Cuadernos del Rebalaje

Nº 58 / Abril - junio de 2023 | DL: MA 702-2016 | Edita ABJ

Málaga y el mar de Alborán
Entre el Atlántico y el Mediterráneo

Manuel Vargas Yáñez
Mª Carmen García Martínez
Francina Moya Ruiz

Prólogo
Juan Antonio Camiñas

Obra artística
Ahmad Ghoreishi

Cuadernos del Rebalaje ®

DL : MA 702-2016 | ISSN (ed. impresa): 2530-6286 / (ed. digital): 2174-9868

Publicación monográfica sin ánimo de lucro, de periodicidad trimestral.
Editada desde 2010 por la asociación cultural **A**migos de la **B**arca de **J**ábega.

Dirección
Mª Luisa Balbín Luque

Consejo de redacción
Mª Luisa Balbín Luque
Juan A. Camiñas Hernández
Mariano Díaz Guzmán
Juan A. Gimbel Espejo
Eloísa Navas Martín
Andrés Portillo Strempel
Pablo Portillo Strempel

Asesoría fotográfica
Mercedes Jiménez Bolívar

Diseño y maquetación
Estefanía González Hijano

Cuadernos del Rebalaje se difunde preferentemente en formato electrónico por Internet. Tiene como objetivo divulgar conocimientos relacionados con el mar Mediterráneo y su vinculación con la costa malagueña y andaluza, sus gentes, embarcaciones, tradiciones y costumbres desde el punto de vista antropológico, histórico, geográfico, científico-técnico, artístico o de creación literaria.

La revista no comparte necesariamente las opiniones expuestas en los trabajos publicados. Los autores de estos y de las imágenes originales se reservan los derechos protegidos por la ley, autorizándose su uso y difusión siempre que se cite procedencia y autoría.

Se imprime en ARS Impresores (Málaga).

Más información, acceso libre a todos los números y normas de estilo de publicación en
https://www.amigosjabega.org/cuadernos-del-rebalaje/

✉ cuadernosdelrebalaje@gmail.com

Amigos de la **B**arca de **J**ábega está inscrita en el Reg. de Asociaciones de Andalucía con el nº 9210 de la Sección 1.
(Resolución de 29/07/2010) y en el Reg. Municipal de Málaga de Asociaciones y Entidades con el nº 2372. (Resolución de 27/09/2010). Domicilio social en el IES "El Palo". Camino Viejo de Vélez, s/nº. 29018 - MÁLAGA.

Presidente de Honor: Fernando Dols García

Presidente: Juan Antonio Camiñas Hernández
Vicepresidenta: Mª Luisa Balbín Luque
Secretario: Andrés Portillo Strempel
Tesorero: Mariano Díaz Guzmán
Vocales: Juan Antonio Gimbel Espejo, Mercedes Jiménez Bolívar, Eloisa Navas Martín y Pablo Portillo Strempel

✉ abjcontacto@gmail.com

Málaga y el mar de Alborán. Entre el Atlántico y el Mediterráneo

Portada: *Mediterráneo I.*130 x 98 cm. Acrílico sobre lienzo.

Manuel Vargas Yáñez
Mª Carmen García Martínez
Francina Moya Ruiz

Prólogo: Juan Antonio Camiñas

Obra artística: Ahmad Ghoreishi

Cuadernos del Rebalaje nº 58

Azul. 40 x 30 cm. Acrílico sobre papel.

A correct chart of the Mediterranean sea from the Straits of Gibraltar to the Levant... for Mr Tindal's continuation of Mr Rapin's History / R.W. Seale del. et sculp.
Richard William Seale. 1750. 72 x 35 cm.
[1° lat. = Om.019 ; 1:5 850 000 ca].
Bibliothèque Nationale de France

SUMARIO

- **Prólogo**
- **Introducción**
- **Empecemos por el principio…**
- **En el punto de partida**
- **Un breve paréntesis. Agitando el agua**
- **Cerremos el paréntesis y volvamos al Mediterráneo**
- **Un poco de historia: Luigi Ferdinando Marsigli**
- **El Mar de Alborán**
- ***Eppur si muove***
- **Se rompe la simetría**
- **La topografía del mar**
- **La bahía de Málaga y el terral**
- **La riqueza de las aguas malagueñas: entre el Atlántico y el Mediterráneo**

Prólogo

Mi mar es Alborán, mi ciudad Málaga. No puedo ser más concreto tras dedicar toda mi vida profesional al estudio del mar y acabarla en el Centro Oceanográfico de Málaga como coeditor del libro "Alboran Sea, Ecosystems and Marine Resources". Lo que soy y he sido le debe mucho al mar de Alborán y a Málaga, por lo que es un orgullo prologar este Cuaderno que compendia lo que saben hoy los oceanógrafos y biólogos sobre el mar de Alborán. Málaga es una ciudad mediterránea, pero las aguas que bañan sus costas, particularmente en el tramo occidental y central de la provincia ofrecen otra visión más atlántica, lo que ha llevado a los autores a decir "*Málaga es una ciudad mediterránea. Sin embargo, si atendemos a las características de las aguas que bañan sus costas, podría no ser cierta esta afirmación*". Aunque la realidad del mar de Alborán es mucho más compleja, lo que es cierto es que las aguas del Atlántico entran en el Mediterráneo a través del estrecho de Gibraltar y ocupan todo el mar de Alborán. Por tanto, las aguas superficiales de Alborán son atlánticas y en eso Málaga se parece más a otras ciudades del lado atlántico del estrecho de Gibraltar, el *Fretum Herculem* de los romanos. Y quizás entendiendo que el estrecho es una conexión más que un límite entre el Atlántico y el Mediterráneo, comprenderemos mejor el título de este Cuaderno.

El Instituto Español de Oceanografía, creado en 1914 por Odón de Buen a partir de los Laboratorios Oceanográficos de Palma de Mallorca y Málaga, y de la Estación de Biología marina de Santander, concentraba una parte importante de sus investigaciones en Alborán por muy diversas razones[1]. Y así se había decidido en la Comisión Internacional para la Exploración del Mar Mediterráneo, que acordaba cuales debían ser los trabajos prioritarios en el Mediterráneo: el mar de Alborán y el estrecho de Gibraltar eran a comienzos del siglo XX un lugar de interés para la oceanografía internacional. Como diría el propio Odón de Buen, «*Apenas creado el Instituto se organizó la primera campaña. El Ministerio de Marina puso a mi disposición un pequeño buque de 200 toneladas, el cañonero Vasco Núñez de Balboa*» (Odón de Buen. *Mis memorias*, página 224). Ese buque se encargó de las primeras campañas de investigación del IEO a partir de 1914 en las aguas del Mediterráneo occidental y Estrecho de Gibraltar. El 27 de octubre de 1914 se realiza la primera campaña de investigación marina en aguas de Málaga bajo la dirección de Odón de Buen, y se decide establecer un punto de muestreo frente a Vélez Málaga, a más de 600 metros de profundidad. En esa estación se toman las primeras muestras de agua, de sedimentos y de plancton[2]. Esa estación de muestreo daría lugar a otras en Alborán: tras la creación en 1975 del Plan de Acción para el Mediterráneo del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP-MAP) el IEO creó en 1977 la Red de Observación del Medio Marino (ROMM), y el Laboratorio Oceanográfico de Málaga llevó a cabo la toma de datos mensuales de parámetros físico-químicos, geológicos y biológicos en el mar de Alborán desde 1978. Una vez finalizado ese programa, se inició en 1981 el Programa MEDPOL-II, en cuyo marco se realizaron una serie de muestreos multidisciplinares en la costa de Málaga. Posteriormente el IEO inicia el proyecto ECOMALAGA en 1992, ampliación a Alborán del proyecto "Radiales" que ya realizaba en el Cantábrico y Atlántico. El objeto de esa investigación multidisciplinar

[1] Camiñas, J. A. 2018. "Ciencia, Oceanografía y Patrimonio. Inicios del Laboratorio, Acuario y Museo Oceanográfico de Málaga", *Cuadernos del Rebalaje* Nº 41. Asociación de Amigos de la Barca de Jábega.

[2] Camiñas, J. A. 1997. "Antecedentes de la investigación marina en Málaga. Apuntes para una historia de la ciencia". *Boletín de la Academia Malagueña de Ciencias*, Vol. V, 1999-2003, págs. 149-153.

Luz y sombra. 50 x 80 cm.

era continuar la obtención de series de datos que permitieran analizar sus variaciones en el espacio y el tiempo.

Los autores de este Cuaderno, compañeros del Oceanográfico que me honran con la posibilidad de prologar su trabajo, realizan un interesante recorrido por la historia, la geología y la oceanografía del Mediterráneo y de Alborán basada en datos. Desde la creación de una cascada gigantesca en el estrecho de Gibraltar que permitió que se llenara el Mediterráneo durante la inundación Zancliense, hace unos 5,3 millones de años, con el agua entrando en el Mediterráneo a velocidades del orden de 100 km/h, hasta hoy, permitiéndonos hacer un seguimiento de las aguas que podemos tocar en las playas de Málaga, ora atlánticas, ora mediterráneas. Y nos explican de forma sencilla pero rigurosa, cuál es la relación entre las aguas alboránicas y aquellas de las que provienen, tanto del Mediterráneo como del Atlántico. Ellos son actualmente los continuadores de esa labor callada de investigación marina que supone la toma de datos en estaciones fijas iniciada en octubre de 1914, estaciones que han ampliado de manera concienzuda por todo el Mediterráneo español para que las series de datos que analizan tengan un mayor rango geográfico y les permita una mejor observación de procesos que no sólo ocurren a escala local sino en un más amplio espectro espacial y temporal. Con mi aportación en este prólogo quiero subrayar el valor de su trabajo, que es bastante desconocido, con días en el mar y prolongados análisis y estudios de laboratorio, que ofrecen resultados muy sólidos con los que podemos asegurar que estamos ante un notable cambio climático que está afectando al mar, a sus especies y al planeta entero. Y que ya presenta enormes pérdidas de vidas, bienes y recursos que son consecuencias de tormentas, subidas del nivel del mar, lluvias torrenciales, inundaciones, deslizamientos de laderas, muerte y destrucción. Esperamos que este Cuaderno sirva para que cambien hábitos y discursos y se piense en nuestro común planeta océano.

Juan Antonio Camiñas

Introducción

Podríamos decir que Málaga nació mirando al mar. Los primeros asentamientos fenicios del Cerro del Villar, en la desembocadura del Guadalhorce, allá por el siglo IX a.C., y la propia Malaka, fundada en el siglo VII a. C. entre la ladera de la colina de la Alcazaba y los terrenos donde hoy se ubica la Catedral [Padilla et al., 2020], mantuvieron desde sus inicios una estrecha relación con el Mediterráneo. Las condiciones de la costa formaban un puerto natural que proporcionaba abrigo a las embarcaciones fenicias. Muchos pueblos han pasado por Málaga o se han asentado en ella a lo largo de su historia, y su carácter costero, su puerto, sus recursos pesqueros, y el comercio marítimo, han sido siempre un elemento de capital importancia.

Geográficamente Málaga se halla situada en el Mediterráneo. Los orígenes de la ciudad y sus primeras relaciones con aquellos pueblos que forjaron la cultura occidental en torno al mare nostrum refuerzan su carácter mediterráneo, como también lo hacen su clima, su gastronomía, etc. Sin embargo, estamos seguros de que muchos se llevarán una sorpresa si les decimos que las aguas que bañan nuestras costas son aguas atlánticas, aunque el Mediterráneo se encuentra al acecho y aparece a la menor oportunidad.

Realizaremos un breve recorrido por la historia geológica del Mediterráneo, desde el mar de Tetis hasta la actualidad, haremos un análisis de los procesos físicos que le afectan y su interacción con la atmósfera. Mostraremos que el Mediterráneo ocupa un lugar singular entre los mares del planeta, y en su extremo más occidental echaremos un vistazo al mar de Alborán donde se sitúa Málaga: entre el Atlántico y el Mediterráneo.

Era	Periodo	Época	Edad	Millones de años antes del presente
	Cuaternario	Holoceno		0,01
		Pleistoceno		2,6
Cenozoico	Neogeno	Plioceno	Zancliense	5,3
			Messiniense	7,3
		Mioceno		23
	Paleogeno	Oligoceno		33,9
		Eoceno		56
		Paleoceno		66
	Cretácico			145
Mesozoico	Jurásico			201
	Triásico			252

Tabla. Escala del tiempo geológico muy simplificada donde se incluyen los principales periodos que se mencionan en este epígrafe con objeto de facilitar su lectura.

Empecemos por el principio…

Si viajásemos atrás en el tiempo 200 millones de años (Ma), hasta el inicio del periodo Jurásico, no seríamos capaces de reconocer nuestro planeta, pues la distribución de sus continentes y océanos era completamente distinta a la actual.

Todos los continentes estaban unidos formando un supercontinente llamado Pangea rodeado por el gran océano Panthalassa. En el extremo oriental de Pangea, y sobre su franja ecuatorial, se abría un segundo océano llamado Tetis, (Fig. 1A). A lo largo del Mesozoico (252 Ma), y durante principios del Cenozoico (66 Ma), Tetis se fue extendiendo hacia el oeste a medida que Pangea se desgajaba en una parte septentrional denominada Laurasia, que engloba Norteamérica y Eurasia, y en una parte meridional, Gondwana, formada por el resto de los continentes. Al mismo tiempo América y África se separaron propiciando la apertura del océano Atlántico. Así, Tetis comunicaba el Atlántico con el océano Índico. Esta transformación continuó lenta pero inexorablemente, y a principios del Mioceno (23 Ma) la configuración de los océanos y continentes del planeta sería algo parecida a la de la figura 1B.

Las placas Africana y Arábiga continuaron desplazándose hacia el norte hasta que, hace aproximadamente 14 Ma, la conexión de Tetis con el Índico quedó cerrada, formándose un primitivo mar Mediterráneo conectado entonces tan solo con el Atlántico a través del corredor Bético (hoy Valle del Guadalquivir) y el corredor del Rif (en el actual Marruecos).

