

La temperatura de la superficie del mar en la costa norte de Alborán: *vientos, circulación oceánica y cambio climático*

MANUEL VARGAS YÁÑEZ. INSTITUTO ESPAÑOL
DE OCEANOGRAFÍA. CENTRO OCEANOGRÁFICO DE MÁLAGA

El 10 de agosto de 2020 la temperatura del mar, medida en la playa de Fuengirola, alcanzó su valor máximo desde que el Instituto Español de Oceanografía empezara a realizar medidas casi diarias de esta variable en 1985. Actualmente la temperatura media sobre la superficie del planeta ha aumentado 0.87 °C respecto de la era preindustrial, y los océanos han absorbido alrededor del 90 % de la energía ganada por la Tierra debido al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2013). En este contexto, cuando las series de datos oceanográficos o atmosféricos alcanzan algún tipo de récord o valor sin precedente en cualquier región del mundo, resulta casi inevitable pensar en el cambio climático. Aunque indudablemente no podemos descartar la influencia del calentamiento global en el registro de temperatura del mar en la localidad de Fuengirola del 10 de agosto, la hidrodinámica del mar de Alborán es muy compleja, y las fluctuaciones de temperatura o salinidad que experimenta esta cuenca mediterránea, antesala del océano Atlántico, pueden ser causadas por fenómenos oceanográficos y atmosféricos de muy diversa índole. La explicación de este episodio de aguas extremadamente cálidas en las costas malagueñas durante el mes de agosto de 2020 nos da pie a adentrarnos en el interesante funcionamiento del mar de Alborán.

Antes de empezar... algunas cuestiones sobre el funcionamiento del Mediterráneo

No puede entenderse la hidrodinámica del mar de Alborán sin antes recordar algunas cuestiones básicas. En primer lugar, el Mediterráneo es una cuenca de concentración. Esto significa que, en promedio, a lo largo de un año, la evaporación supera a las precipitaciones y a los aportes de los ríos (evaporación neta). En consecuencia, si no estuviese conectado a través del estrecho de Gibraltar con el océano Atlántico, el nivel del mar en el Mediterráneo descendería entre 0.5 y 1 metro cada año. Esta evaporación neta produce un desnivel en la superficie del mar que genera una corriente de agua que fluye desde el Atlántico hacia el Mediterráneo a través de Gibraltar. Esta corriente, que afecta a los 150 o 200 metros más superficiales del mar, continúa hacia el este a través de Alborán primero, y de la costa argelina después, para finalmente adentrarse a través del estrecho de Sicilia en el mediterráneo Oriental: mar Jónico, Egeo, y Cuenca Levantina, frente a las costas de Israel, Líbano, Siria y Turquía.

Esta evaporación neta produce un aumento de la salinidad de esas aguas de origen atlántico que poco a poco se adentran en el Mediterráneo. Durante el verano, el posible aumento de densidad asociado a la salinización de las aguas es compensado por las elevadas temperaturas superficiales. Sin embargo, en invierno, la superficie del mar sufre una importante pérdida de calor, principalmente de tipo sensible y latente, debido a la alta evaporación propiciada por los fríos y secos vientos continentales de componente norte. El resultado es que las aguas procedentes del Atlántico se transforman en aguas frías y saladas que se hunden ocupando todo el volumen del Mediterráneo por debajo de esos 200 metros más superficiales. En este punto no debemos olvidar que, en promedio, y a lo largo de un año, la superficie del Mediterráneo experimenta una pérdida de calor hacia la atmósfera que puede cifrarse en torno a los 5 W/m² (Song y Yu, 2017).

Estas aguas frías y saladas, y consecuentemente más densas, generan un gradiente de presión que propicia su movimiento hacia el oeste, para finalmente salir al Atlántico a través del estrecho de Gibraltar. De una forma muy simplificada podríamos decir que la circulación oceánica en el Mediterráneo se caracteriza por un sistema de dos capas o corrientes. Una capa de agua atlántica, más cálida y menos salada que se extiende desde la superficie del mar hasta los 150 o 200 m de profundidad, y que fluye hacia el este, y otra capa de agua mediterránea, más fría y salada, que se extiende por debajo de los 200 m de profundidad hasta el fondo, y que fluye hacia el oeste para desembocar finalmente en el Atlántico. El mar de Alborán es, entre todas las cuencas que conforman el Mediterráneo, la primera en recibir el agua del Atlántico, y es así mismo la última que atraviesan las aguas procedentes del Mediterráneo antes de salir a través del estrecho de Gibraltar.

