

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS
EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

LA BATIMETRIA Y SUS PROBLEMAS

DISCURSO

LEIDO EN EL ACTO DE SU RECEPCION

POR EL

EXCMO. SR. D. JUAN GARCIA-FRIAS Y GARCIA

Y

CONTESTACION

DEL

EXCMO. SR. D. FRANCISCO NAVARRO BORRAS

EL DIA 10 DE MAYO DE 1967



M A D R I D

DOMICILIO DE LA ACADEMIA: VALVERDE, 22

TELEFONO 221-25-29

1 9 6 7

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS
EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

LA BATIMETRÍA Y SUS PROBLEMAS

DISCURSO

LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN

EN EL

EXCMO. SR. D. JUAN GARCÍA-FRÍAS Y GARCÍA

CONTESTACIÓN

DEL

EXCMO. SR. D. FRANCISCO NAVARRO BORRAS

EL DÍA 19 DE MAYO DE 1967



MADRID

Depósito Legal M. 8.186.-1967.

DISCURSO

DEL

EXCMO. SR. D. JUAN GARCIA-FRIAS Y GARCIA

TEMA:

LA BATIMETRIA Y SUS PROBLEMAS

Excmo. Sr.,
Excmos. Señores Académicos,
Señoras, Señores :

Sean mis primeras palabras para expresar mi agradecimiento por haber tenido el honor de ser elegido para ocupar un puesto en esta ilustre corporación y para rendir emocional homenaje a la memoria de los académicos ya desaparecidos Inglada Ors, Novo y Fernández Chicarro, Torroja Miret (don José María) y González Quijano, que me honraron con su amistad desde que les conocí en ocasión del Congreso de la Asociación Española para el Progreso de las Ciencias, celebrado en Zaragoza en 1940, y de un modo especial a Torroja, ya que gracias a su iniciativa fui elegido corresponsal en 1951. En esta ocasión tan solemne para mí, recuerdo también con gran sentimiento a mi antecesor en la sucesión de académicos pertenecientes al Cuerpo General de la Armada, el Contralmirante Benítez e Inglott.

La nota más sobresaliente de mi antecesor, el excelentísimo señor don Alfonso Peña Boeuf, la constituye, sin lugar a dudas, su doble personalidad como hombre de ciencia y hombre de acción. Esta dualidad de vocaciones hizo que su vida profesional se orientara hacia la carrera de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, conjuntamente con la de Ciencias Exactas. Sus primeros pasos en el ejercicio de su profesión en los principios de nuestro siglo, coinciden felizmente con el momento crítico en que el hormigón armado no había salido todavía de un relativo empirismo, no obstante los intentos realizados en la construcción con cierto carácter científico, pretendiendo hacer aplicación, como novedad, de la teoría matemática de la elasticidad. Dotado de un peculiar sentido de la economía, como corresponde a

todo buen ingeniero, los presupuestos de los proyectos de Peña Boeuf suelen ser más económicos que los redactados siguiendo las normas usuales de la época. Esto era posible gracias a su poderosa inventiva, resolviendo los problemas con que se enfrentaba creando teorías originales, como la implicada en su famoso sistema de anillos independientes, que aplicó por primera vez en su proyecto de presa con el que construyó el pantano del Isbert, en Denia, resistiendo la dura prueba de la riada de 1925 al rebosar el agua en toda la coronación.

Sus concepciones tenían así que ser forzosamente muy audaces para su época, como lo demuestra el espesor de cinco metros en el fondo para 100 metros de altura en la presa del pantano de Alloz, con su sistema, en comparación con más del doble con la solución de arco ménsula y con los 73 metros que tenía el proyecto de gravedad. Lo atrevido de sus ideas tuvo que dar lugar, como es natural, a graves objeciones opuestas por consejeros timoratos y sus enemigos declarados, como en ocasión de la chimenea de San Justo Desvern, y de un modo especial en el acueducto de Tardienta y en el pantano de Benagéber, inaugurado en 1952 por el Generalísimo y que lleva su nombre. En todos estos serios contratiempos puso Peña Boeuf a prueba su gran tenacidad con un notable dominio de sí mismo, basado en sólidos fundamentos de posibilidades racionales, como en ocasión del segundo de los pantanos citados, en el que, después del largo y enojoso proceso político y judicial de todos conocido, su primitivo proyecto de 100 metros de altura quedó reducido a la ataguía que por tantas causas se ha hecho famosa, pero con todo, constituyó un éxito rotundo de su sistema original de tipo de presas bóvedas, pues con sus 42 metros de altura resistió airoosamente la prueba.

Otra característica peculiar de Peña Boeuf, estrechamente ligada con el factor económico es, como él reconoció muy bien, el criterio que siempre ha tenido y le ha dado el mejor resultado, «de idear el funcionamiento de todo lo que debe ser duradero en la vida con la idea de la mayor simplicidad, que es como siempre se producen los fenómenos naturales de la vida». Si alguno de sus grandiosos proyectos no llegaron a realizarse, como el hangar para zeppelines en Sevilla, el puente sobre el Tajo en Lisboa y el puente sobre el Estrecho de Gibraltar, fueron por causas ajenas por completo a su inquebrantable voluntad, pues por su parte él hizo siempre lo posible por presentar todo cuanto se pudiese requerir para hacer la cons-

trucción, por complicados que fueran los trabajos de preparación, que muchas veces implicaban no pocas dificultades.

Como final de estas pinceladas sobre las facetas más importantes de su semblanza, es interesante poner de relieve una de las grandes virtudes que caracterizaron su relevante personalidad. Peña Boeuf no tuvo jamás el menor recelo que a veces suele surgir ante una posible rivalidad profesional, en especial en la esfera de la investigación científica. Cuando fue requerido por su reconocida autoridad, para el cargo de director-adjunto de la obra del viaducto sobre el Esla, por la gran responsabilidad que suponía dirigir la construcción de un proyecto tan atrevido, y al reanudarse después de la interrupción obligada por nuestra Guerra de Liberación, siendo ya Ministro de Obras Públicas, Peña Boeuf no vaciló en nombrar para sustituirle en dicho cargo, así como en su clase de la Escuela de Caminos, a otro ingeniero —Eduardo Torroja— que por entonces ya había logrado un merecido prestigio en el mismo campo de investigación que él cultivó con tanto acierto.

* * *

La razón de haber elegido el tema que aquí presento, radica principalmente en su gran actualidad e inmensas perspectivas, ya que las líneas de igual sonda —isobáticas— constituyen el único medio para conocer la superficie de la corteza terrestre cubierta por los océanos, cuyo levantamiento en la extensión y precisión de las exigencias modernas no es posible hasta que el progreso de la técnica ha alcanzado el nivel de los últimos años, y en especial, el de la década en que vivimos.

LA BATIMETRIA Y SUS PROBLEMAS

I

LA DETECCIÓN DEL RELIEVE SUBMARINO

Raras veces ofrece la Historia ejemplos, como el de la Batimetría, de un período tan dilatado entre sus orígenes, exclusivamente como arte, hasta lograr alcanzar un desarrollo con ciertos caracteres científicos. Desde los tiempos más remotos en que el hombre se lanzó a surcar los mares con sus naves, surge la sonda como recurso indispensable para evitar los peligros que se ocultan bajo sus aguas y mucho antes de aparecer los primeros rudimentos de la carta náutica son ya utilizadas enfilaciones naturales para localizar parajes por donde navegar con seguridad. Refiere Estrabón que en ocasión de un viaje a las Casitérides, un barco fenicio llegó a estar perseguido muy de cerca por otro romano, logrando burlar la caza de que era objeto gracias a la amenaza de unos bajos que sólo él pudo sortear con habilidad.

Durante casi medio centenar de siglos permanecen los procedimientos de sondeo vinculados al simple principio de la plomada y desde principios del XVIII es posible la representación del fondo de los mares gracias a la feliz idea que tuvo Cruquius de unir con una curva los puntos de la misma sonda, surgiendo así la línea batimétrica que ha recibido el nombre de isobática. Esta idea implica, evidentemente, el modo más sencillo y práctico de representar el relieve submarino, ya que constituye la proyección vertical en la superficie del mar, de los cortes de este relieve con las superficies paralelas a aquélla y, por tanto, la carta batimétrica que así resulta es la más apropiada para los levantamientos en la mar, pudiéndose decir lo

mismo en cuanto a su utilización al tener que operar en ambos casos desde dicha superficie, o por su referencia, los submarinos.

Aunque a finales del siglo XIX se publicó, bajo la iniciativa del príncipe de Mónaco, una «carta general batimétrica de los Océanos», intentando dar una primera idea del relieve oceánico, la fantasía jugó el papel más importante en este buen propósito, porque, como Thoulet mostró, la densidad de los sondeos efectuados hasta entonces —una sonda por cada 500 millas cuadradas— era ridícula para tal objeto. Por la misma época se inició la ciencia oceanográfica —tan vinculada a la Batimetría— con los viajes del H. M. S. «Challenger» (1872-76), construyendo también una carta batimétrica y aunque muchos barcos proporcionaron miles de sondas hasta finales del mismo siglo, no pudieron servir más que para la apreciación del fondo submarino en forma muy rudimentaria, tanto por la escasa cantidad como por la deficiente calidad de los sondeos.

La medición de las grandes profundidades era una empresa muy complicada en el siglo XIX, y por ello el número de sondas profundas registradas hasta 1914 no pasaba de 6.000. La razón principal era que con los clásicos escandallos de gran profundidad —si bien se mejoraron mecanizándolos, como con la famosa máquina de sondear de William Thomson—, eran extraordinariamente lentas las operaciones de los levantamientos, no constituyendo en realidad un medio propiamente científico para la detección del relieve submarino.

La idea de aplicar la propagación del sonido a las medidas de la profundidad, se remontan al principio del siglo XIX con la propuesta del físico francés Arago (1807), pero no logran cristalizar hasta nuestro siglo con los grandes progresos realizados en la investigación de la propagación de las ondas sonoras en el agua, con motivo de la Primera Guerra Mundial, en especial en ocasión de la lucha antisubmarina. Al ser revelados estos progresos a la terminación de la contienda, se concentraron principalmente los esfuerzos en experimentar en los barcos los sondadores acústicos para resolver las dificultades que se presentaban en relación con la posición más adecuada para el transmisor y el hidrófono, llegando en los años veinte a obtener resultados satisfactorios, quedando desde entonces consagrada su utilización en la práctica de los sondeos con el abandono del escandallo —excepto en ciertas circunstancias— y a partir del año 1933, las sondas de los levantamientos hidrográficos se obtienen todas con este tipo de sondador, siendo una característica muy importante el

poder hallar las sondas a la velocidad normal del buque, lo que no era posible con los sondadores mecánicos.

Puede decirse que antes de 1930 el conocimiento del fondo del mar se limitaba a una representación muy rudimentaria de las plataformas continentales, prestándose escasa atención a su detalle; pues como las cartas marinas se construyeron para la seguridad de la navegación de superficie, se contentaban los hidrógrafos con la busca de bajos y demás peligros para el navegante, consiguiéndolo después de laboriosos trabajos con el clásico escandallo. Con el advenimiento del sondador de eco y las exigencias de la navegación submarina, se han perfeccionado los levantamientos que se efectúan actualmente. Como esta clase de navegación no parece pase de los 500 metros de profundidad, bastaría entonces con levantamientos hasta este límite a los efectos de la seguridad, pero desde hace algunos años ha surgido la posibilidad de servirse de la topografía submarina para resolver el problema de la posición en la navegación, lo que unido a las demás exigencias de la ciencia oceanográfica, hace despertar el interés porque el levantamiento batimétrico sea lo más completo posible.

Es en realidad el sondador de eco y, en especial, en cuanto al perfil del fondo que proporciona con su gráfica según la línea de rumbo, lo que permite una definición del relieve submarino, si bien solamente sea aproximada, pues aunque con los cortes verticales del mismo que implican dichos perfiles, tengamos ya un medio de obtenerla con cierta rigurosidad, es fácil imaginar que muy bien puede quedar sin detectar cualquier accidente que implique una irregularidad entre dos perfiles sucesivos, escapando a la operación de la interpolación, no existiendo, en consecuencia, una garantía absoluta de su detección. El camino que se inicia con el sondador de eco constituye un gran avance, pero es evidente que, además del citado inconveniente, se une la laboriosidad de este procedimiento por la cantidad de perfiles que es necesario obtener cuando el fondo es muy irregular y, por tanto, el coste excesivo que implica surcar las aguas una y otra vez en forma compacta. Por ello, no es de extrañar que solamente una pequeña parte de las regiones oceánicas ha sido adecuadamente levantada y comparada con la topografía terrestre, se conoce relativamente poco del relieve submarino.

El problema de la detección acústica del relieve submarino ha evolucionado extraordinariamente en los últimos tiempos. Con el

sector-scanning asdic y otros dispositivos electro-acústicos, se ha resuelto el importante problema de dar con detalle el perfil del fondo del mar a través del rumbo seguido por el buque y con esta imagen de tres dimensiones se consigue un enorme ahorro de coste y tiempo en el levantamiento de la zona, quedando garantizada, además, la detección de todo accidente con el barrido de media milla de amplitud que se realiza en cada corrida del buque, consiguiéndose así la perfección tan deseada. Aunque este procedimiento se encuentra todavía en fase experimental, las pruebas ya realizadas —entre ellas, con el equipo montado en el R. R. S. «Discovery» por el Departamento de Ingeniería de la Universidad de Birmingham— han constituido un éxito completo, siendo de esperar que bien pronto se aplique a los levantamientos hidrográficos.