Esta conexión también acabó por cerrarse debido al choque de las placas Africana y Euroasiática hace 6 Ma, produciendo la denominada Crisis de Salinidad del Messiniense. Durante los 600.000 años en los que el Mediterráneo permaneció desconectado del resto de los océanos del mundo, fue desecándose, quedando reducido a un conjunto de lagos hipersalinos. Al inicio de la Edad Zancliense, hace 5,3 Ma, se produce la apertura del actual estrecho de Gibraltar en un proceso muy rápido [García-Castellanos et al., 2009]. A medida que el agua se precipitaba por la nueva apertura, iba erosionando el terreno, agrandando el canal por el que discurría y la velocidad a la que entraba el agua fue aumentando de forma exponencial, formando una gigantesca cascada que llenaría el Mediterráneo en un periodo de entre unos meses y dos años. Durante este proceso, denominado Inundación Zanclienses, el agua entró en el Mediterráneo con un caudal más de mil veces superior al del río Amazonas. El nivel de este "nuevo" Mediterráneo subió a razón de unos 10 metros por día.

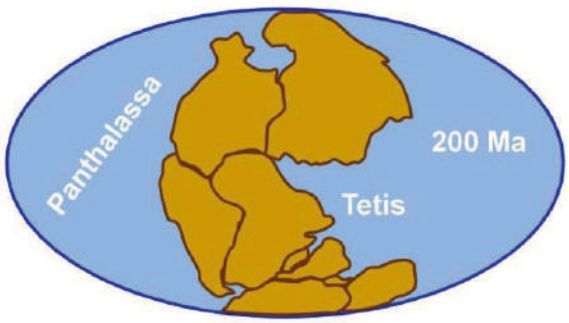


Figura 1A.

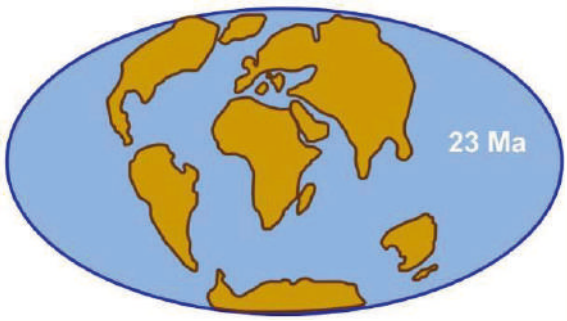


Figura 1B.

Distribución aproximada de los océanos y continentes de la Tierra hace 200 Ma (A) y 23 Ma (B).

En el punto de partida

El Mediterráneo quedó lleno de agua procedente del Atlántico, así que podría decirse que en aquel momento sus aguas eran las mismas que ocupaban la parte superficial del golfo de Cádiz. Sin embargo, en la actualidad, las propiedades físicas de las aguas del Mediterráneo, (temperatura, salinidad, y densidad), no son iguales que las de su océano vecino. Los oceanógrafos acostumbramos a añadir gentilicios a las aguas de los mares, hablando de aguas atlánticas y aguas mediterráneas, entendiéndose que no son la misma cosa. Entonces, ¿Qué mecanismo transformó esas aguas atlánticas en aguas mediterráneas? ¿Sigue actuando hoy ese mecanismo transformador?

Para responder estas preguntas plantearemos un experimento mental que toma como punto de partida una inundación del Mediterráneo similar a la Zancliense. En primer lugar, debemos hacer algunas precisiones. Las condiciones climáticas de nuestro planeta en general, y de la región mediterránea en particular, hace 5,3 Ma, no eran las mismas que las de hoy. El clima del planeta era más cálido. Pensemos simplemente que entre hace 3,3 y 3 Ma, en lo que se conoce como Óptimo Climático del Plioceno, la temperatura media de la Tierra era unos 3º C superior a la de hoy en día y el nivel del mar estaba 30 m por encima del actual. En consecuencia, la temperatura y la salinidad de las aguas que, procedentes del Atlántico, llenaron el Mediterráneo, no eran las mismas que las que tienen las aguas del golfo de Cádiz en la actualidad. Tampoco la atmósfera con la que interaccionaban esas aguas era la misma que la de nuestros días. Sin embargo, en nuestro experimento mental, y con el objetivo de ilustrar el funcionamiento del Mediterráneo en el presente, vamos a considerar que las condiciones climáticas y oceanográficas son las actuales.

En esta situación, una vez abierto el estrecho de Gibraltar, el agua superficial del Atlántico empezaría a fluir hacia la primera de las cuencas que configuran el Mediterráneo: el mar de Alborán. La salinidad del agua de esta formidable cascada sería de unos 36,3 $^{0}/_{00}$ (partes por mil: 36,3 gramos de sal por cada kilogramo de agua). Esta salinidad experimentaría ligeras variaciones con el ciclo de las estaciones, pero en principio pueden despreciarse. La temperatura sí mostraría fuertes oscilaciones entre el invierno y el verano, por lo que tomaremos el promedio de un año completo que sería de unos 16,4 ºC (Figura 2A). El agua se iría extendiendo por las distintas cuencas del Mediterráneo occidental, que es aquel que queda a occidente del canal de Sicilia, entre la isla del mismo nombre y África, para finalmente desbordarse sobre el umbral de este canal y acabar de llenar el Mediterráneo oriental (Figura 2B).

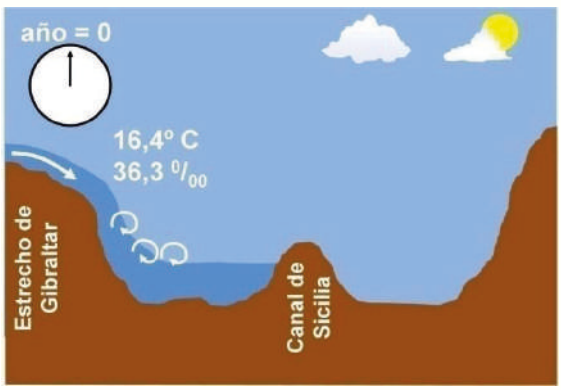


Figura 2A.

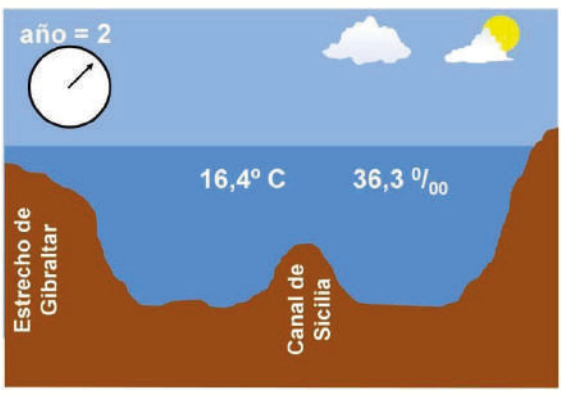


Figura 2B.

Esquema del proceso de inundación Zancliense y llenado del Mediterráneo con agua atlántica.

Y como reza el título de este epígrafe, este es nuestro punto de partida. A partir de aquí comienzan a producirse las transformaciones que convertirán este "trozo" de Atlántico en el Mediterráneo que todos conocemos.

Un breve paréntesis. Agitando el agua

Antes de abordar los procesos que transformaron aquel Mediterráneo lleno de agua atlántica en el mar que hoy conocemos, y que siguen actuando en la actualidad, debemos entender algunos fenómenos que se producen a lo largo y ancho del planeta. La temperatura y salinidad de los mares, así como las corrientes que los surcan son el resultado de la interacción entre el océano, la energía del sol y la atmósfera. Esta interacción se limita a la capa más superficial del mar. La luz solar que aporta la energía que las algas (fitoplancton) y plantas marinas necesitan para realizar la fotosíntesis, solo penetra entre unas decenas y algo más de una centena de metros. Podríamos decir que la parte más superficial está "desconectada" del resto del océano que se extiende bajo ella. Es por tanto fundamental entender los procesos de mezcla, que son los que pueden producir el intercambio de energía y materia entre la superficie y las capas profundas de los mares.

Llamaremos columna de agua a toda el agua que se extiende desde un área de un metro cuadrado situado en la superficie del mar, hasta el fondo del mismo. Cuando las aguas superficiales, cálidas y poco densas, se encuentran por encima de aguas más frías y densas que se extienden hasta el fondo de la columna de agua, decimos que el mar está estratificado (esquema de la izquierda de la figura 3A). Si por el contrario, esas aguas cálidas superficiales se mezclan con las aguas frías profundas, decimos que se ha roto la estratificación, y tenemos una columna de agua mezclada permitiendo que

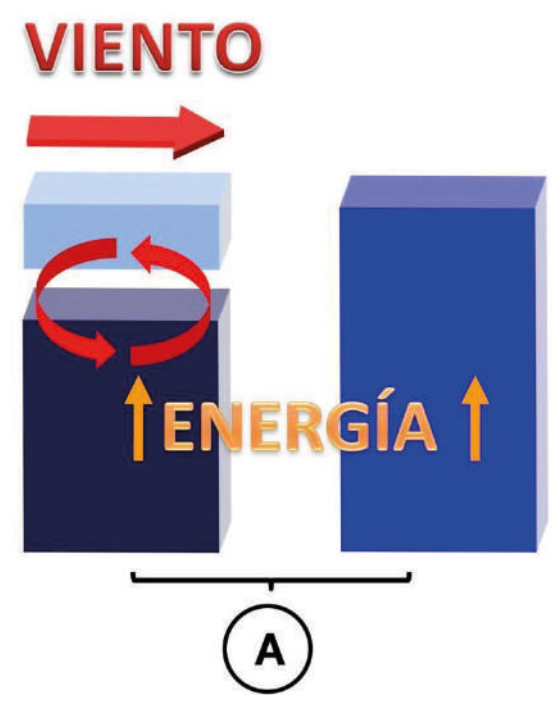


Figura 3A.
Situación de estratificación de la columna de agua y posterior mezcla por la acción del viento.

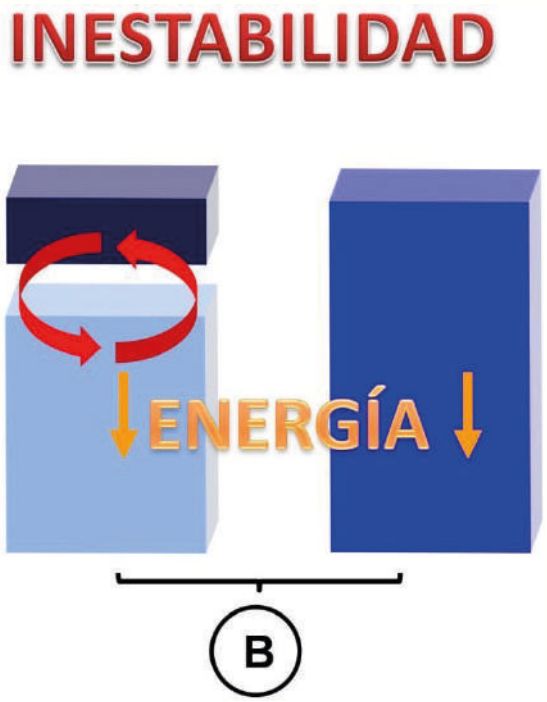


Figura 3B.
Situación de inestabilidad de la columna de agua y posterior mezcla por procesos de convección.

Serie *Mediterráneo*. 146 x 97 cm. Acrílico sobre lienzo.

el calor almacenado en la parte más superficial penetre hacia el fondo del mar y facilitando el transporte de oxígeno y dióxido de carbono hacia su interior. Por otra parte, las aguas profundas ricas en nutrientes inorgánicos son indispensables para que las algas marinas realicen la fotosíntesis. Con la mezcla estos nutrientes llegan a las capas superficiales bien iluminadas por la luz solar, favoreciendo el crecimiento del fitoplancton que constituye la base de la cadena trófica o alimentaria.

Cuando se rompe la estratificación (esquema de la derecha en la figura 3A), la energía almacenada en la columna de agua es mayor que la de la situación de la izquierda, en la que la columna de agua estaba estratificada (energía potencial gravitatoria). La energía ni se crea ni se destruye, por tanto, alguien debe aportar esa "energía extra" que el mar ha ganado durante la mezcla. Ese alguien es principalmente el viento. Se necesita que el viento agite las aguas haciendo penetrar el calor hacia las profundidades de los mares, de la misma forma que necesitamos remover el café con una cucharilla, aportando energía para que el azúcar se disuelva y todo quede bien mezclado.

Sin embargo, no siempre es así. En el esquema de la izquierda de la figura 3B se muestra una situación en la que el agua que ocupa la parte más superficial del mar es más densa que el agua más profunda. Este hecho puede tener dos causas. Durante el invierno el mar pierde calor a través de su superficie, de tal forma que el agua superficial llega a tener una temperatura inferior a la de las aguas situadas por debajo de ella. La otra causa es un aumento de la salinidad de las aguas superficiales debido a una intensa evaporación. En cualquiera de los dos casos la situación que muestra el esquema de la derecha de la figura 3B tiene menor energía que la situación de la izquierda. La naturaleza siempre tiende a un estado de mínima energía. Por tanto, la presencia de aguas más frías (o más saladas, o ambas cosas) por encima de aguas más cálidas (y/o dulces), constituye una situación inestable que llevará finalmente a la mezcla de la columna de agua sin necesidad de un aporte externo de energía. Este proceso se denomina **convección**.

Cerremos el paréntesis y volvamos al Mediterráneo

En la Tierra hay mares y océanos que absorben del Sol y de la atmósfera más calor del que a su vez emiten, mientras que en otros casos sucede lo contrario. En realidad, ni los mares del primer caso se calientan progresivamente, ni los del segundo se enfrían, pues existe un transporte desde las zonas que tienen una ganancia neta de calor hacia las que son deficitarias, siendo las corrientes marinas las que se encargan de esta redistribución.

Probablemente, muchos pensarán que el Mediterráneo pertenece a ese primer grupo de mares que absorben más calor del que emiten a la atmósfera. ¡Pero no es así! Claro está que no es lo mismo el verano que el invierno, ni todas las regiones mediterráneas tienen el mismo clima, pero si hacemos un promedio a lo largo de las estaciones del año, y para todas las regiones que lo forman, el resultado es que el Mediterráneo cede calor a la atmósfera. Esta cantidad es difícil de medir, entre otras cosas porque es muy variable y no todos los años son iguales, pero aproximadamente es de unos 5 vatios por metro cuadrado. Debe quedar claro que esta cifra es un promedio, lo que significa que la cantidad de energía que el Mediterráneo cede a la atmósfera en su conjunto, y a lo largo de un año completo, es la misma que cedería "si" (recalcamos el condicional) cada metro cuadrado del Mediterráneo estuviese emitiendo todo el año energía con una potencia de 5 vatios.

