con que se blindan ciertos barcos.

De la dilatación que, en el agua, produce su alta temperatura y del aumento de su peso específico, efecto de su riqueza en sal, es preponderante la primera como causa para dar a la corriente del Golfo mayor ligereza que la de las aguas circundantes; de donde resulta que la conservación del equilibrio entre una y otra de esas masas líquidas exige que el nivel de la corriente sea más alto que el de las aguas que atraviesa. Se observa, en efecto, que forman la superficie de la primera dos planos inclinados

(1) A Manual of Marine Meteorology. Página

Su carácter verdaderamente notable es la perfecta claridad con que se destaca de la masa oceánica en que se desliza y la precisión con que se marcan sus orillas, especialmente la que mira a tierra. El azul intenso de sus aguas de procedencia tropical, contrasta a simple vista con los tintes más claros del océano y con el verde sucio de las aguas litorales. Ni la inquietud continua del mar, ni la agitación intensa del oleaje son poder suficiente para borrar esa línea de separación de las aguas, reveladora de una resistencia o repugnancia para mezclarse y confundirse, semejante a la que se muestra entre el agua y el aceite.

Fuera del contraste tan notable entre el color azul oscuro de la corriente del Golfo, formada por aguas tropicales tibias y ricas en sal, y el tinte verde aceituna de la corriente del Labrador característico de los mares polares de donde procede, teñidos por incontables diatomeas; la línea de separación de una y otra corriente, llamada la **pared fría**, se marca por una línea rizada, ondulacioncita muy perceptible en tiempo sereno.

Cuenta W. Allingham ⁽¹⁾ que el capitán de un barco que había roto un bloqueo, perseguido por otro y a punto de ser alcanzado, vió esta línea y, atravesándola, entró en la corriente favorable que pronto lo alejó de su perseguidor retardado por la otra.

A las diferencias de color, de transparencia y de temperatura, se agregan las de densidad y de riqueza en sal, y tal vez otras condiciones físicas o químicas aún desconocidas, que dan al agua de la corriente un estado molecular propio y una especial viscosidad. Son bien sabidas de los constructores navales la actividad y la rapidez con que las aguas del golfo de México y del mar Caribe atacan las placas de cobre con que se blindan ciertos barcos.

De la dilatación que, en el agua, produce su alta temperatura y del aumento de su peso específico, efecto de su riqueza en sal, es preponderante la primera como causa para dar a la corriente del Golfo mayor ligereza que la de las aguas circundantes; de donde resulta que la conservación del equilibrio entre una y otra de esas masas líquidas exige que el nivel de la corriente sea más alto que el de las aguas que atraviesa. Se observa, en efecto, que forman la superficie de la primera dos planos inclinados

(1) A Manual of Marine Meteorology. Página

En virtud de la alta capacidad térmica del agua y de la enorme cantidad de este líquido que lleva la corriente, el calor tropical que absorbe en el mar Caribe y en el golfo de México, y conserva merced a la muy débil conductibilidad del agua fría que forma su cauce y el fondo en que se desliza, se eleva a cerca de cuarenta trillones (4×10^{19}) de calorías. Con una disminución media de un grado por cada 10° de aumento en latitud, guarda en su dilatado trayecto por el Atlántico la temperatura del verano aun en invierno. Traspuesto el paralelo 40, la corriente se desborda y el inmenso caudal de sus aguas se derrama ampliamente y lleva esta temperatura a miles de kilómetros cuadrados de la superficie oceánica. Los vientos moderados del oeste, regulares en esas regiones, transportan el calor a las costas de Europa y a las islas Británicas y las envuelven en un ambiente que templará el frío del soplo boreal propio de esas latitudes y mitiga el rigor de su clima.

Los litorales y las islas del mar Caribe y del golfo de México gozan a su vez de la influencia benéfica de la corriente. La incesante salida de esos mares, del agua a medida que la caldea el sol, y su sustitución continua por la fría que llega del océano, impiden el calentamiento excesivo del aire y difunden en esas costas una temperatura, aunque alta, muy soportable en verano, y suave y saludable en otoño y en invierno.

La corriente del golfo ejerce acción poderosa sobre la meteorología del océano Atlántico. Los marinos la llaman "creadora del tiempo". Al contacto de sus aguas con el aire enfriado por la corriente del Labrador que a su lado pasa, se forman las densas nieblas de Terranova llamadas "nieblas de plata", tan temidas y peligrosas para la navegación, y uno de los más bellos espectáculos que la mar ofrece. Portadora de gran cantidad de calor, elemento perturbador del equilibrio atmosférico, su trayecto y sus cercanías son sitio de furiosas tormentas. Los vientos que se levantan en diversos parajes del Atlántico, al encontrar la corriente, abandonan su dirección, y como atraídos por ella, la siguen en su marcha hacia el nordeste y coadyuvan para producir la agitación tumultuosa del agua y la violencia del oleaje, causantes de numerosos naufragios.

La historia de los siniestros marítimos recuerda con horror y consternación el formidable huracán de 1780. Iniciado en la

isla Barbada donde desarraigó árboles, derribó casas y causó enormes daños había adquirido tal fuerza en el canal de la Florida que hizo retroceder el agua de la corriente y la acumuló en el golfo manteniéndola a 10 metros de altura. Represada así, al lanzarse con ímpetu violento en busca de su nivel, corría contra las ráfagas del aire con espantosa velocidad, en olas de inusitada fuerza y altura que, en loca y ciega confusión y desorden, formaban una mar terrible. La marejada invadió los cayos y las islas cubriéndolos con varios metros de agua. Las olas llegaban con tal fuerza y a altura tal, que arrasaron fuertes y castillos y les arrebataron sus pesados cañones. El viento levantaba los cuerpos de hombres y animales que volaban como plumas para caer despedazados en el suelo. Se perdieron más de veinte mil vidas humanas en las diversas islas y 50 veleros y dos grandes navíos de guerra se hundieron en las aguas de las islas Bermudas.

Corriente de Guinea.—Es una corriente rápida de temperatura más elevada que la ecuatorial que cerca de ella pasa. Tira hacia el oriente siguiendo la costa meridional del norte de Africa con dirección al golfo de Biafra. Llevados, sin advertirlo, por la velocidad de esta corriente, numerosos barcos de vela han sufrido notables desviaciones de su ruta.

X

Atlántico del Sur.

(Véase la figura 11.)

Corriente del Brasil.—Dejamos arriba la corriente ecuatorial del sur dividida frente al cabo de San Roque, con una de sus ramas vuelta a la derecha rumbo al mar Caribe para formar la gran corriente del Golfo. Sigamos, ahora, su otra rama, sea la de la izquierda. Vuelta hacia el sur, corre paralelamente a la costa sudamericana; y más o menos a la altura de las bocas del Plata, enriquecida con el caudal de ese río, ayudada entre los 35 y 40° de latitud por los vientos del oeste, y desviada hacia la izquierda por la rotación de la tierra, vuelve su rumbo hacia

levante; y casi al lado de la gran corriente antártica rápida y portadora de numerosos bancos de hielo, y enfriada por ella, llega al cabo de Buena Esperanza, para seguir hacia el norte con el nombre de corriente "Sudafricana o de Benguela."

Corriente de Benguela.—Paralela a la costa occidental de Africa y creciendo gradualmente en velocidad, hasta 30 millas diarias, esta corriente fría, impulsada por los alisios del sureste, en la latitud de 6° vuelve su camino a occidente para reunirse con la ecuatorial del sur y cerrar así el circuito del Atlántico austral. Como se ve, las aguas circulan en este océano en sentido contrario al de las manecillas del reloj, alrededor de una área central de alta presión y de inmovilidad donde se forma un mar de sargazos.

CORRIENTES DEL PACIFICO

XI

Pacífico del norte.

(Véase la figura 12)

Corriente Negra.—Inicia la circulación del Pacífico boreal, en las islas Revillagigedo, la corriente ecuatorial del norte que, con velocidad de 15 millas por día, avanza entre los paralelos de 9 a 20°, hasta el archipiélago Filipino donde sus aguas se reúnen con las que, procedentes del océano Indico, se escapan por el estrecho entre Sumatra y Malaca, y forman con ellas una corriente de 100 millas de ancho que, a razón de 40 por día, avanza hacia el Japón. Desde las islas Kiou Shiou recibe el nombre de "corriente Negra" a causa del azul oscuro de sus aguas, o de "Kuro Siwo" que le dan los japoneses, y su anchura va aumentando hasta duplicarse y su velocidad creciendo hasta 70 millas en 24 horas. Después de contornear las costas del Japón, cae bajo la acción de los vientos del sudeste que impelen una parte de su caudal hacia el mar de Behring. El resto, o su mayor porción, vuélvese al oriente, cruza el océano donde encuentra las islas Aleúceas, y al fin, arriba a las costas de Alaska y de la Colombia Británica. En este punto, una pequeña parte de sus

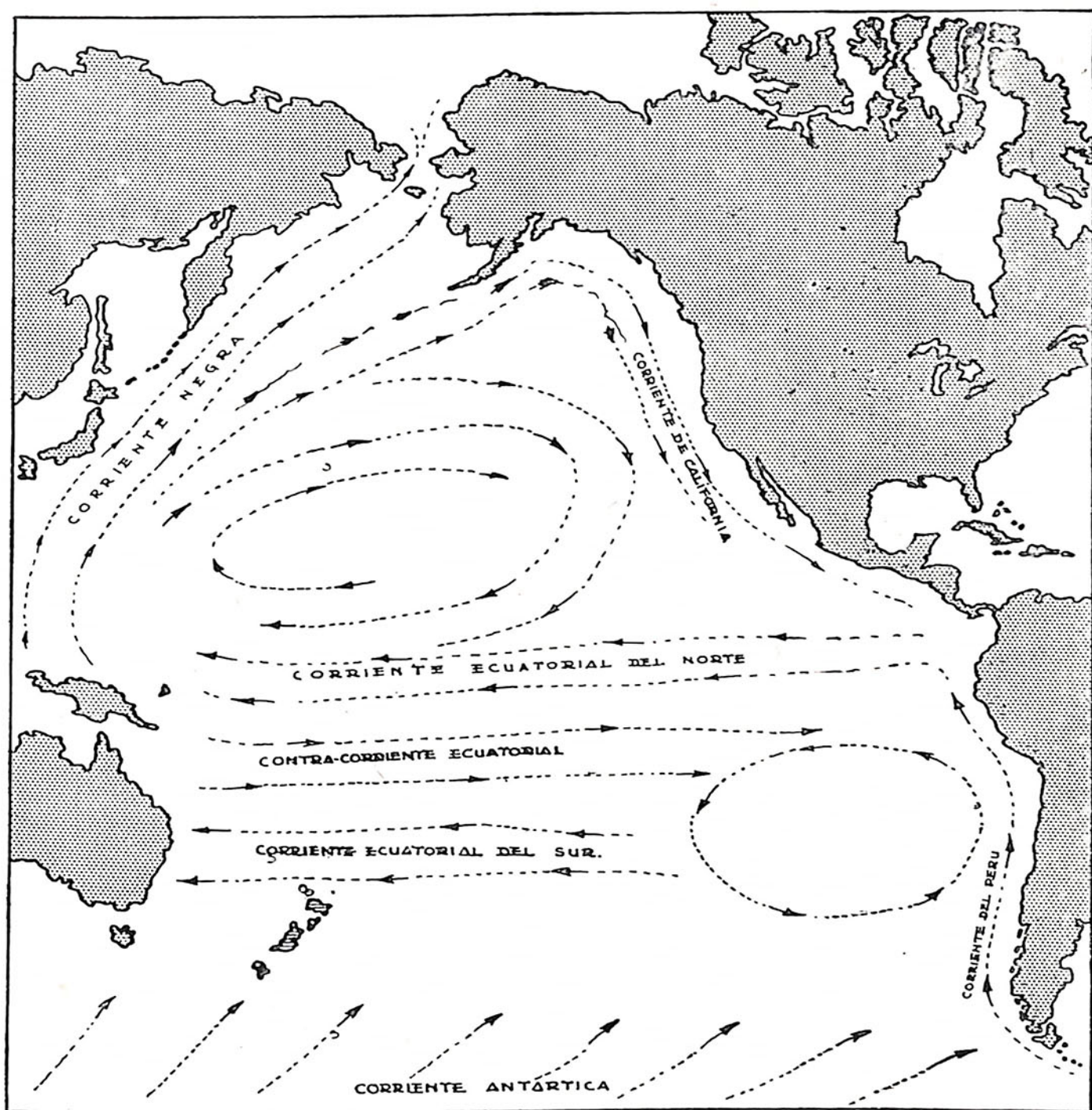


Fig. 12

aguas, se dirige al norte como corriente de reacción. El resto, desviado a la derecha por la rotación de la tierra, y con el nombre de corriente de California, va separándose gradualmente de la costa americana para caer en la corriente ecuatorial del norte y cerrar el circuito del Pacífico boreal. Es una corriente fría cuyo contacto con la atmósfera de más alta temperatura de latitudes más bajas, origina las densas nieblas que, en estos parajes incomodan tanto la navegación.

Corriente Amarilla.—Una corriente fría originaria del Kamtchatka y con tiro hacia el sudsudoeste, pasa entre la costa asiática y la corriente Negra. Se llama “corriente Amarilla”, u “Oya Siwo”. Es en el Pacífico, por su situación y caracteres, análoga y semejante a la corriente del Labrador en el Atlántico, de la que se distingue por que no transporta bancos de hielo.

El circuito del Pacífico boreal, recorrido como el del Atlántico del norte, en el sentido del reloj, comprende en su interior una área de reposo donde se estancan algunos sargazos o despojos traídos de las costas por las corrientes.

La leña que queman los habitantes de las islas Aleúceas, donde no hay árboles, y la madera con que fabrican sus canoas y sus utensilios domésticos y de pesca, son las que la corriente Negra o Kuro Siwo, trae de las lejanas costas del Japón y hasta de China, y deposita en sus heladas playas.

Corriente Negra y Corriente del Golfo.—La corriente Negra o Kuro Siwo en el Pacífico y la del Golfo en el Atlántico, ofrecen notable semejanza en sus caracteres y en su marcha. La primera sale del océano Indico por el paso entre la península de Malaca y la isla de Sumatra; la segunda, sale del seno mexicano por el canal entre la Florida y Cuba. Una corre hacia el norte frente a las costas asiáticas hasta el archipiélago japonés; la otra, con igual rumbo, pasa frente a las de América hasta los bancos de Terranova. Las dos, después de enviar en estos puntos, una rama a las regiones árticas, cruzan rumbo al este, una, el Pacífico, la otra el Atlántico, para llegar al continente fronterero, seguir sus costas hacia el sur y entrar en las corrientes ecuatoriales, y cerrar los circuitos Pacífico y Atlántico. El agua caliente que ambas llevan, originaria de los mares tropicales, debe a su alta proporción de sal ⁽¹⁾ ese color azul profundo que las caracteriza, en notable contraste con el tinte verdoso de las aguas circundantes, y la claridad con que se marcan sus orillas en medio de la mar. Separadas unas y otras de la costa por las corrientes frías del Labrador y de la Oya Siwo respectivamente, se forman en ambas las densas nieblas, efecto de la diferencia de temperatura de su agua tibia y la fría del aire que las envuelve.

(1) En las salinas o establecimientos donde se extrae la sal de mar por medio de la evaporación continuada en una serie de depósitos, se observa cómo aumenta la intensidad del azul del agua con el grado de concentración, cómo se acentúa su verdor con la proximidad al estado de agua dulce, y cómo adquiere un tono rojizo cuando, con la saturación, la sal está a pique de cristalizar.

La corriente del Golfo, llevando el calor tropical a las costas europeas y suavizando su clima, completa su analogía con la corriente negra que obra el mismo beneficio en las costas occidentales de la América del norte. En su travesía por los océanos, una y otra se ven con frecuencia, envueltas en nubes tempestuosas y en duros temporales.

XII

Pacífico del sur

(Figura 12.)

La corriente ecuatorial del sur, más ancha, según en otro lugar dijimos, que su compañera la del norte, y más veloz, pues a veces recorre 100 millas por día, avanza hacia el poniente hasta la región de las islas Filipinas y de Australia. Parte de su agua se escapa al océano Indico por el estrecho de Torres (entre Australia y Nueva Guinea), y su mayor porción, desviada, tal vez, por la rotación de la tierra, se vuelve hacia el sudeste siguiendo las costas de Australia y de Nueva Zelandia; y luego al este, hasta encontrar la gran corriente antártica que las conduce en un largo y agitado trayecto hasta el cabo de Hornos.

Corriente del Perú.—Desde este punto y a lo largo de la costa sudamericana, reina una corriente de agua fría que avanza hacia el norte hasta encontrar la ecuatorial del sur y completar así el circuito de sentido inverso (contrario al del reloj) del océano Pacífico austral. Se llama **corriente del Perú**, o de **Humboldt**, como su descubridor. Con 100 millas de anchura frente a Chile, que va creciendo hasta 250 frente al Perú, recorre 15 a 16 al día.

Su baja temperatura influye sobre el estado de la atmósfera provocando y manteniendo en ella una sequía que hace habitualmente áridas la costa del norte de Chile, la del Perú y la del sur del Ecuador. Gracias a la baja temperatura de sus aguas y a las nieves que coronan las cumbres de la vertiente occidental de los Andes, se goza, especialmente en el Perú, de un clima templado y delicioso que el calor tropical haría insoportable en tan baja latitud.

Siendo lo normal que, impelida de los vientos del sur y del sudeste, la corriente conserve su fuerza y su regularidad y que las bajas presiones no se alejen de la zona donde habitualmente reinan, no hay causa para temer trastornos en el aire, lo que explica la rareza de tormentas en ese litoral. Conviene, pues, a la seguridad de la navegación en estos mares, dirigir las rutas a lo largo de la costa.

En su vuelta hacia el oeste desde la región ecuatorial, la corriente conserva la frescura de sus aguas y mantiene en el gran número de islotes rocosos y desnudos que encuentra en su trayecto hasta las islas Galápagos, un clima oceánico ideal para los millones de aves que han anidado en ellas y para el género de peces más apropiados para su alimentación. Estas aves han formado durante largos milenios, copiosos depósitos de materia orgánica a cuya acumulación se deben los bancos del poderoso fertilizador llamado **Guano** cuya explotación constituye un ramo de la riqueza de aquellos áridos parajes.

Corriente del Niño.—Al iniciarse cada año el estío del hemisferio austral aparece frente a la región de la costa sudamericana, (entre 6° norte y 4° sur) una corriente de agua tibia que modifica el estado habitual de la atmósfera originando elevación de temperatura y abundantes lluvias en las costas, sur del Ecuador y norte del Perú, cuyo clima suave y fresco se torna temporalmente caluroso y húmedo con su natural acompañamiento de plagas y enfermedades tropicales, insólitas en aquellas regiones.

A causa de la aparición de la corriente en los días cercanos y posteriores a la Navidad, los habitantes de esas comarcas la han denominado **corriente del Niño**.

Se cree que es una rama de la contracorriente ecuatorial del sur que antes de llegar a Panamá, retrocede hacia el oeste para unirse con la ecuatorial del sur; y que sus aguas, por haber recorrido el ecuador en la dilatada extensión del Pacífico, traen naturalmente la temperatura tropical.

En tiempos, y de modo inesperado, la corriente del Niño, avanza mucho hacia el sur, a veces hasta las latitudes de Valparaíso (12° S). Se interpone, entonces, entre la costa y la corriente del Perú, o se sobrepone a ésta, y origina muy intensa perturbación atmosférica que trae calor sofocante y desata en

todo ese extenso litoral fuertes tempestades y lluvias torrenciales, causa de inundaciones y de destrucción de casas, de caminos y de sementeras. Fueron muy intensos y desastrosos estos efectos de la corriente del Niño en los recientes años de 1939 y 1941. A los graves daños materiales sufridos por los ribereños hubo que añadir la invasión de enjambres de moscas y de insectos que transmitieron serias enfermedades. En 1925 apareció en toda la costa gran cantidad de aves y de peces muertos.

Cuando pasado el temporal, las aguas se retiran de aquellas tierras, habitualmente áridas y yermas, las dejan cubiertas de ricas lamas e impregnadas de humedad y convertidas en fértiles campos de donde los laboriosos habitantes recogen temprana y abundante cosecha: compensación, aunque incompleta, del reciente desastre.