Con el perfil transversal —una vez corregido— proporcionado por el *sector-scanning asdic*, se obtiene la distancia de sus puntos a la derrota seguida por el barco y la profundidad en cada uno de ellos, cuyos datos son suficientes para el trazado simultáneo de líneas de posición de base isobática que veremos más adelante, hallándose así la posición por procedimientos puramente batimétricos. Con otro equipo más perfeccionado —el *contour scanning set*— se halla la distancia y la sonda en cualquier dirección del punto central, es decir, es un método muy similar al sistema PPI usado en la técnica radar, obteniéndose el perfil completo del fondo en cada rotación del oscilador. Presenta, sin embargo, la limitación de que, por ahora, sólo se ha conseguido para profundidades que no sean demasiado grandes, debido a la velocidad relativamente baja del sonido.

El problema de la estabilidad de plataforma tiene una gran importancia en los sondeos por eco, en especial en las nuevas técnicas por medio de haces estrechos, gracias a las cuales se han podido detectar por primera vez los detalles topográficos muy accidentados situados verticalmente debajo del buque. El «Surveyor» del *Coast and Geodetic Survey* de los Estados Unidos, ha realizado ensayos en la mar con un nuevo sistema de sondeo con un haz estrecho estabilizado electrónicamente (NBT) con estrechez de haz de 4°5. El éxito logrado en las experiencias realizadas en el Pacífico Norte significa la posibilidad de obtener con el NBT precisiones más grandes y un rendimiento superior en los sondeos de grandes profundidades.

Con el *Sonar* de haz fijo para su utilización en los levantamientos, se obtiene una imagen del fondo hasta una distancia de 550

metros a cada banda del buque, pudiéndose lograr alcances mayores empleando un emisor de gran potencia con «transducer» remolcado y si, además, está estabilizado electrónicamente, se consiguen mejores resultados que con los aparatos estabilizados mecánicamente. El OBSS (*Ocean Bottom Scanning Sonar*) —Sonar de exploración de fondos oceánicos— es remolcado a una distancia constante del fondo, lo que presenta el inconveniente de que puede quedar atrapado en algún accidente. De los tres de este tipo que usaron los norteamericanos en las operaciones de búsqueda y recuperación de la bomba de Palomares, sólo pudieron recuperar uno, que también había quedado atrapado en el fondo.

Todos los sistemas de sondeo por eco acusan, como es natural, las anomalías de la propagación del sonido en el agua, que pueden falsear las mediciones efectuadas, siendo de las más importantes la debida al fenómeno del «fondo fantasma», cuya causa, según las teorías más recientes, son organismos nocturnos que suben a la superficie en la noche para alimentarse en las aguas de rico plaktom y descienden otra vez por la mañana. Hasta ahora, estas anomalías que pueden falsear las sondas por eco, no se pueden delatar más que por medio del clásico escandallo, pero esta enojosa comprobación se podrá desechar cuando se utilicen las líneas de posición de base isobática, ya que la verificación se puede conseguir entonces con una tercera cuando se considere necesario.

II

EL PROBLEMA DE LA POSICIÓN EN LA MAR CON APOYO DIRECTO EN TIERRA

De bien poco serviría el progreso conseguido en la técnica del sondeo con las grandes perspectivas que presentan los procedimientos de haces dirigidos, si la técnica de la posición no se desarrollara de igual forma proporcionando los métodos apropiados a las exigencias modernas, pues no tiene sentido aquilatar la información del relieve submarino si la posición no se determina con la mayor precisión. El almirante inglés Day, *Hydrographer of the Navy* por los años cincuenta, expresó su inquietud en este aspecto diciendo que: «Mientras los levantamientos se realizan con cierto apoyo costero, más o menos directo, incluso a distancias de unas cien millas de la

costa, no parece existir problema, pero la superficie total del mundo que implica tal zona es bien pequeña comparada con la inmensidad de todos los mares» y si se piensa, como debe pensarse, que algún día se emprenda el levantamiento completo, hay que enfrentarse con una realidad que hoy apenas se ha vislumbrado.

Hasta hace pocos años, se usaban marcas fijas en tierra para los levantamientos hidrográficos, por medio de las cuáles se obtenía visualmente la posición al mismo tiempo que las sondas y conforme se adentraban en la mar, alejándose de estas marcas, se fondeaban marcas flotantes que eran situadas, a su vez, respecto a las primeras. Algún progreso se consiguió en la técnica de las mediciones de distancias en estas zonas más o menos alejadas de la costa, antes de que surgieran los modernos instrumentos electrónicos, por medio de las mediciones basadas en la determinación precisa de la velocidad horizontal del sonido en el agua, siendo dignas de mención las investigaciones realizadas por el *Coast and Geodetic Survey* de los Estados Unidos.

Así como las investigaciones realizadas durante la Primera Guerra Mundial para localizar los submarinos debajo del agua, dieron lugar al progreso de las técnicas de la propagación del sonido en este elemento, de tal forma que cristalizaron en el sondador de eco y demás sistemas de localización acústica, la Segunda Guerra Mundial, en ocasión de la misma lucha antisubmarina, dio lugar al descubrimiento y realización práctica del radar para la localización de esta clase de buques cuando salían a superficie durante la noche para la carga de sus baterías.

El radar proporciona excelentes resultados en los levantamientos en distancias desde tierra hasta un máximo de unas 20 millas y con esta maravillosa invención se abre una era con una proliferación asombrosa de sistemas de medición radioeléctrica de la distancia que han constituido una verdadera revolución en el campo de la Geodesia. Aunque con menos precisión que en esta última, ya que en ella se ha llegado a errores dentro del orden de escasos centímetros, también se han aplicado estas técnicas en el problema de la posición en la mar y los sistemas basados en ellas aumentan de tal modo y mejoran tan rápidamente, que se considera complicado estar al corriente de los progresos alcanzados. Ya son de uso normal en los levantamientos hidrográficos y otras operaciones en la mar, los sistemas

Decca, Electrotape, Shoran, E. P. I. (Indicador electrónico de posición), Raydist, Lorac, Rana, Hi-Fix, Hydrodist, Derveaux, Toran.

Dentro del sistema Decca, el Two-Range Decca es uno de los que ofrecen mayores posibilidades a gran distancia de la costa. Utiliza dos estaciones de apoyo solamente y las líneas de posición son circulares en lugar de hipérbolas —usadas en la mayoría de estos sistemas radioeléctricos—. Su alcance es de alrededor de unas 100 millas de la costa. El Raydist proporciona la posición automáticamente mientras navega el barco, de un modo continuo, por distancias a dos estaciones relés en tierra, estando la magistral a bordo. Su alcance es de 100 a 250 millas. El D. M. —Raydist mejorado— mide distancias hasta 200 millas y su precisión es de unos tres metros. Las redes Lorac implican una cobertura que reduce el total de equipos móviles requeridos en el levantamiento de grandes zonas. El Hydrodist es la adaptación del Telurómetro para los levantamientos hidrográficos con dos unidades magistrales a bordo y dos estaciones en tierra. En todos estos sistemas, los equipos terrestres pueden ser cambiados fácilmente de un lugar a otro por medio de lanchas o en helicópteros, siendo así posible establecer estaciones de apoyo en puntos inaccesibles.

No sólo la medición de distancias, sino también las angulares, se han conseguido mejorar con los medios electrónicos, siendo el MPFS (*Microwave Position-Fixing System*) un ejemplo notable que, utilizando tres estaciones transmisoras en tierra, permite aplicar el método de ángulos capaces para obtener la posición.

Todos estos sistemas dan un error tan pequeño en la posición, que han hecho progresar notablemente la precisión en los levantamientos, pero no han logrado alcances mayores de las 250 millas de la costa. Con las ayudas radio implicadas en los sistemas Loran y Omega, se ha conseguido una cobertura mucho mayor, capaz de abarcar casi todos los océanos, pero su precisión es mucho menor. Con el Loran «C» se obtiene, en general, la posición dentro de un radio de 1.600 millas con una milla de error. La precisión del sistema Omega es de media milla dentro de un radio de 5.000 millas, lo que permite la cobertura necesaria con un pequeño número de estaciones.

III

LAS OBSERVACIONES ASTRONÓMICAS EN LA MAR

Hasta hace bien poco no había más posibilidad de hallar la posición de un modo universal en el océano que por medio de las observaciones astronómicas. Por ello, la pérdida de tiempo y esfuerzo cuando las condiciones de nubosidad son adversas para la observación visual, ha sido objeto de una gran preocupación durante muchos años, quedando resuelta la cuestión con el radio-sextante, con lo que han mejorado notablemente estas observaciones en este aspecto del problema, pero no así en cuanto a la precisión, pues el cuarto de milla aparece todavía como barrera infranqueable. Por otra parte, la mayor precisión sigue siendo todavía con el horizonte natural —ya que el sextante de burbuja no ha logrado los resultados que se esperaban de él en la práctica— y para que sea lo más eficaz posible, aumentando el número de astros a observar, no hay más que dos momentos en el día —los crepúsculos— verdaderamente aprovechables en condiciones óptimas.

La técnica de la estabilización de plataforma puede ser el camino para progresar en las observaciones astronómicas en la mar, volviendo a tener actualidad un problema que tuvo gran interés en los siglos de los Descubrimientos, cuando fueron vitales las mediciones angulares en la mar, dando lugar a propuestas y experiencias que forzosamente se frustraron, porque el progreso técnico de la época no estaba al nivel apropiado para su resolución, terminando al fin esta preocupación con la invención de los instrumentos de reflexión en el siglo XVIII, al hacer innecesario este problema por proporcionar hasta nuestros días tales instrumentos la precisión necesaria y suficiente para la navegación astronómica en la mar. Ante ciertas exigencias modernas de la precisión en navegación, así como en el campo de los levantamientos y otros aspectos, vuelve este problema de la estabilidad de plataforma a ser objeto de estudio, constituyendo uno de tantos que ocupan poderosamente la atención de los científicos y técnicos.

No parece, sin embargo, que el problema de la posición en la mar por medio de las observaciones astronómicas, tenga ya un gran

interés práctico. Incluso en Geodesia, solamente se reservan para la determinación del punto fundamental en el levantamiento de la red de primer orden de un gran país, pues su precisión no se puede comparar con la de las triangulaciones y trilateraciones, ya que las astronómicas no proporcionan más que la precisión del orden de algunos metros y a costa de muchas dificultades y pérdida de tiempo con instalaciones y materiales importantes, utilizándose, a lo sumo, en ciertos casos para la reorientación de la red —puntos de Laplace—.

Las dificultades que presentan las observaciones astronómicas, en especial la debida a las situaciones de nubosidad, se han tratado de remediar con el uso del Loran. Algunos barcos, como el H.M.S. «Challenger», han realizado experiencias sobre su precisión respecto a las astronómicas, habiendo llegado a la conclusión de que es parecida en ambas y que usadas conjuntamente son una ayuda inestimable para los trabajos oceanográficos e hidrográficos, estimando que es el mejor método que puede ser utilizado a distancias considerables de tierra. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que esta afirmación se hizo en vísperas de la aparición de los satélites artificiales, que en definitiva parece ser la verdadera solución del problema de la posición de precisión en la mar fuera del alcance de las ayudas electrónicas que proporcionan esta precisión.

IV

EL PROBLEMA DE LA POSICIÓN EN LA MAR POR MEDIO DE LOS SATÉLITES ARTIFICIALES

Lo que verdaderamente ha revolucionado de un modo extraordinario el problema de la posición en la mar, tanto en el campo de los levantamientos como en el de la navegación de precisión, son los satélites artificiales. Se afirma con razón, que en el estudio de la forma de la Tierra se han realizado mayores progresos por el análisis de sus órbitas, en los años desde 1958 a 1960, que en los anteriores doscientos años. Y si en el campo de la Geodesia ha sido tan trascendental su aplicación, probando con las mediciones efectuadas, que el interior de nuestro planeta tiene una gran consistencia, siendo ilegítima la hipótesis muy extendida en el pasado, de que

puede ser tratado como un fluido, no son menos importantes sus aplicaciones en otros aspectos. La diferencia de 170 metros del exceso del diámetro ecuatorial respecto al polar, del valor obtenido por los satélites artificiales en relación con el aceptado anteriormente, es una buena prueba de la gran precisión alcanzada en las mediciones geodésicas y, en consecuencia, de la que cabe esperar de estos valiosos instrumentos como puntos de apoyo en el problema de la posición en general.

Con el desarrollo de los sistemas aéreos de medición de distancias y los basados en los satélites artificiales, se abre un campo insospechado para los levantamientos en pleno océano, esperándose grandes resultados. La *General Electric* completó un estudio en su contrato con la NASA en 1964. En este proyecto, los satélites están moviéndose en el mismo sentido de la rotación de la Tierra, con un período orbital de veinticuatro horas y, por consiguiente, aparecen estacionarios con respecto a la superficie de la misma. Dos satélites, uno en 15°W y otro en 50°W de longitud, están a la vista constantemente para cualquier observador en la zona del Atlántico Norte entre Europa y Norteamérica. Se estima que veinticuatro horas después de haber sido lanzado un satélite, se puede conocer bien su posición dentro de unos 30 metros en cada una de las tres dimensiones desde las estaciones terrestres que están situadas una a cada lado del Atlántico. Con el sistema Transit, desarrollado por la U. S. Navy, se esperaba obtener precisiones de 50 metros, e incluso mayores, pretendiéndose que se pueda determinar la posición con una precisión que se aproxima a la requerida en Geodesia.