El récord de temperatura del 10 de agosto de 2020

El Grupo Mediterráneo de Cambio Climático del Instituto Español de Oceanografía, mide casi diariamente la temperatura del mar en la playa de Fuengirola desde el año 1985. Esta actividad podría considerarse, en principio, como anecdótica, pues la labor de este grupo de investigación se centra en la realización de campañas oceanográficas multidisciplinares que cubren las aguas mediterráneas españolas, desde Málaga hasta Barcelona, pasando por las islas Baleares, tanto sobre la plataforma como sobre el talud continental y la zona abisal (Vargas Yáñez et al.,

2019). Sin embargo, la escasez, y en algunas zonas casi ausencia, de medidas directas de la temperatura del mar, han hecho que este tipo de series temporales, iniciadas en algunos casos por la “afición” de un particular, hayan cobrado con el tiempo un gran valor. Otro ejemplo de este tipo de series en las costas españolas sería la de temperatura del mar en l’Estartit, en la provincia de Girona, mantenida por Josep Pascual bajo el amparo del Instituto de Ciencias del mar de Barcelona (ICM/CSIC, Salat y Pascual, 2006).

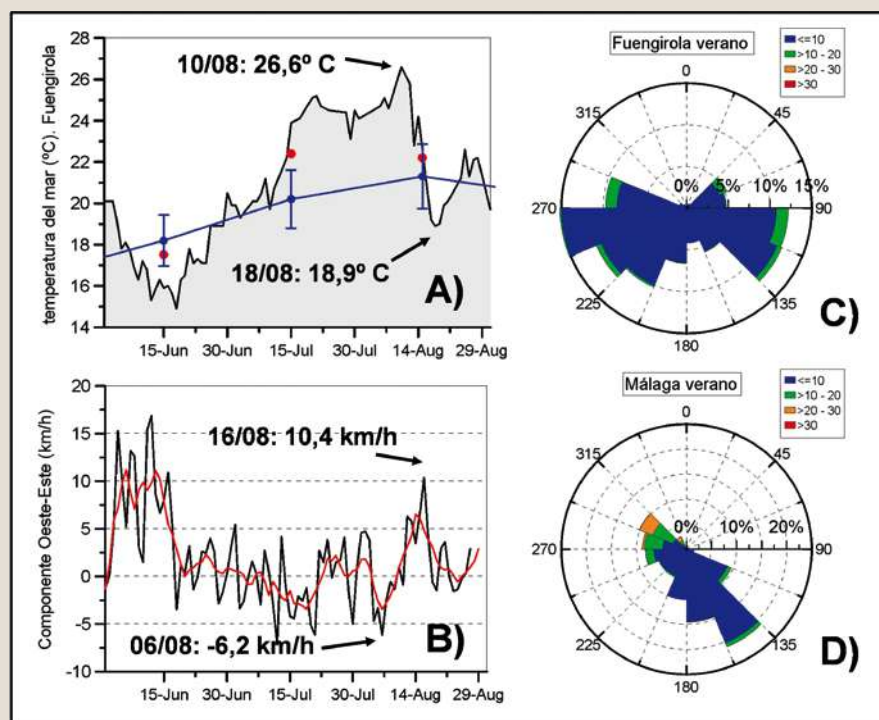


Figura 1. A) Evolución de la temperatura del mar en la playa de Fuengirola (curva negra). La línea azul une las medias históricas para los meses de junio, julio y agosto y las correspondientes desviaciones estándar. Los puntos rojos representan los valores medios de junio, julio y agosto de 2020. B) Evolución de la componente zonal del viento en el sector norte de Alborán (curva negra, positiva para poniente). La curva roja corresponde a las medias móviles de 5 días. Fuente de los datos: Copernicus Marine Service. Las figuras C) y D) son las rosas de viento para los vectores medios diarios de los meses de julio, agosto y septiembre desde 1990 a 2015 en Fuengirola y Málaga respectivamente. Fuente: AEMET.