XIII

El Atlántico y el Pacífico

Menos frecuente la navegación en el Pacífico que en el Atlántico, sus corrientes son menos conocidas en detalle que las de este océano, pero no ha quedado inadvertida, sin embargo, la notable semejanza que muestra la circulación general en el uno y en el otro. Bajo la influencia de los mismos vientos regulares y de parecidos accidentes atmosféricos, de la rotación de la tierra y aun de la semejante configuración de los contornos continentales; las trayectorias de las corrientes son en los dos océanos, circuitos cerrados en torno de áreas centrales de alta presión y de inmovilidad que se señalan por depósitos de sargazos. Son, también, en todo semejantes en los dos mares los efectos de sus corrientes sobre la climatología de las costas vecinas de su trayecto.

Más rápidas y angostas las corrientes del Atlántico que las del Pacífico, y más señalados la irregularidad y el contraste entre la temperatura de sus aguas y la del aire que encuentran en su camino, son más intensas y frecuentes las causas de perturbación del equilibrio en el primer océano, y por tanto, los temporales que en él se desatan son más fuertes que los del segundo y toman casi siempre las proporciones de furiosas tormentas. Los

marinos consideran el Atlántico como el más inquieto y borrascoso de los mares, principalmente en la estrechez de su región del norte, y más violentas y furiosas sus olas que las que se levantan en los cabos de Hornos y de Buena Esperanza llamadas, a causa de la intensa agitación de sus aguas, “cabos de las Tempestades”. El Pacífico, por su más moderada actividad, parece merecer su nombre.

CORRIENTES DEL OCEANO INDICO

(Figuras 13, 14 y 15.)

XIV

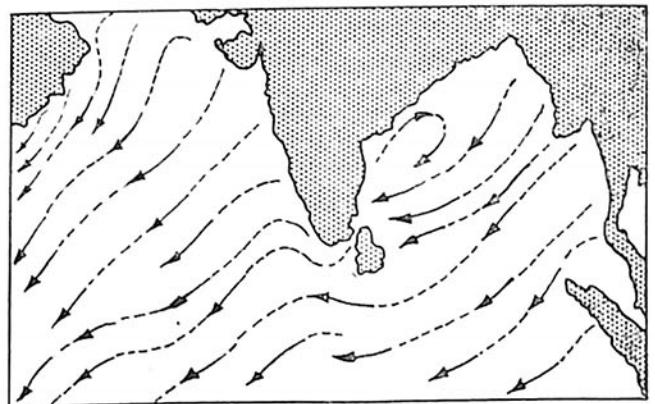
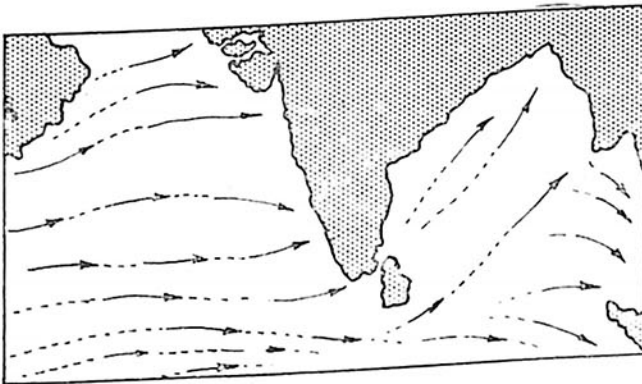
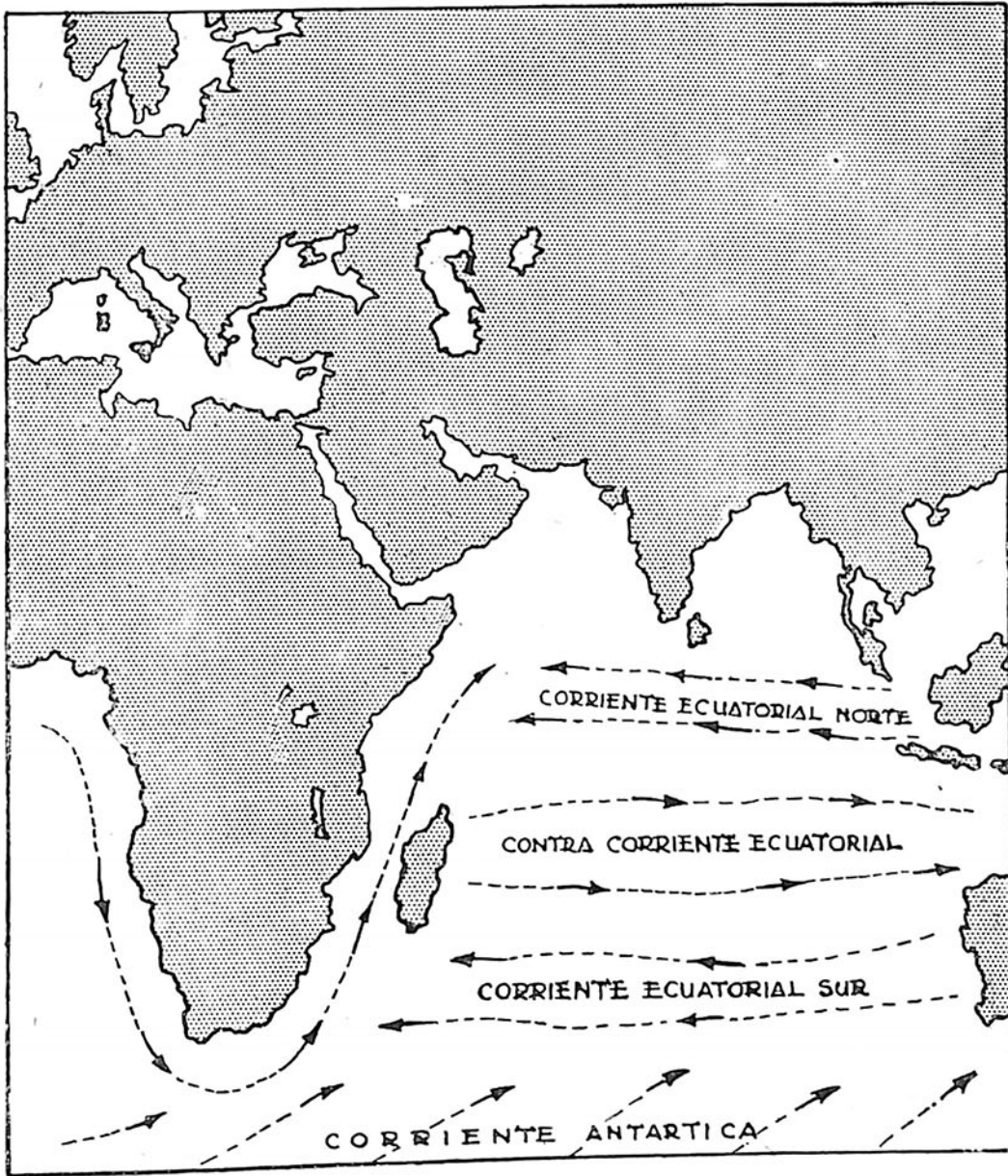
Del norte

El océano Indico del norte está reducido, por la presencia del gran continente asiático, a una estrecha zona entre el trópico de Cáncer y el ecuador, por lo que la circulación de sus aguas, aunque en principio obedece a las mismas leyes físicas que la de los otros mares, presenta, sin embargo, la particularidad de que las corrientes de verano son de sentido contrario a las del invierno.

Ese continente, muy frío en invierno a causa de la intensa radiación de sus vastas mesetas y de sus altísimas cumbres, se torna cálido en verano por la prolongada incidencia de los rayos del sol tropical sobre sus inmensas llanuras, como las de Persia, de la India y de la Arabia. Este cambio periódico en la situación de los centros de llamada del aire, invierte el sentido de los vientos, sean los alisios regulares, que, en invierno soplan del noreste, y en verano retroceden y vienen del sudoeste. Son los vientos periódicos llamados “monzones” (1) semejantes, por su causa, a las brisas de las costas que, en la noche, corren de la ribera enfriada por la radiación, hacia el mar, y en el día, del mar a la tierra calentada por el sol.

Guiadas las corrientes marinas por la acción de los vientos dominantes, la de este océano, que es la ecuatorial del sur, siguiendo en invierno figura 15, la dirección del monzón seco del noreste, avanza con velocidad de 40 a 60 millas diarias hacia el

(1) De una palabra arábiga que significa estación.



(Figuras 13, 14 y 15.)

sudoeste, y luego, desviada por la rotación de la tierra, tira hacia el poniente; y después de pasar por la isla de Ceilán, arriba a la costa oriental de Africa cerca del ecuador. En verano, figura 16, bajo la acción del monzón húmedo del sudoeste, se vuelve hacia el oriente, recorriendo, según varía la fuerza del viento, de 1 a 3 millas por hora, rodeando el mar Arábigo y el golfo de Bengala. Alguna vez pasa al Pacífico y refuerza la corriente negra del Japón.

XV

Del Sur.

El régimen de las corrientes en el océano Indico del sur se muestra de conformidad con la ley general que rige la circulación en la parte austral de los otros mares.

La corriente ecuatorial del sur, determinada por los vientos alisios del sudeste, avanza hacia el poniente hasta la isla de Madagascar donde se bifurca. Una de sus ramas, girando a la izquierda, se vuelve al sudeste, luego al este y, casi confundida con la gran corriente antártica que, como hemos visto, circula en todo el sur del planeta, llega a Australia y sigue por su costa occidental para reunirse con la ecuatorial y cerrar el circuito inverso del océano Indico del sur.

Corriente de las Agujas.—La otra rama, llegada a la altura del cabo Delgado, se divide. Una corta porción de su caudal se dirige al norte; la otra corre por el canal de Mozambique (entre las costas de Africa y Madagascar) y, con el nombre de corriente de las “Agujas”, avanza al sur con velocidad creciente que, en ocasiones, alcanza 4 millas por hora. Llegada al cabo de Buena Esperanza, parece perderse en la corriente Antártica o en la de Benguela.

Sus aguas, procedentes de un océano que, circundado de tierras tropicales, adquiere muy alta temperatura, son calientes. Al extenderse en medio de las aguas frías que encuentran en los bancos de las Agujas, originan intensos trastornos atmosféricos que, en estas regiones, toman la forma de imponentes tempestades. Hablan los marinos con asombro, del incesante relampagueo que se prolonga varias horas acompañado del retumbar del trueno, tan continuado, que parece un rugido sin interrupción.

Corrientes verticales

Fuera de los movimientos verticales que, como se indica en la figura 8 de la página 40 ligan las corrientes superficiales con sus compensadoras submarinas, debe haber necesariamente continua comunicación entre las regiones exteriores del océano y las más profundas. A par del aire, móvil en extremo y sensible a la más ligera acción, el mar obedece puntual y dócilmente a la de cualquiera causa, así sea leve, que perturbe el equilibrio entre sus partes; y no es absurdo inferir que, a semejanza de lo que en la atmósfera se observa, debe haber en la masa oceánica una importante circulación vertical.

Desde luego, el no encontrarse en el fondo de los mares la acumulación de salmuera ni los depósitos o bancos de sal que produciría la caída, continuada durante miles de años, de las aguas que la evaporación deja más saladas y más densas, indica que esas aguas no pueden permanecer en las grandes profundidades y que debe haber transporte de ellas, o corrientes hacia arriba y también, naturalmente, alguna fuerza que determine y mantenga ese movimiento.

Es racional admitir que así como en el océano atmosférico es fenómeno corriente y muy perceptible el movimiento vertical, y se debe a la acción del calor y a la compresibilidad del aire, lo propio debe acontecer en el océano líquido donde están presentes y deben obrar las mismas causas; en grado menor la compresibilidad por ser la del agua muy pequeña, aunque, sin embargo, muy sensible bajo las enormes presiones que reinan en las altas profundidades (1).

En efecto, el agua que por su densidad aumentada, desciende en el seno de la masa líquida, al paso que se hunde recibe la presión, siempre en aumento, de las capas superiores, y sufre la consiguiente contracción de su volumen acompañada, según ley física ineludible, de liberación de su calor latente, el cual eleva la temperatura de cantidades iguales del líquido de las capas que atraviesa. De este modo se realiza, de la superficie al fondo,

(1) La compresibilidad del agua marina varía con la temperatura y con su proporción de sal. El valor medio de su coeficiente es 0.0000046. Si el agua no fuera compresible, el volumen del mar no estaría reducido, y su nivel se encontraría 27 metros más arriba que el actual.

un transporte de calor, energía suficiente para impartir a las aguas profundas movimiento ascensional.

XVII

Función y efectos de las corrientes.

Los fenómenos más notables y característicos que la mar ofrece a nuestra admiración tienen su origen, su causa primera, en la naturaleza salina de sus aguas. Dotadas de la propiedad de variar de densidad con el grado cambiante de concentración de su sal, efecto de las mudanzas atmosféricas casi continuas, se hallan siempre en equilibrio inestable y en incesante inquietud; lo que coadyuva poderosamente a la generación y a la persistencia de las corrientes.

Estableciendo una activa circulación entre los océanos, conduciendo el agua de unos parajes donde un intenso calor, la falta de lluvias, la carencia de ríos, la ponen más salada, a otras en que la copiosa precipitación y el abundante tributo de los ríos caudalosos la diluyen y empobrecen, las grandes corrientes regulares y las locales y accidentales de todas direcciones obran continua remoción y elaboran la mezela íntima que resulta en la notable identidad de composición del agua de todos los mares; lo que conserva en ellos un ambiente propicio, un medio adecuado para la prodigiosa exuberancia de la vida animal y vegetal que sustentan.

Las corrientes desempeñan otra función no menos importante en la economía del mar. Transportan a grandes distancias y distribuyen y derraman en sitios muy diversos y aislados el rico tributo de cuerpos minerales arrancados a la tierra por las aguas que circulan en los valles y montañas de los continentes, y es alimento que los millones de organismos marinos asimilan y convierten en conchas, en perlas, en corales y en bellísimos objetos y en materia para edificar los arrecifes y las islas que, más especialmente se muestran abundantes en las aguas de Australia, de la Polinesia y en el trayecto de la corriente del Pacífico del sur.

Al sustraer estos innumerables y diminutos arquitectos los cuerpos contenidos en el agua, alteran su densidad y con ello

rompen el equilibrio de la masa oceánica que, para restablecerlo, se pone en movimiento. Este fenómeno, efecto necesario de inexorable ley física, se realiza continuamente en todos los mares, en todas las latitudes, a todas las profundidades y mantiene un equilibrio inestable y una inquietud muy favorable a la formación y mantenimiento de las corrientes que, a su vez, renuevan la provisión de los alimentos consumidos: manifestación visible de la ley de la acción y la reacción y del orden invariable y armónico de la naturaleza.

En virtud de la resistencia que la débil conductibilidad del agua opone al paso del calor al través de su masa, su propagación tan regular y constante en los océanos, se realiza por obra del movimiento; del movimiento de las partículas líquidas que funcionan como vehículos para conducirlo. No es el calor lo que se transmite de punto a punto de un sistema inmóvil, como acontecería en un cuerpo conductor, *verbi gracia* un metal; sino la masa de agua que, calentada en las zonas tropicales del planeta, guarda en su cuerpo la energía calorífica y, en corrientes caudalosas la lleva a remotos parajes donde es parte en la creación de los climas y en la consiguiente distribución de los organismos, pues en unos forma ambiente favorable para su existencia y en otros, condiciones adversas. Así, la corriente del Golfo, por su alta temperatura, es barrera que recluye las ballenas de esperma en los mares del norte a más de 40° mientras que las corrientes antárticas heladas protegen el avance de estos cetáceos a más bajas latitudes australes. La corriente fría del Labrador es muy favorable a la procreación de peces que proporcionan copiosa pesca y muy apreciado alimento en aquellas costas, en tanto que otras regiones carecen de esas cualidades. La corriente de California, por su baja temperatura, es protectora de las muy variadas especies que a la pesca ofrecen las aguas de nuestra península y que abandonadas por nosotros, explotan subrepticamente y con gran provecho, los americanos y los japoneses.

PARTE TERCERA

. LA MAREA

I

La Marea

La atracción que el sol, y principalmente la luna, ejercen sobre el mar, levanta sus aguas en una protuberancia que, siguiendo la dirección de esos astros en su marcha diurna por el cielo, recorre diariamente la redondez de la tierra.

Este grandioso fenómeno llamado marea se manifiesta en cada punto del océano, por un movimiento rítmico que, dos veces por día y con puntual regularidad, eleva y abate alternativamente el nivel del agua.

Poco perceptible la elevación del líquido en alta mar, se presenta al contrario, muy sensible en la costa donde su nivel sube visiblemente, y el agua invade la ribera en muchos parajes y avanza tierra adentro a distancia considerable y con violencia a veces torrencial.

El movimiento ascensional dura seis horas y se llama **flujo** o **creciente de la marea**. Llegada a su altura máxima denominada **pleamar**, el agua se retira inmediatamente, y durante otras seis horas continúa su descenso, llamado **reflujo** o **menguante de la marea**, hasta alcanzar un nivel mínimo o **baja mar**, para comenzar al punto a reproducir durante igual período de tiempo las mismas fases de su movimiento.

II

Causa general de la marea. Su modo de acción.

Para simplificar o describir con más claridad el mecanismo de la marea, consideremos el fenómeno en toda su sencillez y en su carácter fundamental. Para ello admitiremos por lo pronto, que el océano cubre totalmente la superficie de la tierra y sólo está sujeto a la atracción de la luna, la cual en su movimiento diurno, recorre el ecuador.

La atracción del astro se ejerce, no sólo sobre las aguas del mar, sino también sobre el conjunto del globo terrestre, aunque con desigual energía. En efecto, obrando la fuerza atractiva, según la ley universal de la gravitación, con mayor intensidad sobre los cuerpos más cercanos que sobre los más lejanos del cuerpo atrayente, la luna llamará hacia sí con más vigor la masa oceánica de la región terrestre vuelta hacia ella, que las masas, más lejanas, de la región diametralmente opuesta. La tierra cederá, pues, a la atracción menos que las aguas Z, fig. 16, de la primera región y más que las N, de la segunda, lo que tenderá a producir una separación o alejamiento simultáneo entre el globo y las masas líquidas, tanto en una de esas regiones como en la otra; pero no pudiendo las aguas abandonar su contacto con el fondo del mar donde las retiene la pesantez, el efecto de la atracción diferencial será una deformación de la superficie oceánica, un cambio de su figura esférica en la de elipsoide con dos prominencias Z', N', opuestas, en la dirección del astro atrayente, y dos depresiones p p' en el sentido transversal.

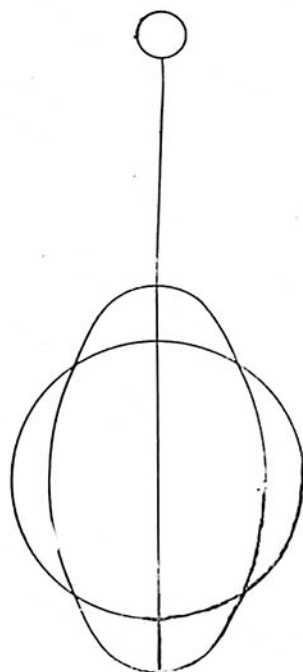


Fig. 16

A primera vista se experimenta dificultad en admitir que la atracción lunar produzca del lado opuesto al astro una separación del agua que más bien parece debida a una repulsión, cuando debía esperarse una depresión máxima. Esa dificultad proviene de creer que la tierra se halla inmóvil y que la atracción se ejerce sólo sobre las aguas. Mas observando que el planeta está aislado en el espacio y libre frente a las fuerzas atractivas

para recibir su acción, y cede a ella, en el acto desaparecerá todo escrúpulo para aceptar el efecto descrito y atribuirle los hechos que ocurren en realidad.

La diferencia de atracción de los astros, sobre la tierra y sobre el mar, a la cual se debe la deformación de la superficie oceánica se llama **fuerza generadora de la marea**. Un cálculo muy sencillo indica que esta fuerza, o atracción diferencial, varía en razón inversa del cubo o tercera potencia de la distancia del astro atrayente y que es sensiblemente igual en la región de la tierra vuelta hacia él que en la región opuesta.