Otra característica importante del Mediterráneo es su evaporación neta. Aunque en un mar cualquiera se produzca una fuerte evaporación, si recibe la misma cantidad de agua dulce por el aporte de la lluvia y de los ríos, entonces decimos que la evaporación neta es cero. En el caso del Mediterráneo la evaporación excede a los aportes procedentes de la lluvia y de los ríos. ¿Qué cantidad de agua representa esa evaporación neta? Una forma visual e intuitiva de expresar este volumen de agua es diciendo que la evaporación neta del Mediterráneo equivale a un metro por año. Si estuviese desconectado del Atlántico (como ocurrió hace 6 Ma), el nivel del mar descendería un metro, aproximadamente, cada año. Si pensamos que la profundidad media del Mediterráneo es de 1500 m, podemos concluir de forma muy simplificada, que tardaría en secarse 1500 años aproximadamente.

La figura 4A muestra esquemáticamente los dos elementos que acabamos de describir: la pérdida de calor y la evaporación neta del Mediterráneo calculadas sobre un año completo. Vamos a considerar esta figura como la primera de una secuencia que nos mostrará el funcionamiento actual del Mediterráneo, así que volvamos al experimento mental que proponíamos en el epígrafe anterior. Antes de seguir debemos advertir que el proceso real que tratamos de describir es más complejo.

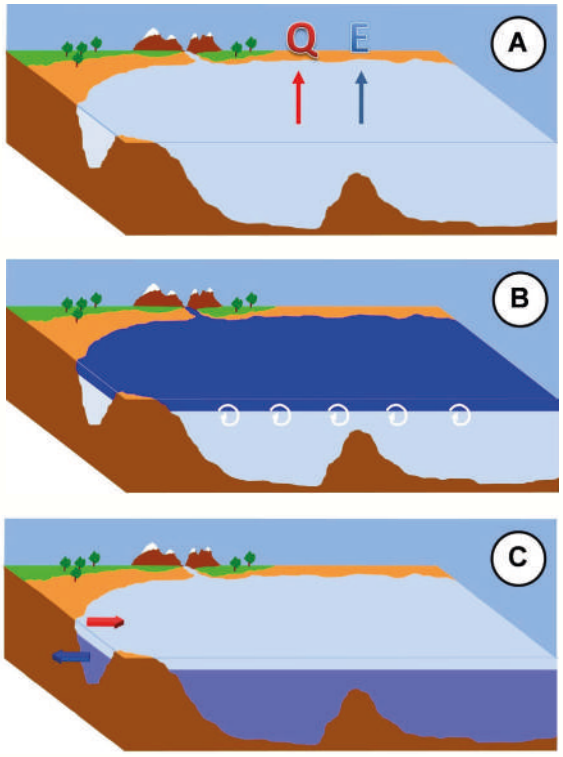


Figura 4.
Esquema de la evolución de las propiedades de las aguas del Mediterráneo debido a la evaporación neta y las pérdidas de calor.

A pesar de ello, la secuencia que vamos a mostrar mantiene los principales elementos que controlan la transformación de las aguas atlánticas en mediterráneas, y la generación de las corrientes que en la actualidad intercambian agua, sal, y calor a través del estrecho de Gibraltar.

Tras haberse llenado el Mediterráneo con agua procedente del Atlántico, y una vez transcurrido un año, las aguas más superficiales se harían un poco más frías y un poco más saladas debido a la pérdida de calor y a la evaporación. Aunque este proceso afecta a la capa superficial, las aguas más frías y saladas son también más densas que las que quedan por debajo de ellas (Figura 4B). Como hemos explicado en nuestro breve paréntesis, ésta es una situación inestable que lleva a la mezcla de toda la columna de agua, es decir, a un proceso de convección, de manera que toda el agua del Mediterráneo se haría, transcurrido un año, un poco más fría y un poco más salada que la que queda a poniente del estrecho de Gibraltar en el golfo de Cádiz (Figura 4C).

Debido a la evaporación neta, el nivel del mar bajaría en el Mediterráneo, lo que produciría nuevamente la entrada de agua procedente del Atlántico a través del estrecho de Gibraltar. Este agua, al ser menos salada y más cálida, sería menos densa que el agua que tras haber estado un año en el Mediterráneo ha sufrido las transformaciones que acabamos de describir. Las aguas que ahora estarían en el fondo del Mediterráneo, debido a su aumento de densidad, soportarían una presión mayor que las que están a la misma profundidad al otro lado del Estrecho, lo que generaría una corriente de las aguas profundas que saldrían a través de Gibraltar hacia el Atlántico como se muestra en la figura 4C.

Podríamos pensar que con esta secuencia ya hemos terminado, pero nada más lejos de la realidad. Tras un año, el aumento de salinidad y el descenso de temperatura que habrían sufrido las aguas del Mediterráneo sería de apenas unas centésimas, así que aún estaríamos muy lejos de los valores 13,5 ºC y 38,6 $^{0}/_{00}$ que aproximadamente tienen en la actualidad las aguas mediterráneas (promediando para todo el Mediterráneo; los valores del Mediterráneo occidental son ligeramente menores). Por otra parte, la velocidad de la corriente de agua mediterránea que sale en profundidad por el Estrecho depende de la diferencia de densidad entre las aguas del Atlántico (más cálidas y menos saladas) y las aguas del Mediterráneo (más frías y saladas). Pero, tras las leves modificaciones que hemos descrito, esta diferencia de densidad es aún muy pequeña, y la corriente sería muy débil, muy lejos del millón de metros cúbicos de agua que actualmente fluyen cada segundo por el estrecho de Gibraltar en uno y otro sentido.

Así que la transformación continuaría. El segundo año, debido a la pérdida de calor que se produce a través de la superficie del Mediterráneo (5 W/m^2) y a la evaporación neta, el agua que había entrado procedente del Atlántico, y que ocupaba la parte más superficial del mar, se haría más fría y salada, y sufriría un proceso de convección (mezcla) con las aguas más profundas que ya habían sufrido una cierta transformación el año anterior. El Mediterráneo se haría un poco más frío y salado y la intensidad de la corriente de salida también se haría un poco mayor.

¿Y así hasta cuándo? Pensemos por un momento en el intercambio que se produce a través del estrecho de Gibraltar. En la parte superficial del mar hay una corriente de agua que entra en el Mediterráneo, y que compensa el metro de agua que se pierde cada año, y que también compensa la pérdida debida al agua que a partir del primer año ha empezado a salir en profundidad. Si en cualquier recipiente lleno de agua vamos sacando una parte de esa agua, y reemplazándola por otra más caliente, el resultado es que el agua del recipiente se calienta, es decir, el intercambio de agua que se produce en el estrecho de Gibraltar aporta calor al Mediterráneo. Por otra parte, la evaporación neta "saca" agua dulce del Mediterráneo (la sal no se evapora), pero el agua que entra desde el Atlántico es salada, así que estamos aportando sal al Mediterráneo. Es cierto que hay una corriente de agua Mediterránea que sale por Gibraltar, pero de momento esta corriente es muy débil en nuestro experimento, así que la cantidad de sal que sale es pequeña.

Azul ++. 40 x 30 cm. Acrílico sobre papel.

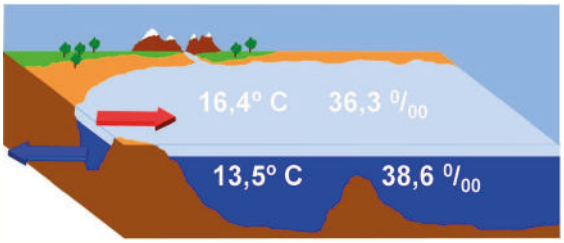


Figura 5. Esquema del intercambio de agua entre el Mediterráneo y el Atlántico.

El agua que entra desde el Atlántico siempre está a unos 16,4 ºC y siempre tiene una salinidad de 36,3 $^{0}/_{00}$, sin embargo, el agua que sale cada año se va haciendo un poco más fría y más salada, y por tanto más densa, y en consecuencia cada vez sale con mayor velocidad y caudal. Esto implica también que cada vez este intercambio de agua aporta más calor al Mediterráneo, y que cada vez sale más sal a través de la corriente mediterránea profunda. Así, llegaría un punto en el que el calor intercambiado a través del Estrecho compensaría la pérdida de 5 W/m^2 que se produce cada año, y la cantidad de sal que entra con la corriente atlántica sería igual a la que sale. Este es el equilibrio que existe en la actualidad y que estaría representado por el esquema de la figura 5 en el que el agua del Mediterráneo ha alcanzado sus valores característicos de 13,5 ° C de temperatura y 38,6 $^{0}/_{00}$ de salinidad. En este estado de equilibrio, la corriente mediterránea tiene, grosso modo, un caudal de un millón de metros cúbicos por segundo, y el caudal de la corriente atlántica es un 5% superior.

Como ya advertimos, el proceso que hemos descrito es una simplificación de la realidad. La convección que transforma las aguas atlánticas en mediterráneas no sucede en toda la superficie del Mediterráneo, sino en lugares concretos. Además, los valores de temperatura y salinidad 13,5 ºC y 38,6 $^{0}/_{00}$ son el promedio para todas las aguas que en el Mediterráneo se extienden por debajo de la capa de agua atlántica hasta el fondo del mar. Pero cada cuenca y cada rango de profundidad tiene en realidad valores ligeramente diferentes que delatan el lugar del Mediterráneo en el que se produjo el fenómeno de convección que otorgó a esas aguas sus "señas de identidad mediterránea". Concretamente en el mar de Alborán las aguas mediterráneas están en torno a 13º C y 38,4 $^{0}/_{00}$.

Pero a pesar de estas simplificaciones, la descripción que hemos realizado contiene la esencia de los procesos reales que ocurren en el Mediterráneo. La entrada de una corriente de agua cálida y poco salada, y su transformación en agua más salada y fría que se hunde y retorna al Atlántico en forma de corriente profunda, es lo que se denomina la circulación termohalina del Mediterráneo. Este nombre deriva del hecho de que esta circulación tiene su origen en las diferencias de temperatura y salinidad entre distintas masas de agua (en este caso las atlánticas y las mediterráneas), que producen finalmente diferencias de densidad y presión. Y estas diferencias de temperatura y salinidad son producidas, a su vez, por la interacción entre la superficie del mar y la atmósfera y los procesos de convección que esta interacción origina.

Esta circulación hace del Mediterráneo un lugar muy especial. Si alguien dice que va a hablar sobre la "circulación termohalina", sin aclarar nada más, no pensaremos en el Mediterráneo. La circulación termohalina constituye un conjunto de corrientes superficiales cálidas que fluyen hacia las latitudes altas del planeta (regiones polares), y corrientes frías y profundas que retornan hacia las latitudes tropicales y ecuatoriales, cubriendo el planeta por completo y transportando inmensas cantidades de calor que, junto con el transportado por la circulación atmosférica, configuran el clima de la Tierra tal y como lo conocemos. Este sistema planetario de corrientes es movido por procesos de convección similares a los que se producen en el Mediterráneo. Por esta razón decimos que el Mediterráneo es un lugar especial; es un océano en miniatura con procesos similares a los que suceden a escala planetaria, pero confinados en una pequeña región del mundo.

Serie *Mediterráneo*. 90 x 120 cm. Acrílico sobre lienzo.

Marina 1. 40 x 30 cm. Acrílico sobre papel.

Un poco de historia: Luigi Ferdinando Marsigli

Tan interesante como los fenómenos que suceden en el Mediterráneo es la historia de los científicos que a lo largo de los siglos contribuyeron a desentrañar sus secretos. Este es el caso de Luigi Ferdinando Marsigli [Soffientino & Pilson, 2005].

Estrictamente hablando, Marsigli no estudió el intercambio de aguas en el estrecho de Gibraltar, sino el del estrecho del Bósforo, pero sus resultados son aplicables, no solo al estudio de las corrientes entre el Mediterráneo y el Atlántico, sino a cualesquiera otros dos mares u océanos con aguas de distinta densidad conectados por un canal o estrecho.

En 1679, con apenas 21 años de edad, Marsigli viajó a Estambul, capital del Imperio otomano, como parte de una delegación diplomática veneciana finalmente sin éxito, por lo que tuvo que abandonar Estambul (Figura 6) apenas un año después de su llegada. Sin embargo no fue un año perdido, le sirvió para realizar una serie de experimentos y medidas que permitieron explicar el intercambio de aguas, con una corriente superficial y otra profunda, que se produce entre dos mares cuyas aguas tienen diferente densidad.

Aunque la ocupación a lo largo de su vida fue el ejército, su pertenencia a una familia noble de Bolonia le proporcionaron medios para una completa formación tanto humanística como científica y sobre todo poseía la cualidad más importante de un científico: la curiosidad. Esta curiosidad le llevó durante su estancia en Estambul, a relacionarse con la población local, a aprender su lengua y sus costumbres. Así, supo por los pescadores que, cuando largaban un arte de pesca por un costado de su embarcación, en ocasiones acababan recobrándolo por el opuesto. Cuando hacían descender un peso sujeto a un cabo, éste era arrastrado por la corriente en una dirección, pero al continuar largándolo, llegaba un momento en que cambiaba la dirección en la que era arrastrado. Estos hechos llevaron a Marsigli a interesarse por el problema de la circulación de dos capas que se producía en el estrecho del Bósforo y que no habían sabido resolver los científicos de la época [Soffientino & Pilson, 2005].

Diseñó un aparato para medir corrientes mediante una serie de palas de madera que podían girar en torno a un eje, mientras con un péndulo medía el tiempo que tardaban las palas en dar las vueltas. De esta forma pudo estimar la velocidad de las corrientes que en la parte superficial del mar se dirigían desde el mar Negro hacia el Mediterráneo. No pudo medir la velocidad de la corriente de la capa más profunda, pero los cambios en la dirección en la que era arrastrado un peso bajado mediante un cabo le permitieron estimar que la dirección de la corriente cambiaba, es decir, se dirigía desde el Mediterráneo hacia el mar Negro, a partir de los 15 o 20 metros de profundidad.