Los sistemas aéreos y por los satélites artificiales, tienen la ventaja sobre los apoyados directamente en tierra, que pueden operar a mayores alcances, pero el error es mayor y presentan dificultades en cuanto a las mediciones angulares. Sin embargo, aunque la precisión lograda hasta ahora en los satélites es, en general, de una milla para la navegación y de un décimo de milla cuando se desea mayor precisión en esta última y para los levantamientos, se puede aquilatar aprovechando el patrón de la variación de la precisión, el cual se mueve sobre la Tierra en los sistemas no síncronos, conforme los satélites se mueven en sus órbitas. Los momentos más favorables a la mayor precisión, se pueden obtener esperando a que las regiones de alta precisión de la cobertura del satélite correspon-

dan con la localización del usuario, siendo distribuidos los períodos de espera en ciertos sistemas entre unos pocos minutos y una hora.

Con anterioridad a la Conferencia de Helsinski (1960) de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica, estaban excluidos los instrumentos aéreos de las operaciones geodésicas, pero ante los resultados obtenidos se acordó en ella incluirlos, habiendo progresado notablemente en los años posteriores, sucediendo lo propio con los satélites artificiales en utilización conjunta con aquéllos. Para usos geodésicos se lanzó en 1962 el satélite «Anna», quedando a una altura de 1.100 kilómetros, estando equipado con los sistemas Segor y Transit, así como con un faro relámpago para observaciones ópticas.

V

LA NAVEGACIÓN POR INERCIA Y LOS MÉTODOS BATIMÉTRICOS DE LA POSICIÓN

Parece ser que con el sistema Omega se puede cubrir por completo los océanos con ayudas electrónicas, pero hay que considerar la eventualidad de un estado de guerra en que tales ayudas pueden ser interferidas y, además, la precisión que proporciona no es satisfactoria para los levantamientos. Por otra parte, las ondas radio, desde las más altas frecuencias radar hasta las longitudes de onda de varios cientos de metros, no penetran en el agua, pues sólo una banda muy limitada de frecuencias bastante bajas puede ser recibida en su seno y, es evidente, que la navegación submarina presenta en la actualidad un interés extraordinario desde que los submarinos Polaris constituyen la mejor salvaguardia de la paz, evitando quede impune un ataque atómico por sorpresa al mundo occidental, que impida la reacción apropiada con apoyo directo en tierra, pues por su ocultación y movilidad debajo del agua escapan a toda destrucción premeditada. Esto es debido, en gran parte, a su propulsión nuclear, que les proporciona una autonomía casi ilimitada con una permanencia en inmersión relativamente profunda, que por ahora sólo está restringida por los requisitos de la navegación, teniendo que subir a cota periscópica con la frecuencia necesaria para la rectificación de su posición.

Con objeto de disminuir todo lo posible esta frecuencia, se investiga con gran interés en el progreso de los instrumentos de navegación. Por una parte, se trata de aplicar las técnicas radiometría y radio-astronomía y en tal sentido se han logrado equipos de radio-sextante en forma compacta y con suficiente adaptabilidad para ser utilizados en la práctica. Parece ser que los submarinos Polaris están equipados con un sistema combinado de sextante fotoeléctrico y radiométrico. Por otra parte, se investiga de un modo especial en los sistemas de inercia, pero al no ser estos más que una navegación de estima con cierta precisión, lo único que puede conseguirse es la disminución de la citada frecuencia en la rectificación de la posición, pero no pueden eliminarla por completo. La importancia de este problema es tal, que los Estados Unidos tienen dedicado un barco especial —el «Compass Island»— para la investigación y prueba de instrumentos de navegación, especialmente los equipos de inercia, siendo probados y calibrados los que después han de ser montados en los submarinos Polaris.

Hay que tener en cuenta, además, que la precisión de la navegación submarina en los Polaris no es sólo por razones de la navegación en sí, sino más bien por la cuestión de los lanzamientos de estos misiles, ya que, estando navegando constantemente por razones de evasividad, necesitan conocer su posición lo más exacta y rápidamente posible en cualquier momento para el caso de una reacción atómica inmediata y, es evidente, que si bien están dotados con calculadores electrónicos para la determinación de los elementos del lanzamiento, la base fundamental de esos cálculos es la posición lo más precisa posible en el instante de efectuarlo. Por esta razón se considera actualmente la navegación por estima y, por tanto, la navegación por inercia, de la mayor importancia debajo del agua. Pero los sistemas de inercia son costosos, lográndose alguna precisión a costa de muchos esfuerzos, y aunque esto no sea obstáculo desde el punto de vista militar, tampoco es satisfactoria, pues se considera que al final de una navegación de una hora con avión convencional o helicóptero —una de las informaciones asequibles— suele ser de una milla de error debido a la tendencia del giróscopo, incluso con un error cero de alineación de cabeza. Por ello se está haciendo un intenso estudio sobre este asunto para aplicar los aparatos basados en el Maser o Laser. El Ring-Laser —una forma particular del Laser— puede competir con el giróscopo en el problema

de la estabilidad de plataforma, ya que proporciona un modo completamente nuevo para medir la dirección relativa en el espacio inerte y también puede ser útil para determinar la velocidad del vehículo que lo usa, pero hay que resolver todavía muchas dificultades para que pueda reemplazar al giróscopo en la práctica.

Todos están de acuerdo en reconocer, por tanto, que la comprobación de la posición es indispensable y que no existen actualmente métodos para verificar la estima estando sumergido por debajo de la cota periscópica. Como las únicas ayudas disponibles entonces son la sonda por eco, Sonar y Asdic, no hay más solución que el uso de los métodos apropiados para hallar la posición por medio de estos instrumentos. También existe bastante acuerdo en que las líneas isobáticas pueden ser de gran valor, pero ni en el mundo científico ni en la práctica de la navegación y de los levantamientos, se conoce un procedimiento puramente batimétrico para determinar la posición, pues lo único que ha sido objeto de tal ciencia y práctica es hacer la coincidencia con las isobáticas de la carta, del levantamiento local que se efectúa con relación a una boya fondeada para determinar la posición de ésta —método que ha sido usado con bastante frecuencia por el *Coast and Geodetic Survey* para la relocalización de las boyas Dan y otras—, o la coincidencia del perfil obtenido por el registrador del sondador de eco, con las isobáticas de la carta, haciendo tanteos en la dirección de la derrota seguida, hasta lograr encajarlo y obtener así a *grosso modo* la posición del buque. Hay que advertir, además, que la garantía del método seguido con las boyas Dan, es puesto en duda por algunos al estimarse como desventaja del uso de esta clase de boyas, no sólo lo laborioso de las operaciones que implican, sino el hecho de la incertidumbre del lugar en que han sido fondeadas.

Es a todas luces evidente, que estos procedimientos son bastante rudimentarios y no pueden compararse con los métodos rigurosamente científicos que utilizan líneas de posición, como los basados en los apoyos terrestres. Ahora bien, estas líneas de posición, lo mismo que las de apoyo astronómico, son todas ellas de base puntual. Las rectas de altura están definidas por el punto implicado en el astro observado; las líneas de marcación, las de igual distancia y las de arcos capaces —obtenidas todas ellas por medio de marcas terrestres—, están también definidas por los puntos implicados en estas marcas; las líneas hiperbólicas y las circulares, utilizadas en

los sistemas Decca, Loran, Consol y Omega, están determinadas fundamentalmente por los puntos de situación de las estaciones respectivas; las líneas de marcación radiogoniométrica y las isoacimutales, también lo están por los puntos de situación de los radiofaros.

Como en tantos otros problemas en que al iniciarse su planteamiento en la mar se ha tratado de aplicar lo que en tierra ya estaba en pleno desarrollo —siendo un buen ejemplo el que la historia nos ofrece con las mediciones angulares con los esfuerzos realizados para adaptar el astrolabio a las exigencias de los barcos, hasta que el descubrimiento de los instrumentos de reflexión puso punto final a tales pretensiones—, cabe intentarlo en este problema de la posición en la navegación y en los levantamientos batimétricos. Pero al tratar de realizar este intento, surge la necesidad de utilizar marcas del fondo submarino en forma análoga a como se utilizan las marcas terrestres. Cuando todavía no se había logrado cubrir por completo con el Loran las zonas en que hacen estación los barcos meteorológicos, se pensó obtener su posición por medio de la sonda, y con este objeto se efectuaron algunos levantamientos de tales zonas, pero no se logró esta pretensión y por ello, al obstinarse en utilizar rasgos del fondo, para que al modo de marcas submarinas sirvan para hallar la posición, ha dado lugar a que exista cierto excepticismo en que la sonda por sí sola pueda servir para resolver este problema, siendo compartido este pesimismo por el almirante Day, antes citado.

La realidad es que si bien se ha progresado notablemente en los instrumentos —sondador de eco, Sonar y Asdic—, no es posible la detección con ellos de marcas naturales del relieve submarino, para que sirvan de apoyo para obtener líneas de posición en forma análoga a como se hace con las marcas terrestres. Cabe pensar en la utilización de balizas activas de fondo que pueden ser detectadas fácilmente por cualquier sistema Sonar pasivo, como las que ya están en uso, con éxito, en algunas actividades submarinas, como los trabajos de prospección petrolífera. Sin embargo, aunque en estas balizas la fuente de energía a base de baterías les permite una duración de casi un año y con fuentes de tipo nuclear, como en los relojes atómicos, cabe esperar una duración casi ilimitada, no parece que las complicaciones implicadas en el costo, posibles averías, etc., permita en la práctica su uso generalizado en forma análoga a las marcas o estaciones que sirven de apoyo en tierra. Es innegable, sin

embargo, la utilidad de estas balizas de fondo en las operaciones batimétricas —si se piensa, como debe pensarse, que la Batimetría logre el desarrollo que merece—, aunque sólo sea de un modo transitorio, para resolver el problema de su posición en los levantamientos fundamentales, y en tal caso estas balizas pueden constituir el instrumento ideal para tales operaciones.

No es de extrañar, por consiguiente, que exista todavía bastante discusión sobre la utilidad de las sondas para determinar la posición. Ello es debido a que todavía no se ha planteado el problema en sus verdaderos términos en la Ciencia conocida, al obstinarse en tratar de resolverlo en forma análoga a como es usual con el apoyo terrestre —líneas de posición de base puntual—. Sin embargo, si la cuestión se plantea en cuanto a la posibilidad de poder utilizar las líneas isobáticas basándose en ellas para obtener verdaderas líneas de posición, el problema cambia por completo, apareciendo un campo fecundo con la revelación de las líneas de posición demora-distancia, líneas de posición bidireccionales y líneas de posición mini-distancia. Con estas tres clases de líneas de posición, tenemos los elementos necesarios y suficientes para responder a todas las exigencias del problema de la posición, tanto en las operaciones de levantamiento como en la navegación, con procedimientos puramente batimétricos.

Los métodos de hallar la posición por medio de isobáticas utilizando tales líneas de posición —en su aplicación adecuada en cada caso particular— son los más sencillos, seguros, rápidos y exactos, si se dispone en todos los océanos, como probablemente se dispondrá en un futuro más o menos lejano, de las cartas apropiadas —en cuya construcción contribuirán, a su vez, estos métodos notablemente—. Tales métodos son, por tanto, los únicos que pueden proporcionar la solución en las condiciones más favorables en todos los aspectos; permiten la navegación submarina sin ayudas exteriores, ofreciendo la solución tan deseada y en las operaciones de búsqueda de objetos en el fondo en alta mar puede ser también esencial su uso, ya que en ellas se requiere una navegación muy exacta para saber dónde se ha estado antes y qué parte del fondo se ha explorado.

Quando el fondo sea plano en alguna extensión, puede ser debido con frecuencia a la existencia de sedimentos que formando capas blandas cubren una capa más dura con su correspondiente relieve. Esta cuestión ya se ha tratado con técnicas especiales, habiéndose realizado experiencias con éxito de la detección de este subfondo.

El objeto que se ha perseguido es conseguir un método de hallar la posición por medio del espesor de la capa blanda y la sonda de cada punto, pero para ello es preciso, como es natural, que la línea de igual espesor presente un buen corte con la línea isobática del subfondo. Es evidente que estas experiencias de detectar el relieve del subfondo a través de la capa blanda que lo cubre son muy útiles para tratar de aplicar en tales zonas los métodos batimétricos expuestos para hallar la posición.

V I

LA CUESTIÓN DE LOS LEVANTAMIENTOS OCEÁNICOS

Con los progresos de la Ciencia y de la Técnica, tanto en el campo de la detección del relieve submarino como en los instrumentos y métodos del problema de la posición, así como los que cabe esperar en los satélites artificiales, se estará bien pronto en condiciones de emprender el levantamiento completo del relieve submarino de todos los océanos con las exigencias apropiadas de trabajo y precisión, pero la tarea es inmensa y antes de emplearse a fondo es preciso organizar científicamente lo que se va a hacer, en especial, en el problema de la posición, ya que hasta ahora se obtiene ésta, tanto en los levantamientos como en navegación, con el mismo tratamiento operativo con cada método, ya sea astronómico, Loran, Decca, Consol, Omega o cualquier otro, y con apoyo en tierra en todos estos últimos. Mientras en los levantamientos terrestres existe una clara distinción entre las operaciones geodésicas y las topográficas, estando las primeras clasificadas en órdenes diversos, en la mar no se ha tomado todavía en consideración la posibilidad de una distinción similar. Quizás sean los errores en las mediciones el motivo principal de considerar poco menos que ilusorio hablar en términos propiamente geodésicos, pero es indudable que aunque en este sentido no se llegara a lograr esta clasificación, no es obstáculo para establecer una ordenación de los levantamientos en la mar en relación del esfuerzo a aplicar en las operaciones de la determinación de la posición.