La figura 17 que representa una sección de la tierra por un plano que pasa por su centro y por el de la luna L, muestra el efecto y el estado de la marea en diversas zonas del globo en

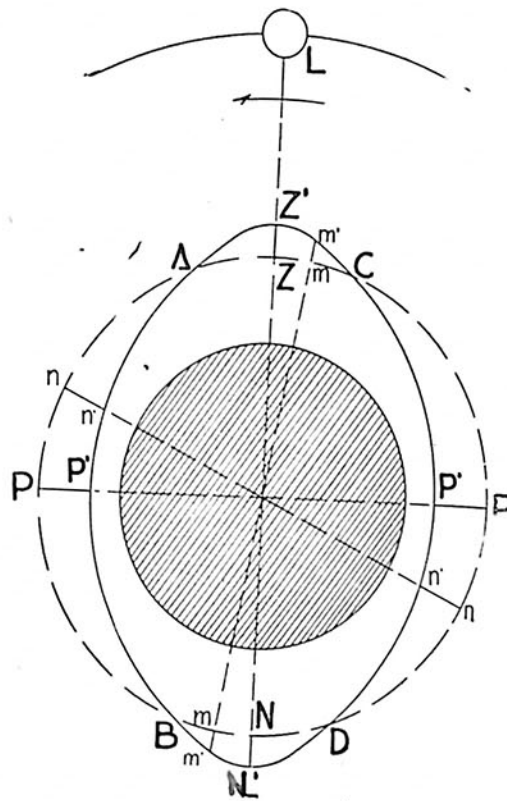
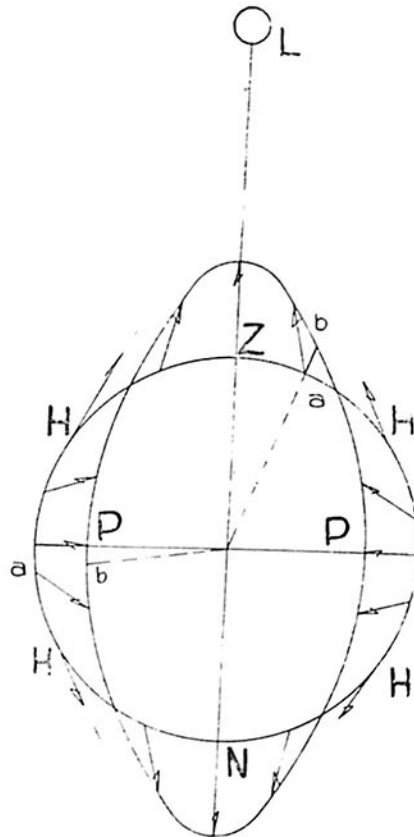


Fig. 17

un instante determinado. El círculo de puntos es la sección de la superficie de equilibrio o el nivel que guardaría el mar bajo la sola acción de la pesantez si no existiera la atracción lunar, y la elipse de línea continua, la sección de la misma superficie deformada por esa acción. La distancia $m m'$, $n n'$, entre una y

otra de esas curvas contada según la vertical, mide en cada punto la altura de la marea. En las regiones AZC y BND de la esfera, se está verificando en el momento considerado, la creciente de la marea o el flujo, y en las zonas APB y CPD, la menguante o el reflujo. Los puntos Z y N que tienen la luna respectivamente en el zenit y en el nadir, están al mismo tiempo en la pleamar o altura máxima de la marea, y en bajamar o mínima marea, los puntos del círculo representados en P P. Como el elipsoide líquido levantado por la marea es una superficie de revolución, ofrece en todas sus secciones por planos que pasan por el eje NZ, la misma apariencia que muestra la figura en la que las líneas como P P, R R, representan círculos en cuyos puntos todos se muestran el mismo estado y las mismas fases de la marea.

Siendo la fuerza generadora de la marea la atracción diferencial de la luna sobre la tierra y sobre el mar, se ejerce en diferente dirección en cada punto del océano. En la figura 18



F.g. 18

las ságitas señalan esquemáticamente esas direcciones y su efecto deformador. Se ve que desde los puntos Z y N que tienen la luna en el zenit y en el nadir respectivamente, esa acción es

vertical hacia arriba y que al alejarse de esos puntos, la fuerza se separa gradualmente de esa dirección y, después de tomar todas las inclinaciones, queda, al fin, invertida, o vertical hacia abajo, en los puntos P P. de máxima depresión. En los puntos H H. la acción es puramente horizontal. No debemos confundir las direcciones oblicuas de la fuerza deformadora con las direcciones verticales, como **a b**, en que se mide en cada punto la **altura** de la marea.

En el movimiento diurno de la luna en torno de la tierra, que dura 24 horas y 50 minutos, la línea de atracción va girando con el astro, y con él la prominencia líquida que esa fuerza va levantando en su trayecto, con sus cúspides Z y N, sus puntos deprimidos P P y todos los accidentes de su figura, produciendo con ello en toda la tierra, todas las fases de la marea en el tiempo que transcurre entre dos pasos sucesivos del satélite, uno superior y otro inferior (invisible) por cada meridiano, intervalo de 12 horas, 25 minutos.

En cuanto a los puntos que, aunque cubiertos por la protuberancia oceánica, no están bajo su cúspide por no hallarse la luna en su zenit, la marea sigue la marcha general con las fases descritas hasta aquí, pero en escala diferente. Veamos cómo.

En la figura 17 hemos representado la sección del globo por el plano del ecuador. El círculo exterior representa en ella el trayecto diurno de la luna y la línea recta L L', el meridiano visto de perfil. El eje del elipsoide líquido se mueve en el plano del dibujo siguiendo a la luna, en el sentido de la flecha. La figura 19 es una sección por el plano del meridiano. El círculo exterior representa este plano. El ecuador está figurado de perfil por la recta E E'. El eje del elipsoide se mueve en este círculo perpendicularmente al plano del dibujo, pasando de atrás del papel hacia adelante. En el punto **b** situado bajo la línea Z, la altura de la pleamar es la mayor, **b p**. En los puntos **a** y **c**. que por tener latitudes EA y EC diferentes de cero, no ven el astro en su zenit, la pleamar alcanza alturas **a h** y **c k** máximas, pero menores que **b p**, y tanto menores cuanto más lejos de su zenit pasa la luna en su culminación.

Si para presentar a la vista simultáneamente las dos prominencias y las depresiones del elipsoide, desarrollamos en línea recta H H, el círculo Z P N P de la figura 16 y sobre esa línea tomamos las alturas del mar en los puntos correspondientes,

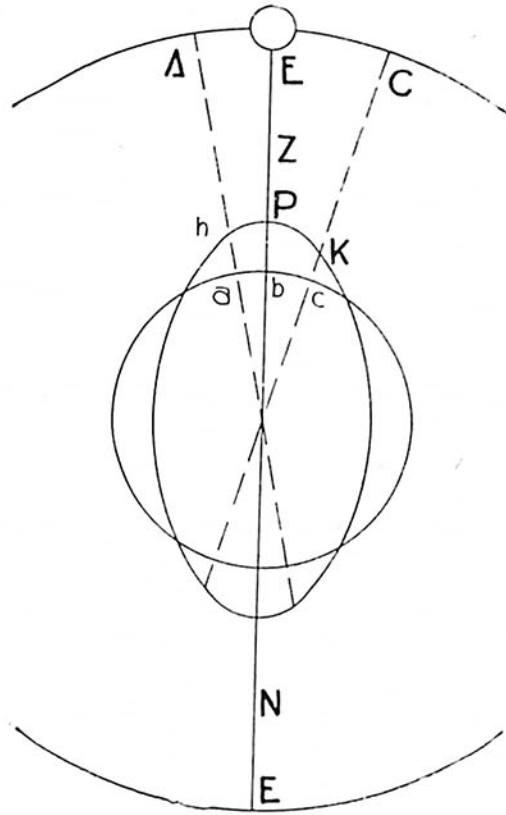


Fig. 19

tendremos la figura 20 que nos muestra la marea como una ondulación gigantesca, como una oscilación en sentido vertical que en cada paraje de la mar, levanta y abate alternativamente el agua en una onda cuya longitud cubre un hemisferio de la tierra y, que serena, sin ruido, sin viento que la impela, sin choque, sin espuma, pasa imponente y majestuosa, dos veces por día, sobre la inmensa extensión de los océanos.

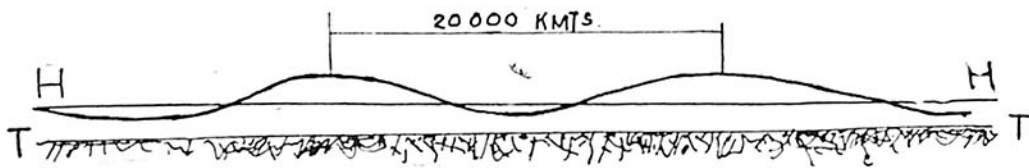


Fig. 20

III

Teoría del Equilibrio.

Esta es en toda su sencillez teórica el fenómeno de la marea en los supuestos en que nos hemos colocado provisionalmente, a

saber: la tierra cubierta totalmente por el agua; acción solamente de la luna; y este astro en el ecuador; pero abandonándolos ya para entrar gradualmente en la realidad física del fenómeno, consideraremos varias circunstancias que modifican, y a veces en alto grado, sus efectos y sus formas. Observemos desde luego, que la luna, por virtud de su movimiento orbitario, cambia continuamente de declinación y el eje del elipsoide que levanta en el océano no permanece en el ecuador donde hasta aquí lo hemos supuesto. En la figura 21 en que la línea $E E$ representa ese círculo máximo, las cúspides $P P'$, de la onda se encuentran, una en el hemisferio norte y la otra en el hemisferio sur. En un punto de la tierra, por ejemplo a , cuyo zenit se encuentra a una distancia $L A$, de la luna, la pleamar tiene una altura ah , en la vertical Oa de ese punto. Cuando después de 12 horas 25 minutos la tierra, en su rotación diurna, ha girado muy próximamente 180° , el punto a se ha transportado en su paralelo, a a' , posición desimétrica de a con respecto al eje $L L'$. Su zenit A' se encuentra, por lo tanto, a una distancia $A'L'$ de la vertical de la luna LL' , menor que AL . Por consiguiente, la pleamar que, según lo explicado arriba, página 79 es tanto mayor cuanto menor es

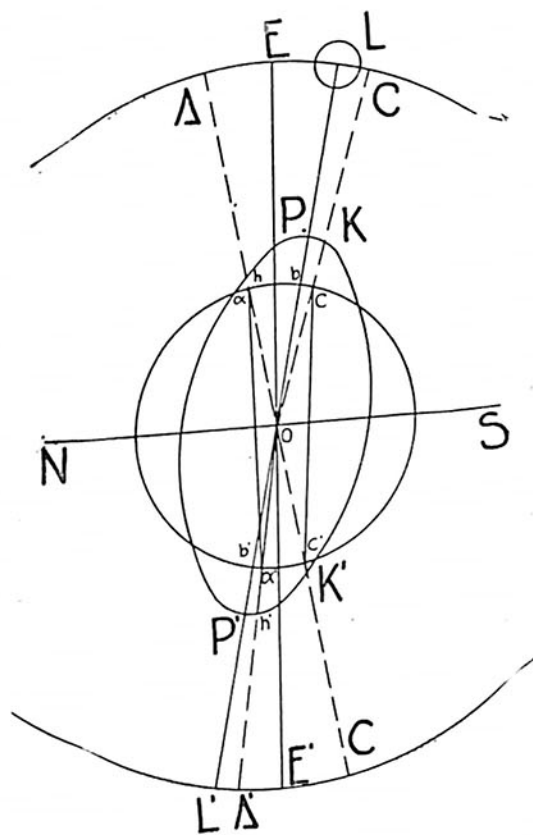


Fig. 21

la distancia del astro al zenit del lugar, será $a'h'$, mayor que ah . Lo que indica y explica la diferencia de altura que se observa en cada punto entre dos pleamares sucesivas. Esta diferencia, llamada **desigualdad diurna**, depende, como se ve, de la declinación de la luna y de la latitud del lugar. Desaparece cuando la luna se halla en el ecuador.

Consideremos en seguida, la presencia del sol cuyo influjo es muy sensible y se combina con la acción de la luna, unas veces para corroborarla, otras, al contrario, para debilitarla.

En efecto, siendo la atracción diferencial sobre la tierra y sobre el mar, que hemos llamado fuerza generadora de la marea, proporcional a la masa del cuerpo que la ejerce y variando en razón inversa del cubo de su distancia al cuerpo atraído, el sol, por razón de su masa, 25.500,000 veces la de la luna, producirá una marea como la de este astro multiplicada por dicho número; y por razón de su distancia, 389 veces mayor, su efecto será el del satélite dividido por el cubo de 389 ó 58.864,000. La fuerza

generadora de la marea solar será pues, $\frac{25500}{58864} = 0.432$, o un poco menor que la mitad de la de la luna.

Cuando los dos astros se encuentran del mismo lado de la tierra sus influencias se ejercen en el mismo sentido, sus fuerzas generadoras se suman, sus efectos se sobreponen y la marea resultante es mayor que la debida solamente a una de las dos.

La sobreposición es completa cuando acontece que esos cuerpos están en línea con la tierra: del mismo lado, como en la conjunción, o, como en el plenilunio, en posiciones diametralmente opuestas. En estos casos, si se representa por 1 la marea lunar aislada, la acción conjunta, o marea lunisolar, quedará representada por $1 + 0.43$ ó 1.43 . Si, como ocurre en las fases creciente y menguante de la luna, su dirección está en cruz con la del sol, la pleamar producida por uno de los astros coincide con la bajamar provocada por el otro, sus efectos son contrarios y ocasionan una marea mínima que se representará por $1 - 0.43 = 0.57$. Estos números nos dicen que la marea máxima o marea de zizigias es $\frac{1.43}{0.57} = 2.58$ o un poquito mayor que el doble de la marea mínima, o marea de cuadraturas: desigualdad bastante perceptible.

Cuando la luna se halla en su perigeo, o a su distancia más corta de la tierra, su atracción es más intensa y la marea se aumenta hasta en una quinta parte, aumento que se eleva a su máximo si esa posición lunar ocurre a principios de enero, época en que el sol también se encuentra a su mayor proximidad de nuestro globo.

La marea se presenta con modos y formas muy variadas en los diversos puntos de la costa, y en cada uno de ellos ofrece peculiaridades características y que se refieren principalmente: al momento u hora de la pleamar, a la extensión de la marea, o diferencia de altura del agua en la alta y la bajamar, y al modo o ley que sigue el nivel del líquido en su oscilación.

Ley que puede ponerse a la vista por medio de las curvas llamadas de "marea" que se construyen tomando como abscisas las horas y como ordenadas las alturas que alcanza el agua en los instantes respectivos. Las horas corresponden al día lunar, o sea, al intervalo entre dos culminaciones de la luna, y es de 24 horas y 50.4 minutos del día solar. Las alturas se cuentan desde un nivel que la observación ha encontrado sensiblemente invariable y se llama **nivel medio del mar**. Se encuentra figura 22, en la línea N, equidistante del punto medio C, entre los niveles A_1 , y A_2 de dos pleamares consecutivas, y el nivel B, de la bajamar intermedia.

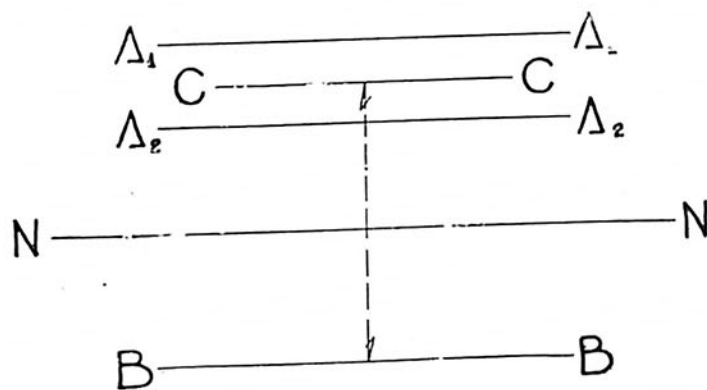


Fig. 22

Esta definición del nivel medio del mar, resultado de la observación continuada durante largos períodos de tiempo, parece la más adecuada para fijar en la práctica el origen de las alturas de la marea en cada localidad. El nivel definido de este modo se llama **nivel medio geográfico o local**. El verdadero nivel oceá-

nico es la superficie equipotencial extendida en todo el globo y no perturbada por el viento, las olas o la marea. Se llama **nivel geodésico** y se determina con ayuda del nivel de burbuja y por medio del cálculo matemático.

Siendo tan varias en especie y tan diferentes en intensidad las causas de alteración del nivel del agua en los diversos puntos de la costa, los dos niveles son en general distintos, aunque en algunos lugares coinciden. Por ser pequeña su diferencia y casi siempre del mismo orden de magnitud que los errores a que está expuesta la delicada determinación del nivel geodésico, sin serio inconveniente se emplea el nivel geográfico en las investigaciones de la Geofísica.

Las figuras 23 y 24 muestran las curvas representativas de las mareas de un mismo puerto en época distinta. Se han cons-

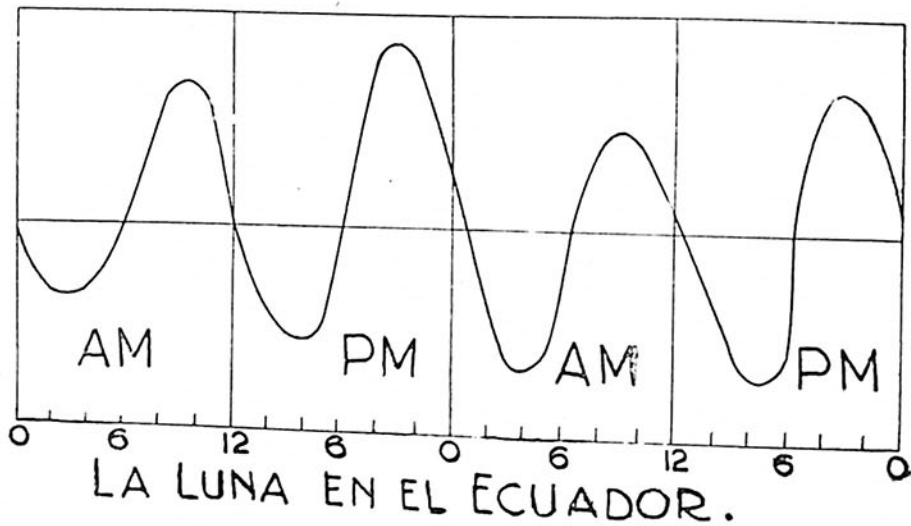


Fig. 23

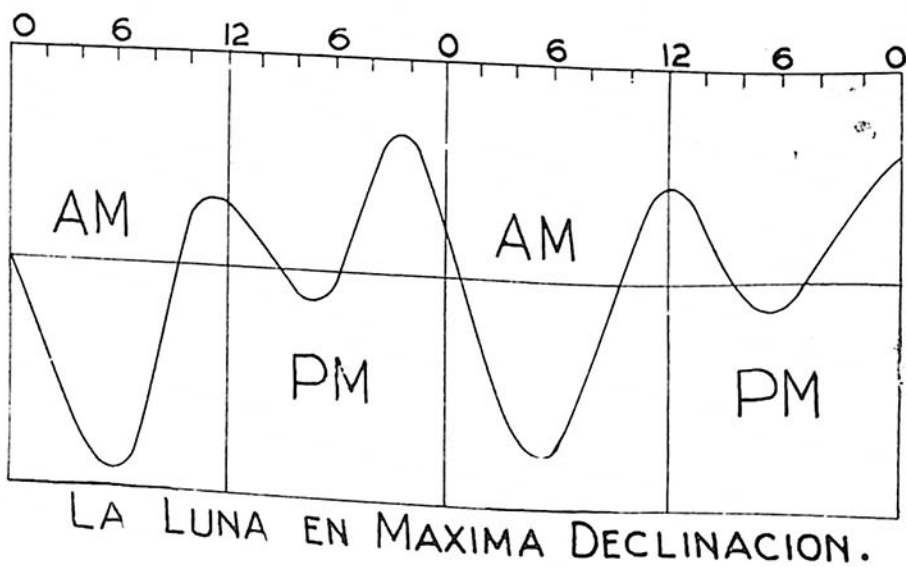


Fig. 24

truído para dos días consecutivos a fin de que permitan notar la variación que, de uno al otro, presenta ese fenómeno. En ellas se ha tomado como origen de las horas la media noche.