Intuyó que este fenómeno era originado por la diferencia de densidad de los dos mares conectados por los estrechos del Bósforo y los Dardanelos. Diferencia de densidad debida a la distinta salinidad del Mediterráneo y del mar Negro, el primero más salado por la intensa evaporación a la que está sometido, y el segundo más dulce debido al gran caudal de los ríos que desembocan en él (Danubio, Dniéper, etc.). Para comprobarlo, realizó medidas de densidad tanto en el mar Egeo como en el mar Negro, y de esta forma reunió todos los elementos experimentales que necesitaba. Las aguas del mar Negro eran efectivamente menos saladas que las del Mediterráneo, comprobó la existencia de una corriente superficial que fluía desde el mar Negro hacia el Mediterráneo, y otra corriente profunda en sentido opuesto. Ya solo faltaba demostrar que efectivamente esa diferencia de salinidad y de densidad, era el factor que originaba estas corrientes.

Para ello construyó un sencillo dispositivo como el que se muestra en la figura 6. Una caja separada en dos compartimentos por una pared en la que se disponían dos orificios, uno en la parte superior y otro en el fondo. Tras llenar los dos compartimentos con aguas de diferente salinidad y dejar libres las aperturas que los conectaban observó cómo el agua más salada fluía por el abertura del fondo hacia el compartimento ocupado por el agua más dulce, tal y como hace el agua del Mediterráneo en su camino hacia el mar Negro, mientras que el agua dulce fluía en sentido opuesto a través del orificio superficial, de forma análoga a lo que hacían las aguas del mar Negro. De esta forma demostró la existencia de una doble circulación en superficie y profundidad entre cualesquiera dos mares de diferente densidad que estén conectados por un estrecho o canal. Esto es exactamente lo mismo que sucede entre el Atlántico y el Mediterráneo. El agua menos salada del Atlántico fluye en la parte superior del mar a través del estrecho de Gibraltar inundando el Mediterráneo, mientras que el agua más salada y densa fluye en profundidad hacia el Atlántico.

El Mar de Alborán

Hasta este momento hemos dirigido nuestra mirada hacia el Mediterráneo esbozando el marco general. Ahora nos acercaremos al mar de Alborán y la bahía de Málaga para apreciar los detalles y matices que esconden sus aguas y su circulación.

Antes de empezar a referir el contenido, debemos dedicar algunas líneas al continente, o dicho de forma más precisa, y citando al Dr. Díaz del Río, hablaremos de la cavidad geológica que contiene sus aguas marinas [Díaz del Río Español, 2009].

Los fondos marinos del mar de Alborán tal y como se observa en la figura 7 nos muestran que esta cuenca se subdivide en tres subcuencas: la subcuenca occidental, la oriental, y una tercera de menor extensión denominada meridional o almohade. Entre las cuencas occidental y oriental se alza la dorsal de Alborán, parte de la cual emerge a la superficie formando la isla que da nombre a este mar.

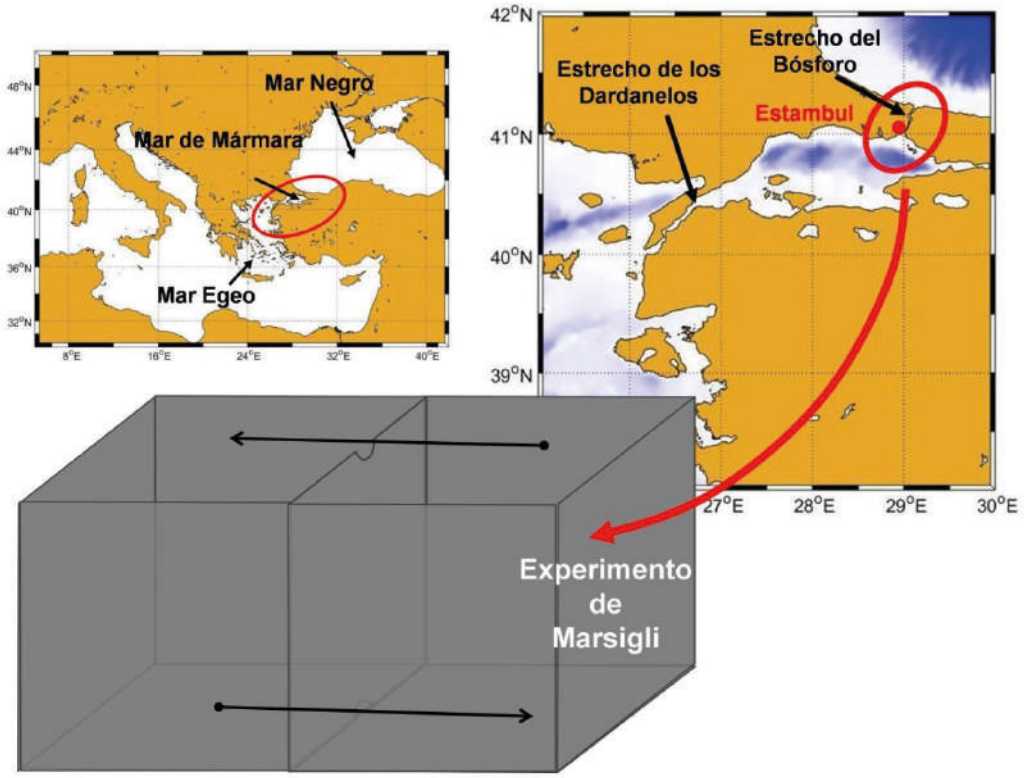


Figura 6. Localización del Estrecho de Bósforo y esquema del experimento de Marsigli.

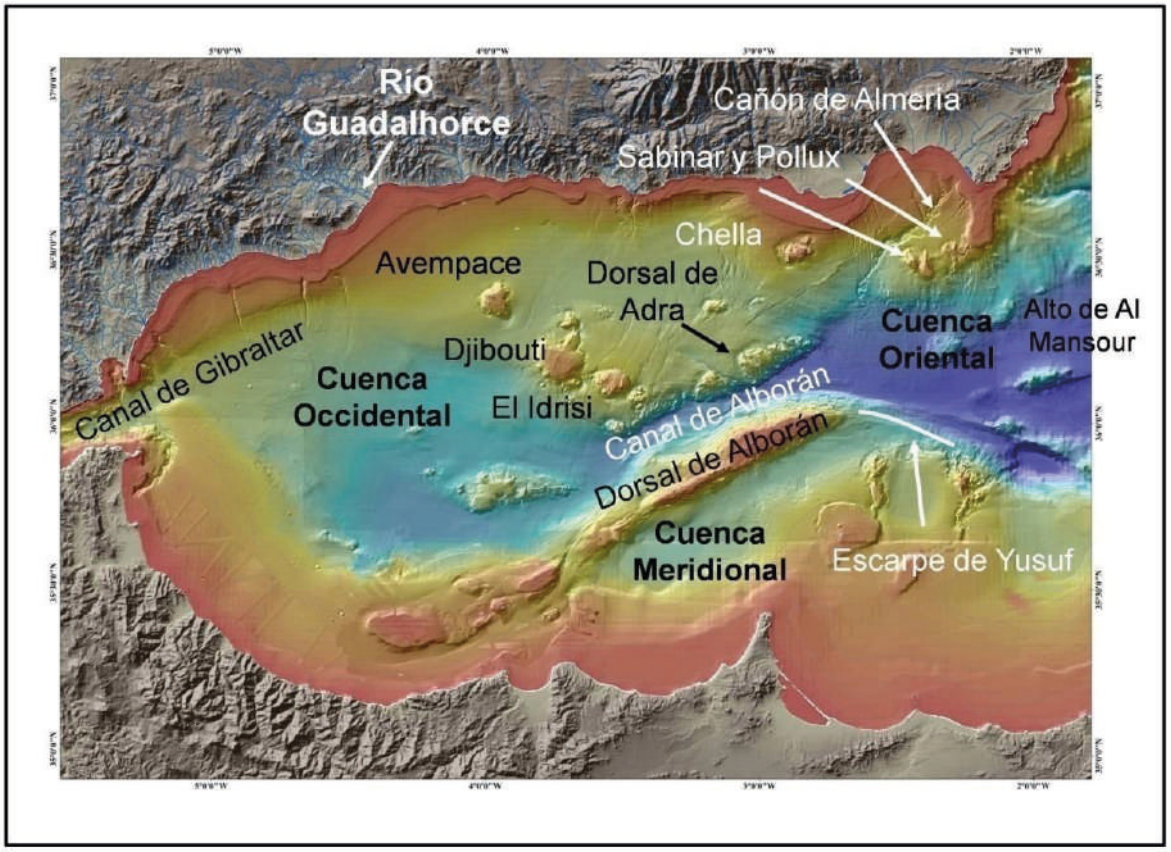


Figura 7. Fondo marino del Mar de Alborán. Figura elaborada por el Grupo de Geociencias Marinas del Instituto Español de Oceanografía.

La subcuenca occidental es menos profunda que la oriental, con profundidades máximas en torno a los 1400 m, y en ella podemos destacar el banco de Djibouti. Otro rasgo sobresaliente de esta subcuenca es el canal de Gibraltar, que encauza la salida de las aguas mediterráneas hacia el Atlántico.

La subcuenca oriental es más profunda que la occidental, alcanzando los 1800 m. Desde ella el mar de Alborán se abre al resto del Mediterráneo, concretamente a la cuenca Argelino-Balear, donde aumenta la profundidad hasta alcanzar los 2900 m. El relieve de los fondos de esta subcuenca también presenta diversas formaciones geológicas tales como los altos de Al Mansour, en su extremo oriental, o los montes submarinos de Sabinar y Pollux, al sur del cañón de Almería, que se extiende en dirección sudoeste desde el golfo del mismo nombre. Finalmente, destacamos el escarpe de Yusuf, en el límite sudoccidental de esta subcuenca, el cual la separa de la subcuenca Meridional, al sur de la dorsal de Alborán.

Formaciones y corrientes del fondo interaccionan de tal manera que estas últimas moldean a las primeras con el paso del tiempo, mientras que son esas formaciones las que constriñen los movimientos de las aguas que fluyen cerca del fondo, imponiendo barreras insalvables en unos casos, y proporcionando una vía natural por la que dichas aguas pueden fluir, en otros.

Eppur si muove

"Y sin embargo se mueve". El movimiento de traslación de la Tierra alrededor del sol, y el de rotación alrededor de su eje que defendía Galileo ante la Inquisición, ya propuesto por Copérnico en el s. XVI, tiene una influencia decisiva en la atmósfera y los océanos del planeta. Concretamente el movimiento de rotación hace que cualquier cuerpo que se desplace en el hemisferio norte, sufra una fuerza perpendicular a la dirección de su

movimiento, proporcional a la velocidad de ese desplazamiento, y hacia la derecha, según el sentido de avance del cuerpo considerado. Esta fuerza aparece igualmente en el hemisferio sur, pero en este caso la fuerza se dirige hacia la izquierda. Seguramente la mayoría de nosotros hemos oído hablar alguna vez de ella: la fuerza de Coriolis (Figura 8).

Los epígrafes anteriores esbozaron los grandes trazos de la circulación del Mediterráneo y de las propiedades de las aguas atlánticas y mediterráneas que protagonizan esta circulación. La fuerza de Coriolis, junto con el viento y algunos accidentes geográficos, acabarán de perfilar los trazos finos y los detalles que caracterizan al mar de Alborán.

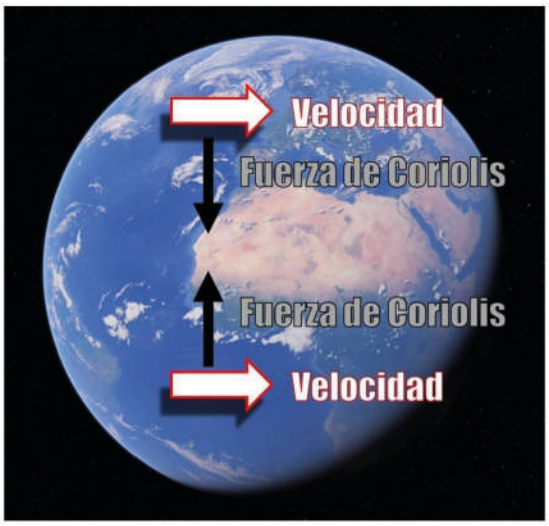


Figura 8. Esquema del efecto o fuerza de Coriolis.

Se rompe la simetría

Volvamos a observar las figuras 4 y 5, en ellas se muestra el mecanismo principal que desencadena la transformación de las aguas poco saladas y cálidas del Atlántico en las aguas más saladas y frías del Mediterráneo, y cómo esa transformación pone en marcha un intercambio de agua a través de dos corrientes, una superficial que fluye desde el oeste hacia el este, y otra profunda que fluye en sentido contrario. Si el canal a través del cual se produce este intercambio de agua se orientase de oeste a este, sin ningún tipo de inclinación, y si la Tierra, como sostenía la Inquisición, se mantuviese estática en el centro del universo, el agua entraría en el mar de Alborán con una clara dirección oeste-este, abriéndose de igual manera hacia norte y sur, de forma simétrica, a medida que el estrecho de Gibraltar se ensancha y se abre al Mediterráneo. Igualmente, si ignorásemos las formaciones geológicas del fondo marino que hemos descrito anteriormente, el agua Mediterránea se movería de este a oeste, comprimiéndose las líneas de corriente a medida que el agua acelerase al sentir el estrechamiento de Gibraltar. También este movimiento sería simétrico. En esta descripción simplista que hacíamos de las corrientes y el intercambio Atlántico-Mediterráneo, tan solo bastarían dos coordenadas o direcciones: La oeste-este, y la dirección vertical. El esquema propuesto podría representarse de forma bidimensional, como se hacía en la figura 2.

Pero las cosas no son tan simples. En primer lugar, el estrecho de Gibraltar no está orientado de oeste a este, sino que se inclina entre 10º y 15º hacia el norte. Este primer elemento ya rompe la simetría en lo que se refiere a la corriente superficial atlántica, que necesariamente entra en el mar de Alborán orientada hacia el nordeste. Debido a su alta velocidad (en torno a 1 m/s), esta corriente Atlántica se acerca a las costas españolas cerca de la punta de Calaburras (Figura 8). Pero, a medida que avanza, siente la fuerza de Coriolis que tiende a desplazarla hacia la derecha, es decir, hacia el sur, describiendo un gran meandro hasta impactar contra las costas marroquíes al oeste del cabo Tres Forcas. Tras alcanzar las costas norteafricanas, la corriente Atlántica se bifurca, y parte de ella recircula hacia el oeste, completando un giro en el sentido de las agujas del reloj, mientras otra parte toma de nuevo una dirección nordeste, y vuelve a acercarse a las costas españolas. Y vuelta a empezar. De nuevo la fuerza de Coriolis desvía esta corriente que describe un segundo giro en el sentido de las agujas del reloj en la subcuenca oriental de Alborán.