La curva negra de la figura 1A muestra la evolución diaria de la temperatura del mar en la playa de Fuengirola desde el 1 de Junio hasta el 31 de agosto de 2020. En esta gráfica puede observarse el valor de 26.6 °C alcanzado el día 10 de agosto, siendo este el valor más alto de esta serie temporal desde que se iniciara en 1985. Para establecer el carácter realmente excepcional de este valor, se han incluido en la figura, en azul, los valores medios de la temperatura en junio, julio y agosto obtenidos a partir del promedio de toda la serie temporal, lo que denominaremos en adelante los valores medios históricos. Las barras verticales muestran la desviación estándar correspondiente a cada uno de estos meses, quedando claro que el registro del 10 de agosto está muy por encima de lo que cabría esperar en base a la variabilidad natural de estas aguas. En rojo se han incluido los valores me-

dios correspondientes a los meses de junio, julio y agosto de 2020. En este caso podemos afirmar que el mes de junio de 2020 estuvo por debajo del valor medio histórico, y que el mes de agosto estuvo por encima, pero en ambos casos los valores de 2020 no están fuera del rango marcado por una desviación estándar, y en consecuencia entran dentro de lo que podríamos calificar como “normales”. Esto es así en el caso del mes de agosto de 2020, porque, a pesar del valor excepcionalmente alto del día 10, también se midieron valores anómalamente bajos, como los 18.9 °C del día

18 de agosto. Sin embargo, el promedio del mes de julio de 2020, sí estuvo claramente por encima de la media histórica.

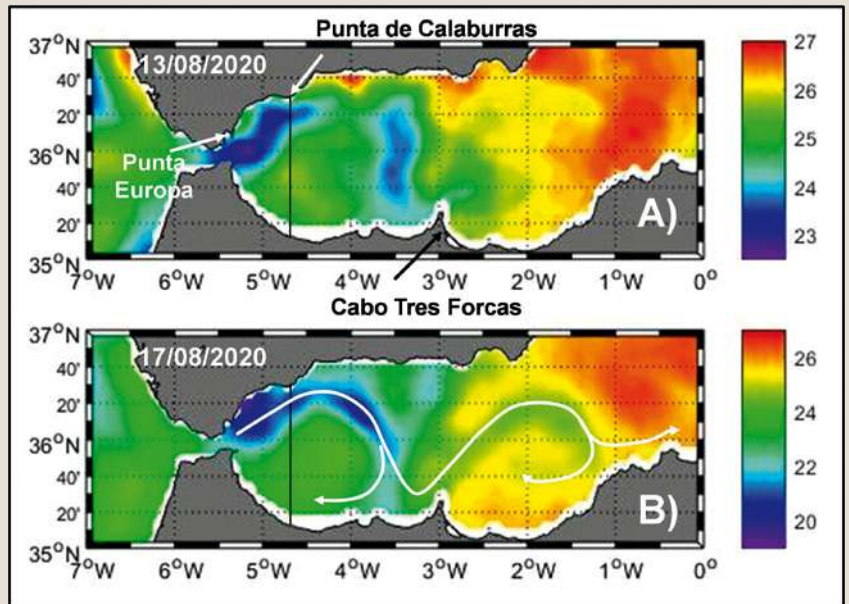
Para buscar una posible explicación a estas fluctuaciones en la temperatura superficial del mar, representamos en la figura 1B la componente zonal del viento en el sector norte del mar de Alborán, que dada la orientación de la costa, es la componente del viento que discurre paralela a la misma (datos obtenidos de Copernicus Marine Service, <https://resources.marine.copernicus.eu>). Hay que hacer hincapié en que en este caso estamos considerando que esta componente es positiva cuando se trata de un viento de poniente, y que es negativa para vientos de levante.

Podemos observar que las temperaturas del mar más bajas se midieron alrededor del 15 de junio, tras un periodo de descenso continuado de las temperaturas que coincide con vientos de componente oeste (valores positivos). A partir de esa fecha la temperatura del mar inició un periodo de continuado ascenso hasta alcanzar el máximo citado del 10 de agosto, al mismo tiempo que la intensidad del viento de poniente iba disminuyendo hasta dar paso a vientos de levante o ponientes muy débiles. La componente zonal del viento alcanzó su valor más negativo el día 6 de agosto, cuatro días antes del máximo de temperatura del mar. Abundando en esta relación entre la componente del viento paralela a la costa y la temperatura del mar, el día 12 de agosto se recuperaron los vientos de componente oeste (valores positivos) que crecieron hasta alcanzar un máximo relativo el día 16. Dos días más tarde, el 18 de agosto, la temperatura del mar en Fuengirola alcanzó un mínimo también relativo de 18.9 °C. Esta evolución de la temperatura del mar y su relación con el viento no solo afectan a la localidad de Fuengirola, sino a toda la costa norte del mar de Alborán, en especial a la parte más occidental.