La variación en las fuerzas generadoras de la marea se debe, según lo explicado arriba, 1º, a las diversas posiciones del satélite con respecto al sol, o sea, a sus fases; 2º, a la variación periódica de su distancia a la tierra; y 3º, al cambio rítmico de su declinación. Los efectos de esas fuerzas se manifiestan en la variación que, de un día al siguiente ofrece la altura de la marea, y aparece en las curvas representativas de su marcha. Se nota en ellas con claridad la elevación y la depresión del agua, máximas en las pleamares y en las bajamares en el tiempo de las zizigias, y mínimas en el de las cuadraturas; y el aumento y la disminución semejante hacia las épocas respectivamente, del perigeo y del apogeo. La llamada desigualdad diurna (pág. 82) debida a la declinación variable de la luna, se descubre en las curvas observando y comparando las alturas de pleamar y de bajamar de dos mareas consecutivas, esto es, la marea de la mañana y la de la tarde. Cuando el astro se encuentra en el ecuador, que es el caso de la figura 23 no se percibe diferencia sensible entre las alturas, pero aparece más y más marcada al paso que la luna se aleja de ese plano, y llega a su máximo medio mes más tarde, cuando el astro alcanza su mayor declinación. Muestra claramente este caso la figura 24.

En las costas y en los puertos donde la altura de las mareas y sus variaciones son sensibles, se usa llamar como sigue sus diversos estados.

Aguas menores, las mareas diarias comunes.

Aguas llenas, la pleamar.

Aguas mayores, las más grandes mareas de los equinoccios.

Aguas vivas, las crecientes del mar hacia el tiempo de los equinoccios o de los zizigias, esto es, del novilunio o del plenilunio.

Aguas muertas, las mareas menores de las cuadraturas de la luna, sean, el cuarto creciente y el cuarto menguante.

Se llama **adámico** el depósito de tierra que abandonan las aguas del mar al tiempo del reflujo.

La descripción y la explicación de los fenómenos de la marea que hemos expuesto hasta aquí constituyen en lo esencial la teo-

ría de Newton llamada del **equilibrio** porque sólo lleva en cuenta las fuerzas atractivas de los astros y la pesantez terrestre, y considera la marea como efecto del equilibrio entre esas acciones. Aunque define y explica bien el carácter general de los fenómenos que en realidad ocurren, aparece notablemente falsa en sus detalles y particularidades e incapaz, por tanto, de aplicarse a su predicción exacta. Según esta teoría, la pleamar debía producirse en cada punto en el momento de la culminación de los astros atrayentes, y se observa, sin embargo, que entre ese fenómeno y la altura máxima del agua transcurre un tiempo variable que puede durar hasta producir una inversión en la marea, esto es, hasta ocasionar que a la hora en que predice, y se espera, la pleamar se verifique la bajamar.

IV

Teoría Dinámica.

La teoría más exacta, y de conformidad casi completa con los hechos, debida al alto genio de Laplace, lleva en cuenta la persistencia y la continuación de las fuerzas atractivas y la obra del tiempo sobre su efecto, la influencia de la profundidad del agua y las leyes de la undulación. Lleva el nombre de teoría **dinámica** y puede exponerse en grado y forma elementales como sigue.

Admitamos por el momento, que la masa líquida se reduce, y se concentra en un canal que circunde la tierra en su ecuador, y consideremos solamente la acción aislada del sol suponiendo que su movimiento diurno se verifica en el ecuador celeste.

Se demuestra matemáticamente que el período de la undulación oceánica, esto es, el tiempo que transcurre entre el paso de dos cúspides sucesivas de la onda por un mismo punto, aumenta cuando disminuye la profundidad. El cálculo descubre que hay una hondura crítica de 22.13 kilómetros que da a la onda una velocidad de propagación de 1678 kilómetros por hora con la cual recorrería en 24 horas los 40272 kilómetros que tiene la circunferencia del ecuador terrestre. Entonces, si nuestro canal tuviera esa profundidad, el eje y las cúspides de la onda que el sol levanta acompañarían al astro en su carrera diurna, y pun-

tual y regularmente, se verificaría cada doce horas, a medio día en un punto, y a media noche en sus antípodas, una pleamar. Con una profundidad mayor de 22.13 kilómetros la onda sería más rápida y emplearía menos de 24 horas en la vuelta de la tierra, caminaría adelante del sol y la pleamar tendría lugar antes del paso meridiano del astro. Con menos hondura, el período sería más largo, la marcha de la onda, más lenta que la del sol, y la pleamar se observaría después de la hora de la culminación solar.

En todos los casos, como uno de los vértices del elipsoide está en un sitio y el otro en sus antípodas, la distancia que separa esos puntos, o las cúspide de dos ondas sucesivas, es la media circunferencia del ecuador o sea 20176 kilómetros, pero el período es de 12 horas, o de mayor o menor duración según que el canal tenga 22.13 kilómetros o mayor o menor profundidad.

Supongamos ahora, que inmediatamente después de levantar una masa líquida, cesa de ejercerse la atracción del sol. Esta masa, por efecto de su peso que la hace descender, y de su inercia que la obliga a continuar este movimiento hacia abajo de su nivel primitivo, se pone a oscilar en sentido vertical y a transmitir el desequilibrio a las masas vecinas generando de este modo, una ondulación cuyo período, según acabamos de explicar, depende de la profundidad del canal. Esta onda es una onda **libre** porque una vez producida, avanzaría libre de toda acción exterior y, por lo tanto, indefinidamente, a no ser por la inevitable resistencia del rozamiento. Su propagación produciría todos los fenómenos de la marea que hemos descrito.

Pero he aquí que la atracción solar no cesa y a cada instante levanta a su paso nueva onda que avanza como si fuera libre, y se acumula a las otras tendiendo a formar una prominencia líquida sin cesar creciente. El análisis matemático indica que este crecimiento no es indefinido porque la velocidad no depende exclusivamente de la profundidad. La onda producida de este modo y su período son **forzados**.

Si por virtud de la persistencia continua de la acción solar, la onda libre de nuestro supuesto se convierte en onda forzada, esa acción persistente es una fuerza perturbadora de la oscilación o de la ondulación libre. Como la atracción se ejerce en cada punto y en sus antípodas cuando el sol pasa por su zenit, esto es, cada 12 horas, la fuerza perturbadora es periódica y su

período tiene esa duración. Como depende solamente del movimiento diurno del astro, se conserva el mismo cualquiera que sea la profundidad del canal. Tenemos, pues, en presencia este período constante de 12 horas de la onda perturbadora y el período variable de la onda libre, igual, menor o mayor de 12 horas, según que la profundidad del canal sea igual, mayor o menor que la hondura crítica de 12.13 kilómetros.

Para explicar mejor el modo y el efecto de la perturbación en cada uno de estos casos, observemos con el distinguido matemático inglés G. H. Darwin, lo que ocurre cuando se mueve horizontalmente o se hace oscilar con la mano el punto de suspensión de un péndulo.

El movimiento del péndulo es una oscilación libre o natural cuyo período, como se sabe, depende de su longitud.

El movimiento que se dé al punto de suspensión es perturbador de esa oscilación y su período puede ser igual, mayor o menor que el período de la oscilación libre.

Si es igual, la oscilación natural y la perturbadora coinciden, y a cada impulso de la mano, la amplitud de la primera va aumentando sin cesar. Análogo es el caso en que la profundidad del canal es de 22.13 kilómetros. La onda sigue exactamente al sol, la pleamar, en un punto y en sus antípodas, coincide con el paso del astro por el zenit, y la onda tiende incesantemente a crecer.

Si la mano oscila con más lentitud que el péndulo, esto es, si la fuerza perturbadora es de período mayor que el de la oscilación libre, se observa que ambos movimientos concuerdan en sentido y que uno y otro móvil llegan juntos a sus posiciones extremas derecha e izquierda. Esta concordancia de las oscilaciones natural y perturbadora, se observa en la marea cuando el canal tiene profundidad mayor de 22.13 kilómetros. Entonces, cuando la fuerza generadora tiende a producir pleamar, se verifica la pleamar, esto es, las cúspides de la onda pasan por un punto y por sus antípodas cuando el sol se halla en su zenit. Se verifica la **marea directa**.

Pero si el vaivén de la mano es más rápido que el del péndulo, o la acción perturbadora, de menor período que la oscilación natural, las excursiones de los dos móviles son de sentido opuesto y sus posiciones extremas quedan invertidas, esto es,

cuando uno llega al límite de la derecha, el otro se halla en el de la izquierda. Si nuestro canal tiene menos de 22.13 kilómetros de profundidad la onda libre es lenta con respecto a la onda perturbadora, y cuando la causa de la marea o de la onda libre, tiende a producir pleamar, se verifica la bajamar, y el contrario. El mar estará deprimido en los puntos que tienen el sol en el zenit y en sus antípodas. Se dice que la marea es **inversa**.

Como los océanos no llegan a la profundidad crítica de 22.13 kilómetros, las mareas, al menos en las regiones ecuatoriales, serán en general inversas.

Por ser el movimiento diurno del sol de 24 horas, ha sido más cómodo y sencillo considerar su sola acción, pero se comprende que todos los razonamientos que preceden son aplicables a la luna, cuya rotación dura 24 horas y 50 minutos, período al cual corresponde una profundidad crítica de 20.8 kilómetros.

Agregando las acciones de los dos astros que, según se ha visto, pueden ser, ya coadyuvantes, ya antagónicas, se obtendrá una variedad de casos en que las mareas se presentarán inversas o directas.

Hasta aquí hemos considerado el movimiento en un canal situado en el ecuador terrestre. Veamos ahora lo que ocurriría en otro canal que ciñerá el globo en otro paralelo de latitud, el de 60° por ejemplo. Se sabe que el radio de este círculo y su circunferencia son de una extensión igual a la mitad de la que tienen las líneas correspondientes del ecuador, por lo cual la distancia que separa en ese paralelo, las cúspides diametralmente opuestas de una onda es sólo de 20136 kilómetros, mitad de la circunferencia ecuatorial. Si, pues, ambos canales, el ecuatorial y el de 60° , tienen la misma profundidad y, a causa de ello, una onda libre se propaga en uno y otro con igual velocidad, la que se levanta a 60° de latitud empleará en recorrer la distancia que media entre esas dos cúspides opuestas, un intervalo de tiempo mitad del que, en ello, invertiría la onda libre nacida en el ecuador que, según vimos hace poco, dada la profundidad de los océanos, es menor de 12 horas. Entonces, como la onda, o influencia perturbadora, obedece a la marcha diurna del sol y es siempre de 12 horas, la onda libre a 60° de latitud, tiene un período menor que ella; luego, según lo explicado, las mareas en esa región oceánica serán directas. Avanzando en nuestro estu-

dio a latitudes superiores a 60° encontraremos canales en paralelos de menor radio y, por tanto, ondas libres, de período siempre decreciente y menor que el de 12 horas, de la onda perturbadora, a causa de la profundidad de esos mares menor que la crítica. En los océanos polares la marea será, pues, inversa.

Bajando a latitudes intermedias entre 60° y el ecuador, encontraremos canales de extensión mayor y mayor, y por tanto, siempre a igualdad de profundidades, períodos de onda libre creciente, desde menores hasta mayores de 12 horas. Debemos, pues, pasar por alguna región en que ese período tenga exactamente esa duración, y nos hallaremos en el caso primeramente citado, página 87 en que las pleamares coinciden con las culminaciones del astro atrayente y tienden a producir una onda acumulada de enorme altura.

Suprimamos ahora los bordes que limitan los canales imaginarios en que el agua corre sólo de oriente a poniente (según el movimiento diurno del sol) y contemplemos el restablecimiento natural de la unidad y continuidad del mar. Al formarse la onda o el elipsoide de marea, el agua afluye a su eje de todas las regiones en contorno, y tiene en todos los puntos movimientos del norte y del sur. Las masas de agua que, participando de la rotación diurna de la tierra hacia el oriente, tienen la velocidad de los paralelos en que yacían, al correr hacia el ecuador conservan esa velocidad y quedan atrás, o al occidente de las masas que encuentran al sur, dotadas de mayor velocidad, y en su movimiento relativo al de éstas, se inclinan hacia ese rumbo poniente. Lo contrario acontece cuando la corriente se dirige al norte. (1)

El movimiento resultante de estas corrientes de tan diversas direcciones y velocidades debe ser vortiginoso y sólo puede determinarse por el análisis matemático. La inexistencia de los bordes ficticios que supusimos retenían el agua en los canales es una de las causas que evitan la acumulación y el aumento indefinido en la altura de las ondas que se forman cuando son iguales el período de la onda libre y el de la acción perturbadora. En este caso, el cálculo indica que hay una latitud crítica donde el agua

(1) Esta es la misma desviación que se verifica en las masas de aire que forman los vientos alisios. Hay, sin embargo, esta diferencia: en los vientos, la corriente viene siempre de los polos hacia el ecuador y tanto en el hemisferio boreal como en el austral, la desviación es hacia el oeste; en el mar, el agua llega, en uno y otro hemisferio, tanto del norte como del sur, porque afluye de todos los rumbos hacia el punto donde se forma la cúspide de la onda, o la pleamar.

no se levanta, lo cual no significa que en ese lugar no se produzca la marea, sino que se manifiesta por el aflujo del agua procedente de los diversos rumbos, en corriente permanente horizontal.

Pero el mar no cubre completa ni uniformemente la superficie del globo. Su continuidad está interrumpida por los continentes que limitan y circundan los océanos y los mares secundarios y por los archipiélagos constituídos por estrechos y canales más o menos amplios y sinuosos. Su profundidad muéstrase muy varia y sin obediencia a ley alguna conocida o determinable.

Estos obstáculos oponen muy efectiva resistencia al movimiento del agua y a la propagación regular de las ondas de marea y ocasionan retardos en su marcha y desviaciones de su dirección, a lo cual contribuyen eficazmente la diversidad de honduras y el rozamiento del agua con el fondo en los parajes donde esas profundidades son poco considerables.

La hora de la pleamar, su altura y todos los fenómenos que acompañan a la llegada de la marea no pueden, pues, realizarse en cada punto del globo con la exactitud y puntualidad que predice la teoría. Dependen en mucha parte de las condiciones de cada lugar y sólo la observación puede determinarlos.

V

Tipos de mareas.

El análisis matemático del problema, en extremo complicado, de las mareas ha descubierto que las fuerzas generadoras se pueden clasificar como sigue: las que obran con período aproximadamente de medio día y son las más poderosas. Se llaman **semi-diurnas**. Las que se manifiestan con período de un día y poseen menos intensidad. Se llaman **diurnas**; y las que tienen un período quincenal y muestran muy débil acción. Se llaman de **período largo**.

Dado el origen astronómico de estas fuerzas, la acción de las semidiurnas es mayor en el ecuador y de menor intensidad en los polos; y las diurnas, al contrario, son más fuertes en los polos que en el ecuador. Pero a causa de la grande influencia que las condiciones y los accidentes locales ejercen sobre la libre acción

de estas fuerzas, sus efectos no se realizan en los diversos mares en la forma que, según indica la teoría, corresponde a la latitud.

El efecto resultante de todas esas influencias es la realización, en cada punto de la costa, de un modo particular de marea determinado por la clase de la fuerza generadora que en esa región predomina. Así pues, las formas de la marea que en general se observan en las costas son de los tres tipos siguientes:

Primero, el tipo **semidiurno** en que se realiza una oscilación completa del agua en medio día, de manera que en el espacio de 24 horas y 50 minutos se registran dos mareas, esto es, dos pleamares y dos bajamares. Este tipo está representado en la figura 25. Muestra entre las mareas de la mañana y las de la tarde una desigualdad, siempre muy ligera, entre las alturas que alcanza el agua en las dos pleamares y en las dos bajamares.

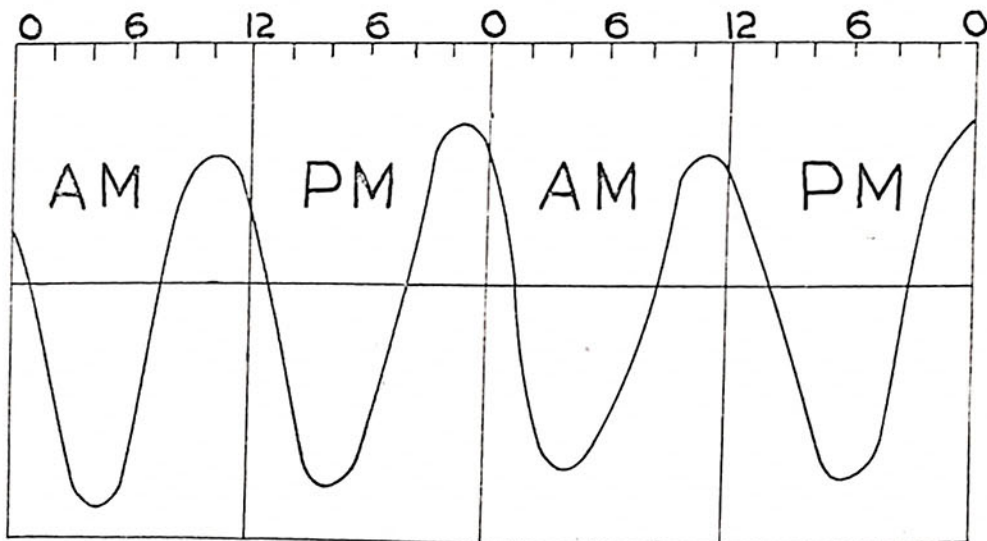


Fig. 25

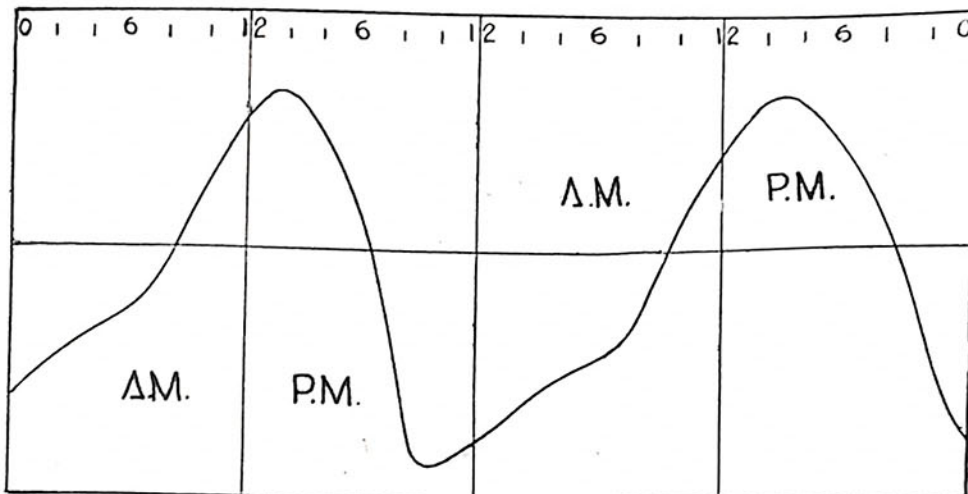


Fig. 26

Segundo, el tipo **diurno**, figura 26, en que en el transcurso de un día ocurre una sola oscilación o ciclo, esto es, una única pleamar y una sola bajamar.

Tercero, el tipo **mixto** que, semejante al semidiurno porque consiste en dos oscilaciones en el día, pero diferente de él porque la desigualdad entre la marea de la mañana y de la tarde no es ligera como en aquél, sino muy marcada, y se presenta como una diferencia en la altura que alcanza el agua, ya solamente en las pleamares **a a a**, (figura 27) ya únicamente en las bajamares **b b b**, (figura 28) y otras veces (figura 29), en ambas fases extremas de las mareas.