Los giros que las corrientes marinas describen siguiendo el sentido de las agujas del reloj en el hemisferio norte, reciben el nombre de giros anticiclónicos, y son análogos a los anticiclones de la atmósfera. Así que en el mar de Alborán podemos decir que hay dos anticiclones, uno en la subcuenca occidental, y otro en la oriental (letras A en la Fig. 9). Por otra parte, cuando la corriente Atlántica entra en el mar de Alborán, se separa de la costa que queda entre punta Europa y la punta de Calaburras. El resultado es la formación de un remolino en el que las aguas circulan en sentido contrario al de las agujas del reloj. Igualmente, tras impactar en las costas africanas, al oeste del cabo Tres Forcas, la corriente Atlántica describe un giro en sentido contrario al de las agujas del reloj en la zona comprendida entre los dos grandes anticiclones. Estas zonas en las que la corriente circula contra el sentido de las agujas del reloj, son como las borrascas, y en oceanografía reciben el nombre de giros ciclónicos (letras C en la figura 9).

Continuemos con el símil meteorológico. Todos hemos oído hablar del famoso anticiclón de las Azores por la gran influencia que tiene en la meteorología de España. Esto no quiere decir que este anticiclón se encuentre siempre sobre el archipiélago de las Azores. En ocasiones se desplaza hacia el norte, otras hacia el sur, en otras se refuerza, y, en otros casos se debilita, etc. Es la continua variabilidad que sufren los patrones de circulación atmosférica y que constituyen el tiempo atmosférico. Sin embargo, hablamos del anticiclón de las Azores porque este patrón de circulación atmosférica es el predominante en esta región del Atlántico norte. De igual manera, los giros anticiclónicos y ciclónicos que hemos descrito en el mar de Alborán, constituyen los patrones de circulación marina predominantes, pero, al igual que ocurre en la atmósfera, están sujetos a una fuerte variabilidad que es lo que podríamos denominar el "tiempo marino". Por ello, no debemos perder de vista que las corrientes y giros que aparecen en la figura 9, pueden no aparecer, o estar fuertemente modificados cuando observemos el mar de Alborán en algún momento concreto. Aun así, la situación más probable o típica esquematizada en la figura 8 nos ofrece mucha información sobre las características de esta cuenca mediterránea. Y, sobre todo, nos ofrece mucha información sobre la cuestión principal de este trabajo: el carácter atlántico o mediterráneo de las aguas que bañan la ciudad de Málaga.

Todo lo que hemos visto hasta ahora confirma que las aguas más superficiales del mar de Alborán y de la bahía de Málaga, son aguas atlánticas, y que llegan a nuestra localidad de

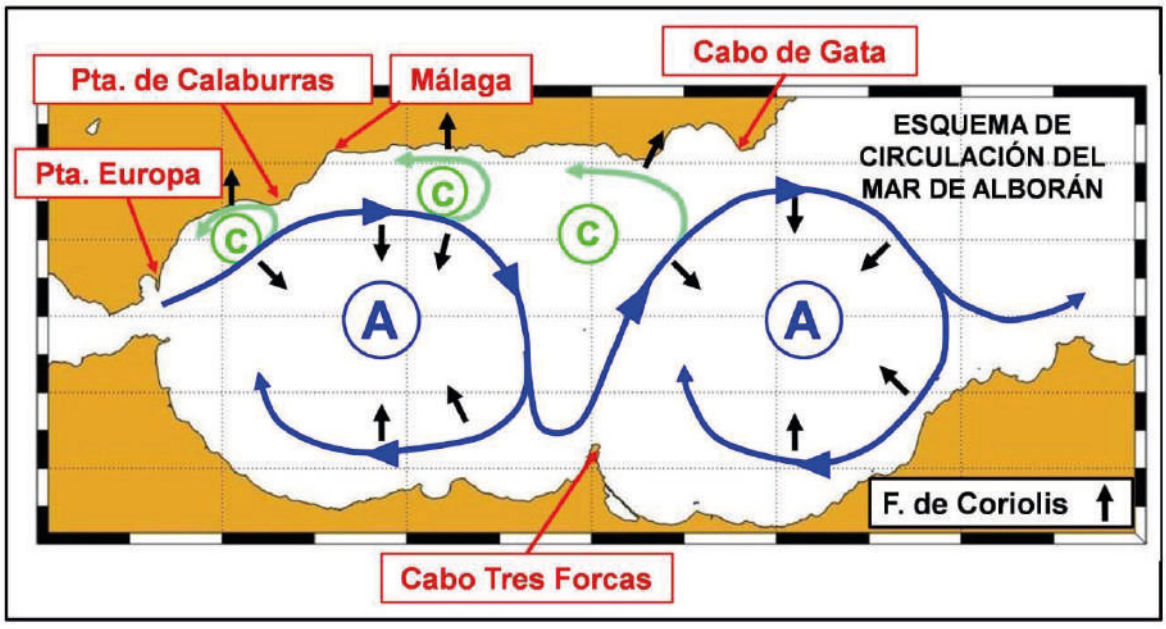


Figura 9. Esquema de circulación superficial del mar de Alborán.

Serie *Mediterráneo*. 90 x 120 cm. Acrílico sobre lienzo.

forma muy directa. Pero no hemos precisado aún hasta qué profundidad llega esa capa superficial. No sabemos aún cuánto tenemos que sumergirnos en las aguas de Alborán para "encontrar el Mediterráneo". Por otra parte, el carácter ondulante de la corriente Atlántica hace que no todas las zonas del mar de Alborán reciban las aguas del Atlántico de una forma igualmente directa. Parafraseando a Serrat en su canción Mediterráneo: "y te acercas y te vas, después de besar mi aldea...". Pues eso mismo hace la corriente Atlántica con las costas españolas: se acerca y besa las costas de Calaburras, pero luego se aleja de las costas de la bahía de Málaga, para volver a besar la costa española en el entorno del cabo de Gata. Sin embargo estas idas y venidas por sí solas no son suficientes para crear grandes diferencias, hay otro factor que sí puede hacerlo, y de nuevo tiene que ver con la fuerza de Coriolis.

En la figura 9 hemos indicado con flechas de color negro la dirección de esta fuerza actuando sobre las distintas corrientes. Como estamos en el hemisferio norte siempre se dirige hacia la derecha según el sentido de avance de las aguas. Este hecho, junto con el carácter ondulante de la dirección de la corriente, hace que estas fuerzas converjan hacia el centro de los giros anticiclónicos marcados con la letra A, mientras que divergen, es decir, apuntan hacia afuera, en los giros ciclónicos marcados con la letra C. Estos movimientos convergentes y divergentes de las aguas tienen su reflejo en la superficie del mar, al mismo tiempo que alejan o acercan a las aguas mediterráneas de la superficie del mismo. Son, en consecuencia, un elemento clave para entender el carácter atlántico o mediterráneo de las aguas de Alborán y de la bahía de Málaga.

La topografía del mar

Cuando estamos en tierra firme, sabemos que cada lugar tiene una elevación diferente. Los mapas topográficos muestran los detalles del relieve mediante líneas que conectan aquellos puntos que tienen la misma altura sobre el nivel del mar (Figura 10).

La figura 10 muestra distintas líneas de nivel para las tierras que bordean el mar de Alborán, un relieve montañoso con el que los habitantes de esta zona están familiarizados. Pero, ¿podríamos encontrar una situación similar en el mar que se extiende al sur de estas tierras? Por sorprendente que parezca la

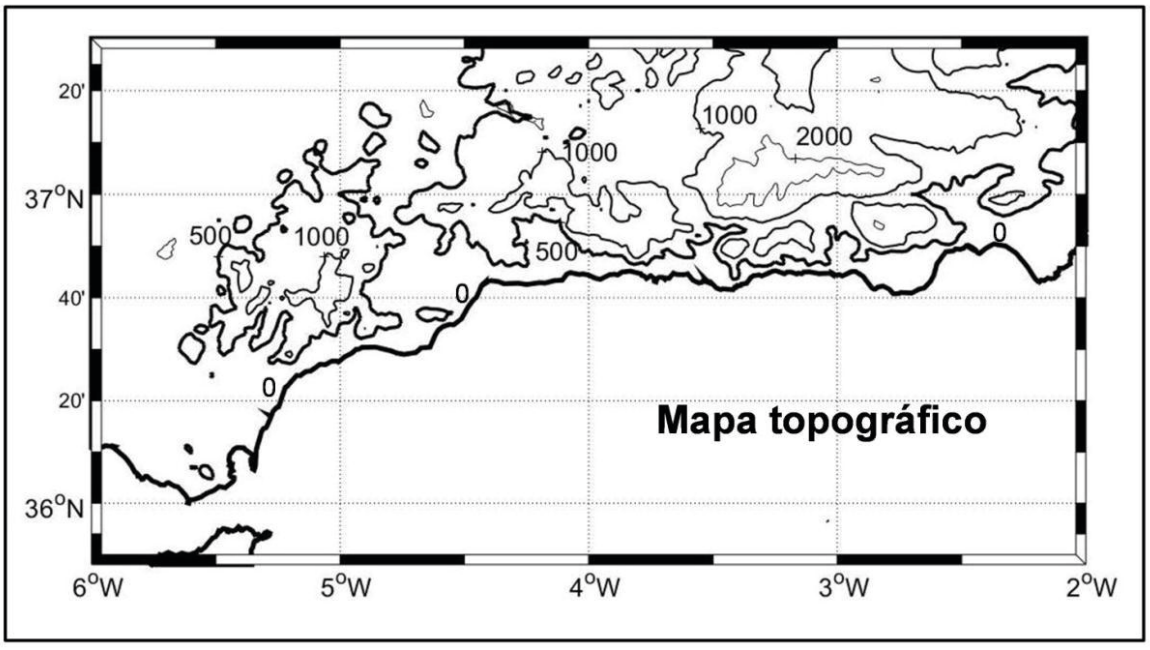


Figura 10. Ejemplo de mapa topográfico.

respuesta es afirmativa, y no solo en el caso del mar de Alborán, sino en el de todos los mares y océanos del planeta. Todos ellos tienen también su propia topografía, con elevaciones y depresiones similares a las montañas y valles de los mapas terrestres. Sin embargo, nuestra intuición nos dice lo contrario. La superficie de nuestra taza de café, nuestro plato de sopa o el agua de la bañera, siempre se encuentran en posición horizontal, y aunque intentemos inclinar el plato, o desplazar el agua de la bañera contra una de sus paredes, el agua siempre recupera la horizontalidad, esto solo es cierto en el caso de un fluido que se encuentra en reposo. Cuando un fluido se mueve, aparecen fuerzas que sí pueden mantener unas partes del mismo elevadas respecto de otras. En los mares, las encargadas de producir este efecto son las corrientes marinas, que dan lugar a elevaciones y depresiones, formando lo que se denomina la "topografía dinámica del mar". Hoy día esta topografía puede medirse desde satélites artificiales que utilizan unos sensores denominados altímetros, o bien se puede calcular a partir de medidas de temperatura y salinidad del mar. La figura 11 muestra la elevación de la superficie del mar de Alborán correspondiente al 1 de septiembre de 2020 (datos obtenidos del servicio europeo de vigilancia del mar COPERNICUS).

En la figura 11 observamos dos zonas en las que la superficie se halla elevada, marcadas igual que en la figura 9 con la letra A, porque se trata de dos anticiclones. Como ocurre en la atmósfera, son zonas de altas presiones. Igualmente encontramos otras zonas donde la superficie del mar se halla más baja. Son zonas de bajas presiones y se han marcado con la letra C de ciclón. Estas alturas están expresadas en metros, por lo que podemos encontrar una diferencia de aproximadamente medio metro entre las zonas más altas y las más bajas. Al producirse este desnivel a lo largo de decenas o centenas de kilómetros, resulta inapreciable a simple vista, y por ello es lógica nuestra percepción de la superficie del mar como algo plano. Sin embargo, veremos que desde un punto de vista oceanográfico estos pequeños desniveles tienen una gran importancia.

Volvamos a fijarnos en el giro anticiclónico de la subcuenca occidental de Alborán, marcado con la letra A en las figuras 9 y 11.

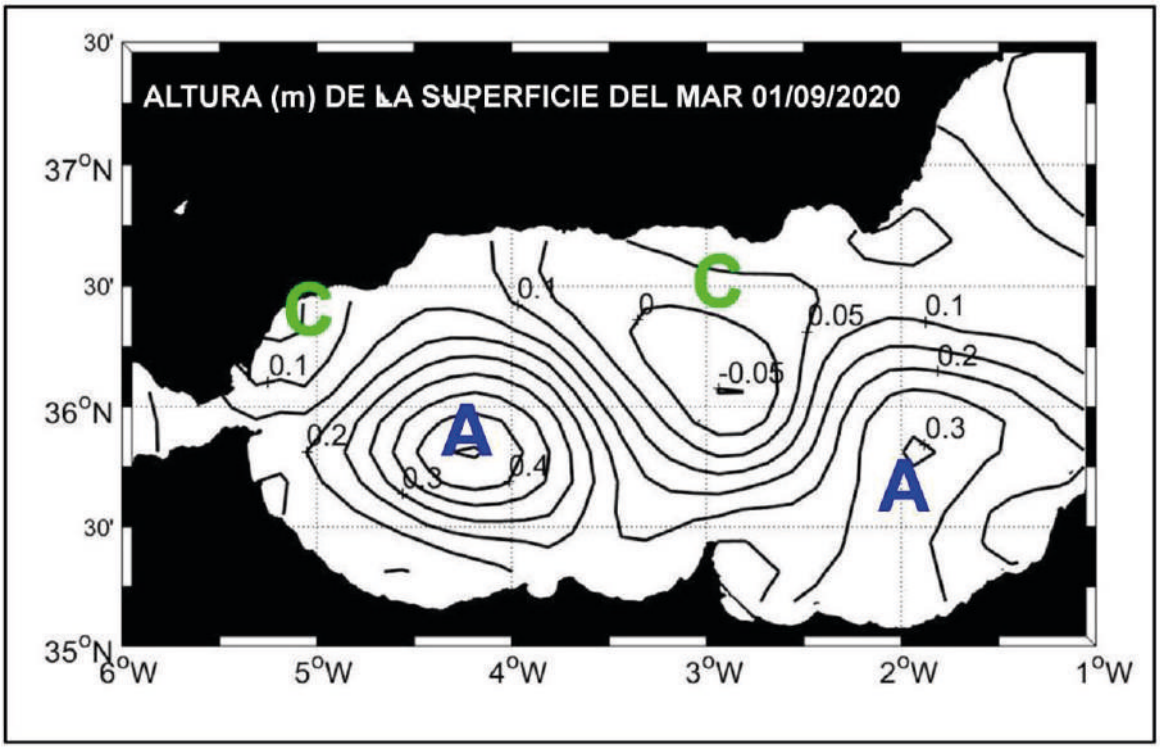


Figura 11. Elevación de la superficie del mar de Alborán en metros. Fuente: COPERNICUS.