La Figura 2A muestra la temperatura superficial del mar de Alborán y estrecho de Gibraltar el día 13 de agosto (datos obtenidos de Copernicus Marine Service), tras un largo periodo en el que los vientos de poniente decrecieron paulatinamente hasta convertirse en vientos de levante. Si consideramos el periodo de tiempo que va desde el 15 de junio al 12

Trazas de la temperie

Figura 2. Temperatura superficial del mar obtenida a partir de medidas desde satélite correspondientes al 13 de agosto de 2020 (A) y al 17 de agosto de 2020 (B). Fuente: Copernicus Marine Service.



de agosto, cuando la componente zonal del viento volvió a valores positivos, tan solo se observaron vientos de poniente durante la segunda quincena de julio, pero en este caso, muy débiles, con valores que fluctuaron en torno al cero (Figura 1B). El resultado es el que muestra la citada Figura 2A, en la que pueden observarse temperaturas de la superficie del mar por encima de los 26 °C en la Bahía de Málaga y al este de la misma. La lengua de agua fría que se extiende desde el estrecho de Gibraltar hacia el interior del mar de Alborán (de la que hablaremos más adelante), se despega de la costa entre Punta Europa y Punta de Calaburras, de tal forma que la temperatura del mar en las costas de Estepona, Marbella y Fuengirola está por encima de los 25 °C (nótese los tonos verdes en la Figura 2A). El día 17 de agosto (Figura 2B), tras una semana de viento de poniente, y un día después de la máxima intensidad de esta componente, registrada el día 16, la situación térmica en las aguas costeras de la provincia de Málaga cambió completamente. La lengua de agua fría que se extiende hacia el noreste desde Gibraltar está ahora unida a la costa entre Punta Europa y Calaburras, con temperaturas en torno a los 20 °C (nótese que en las figuras 2A y 2B se han utilizado distintas escalas de color para resaltar más los gradientes que se asocian a las distintas estructuras oceanográficas). En la Bahía de Málaga, las temperaturas superficiales del mar se encuentran en torno a los 22 °C, lo que supone un descenso de entre 4 y 5 °C.

Aunque aún no hayamos explicado el mecanismo que relaciona los vientos de componente este con las elevadas temperaturas costeras en la superficie del mar, y los vientos de componente oeste con el descenso de la misma, parece que los datos muestran claramente esta relación. La figura 1D muestra un diagrama polar o rosa de vientos para los vectores de viento medios diarios de los meses de verano (julio, agosto y septiembre), medidos en Málaga (aeropuerto, datos de la Agencia Estatal de Meteorología, AEMET) desde 1990 a 2015. En este diagrama se observa una clara polarización de los vientos en la dirección noroeste-sudeste, la cual puede apreciarse igualmente durante el resto del año, siendo debida a la orografía local. Durante los meses estivales, la dirección predominante de procedencia del viento es el sudeste. El 48 % de los vectores diarios eran de componente este. Estos vientos, con independencia de su procedencia, son en general suaves, superando los 10 km/h tan solo en un 6 % de los días. No obstante, hay que señalar que en ocasiones se producen irrupciones de vientos de más de 20 km/h (color naranja en la Figura 1D) que corresponden siempre a la dirección noroeste, los vientos conocidos como “terrales” en la provincia de Málaga. Si consideramos el vector medio dia-

rio para los meses de julio y agosto de 2020, el porcentaje de días con viento del este y la intensidad del viento es similar a la deducida del análisis de la serie de datos de la AEMET. Sin embargo, si nos centramos en el periodo que se extiende desde el 3 de julio al 9 de agosto de 2020, antes de que se produjese la anomalía térmica en las costas malagueñas, el porcentaje de días con viento de componente este sube hasta el 61 %, reduciéndose también la intensidad del viento, ya que los vientos con intensidades superiores a los 10 km/h representaron tan solo el 3 %. En consecuencia, podemos afirmar que, aunque estadísticamente los vientos suaves de componente este predominan durante el verano en el mar de Alborán, el periodo de tiempo que precedió a la anomalía cálida de agosto de 2020 se caracterizó por un incremento en la frecuencia de estos vientos, así como por un descenso de la intensidad de los mismos. Cabe añadir que el resto del año son los vientos de componente oeste los que predominan en estas costas. Resultados similares podrían deducirse del análisis de otras localidades, como Fuengirola (Figura 1C), aunque en este caso la estacionalidad en la alternancia de vientos de poniente y levante no es tan acusada como en Málaga.