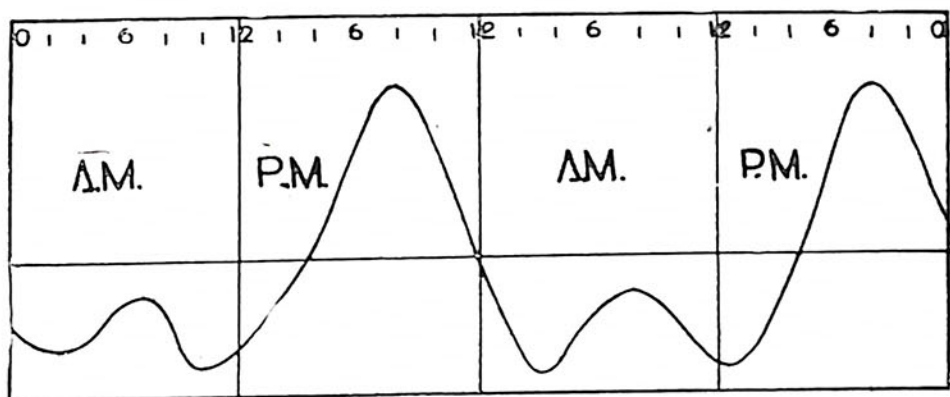


Fig. 27

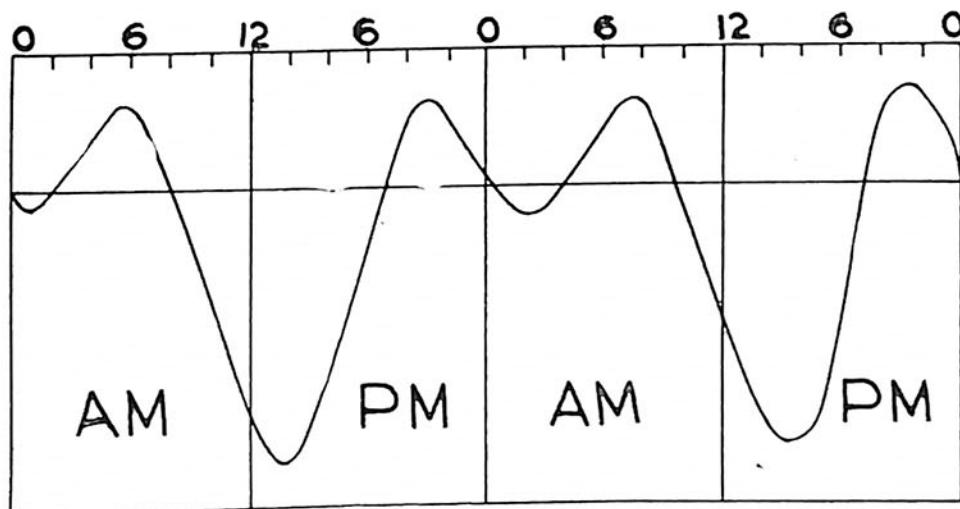


Fig. 28

La observación no ha encontrado ni ley ni regla para la distribución de estos tipos de marea en los océanos, ni su relación con la latitud. Sólo se ve que el tipo semidiurno reina de preferencia en el Atlántico, el semidiurno en el Golfo de México, en el mar de China y otros semejantes, y el tipo mixto en los océanos Indico y Pacífico.

El tipo mixto parece ser efecto de la interferencia de las mareas diurna y semidiurna, o resultante de las acciones simultáneas de las fuerzas generadoras de una y otra. Veamos como. La curva A de la figura 30 representa la marea diurna, y la curva B, la marea semidiurna en el caso en que ambas tengan **igual amplitud** y sus pleamares ocurran a la misma hora. Su efecto combinado se obtendrá gráficamente en la suma algebraica de las ordenadas de los puntos correspondientes (horas simultáneas) de una y otra marea. Resultará de esta operación la curva C, que muestra el carácter del tipo mixto con desigualdad solamente en las alturas de pleamar.

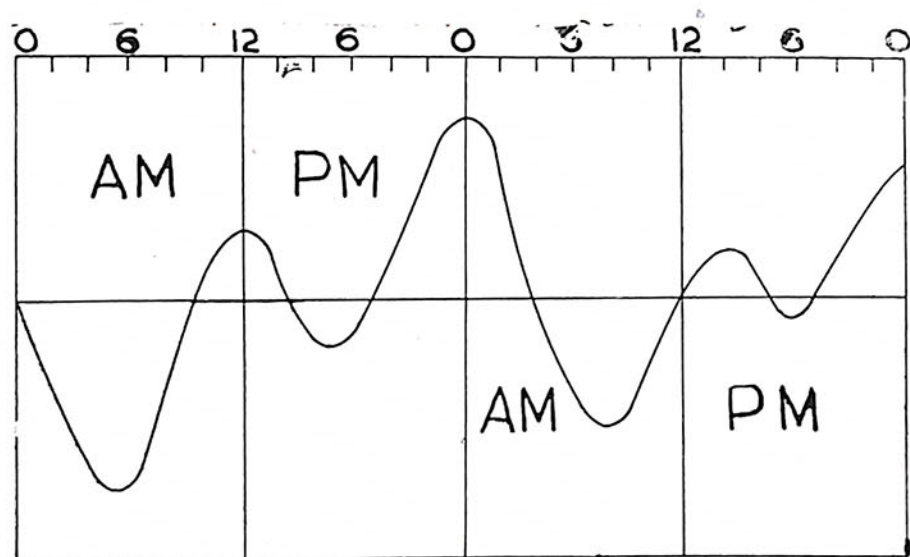


Fig. 29

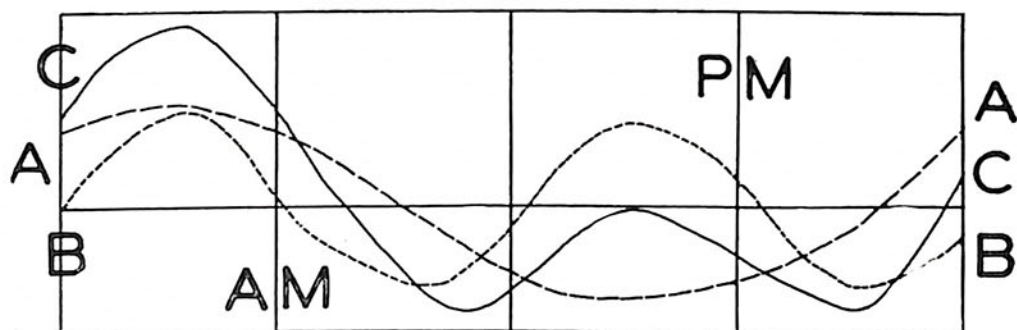


Fig. 30

Si son las bajamares y no las pleamares de las mareas componentes las que ocurren al mismo tiempo, se obtendrá por el mismo procedimiento de sobreposición, figura 31, la curva representativa del tipo mixto de alturas, desiguales solamente en la bajamar.

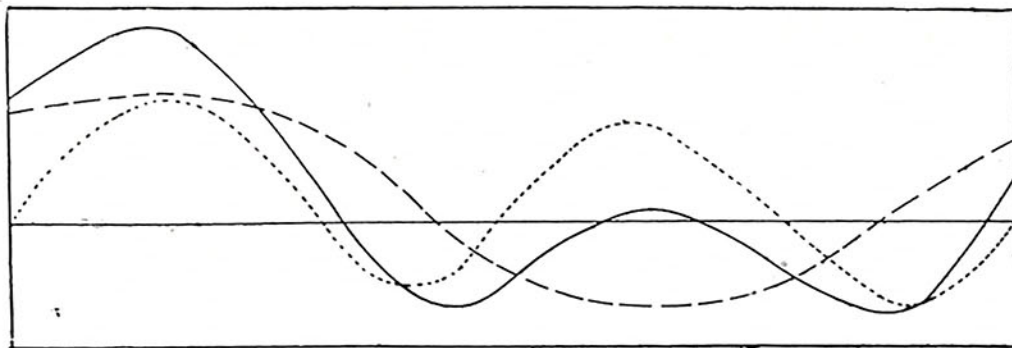


Fig. 31

Si, siendo siempre de igual amplitud, las dos mareas diurna y semidiurna, sus curvas representativas pasan en el mismo instante por el nivel medio del mar $M M_1$ figura 32, su combina-

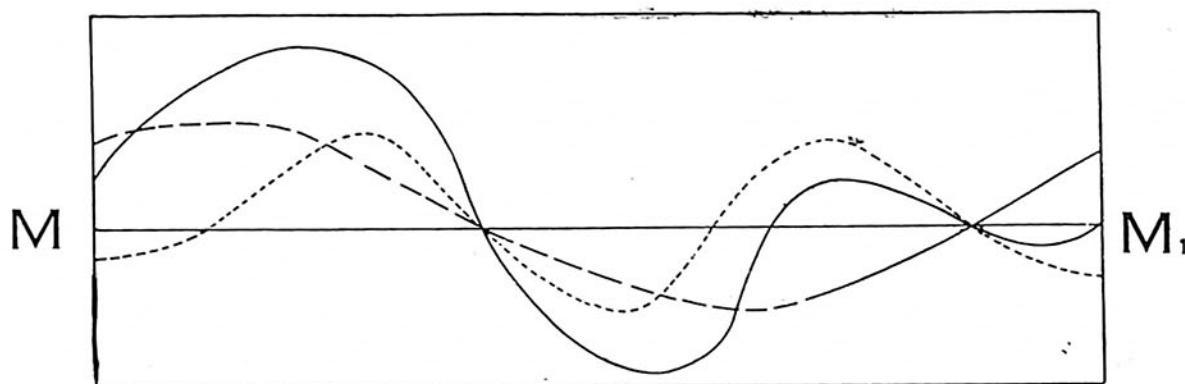


Fig. 32

ción geométrica producirá la curva del tipo mixto con desigualdad de altura, tanto en las altas como en las bajas mareas.

Si las dos mareas componentes no son de la misma amplitud, darán lugar, por su combinación a la múltiple variedad de formas con que se presenta el tipo mixto de la marea.

VI

Propagación de las mareas.

Conforme a la teoría y con las observaciones de las horas de la pleamar practicadas en muchos lugares de la tierra, numerosas en las costas del Atlántico, pero escasas en los otros mares y nulas en las regiones de alta mar, los astrónomos Whewell y

Airy construyeron cartas aproximadas que, en conjunto, pudieran mostrar cómo se propaga en los océanos la onda de marea. Con líneas en cuyos puntos todos se verifica simultáneamente la pleamar a horas sucesivas del meridiano de Greenwich, (1) indican la situación que en esos momentos guarda la cúspide de la onda y su avance de hora en hora. La separación de las curvas contiguas da, pues, idea del camino que recorre la onda en ese intervalo de tiempo y, por tanto, de su velocidad.

VII

Teoría de las Ondas Progresivas.

El pequeño mapa que se ve en la figura 33 representa la marcha de las ondas de la marea de zizigias, según la siguiente explicación propuesta por Whewell que ha llevado en cuenta el efecto que, para modificar la marcha teórica de la marea, obra

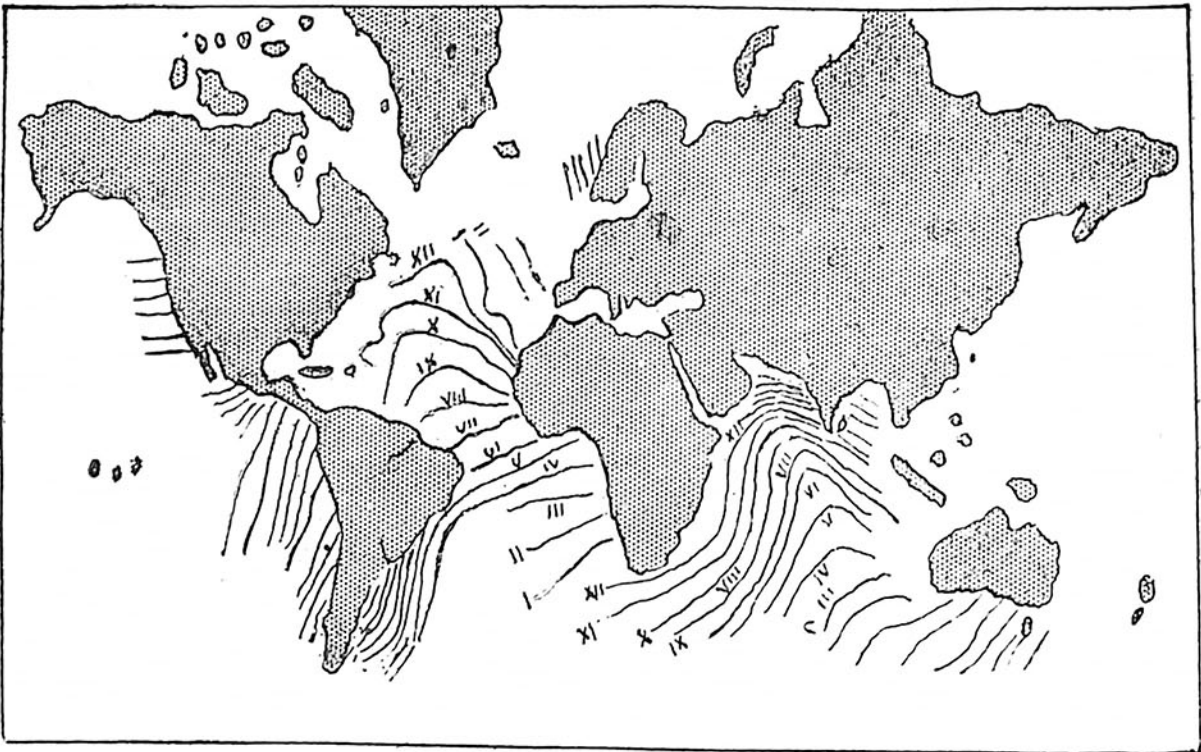


Fig. 33

(1) En inglés llaman estas curvas, "cotidales", de *tide* marea en ese idioma: nombre intraducible con una sola voz castellana. Nos resistimos a conservar esa palabra disonante para no contribuir a la contaminación, que se está haciendo, de nuestra magnífica lengua con aquel idioma. Preferimos la expresión más larga, pero castellana, de *curvas de igual marea*.

la interrupción por las masas continentales, de la continuidad y la unidad del mar.

Consideremos la onda cuya cúspide (marcada XII en el mapa), se encuentra a las doce (de Greenwich) en el norte de Australia, en Sumatra, en Ceilán y, siguiendo frente a la costa oriental de Africa, se acerca a la isla de Borbón, y doblando, a grande distancia, el cabo de Buena Esperanza, se dirige hacia el océano Antártico. Este dilatado mar que rodea por el sur toda la tierra, libre de obstáculos continentales, ofrece amplio paso a la ondulación que, provocada por la luna, avanza con el astro del este hacia el oeste.

Al cruzar esta grande onda el espacio que media entre la punta africana y el Cabo de Hornos, conmueve las aguas del Atlántico que en esa región se abre como un ramal del mar Antártico, y provoca en ellas una onda secundaria, onda libre pues que no persiste la conmoción que la origina. (1) Esta onda libre renacerá con regularidad periódica cada vez que la grande onda antártica que la genera, en obediencia al ritmo del movimiento lunar, pase frente a la boca sur del océano Atlántico.

Al mismo tiempo, la acción directa de la luna sobre las aguas de este mar levanta en él una onda (forzada en virtud de la permanencia de su causa) (1), que se sobrepone y se combina con ella en una resultante. A la sazón que una de ellas nace en la región austral de ese mar, la precedente (véase el mapa) que ha caminado hacia el norte, pasa frente a Terranova rumbo a las islas Canarias, y la más anterior, se siente en las costas de Noruega.

Se ve, pues, que el Atlántico está surcado por varias ondas nacidas a horas diferentes que avanzan unas en pos de otras y, salvo ligeras variaciones, en la misma trayectoria.

La energía de esas ondas, concentrada en la estrechura que media entre Africa y el Brasil, aumenta en esa región, la altura de la cúspide, la cual disminuye al extenderse la onda en el espacio más anchuroso que se abre al norte.

Se ve, pues, y es muy digno de notarse, que las condiciones en que en cada lugar se presenta la marea, dependen menos de la posición de la luna en su fecha, que de lo acontecido dos o tres días antes en el océano Indico y en el Antártico.

(1) Véase lo dicho sobre las ondas libres y forzadas en las páginas 24 y 87.

Oscilación en vasos cerrados. Resonancia.

La gran movilidad del agua ocasiona fenómenos curiosos que turban la aparente tranquilidad de la superficie líquida en los vasos cerrados o limitados como son los estanques y los lagos. Consisten en movimientos de oscilación en la masa flúida que se revelan por la elevación y la depresión alternadas y periódicas del nivel del agua en sus orillas. Aunque obedientes a otras influencias, esas masas de agua son también sensibles a la fuerza generadora de la marea, pero a causa de la insignificante extensión de esos vasos en relación con la de los mares, la oscilación del nivel es casi imperceptible en ellos.

En la figura 34 la línea A. B. representa la superficie normal de un lago, o sea, la superficie a nivel siempre perpendicular a la dirección CD, del hilo a plomo; y la línea A' B', la superficie del líquido inclinada y también normal a la dirección CD', que

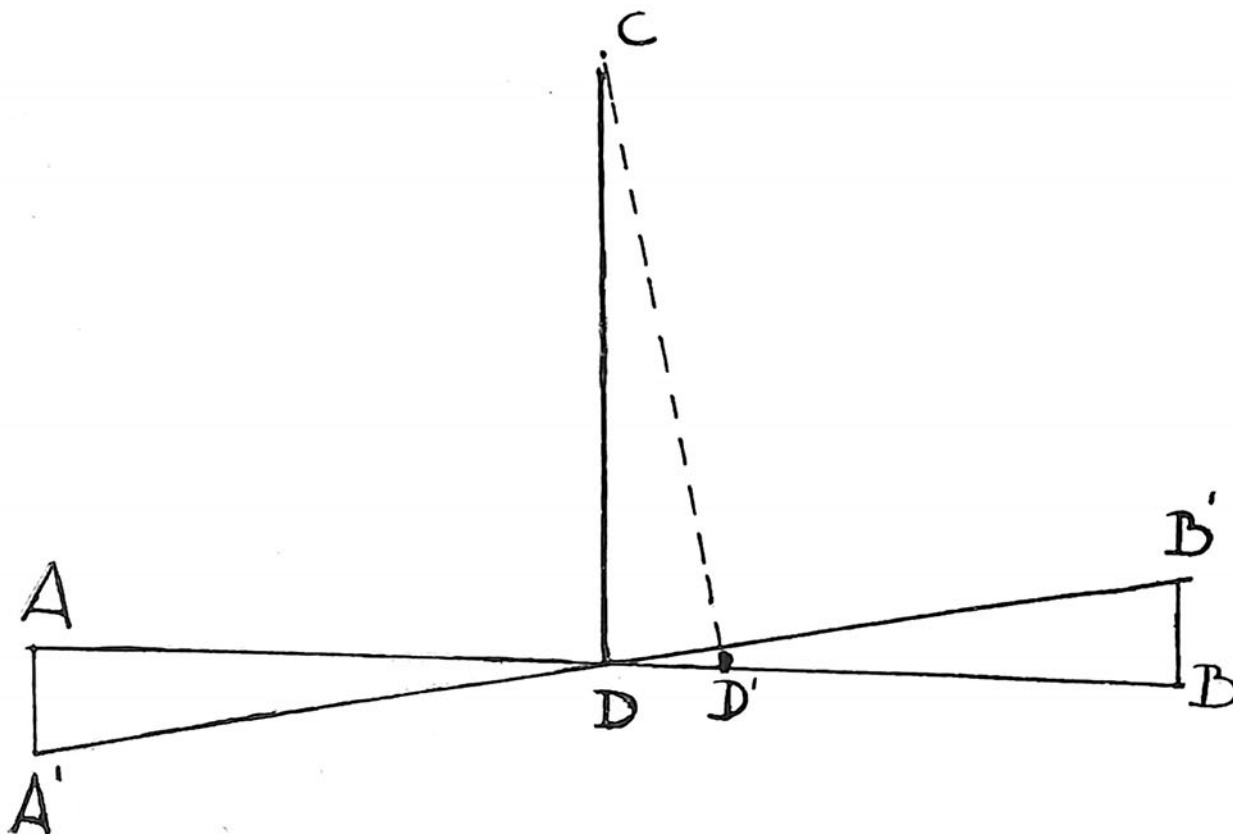


Fig. 34

tomaría ese hilo desviado de la vertical, a manera de un péndulo, por la acción atractiva de la luna (1).