Serie *Mediterráneo*. 130 x 100 cm. Acrílico sobre lienzo.

Isla de Alborán. Wikipedia. Licencia CC0 1.0.

En la parte norte de este giro, la corriente se dirige hacia el este, y la fuerza de Coriolis desplaza las aguas hacia el sur. En el contorno sur de este giro, la corriente se dirige hacia el oeste, y la fuerza de Coriolis desplaza las aguas hacia el norte. Al encontrarse las aguas que se desplazan hacia el sur con las que lo hacen hacia el norte en el centro del anticiclón, se produce una acumulación de agua que origina, por una parte la elevación de la superficie del mar que hemos medido con los altímetros desde los satélites artificiales (Figura 11), y por otra, el hundimiento de las aguas en el centro de este giro anticiclónico. De momento este segundo efecto no lo hemos visto con datos reales, pero se mostrará más adelante. Recordemos que las aguas que están sometidas a estas corrientes y que describen estos giros, son aguas que han entrado en el mar de Alborán, procedentes del Atlántico. Por tanto, las aguas que se acumulan y se hunden en el centro de esta estructura son aguas atlánticas, poco saladas y cálidas. Si ahora nos fijamos en el giro ciclónico, marcado con la letra C, y situado frente a la bahía de Málaga, la parte de la corriente que lame la costa malagueña en dirección oeste, es desplazada hacia el norte por la fuerza de Coriolis, mientras que la rama de este giro situada más al sur, que se dirige hacia el este, es desplazada hacia el sur. Ahora las aguas atlánticas se alejan del centro de este giro ciclónico. En consecuencia, la superficie del mar se deprime en el centro de esta estructura y el espesor de la capa de agua atlántica es menor.

Si se nos permite la licencia, podríamos decir que debajo del agua atlántica que entra por Gibraltar se encuentra el "verdadero Mediterráneo". Esto significa que, si en el centro del giro anticiclónico se acumula y se hunde el agua atlántica, no podremos encontrar aguas mediterráneas hasta una mayor profundidad.

El agua atlántica y el agua mediterránea son simplemente aguas con distinta temperatura y salinidad, no son como el agua y el aceite, que no se mezclan. Por tanto, la separación entre ambas masas de agua no es brusca, sino que se produce de forma suave. Si nos situamos en el centro de uno de los giros anticiclónicos, las aguas mediterráneas aparecen claramente a unos 150 metros de profundidad. Aunque se mezclen con las aguas atlánticas que se encuentran por encima de ellas, será imposible que esta influencia se note en la superficie del mar, así que dicha superficie seguirá caracterizándose por valores más bajos de salinidad, y temperaturas más altas. Por el contrario, en el interior de los giros ciclónicos, las aguas mediterráneas pueden llegar a estar a tan solo 25 metros de la superficie (y a veces menos), así que la mezcla entre estas aguas puede dejar su huella en la superficie, incrementando su salinidad y disminuyendo su temperatura. Al igual que ocurre con la topografía del mar, los satélites artificiales pueden medir la temperatura de la superficie del mar mediante unos sensores llamados radiómetros, que recogen la radiación infrarroja emitida por su superficie. La figura 12 muestra la temperatura superficial del mar de Alborán correspondiente al 1 de septiembre de 2020.

Si se compara la figura 12 con el esquema de la figura 9, y con los datos de altimetría de la figura 11, la concordancia es evidente. Nótese la zona de aguas frías (azul intenso) en las zonas marcadas con la letra C en la figura 9, las cuales corresponden a una circulación ciclónica y, en consecuencia, a una depresión de la superficie del mar y una elevación de las aguas profundas mediterráneas, más frías, en el centro de estas zonas. Por contra, las zonas marcadas con la letra A en la figura 9, se corresponden a zonas anticiclónicas donde se alcanza la mayor elevación del nivel del mar en la figura 11, y las temperaturas de la superficie del mar son más altas (Figura 12).

Recordemos que las aguas que entran en el mar de Alborán a través del estrecho de Gibraltar tienen una salinidad en torno a 36,5 $^{0}/_{00}$, mientras que las aguas mediterráneas tienen una salinidad de aproximadamente 38,5 $^{0}/_{00}$. Por tanto, las aguas tienen un carácter más atlántico cuanto más se aproximen al primero de estos valores, y son más mediterráneas, cuanto más se acerquen al segundo. La figura 13 muestra la distribución de la salinidad a 25 m de profundidad correspondiente a la misma fecha del 01/09/2020.

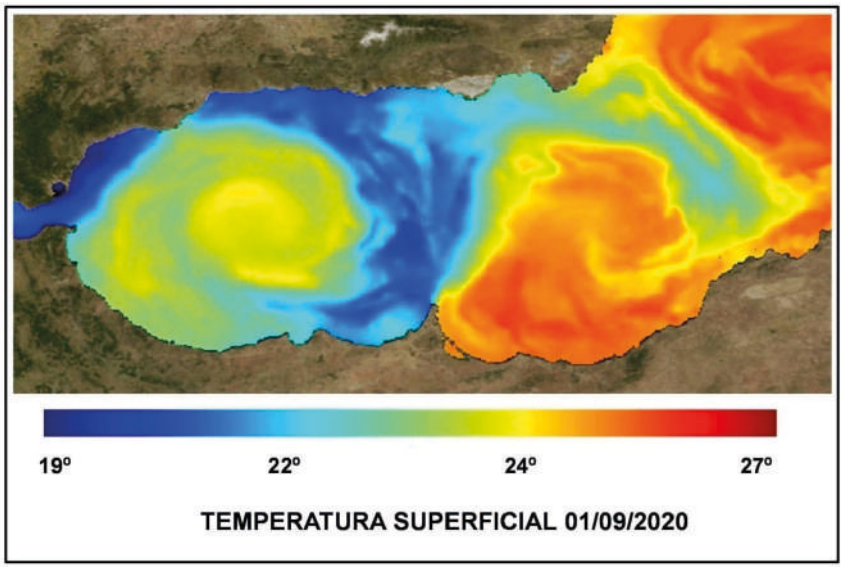


Figura 12. Temperatura superficial del mar de Alborán. Fuente: COPERNICUS.

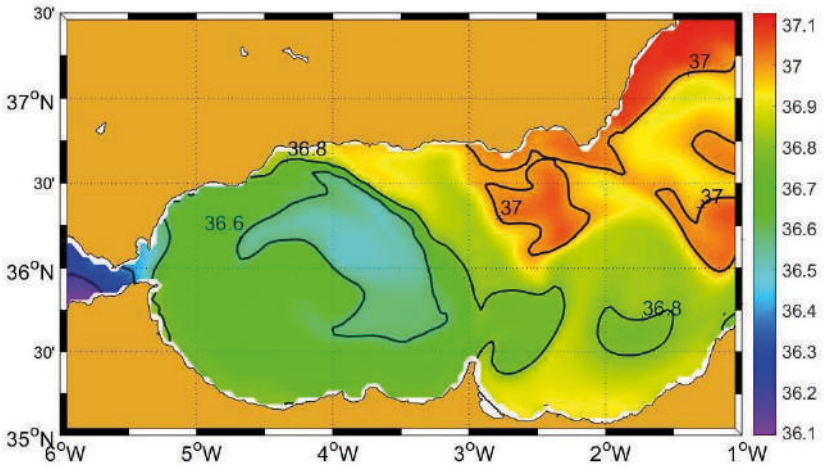


Figura 13. Distribución de salinidad a 25 m de profundidad para el 01/09/2020. Fuente: COPERNICUS.

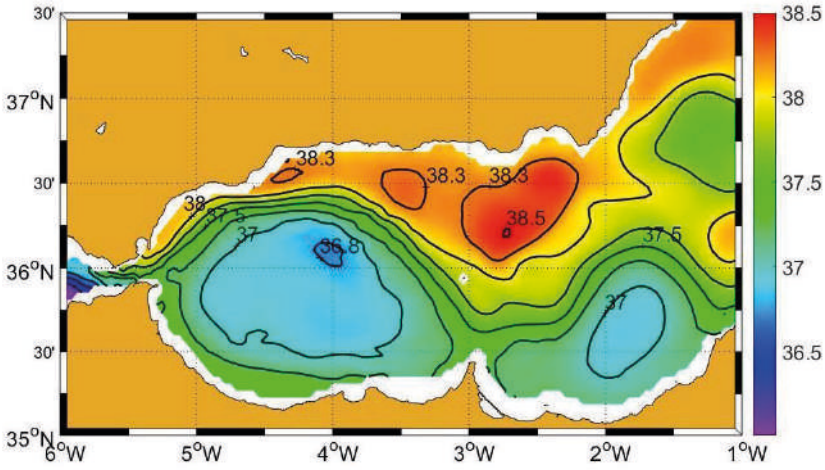


Figura 14. Distribución de salinidad a 100 m de profundidad para el 01/09/2020. Fuente: COPERNICUS.

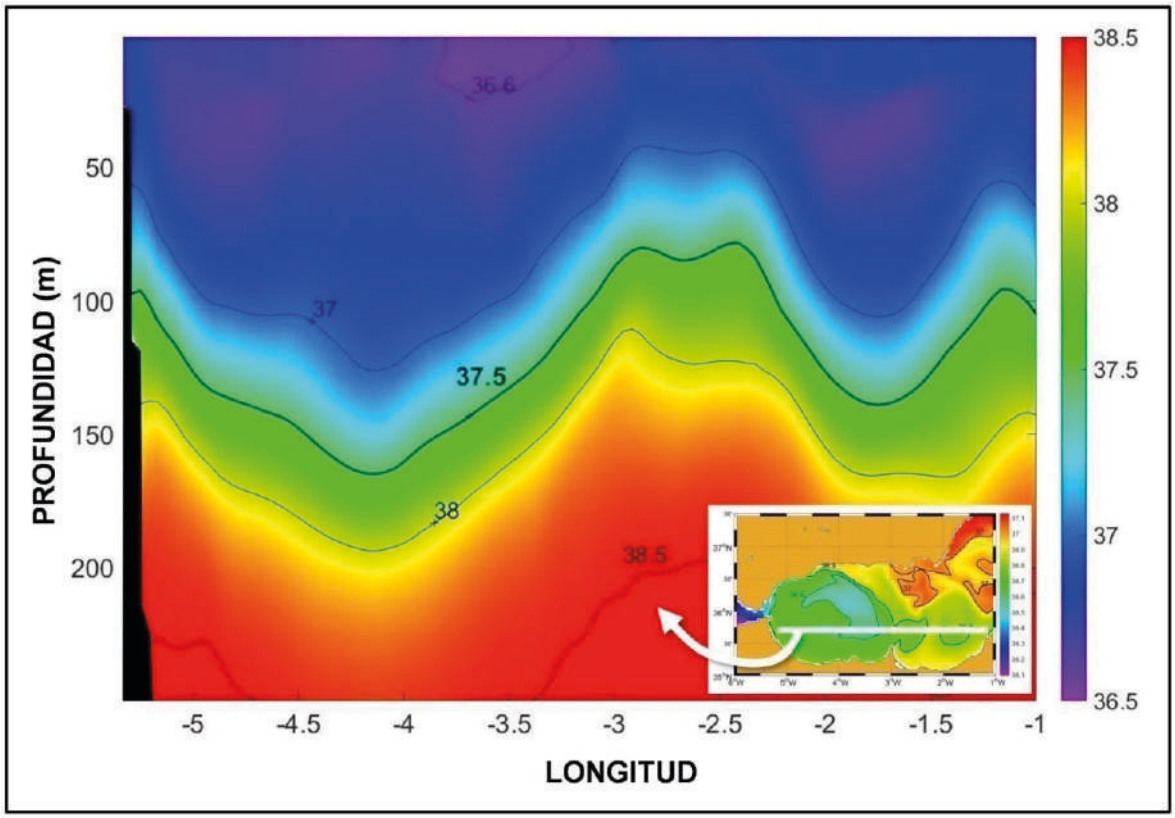


Figura 15. Sección vertical de salinidad hasta los 250 m de profundidad a lo largo de los 35,75° de latitud norte para el 01/09/2020. Fuente: COPERNICUS.

Podemos apreciar que la salinidad en la parte occidental del estrecho de Gibraltar está en torno a 36,1 $^{0}/_{00}$, mientras que ya a la salida, en su extremo oriental, el agua que entra en Alborán tiene una salinidad de aproximadamente 36,6 $^{0}/_{00}$. Estas aguas se desplazan a una velocidad media de 1 m/s, lo que significa que tardarían unas 17 horas en cruzar los 60 km de longitud del estrecho. La evaporación no puede justificar este incremento de salinidad en tan corto periodo de tiempo. En consecuencia, este aumento de salinidad implica que las aguas que proceden del golfo de Cádiz, sufren una intensa mezcla con las aguas mediterráneas que salen a través del Estrecho en forma de corriente profunda. Pero no nos detendremos en el Estrecho. Si nos fijamos, vemos que en el interior del primer anticiclón del mar de Alborán, el agua tiene la misma salinidad que a la salida del estrecho, 36,6 $^{0}/_{00}$, lo que evidencia esa acumulación de agua procedente del Atlántico de la que hablábamos antes. Junto a la costa malagueña, la salinidad aumenta hasta 36,8 $^{0}/_{00}$, y podríamos interpretar este hecho como una muestra de la influencia del agua mediterránea que se encuentra por debajo del agua atlántica, cuya posición se eleva en las zonas de circulación ciclónica. Y sin duda esta es la causa de esta leve elevación de la salinidad, pero no podemos decir que realmente sea muy grande la presencia de agua mediterránea, y debemos concluir que las aguas que bañan las costas españolas del mar de Alborán en general, y las malagueñas en particular, son aguas atlánticas. Pensemos que, si las aguas que entran en Alborán tienen una salinidad en torno a 36,5 $^{0}/_{00}$ o 36,6 $^{0}/_{00}$, y las aguas mediterráneas que llenan el fondo de esta cuenca tienen una salinidad de 38,5 $^{0}/_{00}$, el punto medio se encuentra en 37,5 $^{0}/_{00}$, de forma que las aguas malagueñas no llegan a ser ni tan siquiera, "mitad y mitad".