Aunque la precisión alcanzada no permita la calificación geodésica propiamente dicha, hay razones tan importantes o mayores para

esa ordenación en los levantamientos en la mar. Es posible que otra de las causas de no haber considerado una organización científica similar a la conseguida en tierra, sea debido a la imposibilidad de hacer uso de los puntos apropiados del relieve submarino que sirvan de un modo natural como elementos básicos de una triangulación o trilateración. Esta insuficiencia natural podría suplirse con la utilización de balizas activas de fondo, pero no parece sea este el camino a seguir. Habrá que utilizar algunos puntos del fondo haciendo uso de tales balizas, pero sólo de un modo transitorio, pues de otra forma se complicaría la cuestión en términos tal vez insuperables.

Por otra parte, existe una gran diferencia entre las observaciones para determinar las coordenadas de un punto en tierra y las que se realizan para la obtención de un punto del relieve submarino. En tierra se hace estación en el punto en cuestión durante todo el tiempo que sea necesario, según la importancia del levantamiento y con una estabilidad de plataforma casi absoluta —en general, en pilares de observación—, permitiendo el uso de instrumentos de medida de la mayor precisión. A los efectos de la compensación de errores se pueden hacer todas las observaciones que convenga y, en suma, se opera en las condiciones más favorables. En la mar es completamente distinto, pues la determinación de la posición de un punto del fondo hay que hacerla desde un buque en la superficie, siendo necesario la obtención simultánea de la sonda, que es, en definitiva, el elemento que lo identifica. Es fácil de imaginar las complicaciones que surgen al tratar de aproximarse en lo que sea posible a las condiciones del problema de la observación en tierra, de modo que si las operaciones geodésicas se consideran de una complejidad real, es evidente que operaciones similares en la mar presentan una complejidad mucho mayor.

En primer lugar, aunque se utilice una baliza activa de fondo, es difícil, o casi imposible, para un buque colocarse en su vertical, y aunque se consiga, sólo es en un instante determinado, pues su posición varía continuamente por la acción del viento, de las olas y de las corrientes, es decir, que, a lo sumo, podría mantenerse en los alrededores de la vertical y, por consiguiente, si se quiere efectuar una serie de observaciones —como es de ritual a los efectos de la compensación de errores—, hay que reducirlas a dicha vertical, así como a un mismo nivel del mar, mediante las mediciones correspondientes, implicando todo ello un aumento de fuentes de error con

respecto a las operaciones en tierra. Si a esto se añade la cuestión de la estabilidad de plataforma, tan necesaria en cualquier medición de precisión, tanto de distancias como angulares —ya que el sextante debe quedar excluido como instrumento de precisión—, las dificultades aumentan más todavía, aunque con los adelantos conseguidos y por conseguir en los sistemas de inercia y el Laser, se progrese en este aspecto tan fundamental del problema.

Si bien todas estas dificultades no resulten insuperables y sea necesario afrontarlas, si se quiere, como se debe, que los levantamientos en la mar tengan el carácter científico que merecen, se impone una concentración de esfuerzos de tal naturaleza que salta a la vista la consecuencia natural de reducir al mínimo los puntos fundamentales que deben ser objeto de esta atención, como premisa fundamental en esta importante cuestión. Tales puntos tienen, por tanto, que jugar un papel similar a los vértices geodésicos de primer orden, aunque por la categoría de la precisión que impliquen no merezcan esta calificación. Por otra parte, no parece que todos estos puntos del fondo submarino puedan ser objeto de la conservación que implique la necesidad de su permanencia para servir de apoyo directo para resolver el problema inverso de la posición. En tierra, es esencial que sean materializados sobre el suelo los puntos geodésicos para que resistan a los efectos de la destrucción con el tiempo, pues la naturaleza de las líneas de posición utilizadas obligan a su búsqueda e identificación posterior muchos años después de haberse realizado las operaciones con que se han determinado sus coordenadas. En la mar, esta conservación es de tal naturaleza, por las dificultades que entraña, que obliga a tratar de resolverlo de un modo completamente distinto a lo que se practica en los levantamientos geodésicos y topográficos, así como en la ejecución de cualquier método del problema inverso de la posición.

Si los puntos cuya posición se ha determinado a costa de muchos esfuerzos, no pueden identificarse posteriormente porque las balizas de fondo que han servido para su materialización desaparecen, se desplazan o, por avería, resulta complicada su búsqueda, sería inútil todo el trabajo realizado. La solución no puede ser otra entonces, que utilizar para las mediciones en el problema inverso, otros puntos distintos de fondo en la vecindad del que ha servido para obtener su posición en el problema directo, y con tales mediciones sea posible trazar las líneas de posición correspondientes haciendo uso de las

coordenadas de dicho punto. Esta posibilidad la ofrecen las líneas de posición de base isobática que hemos citado antes, ya que una vez conocida la posición de un punto cualquiera de un segmento isobático —vértice isobático— sensiblemente rectilíneo dentro de la tolerancia de error admitida, se puede trazar la línea de posición que corresponde a las mediciones efectuadas a otro punto cualquiera de dicho segmento, incluso con el método geométrico-analítico, característico de las operaciones de precisión.

Una organización científica de los levantamientos en la mar conduce forzosamente al establecimiento de un esqueleto similar a las cadenas principales geodésicas, debiendo procurar que los trabajos fundamentales en el establecimiento de tal estructura tengan un carácter y una precisión que sean por completo del orden científico. Así como la Geodesia utilitaria proporciona a los topógrafos este esqueleto, indispensable para sus levantamientos, parece también conveniente en la mar una estructura similar de los vértices isobáticos que pueda servir lo mejor posible al mismo objeto en el trabajo de los levantamientos de relleno.

En la determinación de la posición con apoyo en estaciones terrestres por medio de los procedimientos de gran precisión, se consiguen ya errores dentro del orden de unos metros, pero su alcance no se extiende más allá de las 250 millas de la costa, quedando todavía, por consiguiente, una gran parte de los océanos fuera de esa cobertura. Para estas zonas alejadas, pueden ser los satélites artificiales los que resuelvan el problema; pues los 180 metros de error que ya proporcionan en la posición son muy prometedores de que se puedan esperar probablemente mejores resultados si se aumenta el esfuerzo, siendo ésta una razón más para concentrar la atención en un mínimo de vértices isobáticos —que podríamos considerar de primer orden—, los que, a su vez, sirvan de apoyo en el problema inverso —por pertenecer a segmentos isobáticos sensiblemente rectilíneos— para la determinación de vértices isobáticos de segundo orden y de tercer orden, por medio de procedimientos puramente batimétricos con las líneas de posición de base isobática.

Los vértices isobáticos de primer orden comprendidos dentro de las 250 millas de la costa, podrían ya levantarse utilizando los sistemas en uso para determinar la posición, tales como el Hydrodist, etc., mientras que para el resto del océano habría que esperar a que los satélites artificiales proporcionen una precisión mayor, lo que

no parece difícil de conseguir en un futuro próximo. Para esta determinación basta servirse de una baliza activa de fondo en cada punto a levantar —uno para cada segmento sensiblemente rectilíneo dentro de la tolerancia de error— durante el tiempo que duren las operaciones, efectuando las observaciones que se consideren necesarias para compensar los errores, y de este modo se puedan obtener las coordenadas correspondientes con la mayor precisión, mediante la reducción a la vertical de la baliza de todas las mediciones efectuadas.

Teniendo en cuenta los alcances que pueden conseguirse con los sistemas de hallar la posición por medios radioléctricos de precisión, podrían muy bien distribuirse los vértices isobáticos de primer orden estando distanciados entre ellos —es decir, las isobáticas a que corresponden en la extensión apropiada— unas cien millas, con objeto de que, apoyándose en estos vértices y por medio de las líneas de posición de base isobática utilizando el método geométrico-analítico, sea posible obtener los vértices isobáticos de segundo orden con la misma precisión que los de primer orden en que se apoyan, pues lo mismo que sucede con los levantamientos geodésicos, la precisión debe ser la misma para todos los órdenes. Los vértices isobáticos de tercer orden, apoyados de igual forma en los anteriores, podrían quedar separados entre sí unas diez millas para que las operaciones de relleno en las cartas o mapas que lo requieran se puedan realizar batimétricamente en la forma más sencilla.

La perspectiva que presentan los satélites artificiales en cuanto a la precisión en los levantamientos, son, evidentemente, a costa de mayores gastos, que ya parecen bastante elevados. Como en todas las grandes empresas del hombre, es una cuestión de economía, y es claro que el esfuerzo que se aplique en este sentido debe restringirse para que resulte con el mayor rendimiento y, no cabe duda, que concentrándolo por una sola vez en el mínimo indispensable a la determinación de los vértices de primer orden, es la mejor manera de cumplir tal requisito acercándose en lo posible a las operaciones geodésicas, lo que sería una gran conquista para la Ciencia de nuestro planeta al completar en cierto modo la Geodesia su campo de acción, pues su exclusión, hasta ahora, de las tres cuartas parte de la superficie de la Tierra debe ser objeto de seria reflexión.

VII

IMPORTANCIA Y PERSPECTIVAS DE LA BATIMETRÍA

El conocimiento detallado de la topografía de los océanos no sólo es útil para el problema de la posición en navegación, sino también es necesario para el estudio de los fenómenos objeto de la Oceanografía. Como muy bien dice Lord Kelvin, si no podemos medir las cosas expresándolas en números, nuestro conocimiento de ellas es pobre y no nos satisface. En todas las ramas de la Oceanografía, la medición de los factores de cualquier fenómeno tiene que ser simultánea con su ubicación, y cuanto más precisa sea ésta, tanto mejor será conocido aquél. Las cartas batimétricas, que no pueden ser otras que las isobáticas, constituyen así el instrumento indispensable para que sea posible la investigación científica oceanográfica en todas sus facetas, al mismo tiempo que cumplen una misión fundamental en el aspecto descriptivo por medio de las cartas morfológicas, litológicas, geológicas, hidrológicas, de corrientes, de líneas cotidales y tantas otras. Muchas de estas cartas son esenciales para resolver los diversos problemas que se plantean en la posible explotación de los recursos marinos dando la repartición de ciertos elementos —cuya distribución geográfica es necesario conocer con precisión— correspondientes a cada una de las ciencias del mar, física, geofísica, geológica y biológica.

La Física de los océanos tiene hoy día una importancia transcendental en cuanto al conocimiento de las fuerzas que potencian y modifican las corrientes marinas, el intercambio de energía entre los océanos y la atmósfera, los movimientos del agua profunda, las transferencias de agua de una capa a otra, etc. El estudio de este dinamismo se basa en la observación, en la que el problema de la posición juega un papel fundamental, tanto más valioso cuanto mejor sea la precisión que se obtenga.

Los mapas batimétricos ayudan en el estudio de las variaciones en el tiempo y en el espacio de la temperatura, salinidad, densidad, así como otras propiedades físicas de suma importancia en la Batimografía, que hoy día es de una importancia capital en la lucha antisubmarina, pues la detección Sonar está condicionada por estos fac-

tores físicos tan intrínsecamente ligados entre sí y cuyo conocimiento no es posible sin el problema de la posición que sólo los métodos batimétricos pueden proporcionar en las condiciones más favorables, en especial en pleno océano. Tales mapas o cartas son también muy útiles para facilitar la localización, encuentro y recuperación de objetos que se encuentran en el fondo, y son de gran ayuda en el trabajo del tendido de cables submarinos. Precisamente, la primera y más importante aplicación práctica del sonido para sonar, fue en ocasión del tendido del cable de Marsella a Philippeville, obteniendo un perfil de sondas con un aparato del ingeniero Marti en abril de 1922.

La observación de las líneas de refracción sísmica tiene una gran importancia en la determinación de la geología submarina, siendo fundamental conocer el emplazamiento exacto de la explosión de cada carga para que estas observaciones sean eficaces. En la mar esto implica el empleo de una ayuda a la navegación de la más alta precisión, cuya resolución no puede tener lugar en forma más sencilla en la práctica que por medio de los métodos puramente batimétricos. Los mapas son indispensables para el descubrimiento de los depósitos de minerales del fondo del océano. Todas las operaciones de minería en este aspecto están basadas en los mapas batimétricos y los problemas de la posición en estos trabajos pueden ser resueltos del modo más favorable por medio de ellos. También se ha obtenido información sobre las rocas debajo del fondo por mediciones de gravedad hechas con péndulo en submarinos lo suficientemente profundos para que se puedan considerar estables. Durante recientes años se han efectuado importantes levantamientos de esta clase y en este importante problema la reducción de las medidas de gravedad exigen posiciones geográficas precisas de la observación junto con el momento preciso absoluto, en lo que los métodos batimétricos pueden desempeñar una gran función, no sólo en cuanto a la simplicidad y precisión, sino también en el ahorro de tiempo, no teniendo que subir a cota periscópica para rectificar la posición del submarino con la frecuencia que sería necesaria al no utilizar tales métodos. En todos estos trabajos geológicos es muy importante la obtención de muestras del fondo y por ello los técnicos no han acogido con satisfacción el método de sondeo por eco, pero actualmente existen esperanzas de que sea posible saber la naturaleza del fondo por el tipo de huella que es recibida en el sondador de eco, y en este sentido

se han realizado investigaciones por el barco alemán «Gauss» en el mar del Norte.