El movimiento del agua que eleva su nivel en toda la parte B y la deprime al mismo tiempo en toda la parte A, puede considerarse como una oscilación alrededor de un eje o línea perpendicular a la dirección AB, línea en cuyos puntos todo el movimiento es nulo. Se llama **línea nodal**. Se comprende que la situación de una línea nodal puede variar cuando varíe la fuerza generadora y, por tanto, el rumbo en que se propague la ondulación que ella excite.

Debemos observar que la ausencia de obstáculos que estorben el movimiento del agua en los lagos y la limitada extensión de esos vasos permiten que, en ellos, el efecto de la fuerza generadora, esto es, la propagación de la onda, tenga tiempo de consumarse antes que la variación de esa fuerza, en intensidad o en dirección, provoque una nueva onda que perturbe a la primera. Así, en los lagos, cuando no son muy extensos, se puede esperar que las mareas se verifiquen más de conformidad con la teoría del equilibrio.

Un volúmen de agua limitado guarda un estado y una posición de equilibrio naturales. Cuando por una causa cualquiera éste se rompe, el líquido se pone en movimiento en forma de ondulación, o serie de oscilaciones, cuya amplitud y cuyo período dependen de la extensión y de la profundidad del vaso, y es, por tanto, una ondulación libre natural, y propia de esa masa de agua. Así como una caja sonora afinada en cierto tono vibra espontáneamente al paso en su cercanía, de una onda del mismo diapasón, fenómeno que en Acústica se llama "resonancia", así, una masa de agua limitada inicia y continúa su ondulación libre natural cuando la excita la aproximación de una onda o la presencia de una causa de igual periodicidad.

(1) El cálculo matemático enseña que la longitud de un péndulo y la desviación de su extremo inferior guardan la misma relación que la pesantez y la atracción lunar, esto es, 1 a 11664000, o sea, 9×10^{-8} . Así, se tiene en la figura $\frac{CD}{DD'} = \frac{AD}{AA'} = \frac{BD}{BB'}$, en el supuesto de que el péndulo estuviera situado en el punto medio de la distancia AB. Si el lago mide, por ejemplo, 300 kilómetros entre sus riberas A y B, la depresión BB' y la elevación AA', valdrían en centímetros $\frac{30000000}{2} \times 9 \times 10^{-8} = 15 \times 10^6 \times 9 \times 10^{-8} = \frac{135}{100} = 1.35$. La amplitud de la marea o la distancia entre el nivel más alto y el más bajo, del agua, sería pues, 2.7 centímetros, cantidad sin importancia, no obstante la gran extensión que se ha supuesto el lago.

Por efecto de la resonancia, las diversas regiones del mar son más sensibles, y ceden con más facilidad a las fuerzas del sol y de la luna cuyo período se aproxima más al período natural de oscilación de esas masas líquidas. Estas fuerzas levantan y mantienen en dichas áreas marinas oscilaciones de onda estacionaria, o mareas correspondientes a sus períodos. Así, en unas partes del océano predomina el efecto de las fuerzas semidiurnas lunisolares, en otras, como el espacio comprendido entre el sur de Australia y el mar Antártico, es más eficiente la fuerza del sol, y en ciertas otras, las mareas responden mejor a la acción de las fuerzas diurnas.

IX

Teoría de las Ondas Estacionarias.

En el fenómeno de la resonancia funda el hidrógrafo americano Harris una teoría sobre el nacimiento y la propagación de las ondas de marea. Divide el océano en partes de formas diversas, en cada una de las cuales existen condiciones de extensión y profundidad determinantes del período natural de esas porciones limitadas del mar. Por razón de esa limitación, supone el autor que el movimiento del agua, es, como en los lagos, una oscilación periódica alrededor de una o más líneas nodales, de manera que en un lado de estas líneas de quietud, el agua y la marea están alternativa y periódicamente, más altas y más bajas que en el otro.

El autor de esta teoría, llamada de las **ondas estacionarias**, ha construido cartas donde aparecen marcados los contornos poligonales de formas varias, de esas áreas limitadas y sus líneas nodales con las horas de Greenwich, en tiempo lunar, en que de cada lado de esas líneas acaece la pleamar. Los límites de las áreas son algo confusos, y algunas de ellas se sobreponen en parte. Otras aparecen en blanco. Son aquellas en que la acción de las fuerzas generadoras es insignificante, y sus mareas se deben a la propagación de las ondas nacidas en las áreas contiguas.

Esta teoría, que ha encontrado favor entre muchos hidrógrafos, explica satisfactoriamente algunas irregularidades notables

que se advierten en ciertos parajes del mar. Entre otras, la existencia de **puntos anfidrómicos**, o sea, puntos de cruzamiento de dos o varias curvas de igual marea, que se explica como efecto de la interferencia o combinación de las oscilaciones a uno y otro lado de dos o más líneas nodales. Son, pues, puntos en que no se manifiesta la marea.

X

Mares Interiores y Lagos.

En los mares interiores poco extensos y comunicados con el océano por pasos angostos, las mareas se verifican como en los lagos cerrados, esto es, como oscilaciones periódicas a uno y otro lado de líneas nodales cuya situación depende de la forma y extensión del vaso y de su profundidad.

Especialmente en el Mediterráneo donde el estrecho de Gibraltar, y más adelante la angostura formada entre la costa africana y la isla de Sicilia, obstruyen el fácil y pronto acceso de las aguas que afluyen del Atlántico durante las seis horas de la creciente, las mareas son insensibles; y si en algunos puntos, como en Venecia, el agua en las pleamares de zizigias se eleva a 1.20 metros es, según algunos autores, por un efecto de resonancia en el mar Adriático.

Conviene fijarse en que las oscilaciones en los mares cerrados, aunque semejantes a las de los lagos, se deben únicamente a las fuerzas astronómicas generadoras de la marea y son, por tanto, periódicas como ellas; mientras que en los lagos, la ruptura del equilibrio, excitadora de las oscilaciones, más que a la acción insignificante de esas fuerzas ⁽¹⁾, se debe a causas terrestres de origen local. El viento, cuando ha persistido varias horas, origina en la superficie una corriente que acumula el agua en el extremo del lago hacia donde ha soplado, y cuando calma repentinamente, el líquido retrocede buscando su nivel: movimiento iniciativo de una serie de oscilaciones que dura largo tiempo y que el rozamiento con el fondo va amortiguando lentamente. Las variaciones de la presión atmosférica y su desi-

(1) Véase la nota de la página 99.

gualdad en diversas partes de los lagos dan motivo a cambios en el nivel del líquido y, por tanto a la oscilación. Pero la mayor parte de los movimientos y la variedad irregular de sus períodos son efecto muy probable de la conmoción del suelo ocasionada por microsismos inadvertidos que sólo los sismógrafos descubren. Es frecuente en los lagos la producción de oscilaciones de sentidos opuestos que, por su interferencia, generan movimientos resultantes a uno y otro lado de líneas nodales.

Los vaivenes del agua en los lagos, provocados por las causas señaladas, y tal vez por otras desconocidas, y cuyos períodos varían desde largas horas hasta sólo algunos minutos, se conocen universalmente con el nombre intraducible de **seiches**.

Las posiciones del sol y de la luna no son las únicas causas que determinan las variaciones del nivel marino. La configuración y los accidentes de las costas, la presencia en ellas de rías o desembocadura de cauces fluviales, la profundidad, los fenómenos de la atmósfera, como la presión del aire, los vientos, las lluvias, dan lugar a oscilaciones que, con su período propio, modifican más o menos notablemente el carácter fundamental de las ondas de marea, del mismo modo que las vibraciones u ondas sonoras secundarias que acompañan a las notas musicales se combinan con ellas y modifican su altura fundamental.

XI

Predicción de las Mareas.

Entre las cuestiones importantes en relación con las mareas figura el problema de su predicción que consiste principalmente en determinar y anunciar con anticipación la hora de la pleamar y la altura de la marea; predicción que se ha realizado con bastante exactitud para buen número de puertos por medio del cálculo empleado con datos obtenidos por una observación prolongada y perseverante.

La predicción aparece bajo la forma de tablas que con un año de anticipación publican los gobiernos de algunos países, especialmente el de la India para el Océano Indico, y el de los Estados Unidos para sus puertos. Las tablas, unas llamadas **especiales**, muestran para cada puerto y para cada día del año las

horas de la pleamar y de la baja mar y la altura correspondiente del agua; las otras, llamadas **generales**, relacionan las mareas con algunos hechos astronómicos notables, por ejemplo la culminación lunar, indicando cuantas horas después de ese fenómeno se verifican la pleamar y la baja mar, y su altura sobre una señal fijada en la ribera. Conociendo con ayuda de las tablas astronómicas o **Efemérides**, que siempre acompañan a los marinos, los instantes de esas posiciones del satélite, les es fácil determinar los de las mareas.

El retardo o dilación de la pleamar con respecto a la hora del paso meridiano de la luna y la altura máxima del agua constituyen para cada lugar el dato que se llama **establecimiento del puerto**, indispensable a los navegantes para conocer la hora en que encontrarán suficiente hondura para la entrada y salida de sus navíos, cuya suerte depende a veces, de un error de 4 ó 5 decímetros en esa profundidad.

La base para la predicción de las mareas es un complicado problema de Matemáticas que está fuera de los límites y del programa del presente opúsculo; pero su alta importancia, su necesidad y la ingeniosa solución que ha recibido del eminente físico Lord Kelvin, nos obliga a ofrecer al lector una exposición aunque sea breve y sucinta de procedimiento tan práctico y racional.

XII

Método de Lord Kelvin. Satélites Auxiliares.

Análisis Armónico.

Consiste en sustituir las fuerzas naturales generadoras de la marea y de sus accidentes, por la acción de varios satélites ficticios dotados individualmente de masa y movimiento adecuados para que produzcan sendos caracteres de la oscilación oceánica. Obrando cada uno de ellos como si existiera él solo, produce en cada momento y según su posición, una marea o una onda particular componente, de tal modo que la acción conjunta de todos esos cuerpos hipotéticos, o la sobreposición de las ondas que generan, reproduce y constituye la marea tal como se observa en realidad.

Este artificio, desenlazando por decir así, los elementos complicados en la marea, reduce el estudio de este fenómeno complejo al de la serie de los hechos simples que lo forman. Supone los satélites ideales situados en el ecuador o en círculos paralelos a este plano, donde se mueven uniformemente y cada uno con velocidad propia para producir el efecto parcial que se le ha asignado: en lo que estriba la simplificación del cálculo.

Siendo la marea un fenómeno periódico, las mareas parciales o componentes de ella, deben ser también periódicas; lo cual significa que la altura, que, por la acción de los satélites ficticios, adquiere el agua a cada instante, debe variar entre dos valores máximos extremos, los de alta y de baja mar, y reproducirse a intervalos de tiempo iguales cuya duración constituye el período particular de cada satélite, duración que depende de la velocidad con que se le ha dotado. Por lo que se ve que la altura del agua debe ser una función del tiempo, del mismo carácter que el seno o el coseno lo es del arco correspondiente, y por lo tanto, puede expresarse por la fórmula de la función llamada armónica: $h = A \cos \alpha t$, en la cual h es a la hora t , la altura del agua (contada desde el nivel medio del mar, en más o en menos); A , su valor máximo, y α la velocidad del satélite $= \frac{360^\circ}{T}$, en que T representa su período, o sea el tiempo en que recorre el círculo completo.

En este estado, la fórmula indica que la altura máxima ocurre a la hora cero, lo que no siempre es cierto, por lo cual la expresión no es general. Debe, pues agregarse el ángulo αt , una constante que, para cada satélite, se relacione con la hora de ese máximo valor de h . Con lo que se tendrá para la acción conjunta de los satélites o marea total:

$$h = A \cos (\alpha t + a) + B \cos (\beta t + b) + C \cos (\gamma t + c) + \dots$$

cada uno de cuyos términos es una componente de esa marea y contiene las tres constantes, de significado análogo, para cada uno de los satélites.

La descomposición de las fuerzas reales del sol y de la luna en las fuerzas ficticias de los satélites, la asignación a éstos de masas y velocidades convenientes y la determinación de las constantes A, α, a, \dots , procedentes, unas, de la observación de fenó-

menos terrestres, y otras, de causas solamente astronómicas, se llama **análisis armónico de la marea**, obra notable del genio de su distinguido autor.

La teoría requiere un número infinito de satélites para que su acción sintética equivalga exactamente a la acción real de las fuerzas naturales del sol y de la luna, pero en la práctica bastan, para suficiente y muy estrecha aproximación, veinte o veinticinco, pues los demás tienen masas tan pequeñas, que sus efectos son inapreciables. En muchos casos se consideran de ocho a diez.

Las constantes $\alpha \beta \gamma$, o velocidades de los satélites, son las mismas para todos los lugares del globo por que no dependen de condiciones locales, sino exclusivamente de los movimientos relativos del sol, de la luna y de la tierra. Se obtienen, según se dijo, dividiendo la amplitud angular, 360° , del ecuador, donde se supone que se mueven esos cuerpos hipotéticos, por su período T , esto es, por el tiempo que tardan en reproducir sus efectos. En cuanto a las otras constantes $A B C$, o semiamplitudes de las mareas, y $a b c$, o sus épocas, son variables para cada tipo de la marea, y su determinación es precisamente la obra del procedimiento matemático llamado análisis armónico. Nosotros, nos reduciremos a explicar cómo se obtienen las velocidades y los períodos de los satélites, limitándonos a los cinco principales que generan con bastante aproximación los caracteres esenciales de las mareas.

Toca al primer satélite producir la marea media regular semidiurna de la luna. Como los caracteres de esa marea se reproducen a intervalos de 12 horas 25 minutos = 12.42, este intervalo es su período, y su velocidad, $\alpha = 360^\circ \div 12.42 = 28^\circ.98'$. Esta marea se llama **componente principal semidiurna de la luna** y se distingue con el signo M_2 , cuyo índice 2 expresa que se produce dos veces por día.

Al segundo satélite corresponde producir los efectos de la variación de distancia de la luna a la tierra, que aumenta progresivamente la altura de la marea media M_2 , entre el momento del apogeo y el del perigeo, y la disminuye entre el del perigeo y el del apogeo; para lo cual se supone que la pleamar del primer satélite coincide con la pleamar del segundo en el perigeo y con la baja mar del mismo en el apogeo. Las mareas extre-

mas (alta y baja) del segundo satélite se producen cuando este se halla en puntos opuestos del ecuador; de suerte que después de los 13.78 días (mitad de los 27.55 que dura la revolución de la luna) que median entre el apogeo y el perigeo, el segundo satélite debe encontrarse distante 180° del primero. Se mueve, pues, con una velocidad diaria de $180^\circ \div 13.78$, u horaria de $180^\circ \div 13.78 \times 24 = 0.54$. Siendo, como hemos visto, la velocidad por hora del primero $28^\circ.98'$, el atraso del segundo sobre éste es de $28^\circ.98 - 0.54 = 28^\circ.44$ por hora. El período de su marea es $360 \div 28^\circ.44 = 12.66$ horas. Luego es marea semidiurna. Se llama **componente principal elíptica de la luna**. Su símbolo es N_2 .

Queda a cargo de la acción combinada de los satélites tercero y cuarto, generar en la marea media la desigualdad debida al cambio continuo de la declinación lunar. Para ello se admite que estos satélites llenan dos condiciones. Se supone, primero, que cuando la luna adquiere su mayor declinación, sea al norte, sea al sur del ecuador, ambos satélites suman sus acciones para producir el efecto máximo y se encuentran juntos en su órbita supuesta; y cuando el astro cruza el ecuador, las acciones de uno y otro son contrarias y se anulan entre sí. Al cabo de 13.66 días (mitad del mes trópico lunar de 27.33) que invierte la luna en pasar de su máxima declinación boreal a la austral, los dos satélites vuelven a quedar reunidos, pero uno de ellos ha hecho una revolución menos que el otro. Así, la velocidad horaria del primero, siendo n el número de sus revoluciones en ese tiempo, es $360^\circ n \div 13.66 \times 24$, y la del otro, $V_2 = 360^\circ (n-1) \div 13.66 \times 24$. Su diferencia es $V_1 - V_2 = 360^\circ \div 13.66 \times 24 = 1^\circ.10$. La otra condición es que la velocidad media de los dos satélites sea igual a la velocidad aparente diurna de la luna. Se tiene, pues,

$$\frac{V_1 + V_2}{2} = \frac{360^\circ}{24^h 50^m} = \frac{360}{24.84} = 14^\circ 49'$$

Estas dos ecuaciones de condición dan:

$$V_1 = 15^\circ.04 \text{ y } V_2 = 13^\circ.94$$

Los períodos correspondientes son, entonces: $360^\circ \div 15.04 = 23^h 93'$ y $360^\circ \div 13.94 = 25^h 82'$, que difieren muy poco de 24 horas o un día, por lo cual las mareas que los satélites tercero y cuarto producen son mareas diurnas. La primera cuyo símbolo es K_1 , se llama **componente lunisolar diurna**,

y la segunda señalada con el signo O_1 , **componente lunar diurna**. Los índices 1 indican que se producen una vez al día.

El quinto satélite tiene por fin generar la componente principal semidiurna del sol. Como sus efectos, análogos a los de la luna, se producen dos veces por día y el período del sol es de 24 horas exactas, su velocidad es $360^\circ \div 12 = 30^\circ$. El símbolo de esta marea componente es S_2 . (1)

Determinadas por medio de la observación y el cálculo matemático los constantes A α a , B β b ... de cada uno de los términos de la fórmula de la página 104 que dan para cada momento, las alturas de las mareas componentes causadas por los satélites ideales, se puede predecir, para cada lugar, y con una aproximación muy grande, mayor mientras más términos se consideren, la altura de la marea real a una hora determinada. Si con las horas como abscisas y las alturas como ordenadas, se construye una curva, aparecerán en ella los máximos y los mínimos, o sean, las alturas de pleamar y baja mar y las horas a que acaecen. El cálculo de los numerosos términos, que a veces pasa de treinta, y la construcción de la curva son operaciones tan largas y laboriosas, que aparecen verdaderamente impractica-

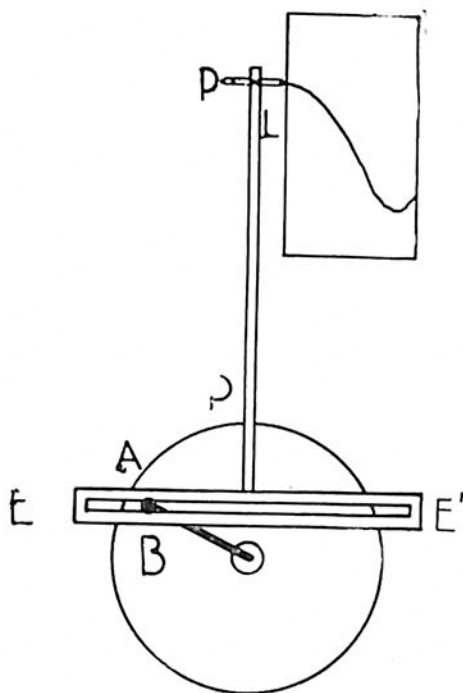


Fig. 35

(1) Por la mayor importancia de la acción del sol, el quinto satélite debía ocupar el lugar de segundo, pero con el objeto de agrupar los elementos de la acción lunar, nos hemos tomado la licencia de colocarlo al fin.

bles. Inconveniente que vencieron, Lord Kelvin primero, y después otros muy entendidos artistas, componiendo máquinas que ejecutan esa integración de términos, automática y rápidamente.

La de Lord Kelvin pinta en una hoja de papel y con trazo continuo y exacto, la curva procedente de la suma algebraica de las ordenadas que, para cada instante, dan los términos de la fórmula. Vale la pena dar una idea de su ingenioso mecanismo. En la figura 35, OA es un manubrio que se mueve alrededor del centro O, con la velocidad α . En el punto B lleva un apéndice saliente o clavija, que entra en la ranura abierta en la pieza E E', perpendicular y fijada a la barra p p guiada para moverse sólo verticalmente. La figura muestra con claridad que el movimiento circular del apéndice se transforma en movimiento vertical de vaivén cuya carrera es el doble de la distancia OB. La posición de la clavija B puede variarse en el brazo OA, para variar a voluntad la carrera del extremo p. En este fácil mecanismo figuran y entran en juego con la ley del coseno, las tres constantes de los términos de la fórmula: la velocidad de rotación corresponde a α ; la extensión OB, o carrera del punto p, a la semi-amplitud A, de la marea componente; y la posición que a la hora cero se da al brazo OA, corresponde al ángulo constante a. De este modo, las posiciones o alturas de la extremidad p reproducirán a escala las de la superficie del agua en cada instante del tiempo.