Vamos a ir en busca de las aguas mediterráneas sumergiéndonos hasta los 100 m. La figura 14 muestra la distribución de salinidad a esa profundidad. Vemos ahora que, entre punta Europa y la punta de Calaburras, al sur

de la bahía de Málaga, y al sudoeste del golfo de Almería, las aguas presentan salinidades de entre 38 y 38,5 $^{0}/_{00}$. Estas aguas tienen una temperatura de entre 13,5º y 14º C. Sin embargo, en el centro del anticiclón occidental, la salinidad a 100 m de profundidad es 36,8 $^{0}/_{00}$, tan solo 2 décimas más alta que aquella que encontrábamos en superficie. Estos datos indican muy claramente la acumulación y el hundimiento de las aguas atlánticas en el centro de los anticiclones, y el acercamiento a la superficie de las aguas mediterráneas en las zonas más costeras dominadas por la circulación ciclónica.

Consideremos ahora una sección vertical que cruce de oeste a este el mar de Alborán a la altura de los 35,75º de latitud y representemos su distribución de salinidad. La figura 15 muestra este corte vertical. Resultan ahora evidentes esas elevaciones y hundimientos de las aguas atlánticas y mediterráneas. De esta forma hemos demostrado que, fijándonos en las direcciones oeste-este y sur-norte, es decir, en las coordenadas horizontales, la corriente atlántica sigue una trayectoria ondulante que unas veces la acerca a las costas españolas y otras veces la aleja de ellas, y si describimos la distribución vertical de estas aguas, vemos que en unas ocasiones se hunden, alejando la influencia del agua mediterránea de la superficie, y en otras ocasiones se elevan, acercando las aguas mediterráneas a la misma.

La bahía de Málaga y el terral

A estas alturas creemos que ha quedado demostrada nuestra afirmación inicial sobre el carácter, más atlántico que mediterráneo, de las aguas que bañan las costas malagueñas. Sin embargo, también ha quedado claro que la compleja circulación del mar de Alborán hace que las aguas mediterráneas, que se encuentran por debajo de las atlánticas, se hallan más cerca de la superficie en unos lugares que en otros. La bahía de Málaga, debido a la circulación ciclónica que predomina frente a ella, es una de esas zonas en las que no hay que profundizar demasiado para encontrar ese carácter mediterráneo. Podríamos decir, si se nos permite la expresión, que el Mediterráneo solo necesita un empujoncito para aparecer en la superficie y llegar hasta las playas de Málaga. Ese empujoncito se lo proporciona, con cierta frecuencia, algo tan malagueño como los espetos de sardinas, las biznagas, o el gazpachuelo. Se trata del terral.

Los malagueños conocen de sobra el terral. Sin embargo, con frecuencia se confunden algunos aspectos de este viento. En verano se trata de un viento muy seco y cálido que eleva las temperaturas del aire hasta valores sofocantes. Por ello, no es extraño escuchar que se trata de un viento procedente del Sáhara y la sensación es esa, pero la realidad es muy distinta. El término terral indica que se trata de un viento que procede de tierra, es decir, del interior de la provincia. En general, el viento de terral se produce cuando en el mar de Alborán predominan los vientos de componente oeste. La orientación de la costa y la orografía malagueña hacen que este viento llegue hasta Málaga con una orientación noroeste, es decir, desde tierra adentro. Pero durante estos episodios de terral, en otros puntos de la costa española de Alborán podemos tener vientos del oeste (ponientes) o incluso del sudoeste, consecuentemente más frescos. Es, sin embargo, la componente oeste de este viento la que se va a encargar de hacer "aflorar" las aguas mediterráneas hasta la superficie, y para explicar el fenómeno responsable, de nuevo tenemos que recurrir a la fuerza de Coriolis. Antes de hacerlo, debemos aclarar que, aunque no produzca este calor sofocante, también se producen con frecuencia episodios de terral en invierno, y los efectos oceanográficos son los mismos que en verano.

Una componente oeste del viento mantiene una corriente a lo largo de la costa norte de Alborán que se desplaza de oeste a este. La fuerza de Coriolis actúa sobre esta corriente desplazando las aguas hacia el sur. Estas aguas que se alejan de la costa son reemplazadas por aguas profundas que afloran a la superficie.

Serie *Mediterráneo*. 90 x 120 cm. Acrílico sobre lienzo.

De esta forma, las aguas atlánticas, más cálidas y menos saladas que ocupaban las playas malagueñas antes de empezar a soplar el terral o el poniente, son reemplazadas por aguas más saladas y frías que tienen un carácter mediterráneo (ver figura 16). Además, la llegada de aguas mediterráneas a la superficie está favorecida por el hecho de que inicialmente, debido a la circulación ciclónica que ya hemos descrito, estas aguas ya se encontraban relativamente próximas a la superficie.

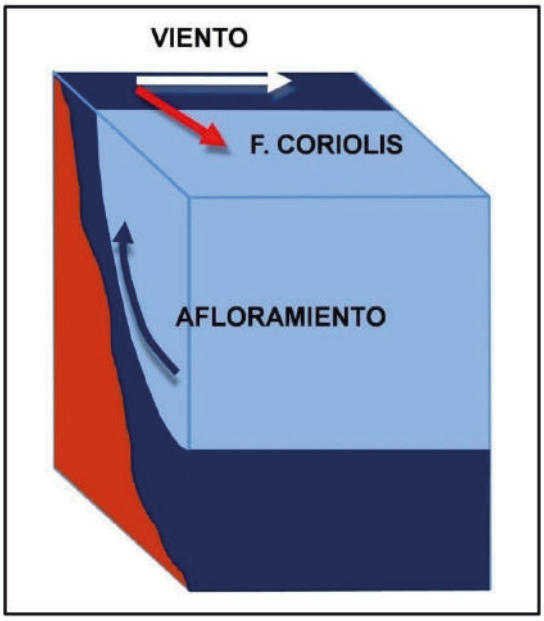


Figura 16. Esquema del fenómeno de afloramiento por la acción del viento.

La riqueza de las aguas malagueñas: entre el Atlántico y el Mediterráneo

A lo largo de este trabajo hemos mostrado que las aguas superficiales del mar de Alborán son prácticamente una extensión del Atlántico. Estas aguas, a lo largo de su periplo hacia el interior del Mediterráneo sufren una pérdida de calor y una intensa evaporación, transformándose en aguas más frías y saladas que denominamos aguas mediterráneas. Su mayor densidad hace que se hundan y retornen para salir al Atlántico en forma de corriente profunda. Pero estas aguas atlánticas y mediterráneas mantienen una fuerte interacción. Debido a esta interacción, podemos resumir este trabajo confirmando que las aguas que bañan el litoral malagueño, al igual que las que bañan el resto de las costas del mar de Alborán, son eminentemente atlánticas, pero que las aguas mediterráneas que se encuentran por debajo de estas aguas y que llenan el Mediterráneo hasta su fondo, se acercan a la superficie cerca de la bahía de Málaga. Y es de este continuo juego entre dos mares, el Atlántico y el Mediterráneo, de esta constante mezcla e interacción entre dos masas de agua diferentes, donde surge la riqueza de las aguas malagueñas.

Las aguas que se encuentran en la superficie del mar reciben la luz del Sol, que proporciona la energía necesaria para que las algas realicen la fotosíntesis, base de (casi) toda la vida que albergan nuestros mares. Pero esto no es suficiente. Las algas necesitan también nutrientes, principalmente nitrógeno, fósforo y silicio. Una vez que estos nutrientes son agotados por las algas, si no existe alguna forma de aportar nuevos nutrientes, estas aguas superficiales, aunque dispongan de abundante luz, serán aguas pobres. Esos nutrientes que permitirían la proliferación de la vida marina son, sin embargo, abundantes en las aguas profundas, que en nuestro caso son las aguas mediterráneas. Así que tenemos aguas que entran a través de Gibraltar, que al ser aguas superficiales son aguas pobres en nutrientes, aunque disponen de mucha luz del Sol, y aguas mediterráneas, que al ser profundas tienen copiosos nutrientes, pero a las que no llega la luz.

Ya explicamos que el agua del Atlántico incrementaba su salinidad al atravesar el estrecho de Gibraltar, y que este aumento solo podía explicarse por la mezcla con las

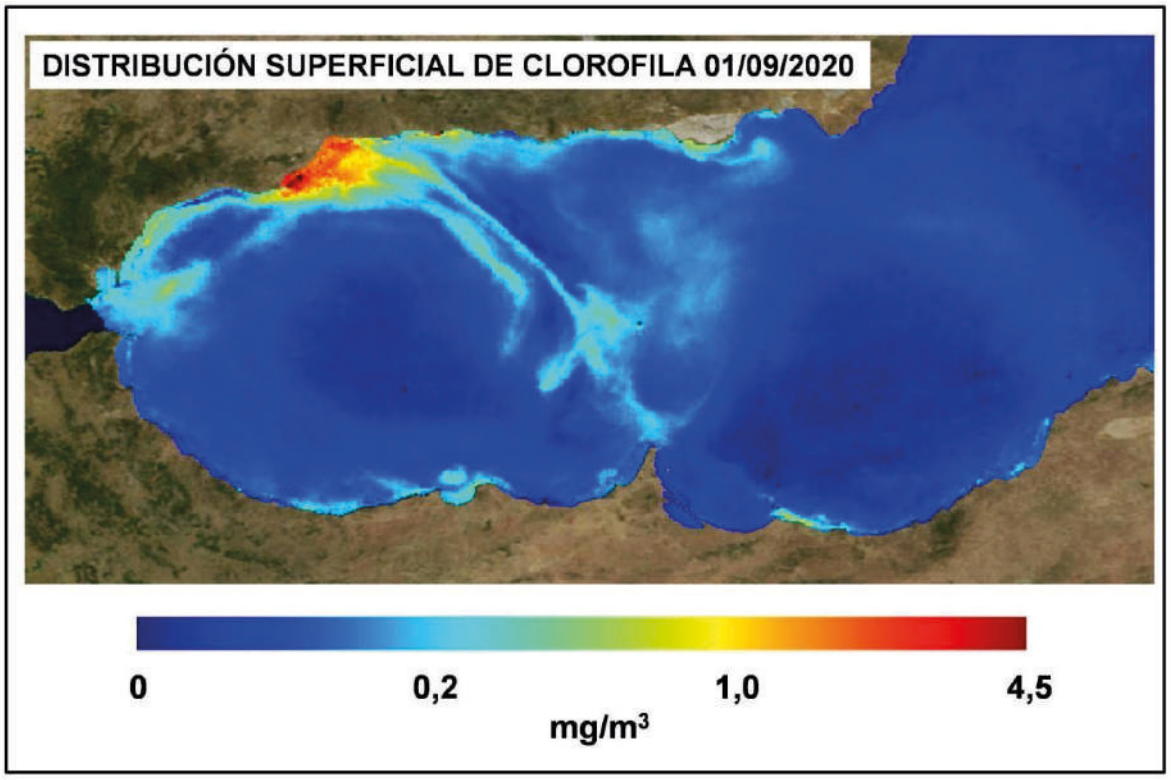


Figura 17. Distribución superficial de clorofila del mar de Alborán para el 01/09/2020. Fuente: COPERNICUS.

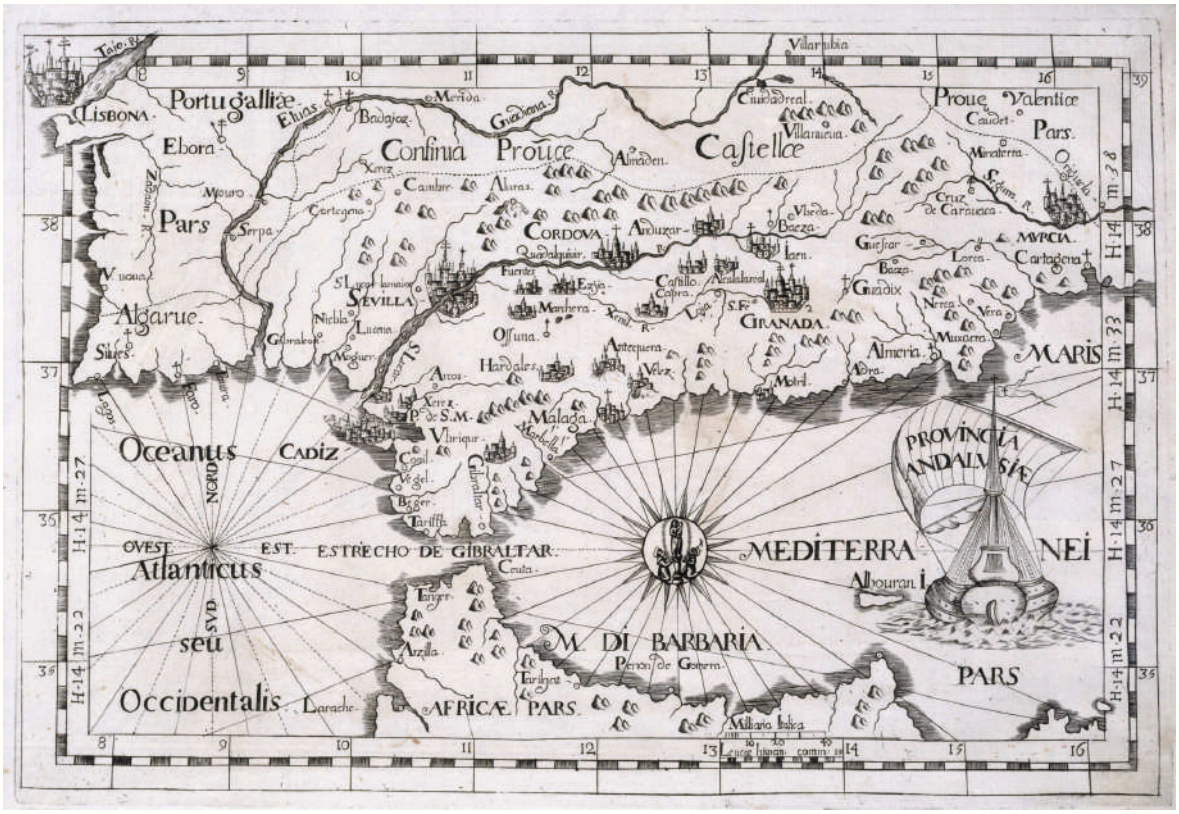
aguas mediterráneas subyacentes. Las aguas mediterráneas no solo aportan sal a las aguas atlánticas, sino también nutrientes que van a favorecer la proliferación del fitoplancton en las aguas superficiales bien iluminadas. La figura 17 muestra la distribución superficial de clorofila en el mar de Alborán (medida desde satélite) correspondiente al mismo día que hemos usado de ejemplo en todo este trabajo (1/09/2020).