Los cataclismos en la corteza terrestre cubierta por los mares son más frecuentes que en la corteza emergida; islas o bajos aparecen para volver a desaparecer, las líneas de costa retroceden, las profundidades experimentan cambios. Todo ello implica la necesidad de simplificar los trabajos hidrográficos para que la evolución del relieve submarino sea fácilmente conocida. El conocimiento de la topografía es, además, de gran interés en el estudio de la geología oceánica, el cual, a su vez, es fundamental para dar una teoría de las deformaciones del globo, siendo evidente que no es posible dar una explicación de los accidentes del relieve emergido sin tener en cuenta los del relieve sumergido.

La exploración de los océanos tiene, además, un interés práctico enorme, porque sus aguas y su suelo pueden considerarse casi inagotables de recursos energéticos, alimenticios y minerales, que se pueden explotar cuando se les conozca mejor, y no cabe duda que los vastos océanos están todavía científicamente inexplorados, no obstante los esfuerzos que se han hecho durante los últimos años, prestando cada vez más atención a las enormes masas de agua que se extienden sobre los siete décimos de la superficie de nuestro globo. La pesca mundial en 1962 fue de un total de 47 millones de toneladas, lo que hace pensar que el mar puede ser, debidamente explotado, el que resuelva el problema alimenticio que se plantea en el mundo superpoblado del futuro. En este aspecto es interesante el hecho de que cada zona está caracterizada por lo que suele denominarse un «clima especial», que es consecuencia de los límites térmicos y de salinidad que hacen posible la vida de la mayoría de los animales marinos. El conocimiento de la topografía submarina es esencial, porque ésta condiciona dichos límites y muchas veces las barreras montañosas constituyen obstáculos que son infranqueables para algunas especies, mientras otras las traspasan en una extensión más o menos general. Cuando las pendientes son pronunciadas, determinan corrientes ascendentes, cuyas aguas transportan sustancias indispensables para la vida. En suma, la repartición de la vida submarina es función del relieve oceánico y, en su consecuencia, al mostrarlo, las cartas batimétricas con las isobáticas constituyen un valioso instrumento para estos estudios que son de gran interés para la explotación pesquera.

Las cartas batimétricas pueden ser también muy útiles en el desarrollo de los estudios que cada vez se realizan con mayor interés sobre las mareas en los océanos. Hasta ahora, la mayoría de los conocimientos sobre las mareas se han obtenido de medidas efectuadas sobre las costas continentales o sobre las islas oceánicas. El *Coast and Geodetic Survey* de los Estados Unidos tiene un programa para poner a punto mareógrafos en alta mar con un objeto científico general, y en ciertos casos para mejorar la precisión de los levantamientos hidrográficos. Estos mareógrafos están montados sobre una boya oceanográfica, siendo, por tanto, fundamental la obtención de su posición con la mayor precisión. Por otra parte, como entre los datos experimentales que se utilizan en Geodesia para emitir la hipótesis sobre la constitución de la corteza terrestre, figuran la comparación de los valores observados y los valores teóricos de las mareas oceánicas; presenta un gran interés la obtención de los primeros, cuya ubicación juega un gran papel en este estudio.

Otro aspecto también muy importante de los océanos es la eventualidad de convertirse en un teatro de operaciones de guerra. En el mundo actual en que la amenaza de los misiles continentales hace que los objetivos fijos sean completamente vulnerables, convierte al submarino de propulsión nuclear en el instrumento ideal para la guerra, y en este sentido, la navegación, por medio de los métodos puramente batimétricos, es de una importancia vital.

Es evidente que en esta labor fundamental del levantamiento batimétrico de los océanos para la construcción de las cartas o mapas, los Servicios hidrográficos son los más capaces para realizar este trabajo por la experiencia secular que tienen en este campo, habiendo desarrollado un cuerpo de doctrina con métodos y procedimientos peculiares y son los más aptos para recoger la evolución de las ciencias y de las técnicas con las mayores posibilidades que se les ofrezcan. Los Servicios hidrográficos pueden también contribuir al desarrollo de la Oceanografía, pues los mismos buques que ellos utilizan pueden realizar esa labor al mismo tiempo con un gran ahorro de medios. En la mayoría de las naciones marítimas están entrando en servicio buques llamados polivalentes, es decir, que sean aptos para practicar toda investigación fundamental o aplicada en todos los mares del mundo —investigaciones físicas, químicas, biológicas, bioquímicas, hidrológicas, geológicas— con un equipo importante de instrumentos e investigadores.

El *Bureau Hydrographique Internationale* de Mónaco, cuya fundación fue decidida en la primera Conferencia Internacional de Hidrografía celebrada en Londres en 1919 y que actúa con gran acierto en interés de los Servicios Hidrográficos del mundo entero, se ha manifestado en este sentido, diciendo:

1.º Que el estudio sistemático de los océanos ha llegado a ser una necesidad vital, implicando, puede ser, la supervivencia de la humanidad

2.º Que los Servicios hidrográficos son los organismos mejor preparados para emprender este estudio con la ayuda de levantamientos sistemáticos a gran escala en los dominios de la Oceanografía física, la Geofísica, la Geología, etc., y, en una medida más débil, de la Biología marina.

3.º Que el *Bureau Hydrographique Internationale* debe fomentar y promover este objetivo proporcionando en definitiva a los Estados-miembros normas de precisión y especificaciones para las investigaciones oceanográficas.

La 8.ª Conferencia Internacional Hidrográfica ha adoptado la siguiente resolución: Observaciones oceanográficas. «Se ha decidido fomentar los Servicios hidrográficos de los Estados-miembros a dar más importancia al dominio de la Oceanografía. En ocasión de las operaciones hidrográficas normales, deben realizar cada vez más en lo posible observaciones oceanográficas a lo largo de sus aguas costeras y mares adyacentes. Los resultados de estas observaciones deben ser comunicados a otras naciones para ser utilizados al máximo por los organismos gubernamentales, la industria de la pesca y los sabios en general».

Todos estos asuntos se pretende tratarlos muy atentamente en la Conferencia Internacional Hidrográfica que se celebra durante este mes de mayo en Mónaco.

DISCURSO DE CONTESTACION

DEL

EXCMO. SR. D. FRANCISCO NAVARRO BORRAS

Excmos. Sres. Académicos,
Sras. y Sres.:

Permitidme que, en primer lugar, consagre mis primeras palabras, anteponiéndolas a cualquier otra consideración, al recuerdo emotivo del que fue nuestro presidente, D. Alfonso Peña Boeuf. No pretendo entrar en el examen de las variadas facetas de su personalidad, tan magistralmente estudiadas en el discurso necrológico por Clemente Sáenz. Tampoco aspiro a subrayar sus merecimientos, insistencia que sería inútil después de la glosa efectuada por el Recipiendario. Sólo deseo que consten unas palabras de gratitud, a fin de que sirvan de adecuada ofrenda a su memoria. Mi devoción al inolvidable amigo es lo que intento consignar como homenaje en este solemne acto. Peña Boeuf fue, para mí, una fuente viviente de lecciones. Mas, en este momento, quiero prescindir del elogio que merece su egregia personalidad científica, para limitarme a resaltar sus dotes humanas. Entre éstas destaca su culto a la amistad, a la par que su cordialidad y simpatía, a las que se unía, reforzando su trato atrayente, la amenidad de su conversación, singularmente puesta de relieve en las numerosas anécdotas de su vida profesional y política. Su persona, degraciadamente, se desvaneció. Mas quedan, empero, sus obras de Ingeniería, modelo de técnicas que, en gran parte, por sus valiosas aportaciones le son deudoras. Y queda también entre nosotros el recuerdo indeleble de su hombría, toda inteligencia y corazón. ¡Descanse en paz!

El pleclaro linaje científico de los que poseyeron la medalla número 24, alcanza hoy su continuación con el ingreso en esta Real Academia del Excmo. Sr. D. Juan García-Frías y García. Nuestro

nuevo compañero, Contralmirante de la Armada, pertenece a la ilustre estirpe de marinos, a quienes tanto debe la Ciencia española. Haciendo incluso abstracción de las figuras señeras de la Ciencia del siglo XVIII, como fueron Jorge Juan y Antonio de Ulloa, la Marina de Guerra posee una vieja tradición científica que se traduce, en nuestro país, en el gran contingente de hombres de ciencia destacados que, en todo tiempo, surgen en su seno; lo que, sin duda, obedece a las supremas y vitales misiones que le están confiadas, dado que se trata de una institución militar a la que incumbe proteger las actividades marítimas que se realizan bajo pabellón español, tanto en tiempo de paz, como en el de guerra, y a la cual corresponde, asimismo, exigir el respeto de las leyes marítimas e intereses españoles por medio de su fuerza o su presencia. Misiones que, como se comprende, requieren, para su adecuado cumplimiento, la organización de Centros de investigación científica; Centros encaminados a facilitar la navegación, como el Instituto y Observatorio de Marina de San Fernando y el Instituto Hidrográfico; la investigación en materias de construcción naval, como es el Canal de experiencias hidrodinámicas de El Pardo; el Laboratorio y Taller de Investigación del Estado Mayor de la Armada (L. T. I. E. M. A.), y otros que no voy a enumerar, en donde se realiza igualmente una auténtica labor de investigación. Instituciones que confirman el hecho de que en la Marina de Guerra se da la afortunada cooperación de múltiples y variadas inteligencias organizadas por la necesidad de vencer para subsistir y que justifican la razón del alto nivel científico que alcanzan sus técnicos.

— Mi conocimiento con García-Frías data de 1940. Un Oficial de la Armada me envió, a fines de aquel año, un interesante trabajo sobre el trazado de las curvas de altura. Aunque completamente profano en cuestiones de tabulación, intuí que una buena dosis de método original latía en su publicación. Y no me equivoqué. Correspondí a su gentileza remitiéndole uno de mis trabajos, y a partir de aquel momento quedó cimentada una amistad que hoy es ya vieja, estrecha y cordial.

— Ingresó García-Frías en la Escuela Naval en el año 1923, de la cual salió en 1928 como Alférez de Navío. El cambio de régimen de 1931, que tantas jóvenes carreras desviara, produjo en nuestro Recipiendario la natural depresión, siempre desorientadora en una vocación incipiente. Y así le vemos durante la República cursar los

estudios de la carrera de Derecho, en la que alcanzó, en 1934, el grado de Licenciado. ¡Consideremos el riesgo que corrió en unos años de desaliento lo que era, como los hechos han justificado, su auténtica vocación científica! Mas ocurre con frecuencia, sobre todo en los años mozos, que se prodigan esfuerzos en apariencia inútiles, pero que luego resulta que han prestado algún misterioso servicio a efectos de la formación del espíritu y amplitud de puntos de vista. Tal ocurre con García-Frías. Aquella severa gimnasia mental determinada por la variedad de sus estudios le proporcionó una inteligencia elástica y una sólida cultura, que se refleja en cuantos trabajos elabora su bien organizada cabeza. Después comprobaremos hasta qué punto le fueron útiles sus conocimientos jurídicos en asuntos de su profesión. Mas el germen de su vocación persistió, y así durante la campaña de liberación, destinado a bordo del submarino «General Sanjurjo», retorna a sus meditaciones sobre los temas de su actividad científica. Y al finalizar la guerra plasma sus vigiliias y reflexiones en el primero de sus trabajos de investigación, el titulado «Método de trazado de las curvas de altura». La Providencia le detuvo al borde mismo del abismo. Hay que creer que Dios no permite que se pierdan los más notables impulsos del espíritu.

Con dicho trabajo, el autor da a conocer su proyecto de Tablas de Navegación astronómica. De los diversos tipos de tablas de que dispone el navegante para las operaciones del trazado de las rectas de altura sobre la carta marina, el más práctico, según García-Frías, es el llamado de «tabulación directa». Con él se encuentran resueltos los cálculos, ya que las operaciones numéricas quedan reducidas a simples interpolaciones. No obstante, ofrece el inconveniente de que la existencia de tres argumentos de entrada exige una desmesurada repetición de las clásicas tablas de «doble entrada» para cada valor del tercer argumento, y, en consecuencia, obliga a distribuir en varios volúmenes el tamaño descomunal de dichas tablas. La feliz aportación de García-Frías consiste en un método completamente original del trazado de las líneas de altura, que permite una notable reducción de dimensiones, con una sistemática distribución de los valores de los argumentos para un reparto uniforme de la tolerancia de error, generalmente admitida, en la navegación de altura.