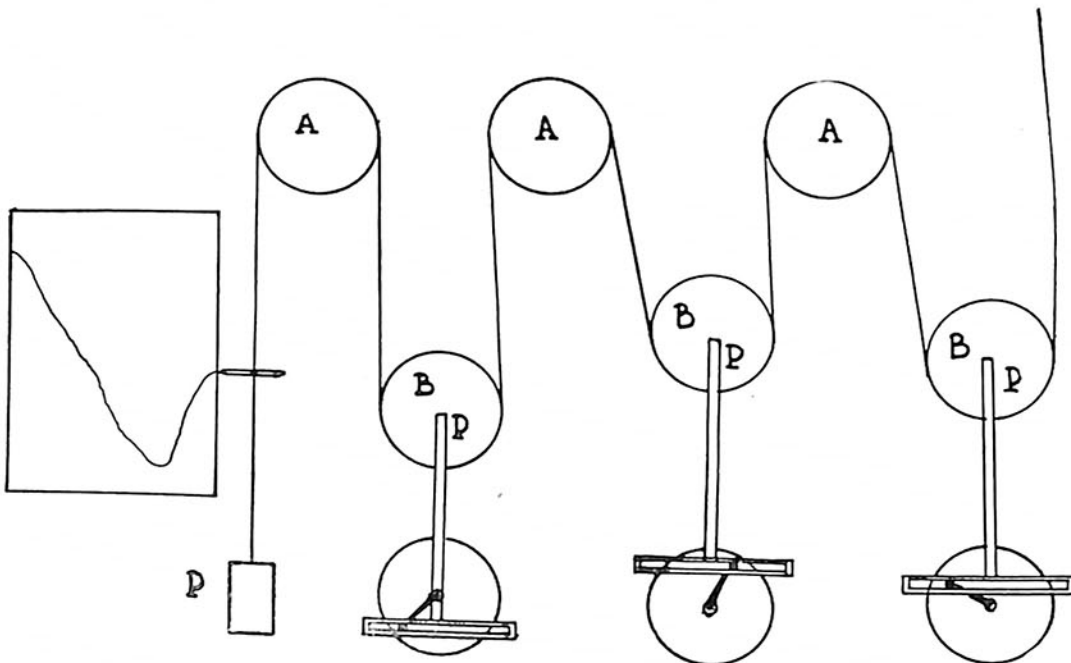


Fig. 36

Si en este punto se pone un lápiz que se apoye sobre un papel arrollado en la superficie de un cilindro que gire con velocidad adecuada, se obtendrá el trazo continuo de la curva de la marea componente.

Para cada término de la fórmula se emplea un elemento o mecanismo idéntico en el cual se disponen las piezas para que representen las constantes $B \beta b$ ó $C \gamma e \dots$ de cada uno. La velocidad del cilindro receptor del trazo, y que representa, también a escala conveniente, el curso del tiempo, rige por intermedio de piezas y engranajes apropiados las velocidades particulares diferentes de los mecanismos elementales.

La figura 36 indica sin necesidad de explicación, como se coordinan los mecanismos componentes y como se integran sus acciones por medio de un sistema de poleas, unas fijas A A A y otras móviles, B B B que, conducidas por las extremidades p p p, de las barras, determinan el movimiento del lápiz L, cuya altura es, en cada momento, la suma algebraica de las variaciones en la extensión de la cuerda tendida por el peso P.

Esta máquina puede hacer en menos de un día el trabajo de predicción de las mareas de todo el año para cada lugar.

XIII

Corrientes de Marea.

Conviene recordar que en los puntos N y Z de la figura 17 página 77 que se hallan con la luna en el zenit o en el nadir y en los de la región transversal P P, la fuerza generadora de la marea se ejerce en dirección enteramente vertical, hacia arriba en los primeros y hacia abajo en los segundos. No debe creerse por esto, como ocurre vulgarmente, que el agua se levanta o se deprime llamada o repelida directamente por los astros. Obsérvese que obrando esa fuerza atractiva F, contra el peso del agua en los puntos N y Z y en el mismo sentido que él en P P, la resultante es $P - F$ en la primera región y $P + F$ en la segunda; (1) fuerzas verticales que no dan movimiento al líquido sino

(1) El peso del agua es menor que la fuerza F; de otro modo esta última predominaría y el líquido se desprendería de la tierra hacia el espacio para girar alrededor de la luna como satélite

simplemente disminuyen su peso en una de esas regiones y lo aumentan en la otra, haciendo menos densas las aguas de pleamar y más densas las de baja mar.

En todo el resto del océano la fuerza generadora obra en dirección oblicua como lo indican las flechas en la misma figura. Tiene pues, en cada punto una componente vertical y una componente horizontal. La primera, que combinada con la pesantez, aumenta o disminuye el peso del agua, y la segunda, que le comunica un movimiento en su misma dirección, esto es, horizontal. El efecto de la componente vertical se llama con más especialidad marea y el de la componente horizontal, es una corriente que se conoce con el nombre de **corriente de marea**.

Este efecto predomina en las regiones intermedias entre los puntos N y P y Z y P, habiendo lugares, como los del círculo H H, en que la fuerza generadora, tangente al globo, carece de componente y de acción vertical y el movimiento que provoca en el agua es exclusivamente horizontal.

El efecto vertical, o la marea, es muy poco sensible, sobre todo en alta mar donde consiste, como se observa en las islas lejanas, en una amplitud o variación próximamente de 60 a 90 centímetros entre los niveles de la máxima y la mínima marea.

Mucho más notable es el efecto horizontal. Se muestra en las costas bajo la forma de anchurosa corriente que, con mayor o menor violencia, llega de la lejanía del mar y ofrece en su volumen, en su marcha y en sus efectos, variaciones que dependen de las circunstancias peculiares de cada región del litoral. Su arribo se anuncia ordinariamente por una marejada en que cada ola avanza y sube más que la anterior. Al tocar fondo, como se acostumbra decir, la corriente modera su velocidad, las olas, figura 37, se siguen más cercanas, estrechan su distancia, se acumulan, crece su volumen y su cúspide se eleva más y más.



Fig. 37

Los accidentes de las costas, sus promontorios, sus concavidades, los arrecifes, la angostura en la boca de los golfos, el relieve del fondo, el declive de la ribera, son causa de irregularidades

en el régimen de las mareas que se manifiesta principalmente en la altura, ya excesiva, ya moderada y hasta insensible, de la pleamar.

Si la corriente de marea encuentra una playa de leve inclinación, el agua, para alcanzar su altura máxima, debe recorrer una distancia horizontal considerable en el breve espacio de tiempo necesario para vencer el desnivel correspondiente. El flujo, o ascenso de la marea, se siente entonces como una corriente de gran velocidad que algunos testigos han comparado con una carga de caballería y que puede envolver a las personas incautas que, en la contemplación del mar, se aventuran por la zona que poco antes se encontraba descubierta.

La corriente que, aunque rápida, como hemos dicho se advierte apenas en la extensión dilatada del océano, se torna viva y terrible a su paso por los estrechos y los canales. Al concentrar su volumen en la angostura, su velocidad se acrecienta, y contrariada la fuerza viva que la anima por la resistencia de los bajos fondos, por los desniveles y las sinuosidades de su forzado trayecto, se desencadena y se agota en agitación desordenada del agua, en violentos remolinos, en cambios bruscos de dirección provocadores de intensidad e interferencia del oleaje y en efecto vertical en las costas donde eleva notablemente la altura de la pleamar.

Ya hemos hecho observar que, en general todo obstáculo que embaraza el movimiento del agua, provoca una disminución en la velocidad; y como la energía que anima al líquido no se agota cuando la resistencia es completa, esto es, cuando impide por completo el avance horizontal, éste, siguiendo la línea de menor resistencia, se cambia en movimiento ascensional que eleva el agua a una altura proporcionada a su energía restante.

Si la costa es escarpada, el ímpetu de la corriente se resuelve en impulso vertical que lanza el agua a grande altura y en furioso asalto que bate las rocas reciamente y a la larga las desgasta, las derriba y las destruye.

En la carta de la página 96 se advierte en las costas orientales de Patagonia, en el golfo de Bengala, en el mar de Omán y en el de China, una apretura de las curvas representativas de la posición que, a cada hora, guarda en su propagación la onda de marea. Esto significa que esa onda recorre muy cortos espa-

cios en ese intervalo o que avanza con velocidad disminuída, indicio de la resistencia que encuentra en esos parajes; lo cual ocasionará que a su arribo a la costa, las aguas de pleamar adquieren una grande elevación. Así se explican las mareas de 15 y hasta de 20 metros en los golfos de San Jorge y de Santa Cruz, en la entrada del estrecho de Magallanes, y las rápidas corrientes de 15 y más kilómetros por hora en los pasos angostos e irregulares entre las islas Británicas, y las mares habitualmente turbulentas en el canal de la Mancha.

Se cita como muy notable y se califica de grandioso el juego de las mareas en la bahía de Fundy, figura 38, en la América del Norte, debido al contorno de sus riberas y al relieve de su fondo. Muy amplia en su boca esa bahía, y cerrándose casi repentinamente en un estrecho canal, el desnivel entre las altas y las bajas aguas aumenta por grados desde 2.70 metros en la entrada, hasta 21 metros en el otro extremo. El agua cubre dos veces por día y convierte en senos navegables vastas extensiones de playa donde algunas horas antes las embarcaciones descansaban abatidas en la arena.



Fig. 38

El reflujo es una corriente en retirada. En ciertos parajes angostos encuentra inquietas todavía las ondas movidas en sentido inverso por el paso reciente de la marea en ascenso. Su interferencia con ellas produce fuertes torbellinos y cambios de

nivel muy peligrosos para las embarcaciones. Fenómeno que aparece muy notable en el reducido espacio entre las islas Lofotten y la costa de Noruega donde se forma el terrible vórtice llamado **maelström**, y con menor intensidad, en los torbellinos leyendarios de Scila y de Caribdis en el estrecho de Mesina.

Hay casos, en cambio, en que la interferencia de las ondas de marea obra una compensación entre sus fases, esto es, una concurrencia de la cúspide de una con la depresión o seno de la otra, lo que crea áreas marinas en que no se percibe variación en el nivel del agua, como acontece frente al golfo de Bristol en el canal de Irlanda, no obstante que se encuentra en una región geográfica de mareas de 15 metros de alto y de aguas turbulentas.

A su arribo a las rías y a los esteros ⁽¹⁾ la onda encuentra el estrechamiento de su álveo y la pendiente y asperezas de su fondo; penetra, pues, en el cauce con velocidad que depende de esas resistencias, y avanza hasta el lugar en que es superior a la suya la rapidez de la corriente fluvial. Se detiene, sin embargo, antes de ese punto si la hondura del río es escasa. Muchas veces sube a un nivel superior al que alcanzaría, en esa costa, la pleamar.

Cuando la marea ascendente regular encuentra en la boca de un río la resistencia opuesta por su forma, su estrechez y las condiciones de sus bordes de arena, y la de su corriente, sus aguas se detienen durante algún tiempo y se acumulan hasta que, reunido el producto total de la marea, penetra en el cauce, de un golpe o en unas cuantas grandes olas, y asciende con gran violencia y velocidad. Este fenómeno es muy notable en el Amazonas y principalmente en el Tsien-tang en China. En este anchuroso río, la onda invasora, semejante a un muro vertical de agua de 10 metros de altura y de 6 a 9 kilómetros de largo, avanza majestuosa y terrible, con velocidad de 40 kilómetros por hora. De efecto devastador en las orillas del río donde destruye los bordes y arrebató objetos y animales, en el centro obra sobre las embarcaciones que sorprende, como cualquiera ola, co-

(1) En castellano llamamos ría la formación que en otros idiomas llaman estuario, esto es, la parte de un río próxima a su entrada en el mar y hasta donde llegan sus aguas saladas; y reservamos la voz estuario, o mejor, estero, para designar el brazo o caño que sale del río para llegar también al mar.

municándoles movimiento de sube y baja y un ligero avance horizontal sin retroceso.

El caudal de los ríos está sujeto a cambios notables que dependen del régimen de la precipitación fluvial que los alimenta. La escasez y la abundancia de las lluvias, así como la fusión de la nieve, fenómenos propios de cada estación del año y, por lo tanto periódicos, se hacen sentir en el nivel del agua y ocasionan una desigualdad, también periódica, bastante sensible en la altura de las mareas que, dado su origen, se llama **desigualdad estacional**.

La presión del aire es una fuerza considerable que, en proporción de su intensidad, deprime la superficie del mar. Una oscilación (no insólita) de 5 centímetros en la altura barométrica, corresponde a una variación de 60 centímetros en el nivel oceánico (1). Las variaciones rítmicas normales de la presión atmosférica contribuyen, pues, con su efecto, a modificar de manera sensible la altura de la marea y a crear otra desigualdad periódica en su régimen.

Cuando el aire está en movimiento, si sopla de la mar, levanta el nivel del agua en la costa y, según sean su fuerza y el tiempo que ha persistido, produce en las rías y en las riberas efectos de más o menos consideración: inundaciones grandes y perdurables, ruptura de diques, destrucción de muelles y hasta verdaderos desastres, sobre todo si sus ráfagas acompañan a la marea creciente.

Se ve por lo que antecede que las manifestaciones más notables de la marea consisten en movimientos horizontales, o corrientes de mayor o menor velocidad, capaces en ocasiones, de efectos de grande intensidad, aunque acompañados de movimientos verticales asociados estrechamente con ellos como efectos que son unos y otros de una causa común o sea, la fuerza generadora que es la misma fuerza que obra sobre el hilo a plomo para desviarlo en el sentido horizontal.

La ley del movimiento horizontal, o de las corrientes de marea, se puede representar como la de la marea, por **curvas de corriente**, construídas con las horas como abscisas y las velocidades como ordenadas. Por ser la corriente que acompaña al flujo, de

(1) Una columna de agua de 60 centímetros tiene un peso de 600 kilogramos por cada metro cuadrado de base, o de 6000 toneladas por cada hectárea. Imaginemos el efecto, sobre el agua o sobre el suelo, de una adición o de una supresión de tan considerable carga.

sentido opuesto al de la que acompaña al reflujó, las ordenadas de las curvas son susceptibles de signos contrarios, y se cuentan, positivas o hacia arriba, y negativas o hacia abajo, de un eje o línea de velocidad nula, según que la corriente se dirija hacia tierra o al contrario.

En la figura 39, MN es la ordenada cero.

Los puntos CFHJ corresponden a los instantes en que la velocidad se anula al cambiar de sentido la corriente, esto es, en los momentos de la pleamar y de la baja mar.

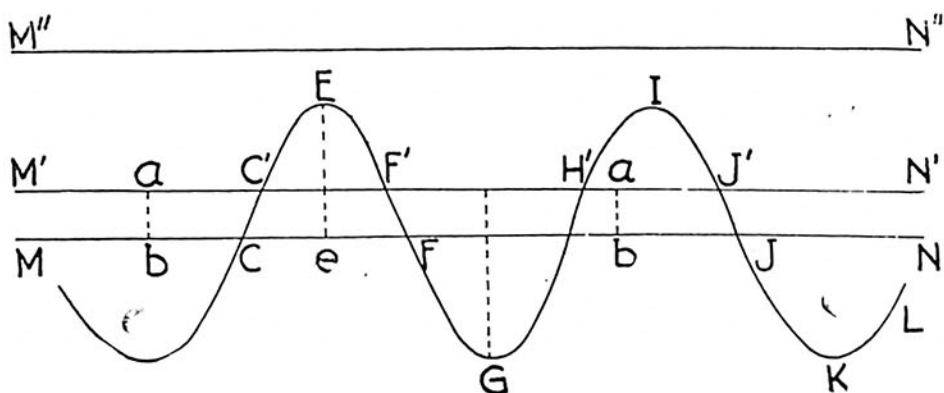


Fig. 39

Supongamos que este mínimo nivel del agua se verifica a las 9 a. m. y corresponde al punto C. Desde este momento y durante 3 horas, 6 minutos (cuarta parte del medio día lunar de 12 horas, 25 minutos), la corriente, rumbo hacia tierra, aumenta su velocidad; las ordenadas son, entonces, positivas y crecientes hasta el punto E. Durante las 3 horas, 6 minutos que siguen, la corriente continúa en la misma dirección y sentido, pero con velocidad decreciente hasta el punto F, que corresponde a la pleamar y al momento en que se anula la velocidad. La parte FGH de la curva indica la marcha de la velocidad en la fase menguante de la marea. A causa del retroceso del agua, las ordenadas son siempre negativas en esta región y de valor numérico en aumento hasta el máximo en G, y luego, en disminución hasta anularse en H, a la hora del reposo instantáneo de la baja mar. La parte IJKL representa la ley de variación de la velocidad en la marea de la tarde.

Para que el lector aprecie la relación de los aspectos simultáneos e inseparables del movimiento del agua en altura y en marcha horizontal, hemos puesto en la figura 40, abajo de las

curvas A, de marea, las curvas B, de la corriente, en las dos oscilaciones semidiurnas.

Las corrientes de marea no son las únicas que surcan la superficie oceánica. El descenso de las aguas de los ríos debido a la pesantez y en dirección constante; las masas líquidas que se deslizan entre dos puntos en que una diferencia en la presión atmosférica determina un desnivel; las que impulsan vientos pertinaces de dirección y velocidad variables; la circulación permanente de grandes volúmenes de agua de las corrientes marinas que en la Parte Segunda hemos estudiado; concurren con las corrientes de marea para generar movimientos resultantes más o menos irregulares y desordenados.

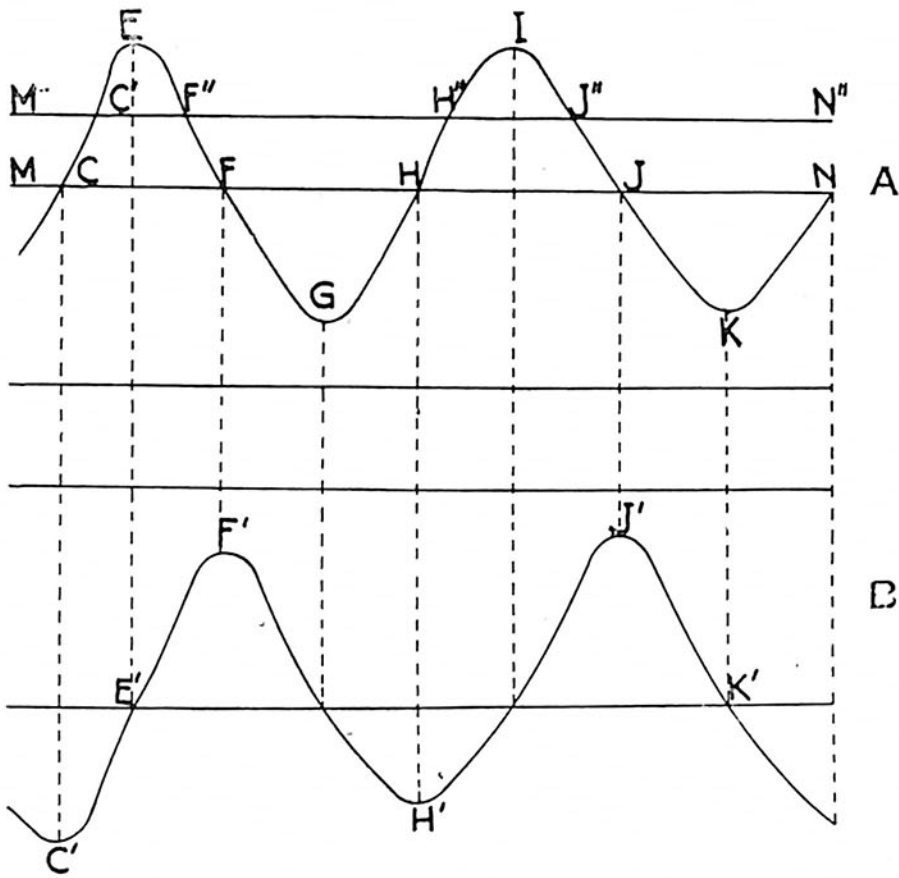


Fig. 40

Dada su causa astronómica, las corrientes de marea se distinguen de las originadas por fenómenos terrestres inconstantes, por su regularidad y por la puntual periodicidad con que alternan su sentido en la fase creciente y en la menguante de la marea.