Aunque la parte occidental del estrecho está cortada, puede observarse como a su salida, las aguas son ricas en clorofila, lo que indica una elevada abundancia fitoplanctónica (algas microscópicas). Nuevamente, se observan estas altas concentraciones en la zona situada entre el estrecho y la punta de Calaburras, y en la bahía de Málaga, donde la circulación ciclónica y los frecuentes vientos de poniente, o el terral, hacen aflorar las aguas mediterráneas, ricas en nutrientes. De hecho, las concentraciones de clorofila, de fitoplancton, y zooplancton, presentan en esta parte del mar de Alborán valores más altos que en muchas otras regiones del Mediterráneo.

En definitiva, desde el punto de vista de las propiedades físicas de sus aguas, Málaga es una ciudad atlántica, pero el Mediterráneo, que se extiende por debajo de su superficie y hasta el fondo del mar, tiene una clara influencia en sus costas; unas veces se acrecienta, y otras disminuye, como resultado de la acción de las corrientes y los vientos. Una influencia que produce la mezcla de las aguas atlánticas y mediterráneas, enfriando en ocasiones las aguas de nuestras playas, pero también enriqueciéndolas con nutrientes que favorecen la proliferación de la vida marina. Es cierto que iniciamos este repaso por algunos de los fascinantes fenómenos que modelan y configuran el Mediterráneo, el mar de Alborán, y la bahía de Málaga, afirmando que las aguas malagueñas eran atlánticas, pero tal vez deberíamos concluir modificando esa afirmación para decir que Málaga vive entre dos mundos, o, mejor dicho, entre dos mares, y que se beneficia de ambos: el Atlántico y el Mediterráneo.

Bibliografía

- Suárez Padilla, J., Ramón Torres, J., Mora Serrano, B., Salvago Soto, L. y Chacón Mohedano, C. (2020): "La cronología fundacional de la *Malaka* fenicia: investigaciones en el solar del Rectorado de la Universidad de Málaga", *Spal* 29.1: 41-77. DOI: http://dx.doi.org/10.12795/spal.2020.i29.02
- Rodríguez Oliva, P. El nombre de la ciudad de Málaga: origen y significado a través de la Historia. Diario Sur, Tribuna de la Historia, 29 de mayo de 2019.
- Garcia-Castellanos, D., Estrada, F., Jiménez-Munt, I., Gorini, C., Fernández, M., Vergés, J. y De Vicente, R., (2009). Catastrophic flood of the Mediterranean after the Messinian salinity crisis. Nature, Vol. 462, 778-782, doi: 10.1038/nature08555
- Soffientino, B., Pilson, M. E. Q., (2005). The Bosporus Strait. A special place in the history of Oceanography. Oceanography, Vol. 18, Nº 2, 17-23.
- Díaz del Río Español, V., La Cuenca de Alborán, un viaje al fondo del mar, (2009). XXVII Semana de Estudios del Mar. Editado por la Asociación de Estudios del Mar, 310-335.



Provincia Andalusiae. Andalucía. Administración eclesiástica. Ca. 1712. Joannis a Montecalerio, Giovanni Battista Cassine, Silvestro da Panicale. Escala [ca. 1:2.300.000]. 15 Leucae hispan. comm. [= 3,6 cm]. Biblioteca Digital Hispánica.

Poemas azules. 100 x 100 cm. Técnica mixta sobre lienzo.

Poemas azules. 100 x 100 cm. Técnica mixta sobre lienzo.

Manuel Vargas Yáñez
Mª Carmen García Martínez
Francina Moya Ruiz

Son desde 2005 fundadores y miembros del grupo de investigación "Grupo Mediterráneo de Cambio Climático (GCC)". Este grupo, perteneciente al Instituto Español de Oceanografía, se dedica a la monitorización de las aguas mediterráneas españolas siendo su objetivo principal el de conocer las propiedades y funcionamiento de las masas de agua, corrientes, y ecosistemas marinos del Mediterráneo español. El análisis de datos oceanográficos a lo largo de varias décadas ha permitido a este grupo detectar y cuantificar las alteraciones que el cambio climático está produciendo en el Mediterráneo Occidental, en general, y en las aguas españolas en particular, habiendo publicado estos resultados en un gran número de artículos científicos, así como en trabajos de divulgación.

Manuel Vargas Yáñez se licenció y doctoró en ciencias físicas por la Universidad de Sevilla. Fue becario de investigación en el Centro Oceanográfico de Málaga y posteriormente profesor de la Universidad de Málaga en el departamento de Física Aplicada II. Desde 1999 desarrolla su actividad investigadora en el Centro Oceanográfico de Málaga siendo coordinador del GCC desde 2005.

Mª Carmen García Martínez se licenció en biología por la Universidad de Sevilla y se doctoró en ciencias por la Universidad de Málaga. Tras un periodo dedicado a la docencia, ingresó en el Instituto Español de Oceanografía en el año 2003, formando parte desde 2005 del citado GCC. Desde 2021 ocupa la dirección del Centro Oceanográfico de Málaga.

Francina Moya Ruiz es licenciada en biología por la Universidad de Granada, y doctora en ciencias por la Universidad de Málaga. Tras haber trabajado en campañas de prospección pesquera en el Atlántico oriental y en estudios de la fauna bentónica en la Antártida, se incorporó al Grupo Mediterráneo de Cambio Climático del Instituto Español de Oceanografía donde desarrolla su actividad investigadora desde 2005.

Juan Antonio Camiñas

Doctor en Biología por la Universidad Complutense de Madrid es científico jubilado del Instituto Español de Oceanografía. Entre 2008 y 2016 fue el primer director de la sede de FAO en Málaga. Director del Centro Oceanográfico de Málaga desde 1989 hasta 2008, ha sido asesor en pesquerías de las administraciones españolas y de la UE.

Representante español en la Comisión General de Pesca del Mediterráneo FAO, y presidente del Comité Científico Asesor (1999 - 2004), miembro del Comité Científico, Técnico y Económico de Pesca de la Comisión Europea, del Grupo Europeo de Pesca de UICN (1995 – 2006) y del Grupo de Especialistas en Tortugas Marinas de la Comisión de Supervivencia de Especies de la UICN desde 1985.

Profesor en Universidades españolas y en cursos internacionales organizados por FAO, y otras entidades, es autor o coautor de 14 libros y 22 capítulos de otros, de más de 150 artículos científicos y de artículos de prensa y revistas especializadas. Participa en proyectos internacionales sobre la captura accidental de tortugas marinas y para implementar medidas de mitigación entre los cetáceos y la pesca artesanal en el Mar de Alborán, junto a organizaciones nacionales e internacionales.

Es miembro de la Junta Directiva de la Academia Malagueña de Ciencias desde 2016, ha sido Presidente de la Asociación Herpetológica Española entre 2016 y 2022 y es desde enero de 2022 Presidente de la asociación "Amigos de la Barca de Jábega".

Ahmad Ghoreishi

1946 Nace en Esfahán, Irán.

1972 Termina sus estudios en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Teherán, Irán.

1982 Establece su residencia en España.

1993 Homologa su título de Arquitecto en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla y establece su estudio profesional en Benalmádena (Málaga) compaginando las actividades de arquitectura y pintura.

Exposiciones destacadas:

1987 Expone en el Colegio de Arquitectos de Málaga sus obras de Arquitectura y pintura.

1991 Caja Provincial de Ahorros de Córdoba. Gana el PRIMER PREMIO "Premio Gaudí de Acuarela".

1992 Museo de Bellas Artes de Málaga "La Colección de Arte del Colegio de Arquitectos de Málaga".

1997 El arte en la sociedad de información "OBEC.97" Universidad de Málaga.

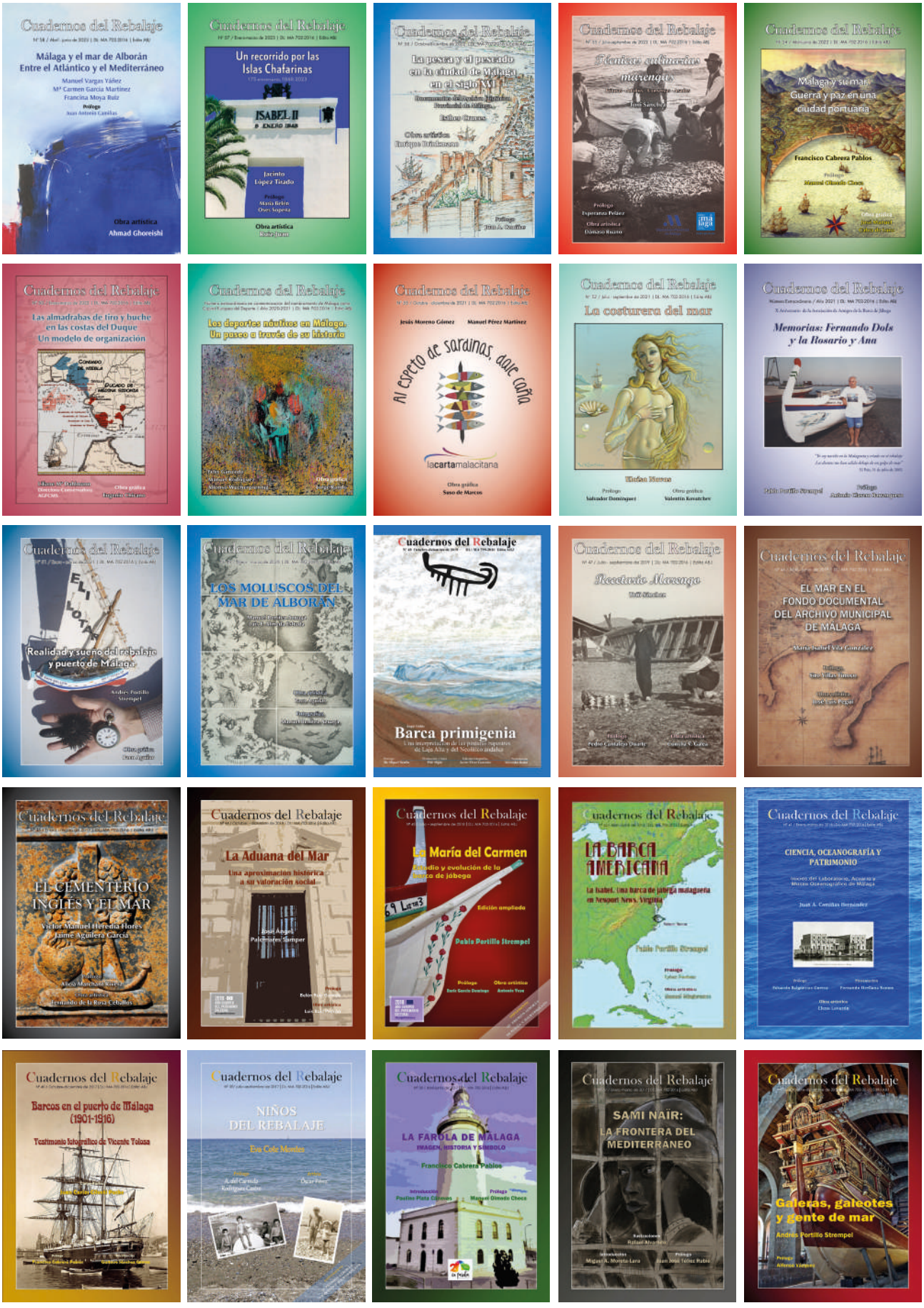
2016 Feria de Arte Mónaco, ART TENTATION - 2016.

2017 Gana El primer premio del XVIII Certamen Andaluz de Pintura Contemporánea Ciudad de Torremolinos.

2020 Feria de arte contemporáneo ARTIST 2020 Madrid.

Contraportada:
Pez. 45 x 20 cm. Técnica Raku.

Colección Cuadernos del Rebalaje



Información y acceso libre a todos los números en *www.amigosjabega.org* | Nuevos socios *abjcontacto@gmail.com*

Si nos fijamos en su localización geográfica, su historia, su cultura, su gastronomía, podemos afirmar que Málaga es una ciudad mediterránea. Sin embargo, si atendemos a las características de las aguas que bañan sus costas, podría no ser cierta esta afirmación. Es lógico que un público no especializado no dude del carácter mediterráneo de las aguas litorales malagueñas, pero a veces, incluso en ámbitos científicos o académicos, esta cuestión suscita malentendidos. La realidad es compleja. Las aguas del Atlántico entran en el Mediterráneo a través del estrecho de Gibraltar, ocupando la parte más superficial del mar de Alborán. Las aguas que ocupan las primeras decenas, o incluso centenas de metros de este mar, son atlánticas, y por tanto, también lo son las aguas superficiales de la bahía de Málaga. Sin embargo, por debajo de estas aguas claramente atlánticas, se encuentran aquellas que podemos denominar, con toda propiedad, mediterráneas. En este trabajo realizaremos un recorrido por la historia, la geología, y la oceanografía del Mediterráneo primero, del mar de Alborán después, y de las aguas que llenan la bahía de Málaga finalmente, para tratar de explicar, de una forma divulgativa y asequible, cuál es la relación entre el Mediterráneo y su océano vecino, el Atlántico, y cómo la interacción entre ambos configura las propiedades de las aguas malagueñas.

2530-6286