Sus trabajos tuvieron eco en el extranjero desde el primer momento y singularmente a partir de septiembre de 1941, cuando el Recipiendario tuvo ocasión de exponerlos en una serie de conferen-

cias pronunciadas en el «Deutsche Seewarte» de Hamburgo, por invitación del Almirantazgo alemán. Luego hubo un intercambio de ideas con el astrónomo alemán Dr. H. C. Freiesleben y el doctor K. Schütte, profesor de Geodesia superior de la Universidad de Viena, movilizado para la investigación sobre navegación astronómica en dicho Centro. En el curso de tales conversaciones, el Dr. Schütte señaló que nuestro compatriota había conseguido un notable progreso, porque unía a sus cualidades de investigador una gran experiencia adquirida en los barcos. Poco después, el Almirantazgo alemán solicitó de nuestro Estado Mayor de la Armada se le facilitasen los cálculos ya realizados, con objeto de utilizarlos en la marina alemana en tanto no fueran publicados por España. Las circunstancias entonces concurrentes determinaron el que no se estimase viable la petición.

En el año 1943 ingresa como ingeniero geógrafo en el Instituto Geográfico y Catastral. Pero no abandona sus trabajos tan arduamente elaborados en la Marina. Y así es en este mismo año cuando ve la luz el primer volumen de las «Tablas de Líneas de Posición de Altura —*Astronomical Position Line Tables*—», con el texto en castellano y en inglés.

Sobre estas Tablas se han publicado trabajos exclusivamente dedicados a su difusión en la revista alemana «*Annalen der Hydrographie und Maritimen Meteorologie*», abril, 1942, con el título *Höhens-tandlinien in der Seekarte*, por H. C. Freiesleben; en la revista inglesa «*The Nautical Magazine*», febrero, 1945, con el título *Position Line by Involute Method*, por Binnacle; en la revista italiana «*Rivista Marittima*», abril, 1951, con el título *Il calcolo del Punto Nave con il metodo delle involute di altezza*, por R. Tirreni; en la «*Revue Hydrographique Internationale*», Vol. XIII, 1945, del *Bureau Hydrographique Internationale de Mónaco*, reproduciendo el precitado trabajo del Dr. Freiesleben y en el *Admiralty Manual of Navigation*, Vol. III, 1955. La Editorial «Brown, Son & Fergusson, Ltd, Glasgow», se dirigió a la Editorial Naval, solicitando la autorización correspondiente para su edición en Inglaterra, habiendo sido denegado por el Estado Mayor de la Armada, fundándose en que la edición española presenta la versión inglesa.

Iniciado de este modo el camino de sus investigaciones, García-Frías encuentra en el estudio de la matemática aplicada a los problemas de su profesión una auténtica sublimación. Unas cuestiones

le conducen a otras. Y con la idea preconcebida de lograr mayores progresos en las tablas de doble entrada, prosigue sus intentos de simplificarlas; y por otra parte los orienta, fijándose como objetivo la eliminación de la dificultad que entraña en los problemas este tipo de tabulación (como ocurre en la llamada fórmula del coseno, que es fundamental en las observaciones astronómicas en la mar).

En el primer aspecto (tablas de doble entrada) consigue proyectos de tablas de navegación astronómica, que eliminan por completo las operaciones de interpolación con un volumen menor que las del mismo tipo conocidas entonces. Estos trabajos los publicó con el título «El cálculo de la altura y del acimut en astronomía náutica». Recientemente ha logrado proyectos que con una sola apertura de las Tablas, se obtienen los valores para hallar la altura y el acimut con el tipo rectangular, los cuales ha publicado con el título «Las Tablas N de alturas y acimutes».

Y con el segundo objetivo (tratar de vencer el obstáculo que presenta el tipo de tabla de doble entrada en los problemas que implican tres argumentos de entrada) penetra en un nuevo campo de la tabulación numérica de ecuaciones, que publica en el año 1944 en una monografía titulada «Teoría General de la Tabulación Numérica de Ecuaciones», con la cual obtuvo un conjunto de aplicaciones a la Astronomía Náutica, que dio a conocer en una memorable conferencia pronunciada en el Salón de Actos del Museo Naval, bajo la presidencia del Almirante D. Salvador Moreno, entonces Ministro de Marina.

He aquí un caso del estímulo que implica la investigación fundamental para la perfección del oficio: la tabulación numérica se detiene en el tipo de tabla con doble entrada; D'Ocagne trata de probar con ello la superioridad de la Nomografía sobre las tablas numéricas, y he aquí que García-Frías consigue con una sola hoja entrar no tan sólo con tres variables, sino con un número cualquiera de ellas.

No obstante, todas las dificultades no quedaban vencidas; pues si bien este tipo de tablas era de fácil aplicación en determinados problemas (como por ejemplo en la obtención del acimut o en la reducción al meridiano), en cambio, para la obtención de la altura (precisamente objeto de su investigación) se presentan obstáculos por causa de las dificultades que para la construcción de estas tablas ofrece por una parte la estructura de la fórmula del coseno, y por otra la materia concerniente a las interpolaciones.

Estas dificultades estimularon la actividad y el ingenio de nuestro marino, y, después de trabajar largamente para superarlas, publicó en 1957 la monografía titulada: *La reducción al meridiano en Astronomía Náutica*. Las tablas usadas en las colecciones de tablas náuticas —por tener que restringirse a la tabulación de doble entrada— sólo tienen en cuenta el primer término del desarrollo en serie que matemáticamente resuelve el problema de hallar la corrección a aplicar a las alturas circunmeridianas y extrameridianas, por ser el único término que permite, dentro de la tolerancia de error, la preparación para dicha tabulación. Con las tablas de triple entrada construidas por García-Frías, no sólo se obtiene con mayor precisión la corrección implicada en el primer término, sino que también se logra la del segundo término del desarrollo en serie, la cual resulta imposible con tablas de doble entrada. Lo mismo acontece con las tablas de tiempos límites, a las que extiende considerablemente el tiempo de observación con este método clásico de hallar la latitud.

La resonancia de los trabajos de García-Frías le pusieron en conexión con el reducido número de personas que se dedican al cultivo de la Ciencia; resonancia que dio lugar a su incorporación al Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Y determinó en 1951 su designación como Académico correspondiente de nuestra Corporación, a propuesta del entonces Secretario perpetuo de la misma, D. José María Torroja Miret, también ingeniero geógrafo.

El fecundo campo de aplicación que puede tener esta teoría de la tabulación numérica de entrada múltiple, se pone en evidencia con los notables resultados que su autor ha logrado en los problemas de cinemática naval. En ellos es frecuente cinco, seis y hasta siete variables. La comodidad de las tablas de García-Frías resulta, pues, evidente. Profusión de ejemplos de esta clase se presentan en su trabajo «La tabulación numérica de ecuaciones», publicado en 1952. En él se da a conocer también el método de la tabulación directa para obtener por interpolación los logaritmos de los senos y tangentes de los ángulos pequeños, evitando el clásico método conocido con el nombre de la *S* y la *T*. Además, se publicaron en 1953 sus «Tablas de Logaritmos» de cinco decimales, proporcionando así, por aplicación de su método, la novedad de la tabulación directa para la interpolación de todos los logaritmos de las funciones circulares para todos los ángulos desde 0° hasta 90° . El profesor Freiesleben difundió estos trabajos en el año 1956 en la revista alemana «Der ma-

thematische und Naturwissenschaftliche Unterricht», con el título *Numerische Tafeln zur Lösung von Gleichungen*.

El estudio de los problemas de cinemática naval para la preparación de las fórmulas en relación con su tabulación, condujo a su autor a la posibilidad de resolver los problemas de esta clase, teniendo en cuenta las tres dimensiones, operando sobre el plano con la misma sencillez con que se logra para las dos dimensiones con la llamada «rosa de maniobra». Este trabajo se publicó en 1958 con el título «Sobre cinemática aeronaval de tres dimensiones».

Hasta estas fechas, la idea que presidió los trabajos de García-Frías fue la de reducción del volumen de las tablas de navegación astronómica. Y esta idea le llevó a interesarse en extender las ventajas de la carta de Mercator en la zona ecuatorial, dando ocasión a un nuevo estudio sobre la posibilidad de resolver todos los problemas de navegación en todas las regiones del globo con cartas marinas construidas con la generalización de la clásica proyección mercatoriana (la cual se ha extendido actualmente de un modo extraordinario), utilizando un círculo máximo cualquiera en lugar del ecuador. (Este trabajo fue publicado con el título *La carta náutica en proyección mercator generalizada*). Después, el autor se pasa a campos de investigación más ambiciosos.

La generalización del uso del radar en toda clase de buques a la terminación de la Segunda Guerra Mundial, ofrece un amplio margen para la investigación en su aplicación para la seguridad de la navegación con mala visibilidad, tanto en relación con los peligros que presentan los accidentes geográficos, como los de los barcos entre sí. Respecto a los primeros, los métodos para hallar la posición a la vista de costa no son tan fáciles de aplicar por medio de la información radar, porque los puntos utilizados con visibilidad normal presentan, con esta última, dificultades para su reconocimiento e identificación. Sus investigaciones en este aspecto del problema de la seguridad condujeron a García-Frías a un nuevo sistema de líneas de posición, el cual, originado con el sistema basado en las líneas de costa, lo generaliza a toda clase de líneas, como las de igual sonda (isobáticas), siendo en este aspecto donde encuentra su campo apropiado de aplicación, en especial para la navegación submarina y los levantamientos oceánicos. Y así, lo que en principio se limitó a las líneas de posición demora-distancia, publicado con el título *Nuevo sistema de líneas de posición en la mar*, 1956, lo com-

pletó recientemente con las líneas de posición bidireccionales y las líneas de posición mini-distancia. La teoría completa de este sistema se publicó en la revista inglesa «The Journal of the Institute of Navigation», en el número de abril último, con el título *Contour-based position lines*.

Sobre el otro aspecto de la seguridad con visibilidad restringida utilizando el radar (la de los barcos entre sí) inicia sus trabajos en en el año 1956, y en el mes de mayo del siguiente asiste a la *Conferenza Internazionale Sulla Disciplina dell uso del radar*, que se celebró en Génova, organizada por el *Istituto Cívico Colombiano* con el propósito de resolver el problema planteado por el radar en la evitación de los abordajes con niebla. Problema de actualidad motivada principalmente por el trágico hundimiento del trasatlántico italiano «Andrea Doria» en su abordaje con el sueco «Stockholm». En esta Conferencia estableció el autor su punto de vista (que siempre ha mantenido), de que la única solución de este importante problema estriba en un ordenamiento jurídico internacional, cuya situación de hecho tiene que ser resuelta con una fórmula de base matemática en las condiciones prácticas del problema. La cultura jurídica del autor le da una amplia visión del asunto. A finales del mismo año consigue la fórmula, dándola a conocer en su trabajo «El radar y la uniformidad en la maniobra anticolidión». En él se exponen los principios de su sistema, que con la denominación «Regla del Sector» ha desarrollado posteriormente y que generaliza a las situaciones de cualquier número de buques, con su táctica de grupos, plasmando toda esta doctrina en normas jurídicas específicas, que ha propuesto para su aceptación legal.

Sus trabajos en este campo son publicados por primera vez en lengua inglesa en la revista «The Journal of the Institute of Navigation», julio, 1960, con el título *Anti-collision radar sectors*. A partir de esta publicación se le considera como una autoridad en la materia por su notable contribución a la resolución de este arduo problema. Y en un trabajo del Dr. Freiesleben se afirma que en todo el mundo sólo se han propuesto tres sistemas completos de soluciones. Uno, el de García-Frías. Pero como éste demuestra con su teoría de la distinción de los aspectos orgánico y operativo del problema anticolidión, que solamente el primero puede plasmarse en norma jurídica, resulta tácitamente que los otros dos (los de los ingleses Calvert y Hollingdale) quedan descartados de todo valor prác-

tico, por ser de naturaleza puramente operativa al implicar solamente reglas de maniobra.

El 18 de diciembre de 1964 se celebró en el *Institute of Navigation* de Londres un Symposium dedicado exclusivamente a la tesis de García-Frías, expuesta en su trabajo *The Sector Rule and the Collision Problem*. En su discusión participaron una gran parte de los miembros del Instituto. Luego se publicó el trabajo en el «Journal of the Institute of Navigation», abril, 1965, con una «nota» al final que dice: «Tuvo lugar una interesante discusión en la que tomaron parte, entre otros, los siguientes: Captain Wylie, Captain Topley, Captain Mellis, Dr. Calvert y Dr. Hollingdale. Se acordó aplazar los comentarios hasta que los miembros del Instituto hubiesen tenido una oportunidad de estudiar la solución del problema una vez publicada. Los conceptos que se manejan son en cierto modo difíciles y lo exigen». Pero Calvert y Hollingdale publican a continuación una réplica conjunta. La coincidencia de unirse los dos en su crítica no puede atribuirse más que al hecho antes citado de ser eliminados sus sistemas por la teoría de la distinción de los aspectos orgánicos y operativo, propuesta por García-Frías. Es un sincretismo lógico determinado por la superioridad del adversario común.

Esta crítica fue contestada por García-Frías y publicada en el «Journal of the Institute of Navigation», saliendo al paso de todas las objeciones presentadas, sin que se haya producido una réplica por parte de ninguno de los dos. Tampoco ha aparecido ninguna otra objeción, a pesar de haber transcurrido más de dos años desde que apareció la «nota» con la que se aplazaba la discusión. Por esto, nuestro compatriota ha efectuado un detenido estudio de todos los trabajos publicados por Captain Wylie (por ser éste el principal detractor de todo sistema de base matemática), recogiendo de una manera exhaustiva las exigencias que en su opinión debe cumplir en la práctica cualquier propuesta para ser aceptada. Y así, con el título *Wylie's criteria and the Sector Rule*, verifica García-Frías un análisis riguroso del problema demostrando que su sistema satisface todos los requisitos. Y este nuevo trabajo será publicado en el próximo número de julio de la citada revista.