En su composición con las corrientes perturbadoras, la influencia de la corriente de marea es predominante en la cerca-

nía de las costas, efecto muy poco perceptible en las lejanas regiones de la alta mar.

Las corrientes irregulares de origen terrestre obran sobre las corrientes de marea agregando u oponiendo a la velocidad de éstas la suya propia; efecto que se señala en las curvas de corriente sumando, con su signo, a todas las ordenadas una misma cantidad que representa a escala la velocidad de la corriente perturbadora; operación que equivale a transportar en el sentido conveniente el eje de las abscisas o cero de las ordenadas. Así, en la figura 39, página 115, MN es este eje para la corriente normal, y si la distancia **ab** representa la velocidad de la corriente extraña, que supondremos hacia el mar, la línea M'N' se tomará como nuevo eje para la curva de la corriente modificada.

Considerada así, la figura nos muestra que con esta modificación, el período del movimiento ascencional se acorta comenzando más tarde y terminando más temprano, pues corresponde a la distancia C'F' menor que CF; y la duración del retroceso se alarga iniciándose más temprano y cerrándose más tarde, como lo indica la distancia F'H' mayor que la normal FH; las horas de máxima velocidad hacia tierra (punto E) y hacia el mar (punto F) se conservan invariables.

Puede suceder que la corriente perturbadora, por ejemplo la de las aguas de un río que penetran en el mar, exceda en rapidez a la máxima de la corriente de marea; ésta entonces, quedará oculta; pues, como se ve en la figura 39, la línea MN, origen de las velocidades, se trasladará a M'N', y todas las ordenadas aparecerán negativas, lo cual significa que el sentido de la corriente será constantemente hacia el mar, aunque con variaciones de velocidad indicadas por la forma de la curva.

Apenas hay necesidad de decir que el efecto de las corrientes perturbadoras sobre la dirección de las corrientes de marea, es desviarlas según la ley de composición, o sea, del paralelogramo de velocidades.

Corrientes giratorias.

A cierta distancia de la costa donde los movimientos pueden efectuarse libremente en todas direcciones, se observan corrientes de velocidades varias y con dirección que cambia con regularidad en las horas del día, recorriendo todo el horizonte. Se llaman **corrientes giratorias**. Se representan muy bien por medio de líneas rectas trazadas desde un punto como polo, con la dirección observada y con magnitud proporcional a la velocidad, anotando para cada una la hora de la observación. Si se hace pasar una línea continua por las extremidades de estas rectas, se obtendrá, figura 41, una curva cerrada irregular que diferirá poco de una elipse. Las dificultades para la medida exacta de las velocidades, practicada en pequeñas embarcaciones ancladas lejos de tierra y expuestas al vaivén de las olas producen irregularidad en la forma de las curvas, pero en su conjunto y en su forma media ofrecen claramente ciertas particularidades.

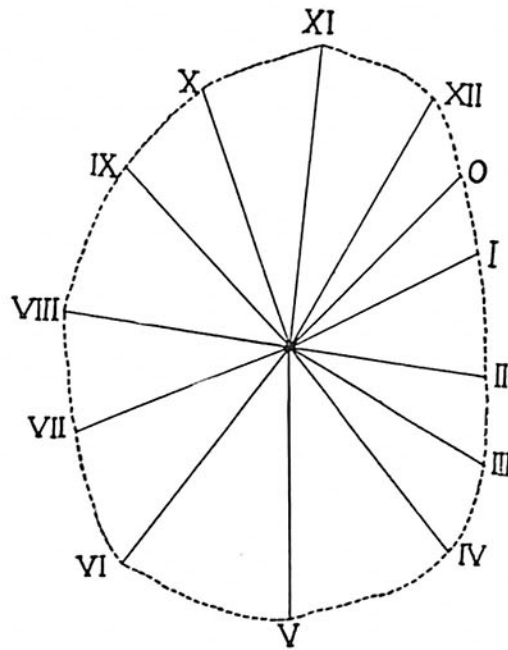


Fig. 41

Tienen dos radios representativos de velocidad máxima en direcciones casi opuestas, y dos radios representativos de velocidades mínimas en dirección perpendicular a la de los primeros.

La rotación completa del radio se verifica en 12 horas 25 mi-

nutos a razón aproximadamente de 29° por hora, y los intervalos que separan los momentos de velocidad máxima y mínima son de 3 horas, 6 minutos.

La variación de la magnitud de los radios con el tiempo sigue muy cerca a la variación de velocidades indicada en las curvas normales de las corrientes de marea.

Construídas con igual escala para hacerlas comparables, las curvas que corresponden a las épocas de zizigias aparecen de mayor magnitud que la media; y al contrario, de menor magnitud, las del tiempo de cuadraturas. Igual efecto se percibe en el tamaño relativo de las elipses en el perigeo y en el apogeo lunares.

Como la dimensión de las curvas depende de la extensión de los radios representativos de las velocidades, se ve cómo participan las corrientes giratorias de la periodicidad y variaciones de las corrientes de marea ocasionadas por la acción lunisolar; hecho que se percibe hasta en la desigualdad diurna que muestran esas curvas y que aumenta con la declinación, o distancia de la luna al ecuador.

Los máximos y mínimos y los puntos críticos de las curvas de las corrientes giratorias corresponden a las horas en que, en las costas cercanas se producen la pleamar, la baja mar y las diversas fases de la marea.

Todas estas propiedades dejan perfectamente establecido que las corrientes giratorias son efectos derivados del fenómeno general de la marea.

El sentido de la rotación de los radios es de izquierda a derecha en el hemisferio norte de la tierra, y al contrario en el aus-

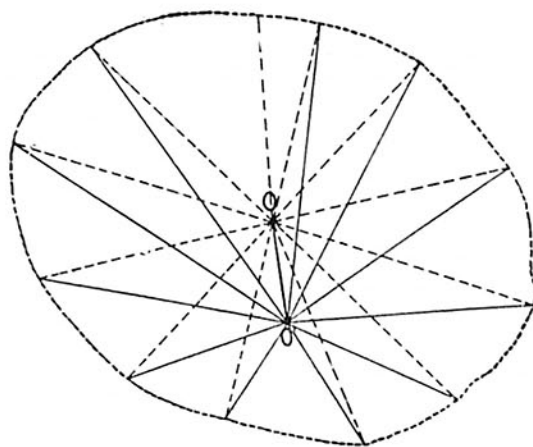


Fig. 42

tral, pero la escasez de observaciones no permite afirmar esta regla como general.

Las corrientes que provoca en el agua un viento que persiste en una dirección se sobreponen, y agregan su velocidad a las corrientes giratorias; de manera que los radios que las representan sufren un cambio resultante, en su magnitud y dirección. Su efecto en las curvas representativas se obtendría trasladando figura 42, el polo O , a otro punto O' , situado a una distancia y con una dirección iguales a la magnitud y dirección de la corriente perturbadora. En la figura, las líneas de puntos representan las velocidades observadas, resultantes de la velocidad OO' , causada por el viento perturbador, y de las velocidades de las corrientes normales, marcadas con líneas llenas.

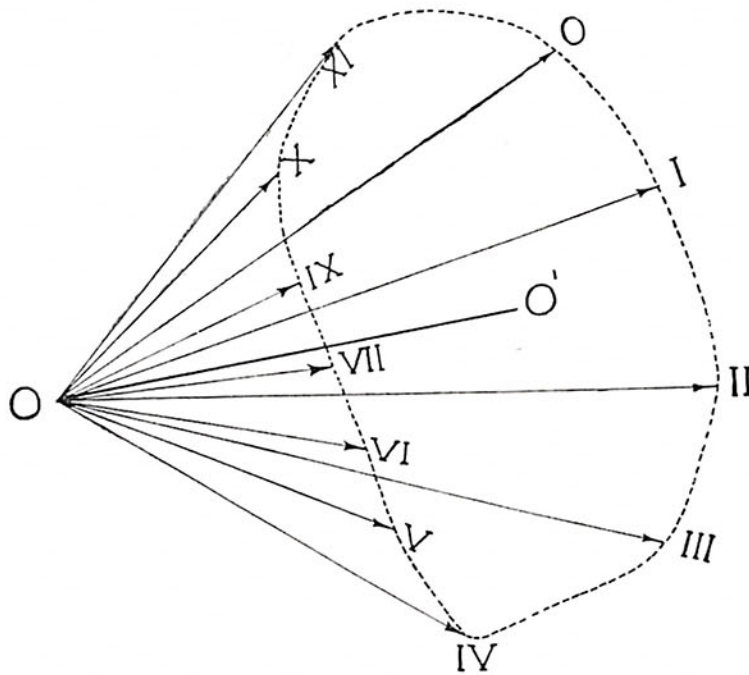


Fig 43.

Cuando la corriente es muy veloz se observa un fenómeno que aparece extraño: la dirección de la corriente giratoria no recorre todo el horizonte, sino se mantiene en un sector limitado, figura 43. Pero observando atentamente y poniendo de manifiesto las horas de cada observación, se descubre que la curva es cerrada, aunque muy irregular, y que su polo se encuentra en O , fuera de su contorno; lo que indica que ha reinado una corriente perturbadora de velocidad y dirección OO' .

Como era de esperarse, las corrientes giratorias ofrecen tipos que corresponden en general a los tipos de marea propios de la región oceánica donde acaecen.

Así, las curvas que representan su marcha en el día lunar de 24 horas y 50 minutos, reproducen los caracteres de esas mareas, apareciendo, ya simples como las diurnas, ya dobles y muy semejantes entre sí, como las semidiurnas, o ya, según el tipo mixto, dobles, pero muy diferentes la de la mañana y la de la tarde.

¿Cuál es la causa de las corrientes giratorias? Es sin duda, la composición cinemática de velocidades. Resulta de la acción mutua de dos ondas de marea que se propagan en diferente dirección. La velocidad, la amplitud, la dirección de cada una de ellas en relación con el tiempo, al componerse con las de la otra, generan una corriente y una velocidad variables a cada instante. El estudio atento de estas combinaciones ha conducido a la conclusión de que sus resultantes tienen una dirección y una magnitud como las que muestran los radios de las curvas representativas de las corrientes giratorias. Se encuentra, por ejemplo, que si las ondas componentes son de rapidez igual y se cruzan en ángulo recto y coincide la máxima velocidad de una con la mínima de la otra, la curva de la corriente giratoria toma la forma circular. Se comprende con facilidad que siendo muy variadas las velocidades y los otros elementos de las corrientes, serán también muy diversas las resultantes de su composición, así como las formas de las elipses que representen las corrientes giratorias generadas.

De un estudio matemático practicado por el señor H. M. Sverdrup con observaciones y datos recogidos en la expedición ártica del Maud en 1922 a 1925, tomando en consideración el rozamiento y la fuerza de rotación de la tierra, concluyó que con ondas que se propagan hacia la costa, las corrientes de marea deben ser giratorias, y de izquierda a derecha en el hemisferio norte y, al contrario en el hemisferio austral: He aquí, otra causa posible de las corrientes giratorias además de la composición de dos ondas de marea de diferente velocidad.

Efectos de las mareas.

Las mareas y sus corrientes, por medio de las olas, ejercen una notable acción mecánica que modifica la forma de las costas. Al golpe incesante del agua sobre los acantilados se abre generalmente en sus partes blandas una ranura que, ahondándose más y más, acaba por dejar sin apoyo a los materiales más duros sobrepuestos que, por su peso, y en fragmentos más o menos grandes, se desploman. El vaivén de las olas y de las corrientes de marea disgrega más estos despojos y el reflujó los arrastra al mar. La repetición de los asaltos va demoliendo las escarpaduras y destruyendo el frente de los acantilados haciéndolos, de este modo, retirarse de la orilla. Las aguas del reflujó, con su poder de transporte, limpian de escombros el espacio abandonado, con lo que dejan libre una plataforma que se extiende hasta la línea que alcanza la altura de la pleamar. Esta plataforma, P, figura 43, es característica de las riberas donde son sensibles las oscilaciones del mar. (1)

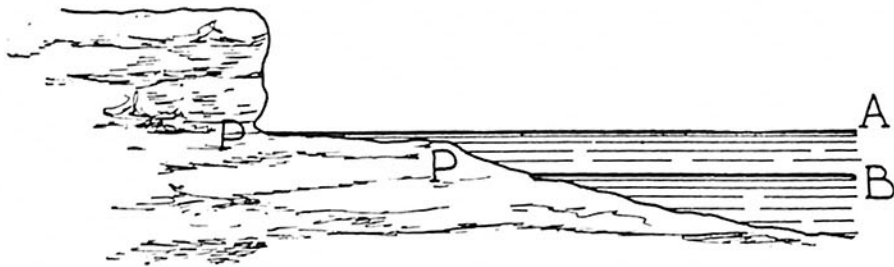


Fig. 44

Como se ve, la acción de las mareas para cambiar la arquitectura de las costas es solamente indirecta, pues se reduce a extender en la ribera el campo de acción de las olas, especialmente las de tempestad, que son el verdadero agente directo de este importante fenómeno geológico.

A su llegada al mar, los ríos pierden su velocidad y con ello, su poder de transporte; los materiales que en gran cantidad

(1) Dice el ilustre Maury en su obra citada: Es notable que esas enormes masas líquidas capaces de los más intensos efectos mecánicos, a pesar del ímpetu con que llegan a la costa, se detienen dócilmente al llegar a la línea que la naturaleza les señaló en la pleamar.

traen en suspensión, se detienen, caen y se acumulan frente a la desembocadura y forman esos obstáculos para la navegación fluvial llamados **barras**, inconveniente de que se ven libres las costas visitadas por mareas que, por su constancia y por la velocidad de sus corrientes, remueven sus materiales y los dispersan en el mar.

Las mareas de grande amplitud impiden en algunos puertos el libre movimiento de las embarcaciones, porque sólo a ciertas horas dan al nivel del agua la altura necesaria para su calado.

Puertos hay de alta latitud cuya temperatura invernal es bajo cero y que, sin embargo, se ven libres de los hielos merced a las mareas que llevan agua muy salada cuyo punto de congelación es más bajo que el del agua dulce.

Debemos notar también, un efecto biológico de esas oscilaciones diarias de la mar que, al introducir regular y alternativamente, variaciones en el nivel y en la consiguiente presión del agua, y en su composición salina, sólo permiten en la zona comprendida entre las altas y bajas mareas, la vida de ciertas y limitadas especies de plantas y animales que resisten y aun aprovechan esos cambios del ambiente.

Con los dos baños diarios que dan a la ribera y a la boca de los ríos, las mareas los limpian de impurezas, contribuyendo así a la salubridad de las costas.

Los citados efectos del movimiento periódico del agua son puramente locales, pues que dependen de la conformación de las costas, del juego de las mareas en cada paraje y del régimen de los vientos coadyuvantes. Pero la marea, ese fenómeno astronómico, manifestación de la gravitación universal, obra en el conjunto de la tierra un efecto muy digno de notarse.

El agua descansa y pesa sobre el fondo de los océanos y en sus oscilaciones no se desliza sobre él sin resistencia. Aunque vemos la luna moverse en el espacio de oriente hacia occidente, está fija en realidad y la tierra es la que gira alrededor de su eje en el sentido opuesto. Así, la atracción del satélite sobre el océano tiende a retener en su dirección el elipsoide líquido que en él levanta y a impedir, por ende, que esa masa de agua acompañe a la tierra en su rotación; lo cual no acontece porque el rozamiento del agua con el fondo mantiene unidos los dos cuerpos que siempre giran juntos. Pero esta resistencia al deslizamiento

del uno sobre el otro, requiere y consume una cantidad no despreciable de energía. ¿De dónde sale esta energía, que no puede proceder de las acciones mutuas de los dos astros?

Observando atentamente, se descubre que el planeta está animado de una fuerza viva, de una energía de rotación que depende de su masa y de su velocidad, y es la fuente que provee al trabajo del rozamiento, cediendo para ello, y perdiendo, una pequeña fracción de su valor; pérdida que resulta en una disminución en la velocidad de su rotación diurna y, por consiguiente, en un aumento en la duración del día.

La ley de la acción y de la reacción se hace sentir en un igual apresuramiento de la revolución de la luna en su órbita, lo cual trae consigo su alejamiento de la tierra y, con ello, la moderación de las mareas.

Estos efectos son insensibles, pues el aumento del día terrestre es de una pequeñísima fracción de segundo en cada siglo; pero son reales, y, acumulados en el transcurso de millones de años, serán capaces de muy importantes fenómenos. Si la luna se va alejando de la tierra, se comprende que en época anterior muy remota, se encontraba muy cerca de la tierra y ocasionaba mareas de mucha consideración, y que en el porvenir, el aumento incesante del día terrestre y la disminución correspondiente de la revolución, o mes lunar, producirán la igualdad de las dos duraciones. La tierra volverá la misma faz a la luna, como ahora lo hace la luna a la tierra, y no habiendo, por tanto, rotación del planeta frente al satélite, causa de las mareas, cesará en nuestro globo ese imponente fenómeno.

INDICE

PARTE PRIMERA

LAS OLAS

	Págs.
Introducción.	5
I.—Causa de las olas.	11
II.—Generación y fuerza de las olas.	13
III.—Magnitud de las olas. Su medida.	16
IV.—Altura de las olas.	17
V.—Influencia de la profundidad.	20
VI.—Espuma. Resaca.	22
VII.—Movimientos submarinos.	23
VIII.—Clases de olas y de oleaje.	24
IX.—Interferencia. Borrascas.	26
X.—Olas de temporal.	27
XI.—Olas sísmicas.	28
XII.—Apaciguamiento del mar.	32
XIII.—Energía de las olas. Su acción vertical. Sus efectos.	34

PARTE SEGUNDA

LAS CORRIENTES

SECCION I

Leyes de las corrientes

I.—La atmósfera y la mar.	37
II.—Causas generales y leyes de las corrientes.	38
III.—Descubrimiento y estudio de las corrientes.	42

	Págs.
IV.—Corrientes profundas.....	46
V.—Barcos errantes.....	47
VI.—Corrientes verticales y submarinas.....	48
VII.—Surcos de marea.....	51

SECCION II

Descripción de las corrientes y de sus efectos

VIII.—Las corrientes ecuatoriales y la corriente antártica.	52
-------------------------------------------------------------	----

Corrientes del Atlántico

IX.—Del norte.....	55
Corriente del Labrador.....	55
Corriente del Golfo.....	55
Corriente de Guinea.....	61
X.—Atlántico del sur.....	61
Corriente del Brasil.....	61
Corriente de Benguela.....	62

Corrientes del Pacífico

XI.—Pacífico del norte.....	62
Corriente Negra.	62
Corriente Amarilla.	64
Corriente Negra y corriente del Golfo.....	64
XII.—Pacífico del sur.....	65
Corriente del Perú.	65
Corriente del Niño.	66
XIII.—El Atlántico y el Pacífico.....	67
Corrientes del océano Indico.....	68
XIV.—Indico del norte.	68
XV.—Indico del sur.	70
Corriente de las agujas.....	70
XVI.—Corrientes verticales.....	71
XVII.—Función y efectos de las corrientes.....	72

PARTE TERCERA

La Marea

	Págs.
I.—La marea.....	75
II.—Causa general de la marea. Su modo de acción...	76
III.—Teoría del equilibrio.....	80
IV.—Teoría dinámica.....	86
V.—Tipos de mareas.....	91
VI.—Propagación de las mareas.....	95
VII.—Teoría de las ondas progresivas.....	96
VIII.—Oscilación en vasos cerrados. Resonancia.....	97
IX.—Teoría de las ondas estacionarias.....	99
X.—Mares interiores y lagos.....	101
XI.—Predicción de las mareas.....	102
XII.—Método de Lord Kelvin. Satélites auxiliares. Análisis armónico.....	103
XIII.—Corrientes de marea.....	109
XIV.—Corrientes giratorias.....	118
XV.—Efectos de las mareas.....	122



SECRETARÍA DE MARINA
UNIDAD DE FORTALEZA
Y COMANDO EN JEFE NAVAL
BIBLIOTECA CENTRAL