Insistiendo a mayor abundamiento, García-Frías ha estudiado el problema en todos sus aspectos: matemático, jurídico y práctico. Llega con ello a la demostración de la validez de sus sistemas. Las pruebas de diversos ejercicios realizados con el equipo de simuladores radar la confirman. Con el nombre de «Juego de la Guerra», este

equipo se halla instalado en la Escuela de Guerra Naval. Asimismo hace tres años se verificaron ejercicios de carácter real con los submarinos de la flotilla de Cartagena, durante su mando de la misma.

Yo no tenía idea, por ser materia ajena a mi dedicación, de la inmensa importancia científica de este problema. En mis conversaciones con García-Frías me he ido percatando de su valor, y por tal motivo menciono las aportaciones de nuestro compañero. En lo que se refiere a su contingencia matemática, Sadler dio la tónica al escribir que «la matemática de la colisión, aunque básicamente simple, conduce a una geometría sorprendentemente complicada en cierto modo y a algunos resultados que no cabía sospechar. Los factores del problema que pueden ser objeto de la matemática son los específicos y precisos, escapando de su estudio los imponderables que impliquen un margen de incertidumbre, pudiendo muy bien suceder que este margen sea tan grande que los resultados del análisis matemático contribuyan bien poco en lo positivo de la solución final». Y a esto añade García-Frías, que «la mayor dificultad para encontrar la regla apropiada es que nos enfrentamos con un problema complejo que hay que resolver con una solución sencilla».

Estos Symposiums son verdaderas olimpiadas de la Ciencia. Cada aportación es una prueba; todos los concurrentes son atletas. ¡Qué satisfacción se siente al considerar que España estaba presente y que tenía al Campeón!

* * *

Faemos ahora al tema del discurso. Confieso que me asalta un gran temor al abordarlo. Reconozco también que he sentido la tentación de acudir al recurso del problema mecánico de los satélites artificiales, extendiéndome a su movimiento orbital y derivando hacia sus aplicaciones geodésicas. Es lo único que la disciplina que profeso me permitiría desarrollar con cierta autarcía. Pero estos modos no encajan en la Academia. Por esto, voy a declarar honestamente que me he limitado a estudiar el tema de García-Frías con mucha atención, y sobre él voy a permitirme expresar el comentario de un científico que no lo domina.

Desde el principio se aprecia en el discurso que hemos oído, que todo él gira alrededor de la idea, completamente nueva, de la organización científica de los levantamientos oceánicos en forma similar

a los levantamientos geodésicos en tierra. Su posibilidad se funda, principalmente, en la resolución del problema de la situación por procedimientos puramente batimétricos, utilizando las líneas de posición de base lineal, propuestos por García-Frías. La posibilidad de su realización en las condiciones que presenta el problema batimétrico, se hace patente gracias al concepto del «vértice isobático». Este viene a ser así el elemento básico de toda la cuestión. Pues, del mismo modo que en las operaciones geodésicas, los vértices de los diversos órdenes se determinan con objeto de que después puedan servir de apoyo para obtener otros puntos (y para ello es preciso que se materialicen aquellos con el fin de que sean fácilmente reconocibles e identificables), la imposibilidad que esta manera de proceder presenta en el campo batimétrico es solventada con gran sencillez por medio de tales «vértices isobáticos», ya que una vez obtenida su posición por medio de una baliza activa de fondo, puede no quedar materializado este punto y, por tanto, desaparecer dicha posición al obtenerse las líneas de posición respectivas utilizando como apoyo cualquier otro punto del segmento isobático sensiblemente rectilíneo, dentro de la tolerancia de error al que pertenece dicho «vértice isobático». Estos resultados que los da a conocer por primera vez el Recipiendario en su discurso, son la culminación de un proceso que se inicia con el trabajo que se publicó por la «Associação Portuguesa do Progresso das Ciências», en 1957, con el título «Sobre la cartografía náutica isobática».

La utilización de los vértices isobáticos resuelve así, de una manera magistral, el problema del apoyo en los puntos previamente determinados, en lo que al reconocimiento de éstos se refiere. En la Historia de la Geodesia no son raros los errores de reconocimiento cometidos por observadores experimentados. Sus consecuencias son graves, aunque se hayan descubierto en el momento de las observaciones. Por ello, es un principio generalmente admitido en Geodesia que «es preciso ver con los propios ojos, con toda claridad, sin la menor duda, la señal o la cima buscada.» En la idea de García-Frías basta apoyarse en cualquier punto del segmento isobático sensiblemente rectilíneo, es decir, que queda reducido el problema del reconocimiento a la localización del segmento correspondiente al punto previamente determinado. Se comprende perfectamente que si esto se confirmase en la práctica, la ventaja sería considerable.

Hace falta analizar, sin embargo, hasta qué extremos se cumplan en la organización de los levantamientos oceánicos propuesta

por García-Frías, las dos condiciones esenciales que se exigen en toda operación geodésica —la precisión y la homogeneidad—. En cuanto a la primera, no parece que la precisión relativa del orden de 10 centímetros llegue a conseguirse en el mar. Se trata de la clásica precisión con que se consideran fijados sobre el terreno los puntos geodésicos de todos los órdenes. Los sistemas modernos de mediciones electrónicas de distancias, permiten una precisión todavía mayor. Pero, en general, en el mar, si bien hasta unas 250 millas de la costa, la aplicación de tales sistemas electrónicos con apoyo en tierra, proporciona la precisión dentro del orden de unos metros en el resto de las tres cuartas partes de la superficie de la corteza terrestre, cubierta por los mares, no puede conseguirse más que dentro del décimo de milla, gracias a los *satélites artificiales*. Ahora bien, los enormes progresos conseguidos en tan corto tiempo con esta valiosa ayuda en la resolución del problema de la posición en el mar, hacen concebir esperanzas de que su precisión irá cada vez más en aumento. Y en efecto, ha venido en la prensa la noticia de que con el nuevo satélite francés, el «D-1 C», llamado también «Dadema», lanzado el 8 de febrero último, se podrá conocer su posición con sólo un error de uno o dos metros y, por tanto, de confirmarse esta noticia, la posición de todo observador que haga uso de este tipo de satélite, se podrá obtener, probablemente, con un error de unos pocos metros. ¡Esto en pleno océano es extraordinario!

En cuanto a la otra condición —la homogeneidad—, no puede soslayarse en una organización científica de los levantamientos. Por ello, en Geodesia es una regla obligada el efectuar observaciones en número superabundante. Y no basta aumentar al máximo la precisión de las observaciones primordiales, para reducir al mínimo los errores. Por pequeños que éstos sean, deben ser repartidos por medio de una compensación, calculada según la teoría de los mínimos cuadrados. Por muy buenas que sean las observaciones, es imposible teóricamente que sea nulo el error final, incluso en las circunstancias más favorables. Es ya tradicional en Geodesia que una triangulación no se admite si no se compensa. Los ordenadores electrónicos contribuyen grandemente a la aplicación de este método. Con ellos se ha hecho posible la aplicación, en forma sencilla, no sólo de este método, sino también a otros procedimientos que por su complejidad y amplitud resultaban antes difícilmente abordables.

Al tratar de extender el principio de la homogeneidad a los procedimientos puramente batimétricos, puede producir confusión, lo

que suele inferirse del llamado método del punto aproximado (de uso cada vez mayor en las operaciones en tierra), ya que su característica esencial (el uso del gráfico) es un elemento fundamental en los métodos batimétricos de la posición propuestos por García-Frías. En efecto, se dice que el método del punto aproximado es un método completamente general, aplicable lo mismo a las coordenadas geográficas que a las rectangulares, y «que no suponen un empleo exclusivo del gráfico, sino que también puede ser tratado por una aplicación rigurosa del método de los mínimos cuadrados». Esto parece dar a entender que este procedimiento no tiene aplicación en las construcciones gráficas y, por consiguiente, en los citados métodos batimétricos de la posición. Conviene, por tanto, hacer la aclaración de que esto no es así, sino que el principio de los mínimos cuadrados es también aplicable gráficamente, utilizando el procedimiento de los baricentros geométricos debido a D'Ocagne, si bien hay que reconocer que conduce a algunas complicaciones cuando las líneas utilizadas para determinar el punto correspondiente a una aplicación del método en cuestión se cortan bajo ángulos desfavorables, obligando a construcciones complementarias.

El uso cada vez más frecuente de medición directa de distancias gracias al telurómetro y otros instrumentos de mediciones electrónicas, que en las operaciones terrestres da lugar a las redes de trilateración o mixtas, con obtención simultánea de observaciones angulares y medición de lados, es favorable a las operaciones en el mar. En éstas, la medición de distancias juega un papel muy importante en los métodos batimétricos de la posición.

La característica esencial de los métodos de García-Frías es también favorable en otro aspecto del problema de la posición. En la triangulación moderna no se trata ya de resolver, al estilo clásico, triángulos con base conocida, sino de la determinación de nuevas posiciones por medio de «líneas de posición» partiendo de puntos ya fijados.

Si comparamos las dos cualidades (la precisión y la homogeneidad) en el alto nivel alcanzado en las operaciones geodésicas, con lo que cabe esperar de ellas en los levantamientos oceánicos, es evidente que existe todavía un abismo que impide considerar estos levantamientos de un modo riguroso dentro del campo de las operaciones geodésicas propiamente dichas; pero, por otra parte, no cabe duda de que, desde el punto de vista de la organización científica

de las operaciones en el mar, de un modo similar a las terrestres bajo el concepto de la división del trabajo (que es en definitiva lo que informa la clasificación de las operaciones geodésicas), no sólo es correcto, sino necesario el planteamiento del problema tal como lo propone García-Frías en su discurso. Es evidente que en este sentido, la mejor aplicación que puede hacerse de los satélites artificiales en pleno océano y de las mediciones electrónicas con apoyo en tierra (a distancias comprendidas dentro de su cobertura), es su aprovechamiento en la determinación de los «vértices isobáticos» de los segmentos que él llama de primer orden.

Además de la abundancia de observaciones que conviene efectuar para cada uno de estos puntos fundamentales a los efectos de la compensación de errores, existen otras restricciones en lo que respecta al uso de los satélites artificiales (como el elevado coste y las exigencias por parte de algunos países a que se restrinja el empleo de las frecuencias usuales en los sistemas radio-geodésicos por las interferencias que producen); en su consecuencia, el plan que acabamos de oír en la cuestión de los levantamientos oceánicos es de una importancia excepcional.

Los satélites artificiales no sólo han hecho posible concebir estas grandes perspectivas sobre los levantamientos en el mar, sino que, también, desde que se han puesto en órbita, han hecho cambiar por completo el sistema geodésico mundial programado de acuerdo con los principios anteriores a su aparición. Con ellos, los diferentes cálculos de las triangulaciones se basan en una hipótesis previa sobre la forma de la Tierra. Y así surge el problema de ajustar las tierras alrededor del océano, con las consiguientes discrepancias, por no ser conocida la conducta del geoide. Y ante la imposibilidad de extender la triangulación realizada sobre los continentes, a través de los océanos, ha dado lugar a las incertidumbres en la posición relativa entre ellos. Estas incertidumbres pueden llegar hasta unos cien metros. La técnica especial para reducir notablemente estas incertidumbres, técnica que fue utilizada en ocasión del Año Geofísico Internacional, consiste en emplear la Luna como punto de la triangulación (siendo determinada su posición relativa con gran precisión en el fondo estelar por observaciones fotográficas en diferentes Observatorios); técnica que ha sido superada con los satélites artificiales. Con éstos últimos se obtienen observaciones más precisas de distancias a lo largo de la Tierra y de la forma de la misma, que por medio de las observaciones de la Luna.

Es interesante señalar el impacto que han producido los satélites artificiales en los estudios de la Geodesia. Las órbitas de tales satélites son extraordinariamente sensibles para explorar el campo de gravitación terrestre, Sabemos, pues, que si la Tierra fuera esférica, la órbita del satélite sería un elipse con su plano en una orientación determinada en el espacio, pero cualquier deformación de la forma esférica de la Tierra produce cambios notables en las fuerzas de gravitación que actúan sobre el satélite, y estos cambios ocasionan la deformación consiguiente de su órbita respecto a su simple forma elíptica. Midiendo las pequeñas alteraciones orbitales se han obtenido inmediatamente las propiedades del campo de gravitación y luego la forma de la superficie del geoide; es decir, la forma que, como primera aproximación del mismo, coincide sensiblemente con la superficie de los océanos en reposo, supuesta prolongada bajo los continentes; la cual daría lugar al referido campo de gravitación. La superficie equipotencial dada realmente por los satélites es la correspondiente a la altura exacta del Monte Everest, ya que la atracción de la gravitación es debida a la Tierra y a la atmósfera, y, por tanto, hay que reducirla al nivel del mar con el correspondiente error, que si bien es pequeño, debe ser considerado para llegar a aquélla.

Con tales estudios, por medio de los satélites se ha obtenido un valor del aplanamiento entre $1/298,2$ y $1/298,3$, resultados que demuestran su alta calidad como instrumento de precisión. Estos resultados significan que el diámetro ecuatorial de la Tierra excede al diámetro polar en 42,77 kilómetros, en lugar de 42,94 kilómetros aceptado anteriormente; diferencia de 170 metros, de gran importancia para la Geodesia utilitaria y también para la Geodesia teórica, porque ella prueba que la Tierra no está en equilibrio isostático; es decir, que su interior tiene gran consistencia, y, por lo tanto, es ilegítima la hipótesis muy extendida hasta hace pocos años de que su interior puede ser considerado como si fuera un fluido.

Los satélites también han servido para lograr nuevos descubrimientos de gran importancia en Geodesia, partiendo de la definición del campo de gravitación de la Tierra. El campo de gravitación en el exterior de un cuerpo sensiblemente esférico como la Tierra, puede ser expresado matemáticamente como el de una esfera más una serie de armónicas esféricas con pequeños coeficientes. Del estudio de estas armónicas, se deduce que la segunda armónica es la más importante, siendo 400 veces mayor que cualquiera de las otras. Sin

embargo, no puede ser ignorada la tercera armónica, porque ésta muestra que la Tierra tiene una ligera tendencia —alcanzando unos 30 metros— hacia una forma de pera con el «pedúnculo» hacia el Polo Norte. La forma de pera ha sido precisamente lo que prueba la considerable consistencia interna de la Tierra, pues no podría asumir esta forma peculiar sin tal cualidad de su estructura. Sin embargo, la cuestión del por qué está el pedúnculo en el Norte más bien que en el Sur, no ha sido todavía resuelta.

Este gran descubrimiento de la forma de pera, realizado en el siglo xx gracias a los satélites artificiales, fue intuido por Cristóbal Colón. Cuando en los últimos años de su vida dio su opinión sobre la forma de la Tierra, escribía: «no era redonda en la forma que escriben; que es de la forma de una pera que sea toda muy redonda, salvo allí donde tiene el pezón que allí tiene muy alto...». Profecía tanto más sorprendente cuanto que el hecho de su confirmación por el descubrimiento del aplanamiento de la Tierra no se hizo hasta 200 años más tarde. Se considera que la mejor imagen de la forma de la Tierra ha sido dada por Kaula, al combinar de una manera original mapas obtenidos desde diferentes satélites. Kaula le atribuye la forma básica regular de un esferoide con $1/298,24$ de aplanamiento y 6.378,165 kilómetros de radio ecuatorial, sirviendo de base para demostrar la altura del geoide; o sea, la superficie del nivel medio del mar. Las características más importantes que se observan en esta imagen de Kaula, son la depresión de 59 metros de profundidad al sur de la India, una elevación de 57 metros de altura cerca de Nueva Guinea, elevaciones de 30 metros centradas en Francia y en el Atlántico Sur, y una depresión de 30 metros centrada cerca del Polo Sur (al sur de Australia). La imagen de Kaula muestra el efecto de la forma de pera porque el Polo Sur está deprimido en unos 20 metros, mientras el Polo Norte está elevado unos 15 metros, pero la pera resulta ligeramente retorcida, de modo que las elevaciones y las depresiones máximas tienen lugar lejos de los Polos.

Para terminar, debemos añadir que en la cuestión de los levantamientos en el mar, se suele decir que los vastos océanos están científicamente inexplorados, no obstante los esfuerzos que se han hecho en los últimos años. Y no cabe duda que en la exploración, que es necesario efectuar, juegan un papel esencial los levantamientos batimétricos. Hay que reconocer que hasta hace muy poco los medios no estaban al nivel apropiado para esta importante empresa, y si

con tal estado de cosas se hubiera intentado, habría sido un esfuerzo inútil. Parece, sin embargo, estar muy próximo el momento en que todo esté preparado para emprenderla. Por una parte, los precedimientos para detectar el relieve submarino han logrado ya la perfección tan deseada para conseguir su objeto, y, por otra, los sistemas para hallar la posición en el mar están progresando vertiginosamente, aproximándose sin cesar a las exigencias de la precisión requerida. Ahora bien, no basta con tener los medios y, como muy bien dice García-Frías, es inadmisibile que mientras en los levantamientos geodésicos está perfectamente escalonado el tratamiento operativo con el establecimiento de órdenes diversos, en el mar no existe esa distinción, determinándose siempre la posición con la repetición del mismo tratamiento operativo dentro de cada sistema utilizado.

La razón principal de este estado de cosas, es que hasta ahora la determinación de la posición en el mar ha sido siempre con apoyo directo en puntos ajenos a su propio medio. Y destaca muy bien García-Frías que, ni en la Ciencia conocida, ni en la práctica de los levantamientos y de la navegación, no existe un método apropiado para hallar la posición por medio exclusivo de la sonda. Esta imposibilidad ha sido debida también a que las líneas de posición conocida no se prestan a ser utilizadas con este recurso tan precioso para el navegante. Ha sido necesario el descubrimiento de un nuevo sistema de líneas de posición, cuyo feliz acierto le corresponde a nuestro compatriota, para que tales métodos batimétricos de la posición puedan ser una realidad.

* * *

La vocación sostenida y ejemplarmente realizada que trasciende de todos los trabajos del Recipiendario, conducen a dos objetos: uno pragmático, de oficio, con objetivo de perfeccionar los métodos de medida; otro a profundizar sobre la armónica disposición de la Geografía, y en suma del Universo, cuyos elementos se van descubriendo con gran parsimonia en el incesante tejer de la investigación científica. Todo esto nos conduce a meditar sobre aquellas ideas vertidas por Newton en su «Filosofía Natural»: «La ordenación admirable de los cuerpos celestes puede ser únicamente obra de un Ser todopoderoso e inteligente. Este Ser infinito lo gobierna todo; no como el alma del mundo, sino como el Señor de las cosas.

Y a causa de esta Soberanía y Señoría, solemos llamar al Señor *Pantocrator*, es decir, Señor y Autor de todas las cosas».

García-Frías me ha declarado con gran modestia que sus aportaciones se debían siempre al celoso cumplimiento de sus deberes profesionales. ¡Benditos deberes que dan lugar a estas bellísimas sinfonías!

Las altas Jerarquías de la Armada, buenos catadores de hombres, supieron calibrar sus talentos. Por esto le promovieron al Almirantazgo. La Academia le recibe hoy con gran júbilo de integrar en ella un prestigio más entre los que traspasan las fronteras.

¡Felicitémonos todos de tan valiosa incorporación!

He dicho

PRINCIPALES PUBLICACIONES

DEL

EXCMO. SR. D. JUAN GARCIA-FRIAS Y GARCIA

A) TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN

- Método de trazado de las curvas de altura.* «Revista General de Marina», noviembre 1940.
- Método de trazado de las líneas ortodrómicas.* «Revista General de Marina», mayo 1941.
- Sobre el método de trazado de las curvas de altura envolventes.* «Revista General de Marina», enero 1943.
- La reforma del Almanaque Náutico.* «Revista General de Marina», mayo 1943.
- La reducción al meridiano en astronomía náutica.* «Revista General de Marina», marzo 1948.
- La tabulación numérica de ecuaciones.* «Las Ciencias», año XVII, núm. 1, 1952.
- El cálculo de la altura y del acimut en astronomía náutica.* «Las Ciencias», 1953.
- Estrategia y Táctica.* «Revista General de Marina», mayo 1954.
- El gran cisma.* «Revista General de Marina» julio 1954.
- Crisis de las directrices navales del Occidente.* «Revista General de Marina», febrero 1955.
- La debatida cuestión del dominio del mar.* «Revista General de Marina», mayo 1955.
- Nuevo sistema de líneas de posición en la mar.* «Revista General de Marina», febrero 1956.
- La carta náutica en proyección mercator generalizada.* «Revista General de Marina», junio 1956.
- Los problemas de la identificación geográfica en navegación.* «Boletín de la Real Sociedad Geográfica», 1956.
- Sobre las Tablas de líneas de posición de altura.* «Las Ciencias» año XXI, núm. 1, 1956.
- El radar y la uniformidad en la maniobra anticolidión.* «Revista General de Marina», diciembre 1957.
- Sobre la cartografía náutica isobática.* «Publicación de la Asociación Portuguesa o Progresso das Ciências», 1957.
- Reglamentación a base del sector uniforme de anticolidión radar.* Revista «Oficema», abril 1958.
- ¿Se pueden simplificar las Reglas de Rumbo y Gobierno?* Revista «Oficema», mayo 1958.
- Sobre cinemática aeronaval de tres dimensiones.* «Revista General de Marina», mayo 1958.

- Consideraciones jurídicas sobre el uso del radar.* «IV Semana de Derecho Marítimo, de Valencia», 1958.
- Sobre la Conferencia internacional de anticollisión radar, Londres, 1957.* «Revista General de Marina», junio 1958.
- Sobre las condiciones del equipo anticollisión radar con mala visibilidad.* Revista «Oficema», septiembre 1958.
- El radar y el Reglamento Internacional para Prevenir los Abordajes en la Mar.* Revista «Oficema», septiembre 1959.
- El radar y la próxima Conferencia Internacional sobre la Seguridad de la Vida Humana en la Mar.* Revista «Oficema», enero 1960.
- Sobre las condiciones determinantes de los sistemas anticollisión radar.* Revista «Oficema», febrero 1960.
- Sobre los requisitos de la información anticollisión radar.* Revista «Oficema», abril 1960.
- Sobre la cuestión jurídica de la anticollisión radar.* Revista «Oficema», mayo 1960.
- Sobre la ordenación de la anticollisión radar.* Revista «Oficema», julio 1960.
- Anticollision radar sectors.* «The Journal of the Institute of Navigation», julio 1960.
- El sector unilateral de anticollisión radar.* Revista «Oficema», agosto 1960.
- La distancia de seguridad y el sector anticollisión radar.* Revista «Oficema», septiembre 1960.
- Sobre la maniobra unilateral cooperable de anticollisión radar.* Revista «Oficema», octubre 1960.
- En torno a la cooperación en la maniobra anticollisión radar.* Revista «Oficema», diciembre 1960.
- El enigma del «Andrea Doria».* «Cuaderno núm. 6 de las Publicaciones de la Oficina Central Marítima».
- Sobre la cuestión jurídica de la seguridad.* Revista «Oficema», marzo 1962.
- La cuestión del plan naval.* «Publicación de la Cátedra "General Palafox" de Cultura Militar, Defensa Nacional, III», 1962.
- La cinemática del abordaje «Etockholm»-«Andrea Doria».* «Revista General de Marina», julio 1962.
- Sobre las líneas de posición demora-distancia.* «Revista General de Marina», junio 1962.
- El uso de los logaritmos en navegación.* «Revista General de Marina», marzo 1963.
- Táctica anticollisión radar.* «Revista General de Marina», junio 1963.
- La Tablas N de alturas y acimutes.* «Revista General de Marina», enero 1964.
- Radar «versus» Derecho.* «Revista Española de Derecho Marítimo», julio-septiembre 1964.
- Recommended routes for ships in congested waters.* «The Journal of the Institute of Navigation», enero 1965.

- The Sector Rule and the collision problem.* «The Journal of the Institute of Navigation», abril 1965.
- Racionalización de la anticollisión radar en la mar.* «Revista de la Real Academia de Ciencias», tomo LIX, cuaderno 3.º, 1965.
- Some suggestions on the Rules for Preventing Collisions at sea.* «The Journal of the Institute of Navigation», octubre 1965.
- El almirante Mahan y el poder marítimo.* «Publicación de la Cátedra "General Palafox" de Cultural Militar. Geopolítica y Geoestrategia», I, 1965.
- Las ideas geopolíticas de Mahan.* «Revista General de Marina», marzo 1966.
- The Pair Rule and the collision problem.* «The Journal of the Institute of Navigation», abril 1966.
- Teoría jurídica del abordaje.* «I Jornadas Nacionales de Derecho Marítimo», abril 1966.
- El mando y la técnica.* «Publicación de la Escuela de Guerra Naval», mayo 1966.
- Contour-based position lines.* «The Journal of the Institute of Navigation», abril 1967.
- Wylie's criteria and the Sector Rule.* «The Journal of the Institute of Navigation», julio 1967.
- La longitud en la mar.* «Enciclopedia del Mar».

B) LIBROS Y MONOGRAFÍAS

- Tablas de Líneas de Posición de Altura — Astronomical Position Line Tables.* Madrid, 1944.
- Tablas de logaritmos.* Madrid, 1953.
- Teoría General de la Tabulación Escalar y Numérica de Ecuaciones.* Madrid, 1944.

C) PUBLICACIONES DE AUTORES EXTRANJEROS SOBRE SUS TRABAJOS

- Höhenstandlinien in der seekarte,* por H. C. Freiesleben. «Annalen der Hydrographie und Maritimen Meteorologie», abril 1942.
- Position line by involute method,* por Binnacle. «The Nautical Magazine», febrero 1945.
- Droit de Hauteur sur la carte marine,* por H. C. Freiesleben. «Revue Hydrographique», Mónaco, vol. XXII, 1945.
- El calcolo del punto nave con el método delle involute di altezza,* por R. Tirreni. «Rivista Marittima», abril 1951.
- The Astronomical Position Line. The García-Frías Method.* «Admiralty Manual of Navigation», vol. III, 1954.
- Numerische Tafeln zur Lösung von Gleichen,* por H. C. Freiesleben. «Der Mathematische und Naturwissenschaftliche Unterricht», 1956