Para continuar... algunas cuestiones sobre el funcionamiento del mar de Alborán

La estrecha relación entre la componente del viento paralela a la costa y las variaciones de la temperatura superficial se basa en el bien conocido fenómeno “transporte de Ekman”, si bien, en el caso de la costa norte del mar de Alborán, se ve acentuado por la hidrodinámica de esta cuenca. El viento arrastra las aguas situadas sobre la superficie del mar. Podríamos decir que hay un flujo de cantidad de movimiento, el cual, a su vez, es transmitido por las aguas superficiales a aquellas que se encuentran por debajo de la superficie. Sin embargo, debido a la fuerza de Coriolis, en cuanto el agua comienza a moverse, ésta sufre una fuerza en dirección perpendicular al sentido de su movimiento, dirigida hacia la derecha en el hemisferio norte, y hacia la izquierda en el sur. El equilibrio de las fuerzas viscosas y de Coriolis a lo largo de la columna de agua da origen a un perfil vertical de velocidad que se conoce como espiral de Ekman, que puede

consultarse en cualquier libro de oceanografía o meteorología (ver por ejemplo, Pond y Pickard, 1983). El resultado final es que bajo la acción del viento se desarrolla en la parte más superficial del mar una capa en la que las aguas se desplazan de forma horizontal hacia la derecha (centrándonos ya en el caso del hemisferio norte que es el que nos ocupa) respecto de la dirección de avance del viento. Este transporte de agua se conoce como transporte de Ekman. Cuando este proceso se produce en mar abierto y el viento es homogéneo, es decir, no presenta cambios espaciales ni en su dirección ni en su intensidad, las aguas que se desplazan por efecto del transporte de Ekman en cualquier punto del océano, son reemplazadas por otras situadas en zonas adyacentes. Sin embargo, cuando este fenómeno sucede en la costa, se produce una limitación al movimiento de las aguas. Así, vientos de componente oeste en la costa norte del mar de Alborán producen un transporte de agua en la capa superficial del mar hacia el sur, es decir, hacia mar adentro (o sea, hacia la derecha según el sentido de avance del viento). Las aguas desplazadas no pueden ser reemplazadas por otras situadas más al norte, pues más al norte se encuentra la costa, de tal manera que son aguas profundas las que vienen a reemplazar a las aguas superficiales tal y como se muestra esquemáticamente en la Figura 3A. Las aguas que se encuentran en la superficie son aguas cálidas porque reciben la radiación solar, mientras que las aguas profundas son frías. En consecuencia, el “afloramiento” a la superficie de aguas profundas, asociado a los vientos de poniente (en el caso de la costa norte del mar de Alborán), produce un descenso de la temperatura superficial del mar. En este punto hay que observar que dependiendo de cuál sea la orientación de la costa, otros vientos con otra dirección distinta podrían ser los responsables de producir este fenómeno de afloramiento.

Por el contrario, los vientos de componente este tendrán un efecto opuesto. El transporte de Ekman se producirá hacia la costa donde las aguas ya no pueden progresar más hacia el norte. Así, estas aguas se hundirán, aumentando el espesor y profundidad de las aguas que han sido previamente calentadas por la radiación solar (Figura 3B).

Este fenómeno es muy común en otras partes de los océanos de la Tierra, siendo el responsable de las grandes zonas de afloramiento que constituyen los ecosistemas marinos más productivos y ricos del planeta. Sin embargo, a este mecanismo general, aplicable a todas esas zonas, tenemos que añadir algunas particularidades en el caso del mar de Alborán. Ya hemos comentado en un epígrafe anterior que el mar Mediterráneo se caracteriza por un sistema de dos capas o corrientes, con aguas atlánticas que fluyen en superficie hacia el interior del Mediterráneo, y aguas mediterráneas que forman una corriente profunda que se dirige hacia el Atlántico.

Este sistema, como es lógico, también afecta al mar de Alborán. En consecuencia, cuando los vientos de poniente hacen aflorar las aguas profundas a lo largo de la costa norte del mar de Alborán, como se observa en la figura 2B, se trata de aguas de carácter mediterráneo. Este hecho contrasta en parte con la idea popular de que los vientos de poniente, (o el terral en Málaga), enfrían las aguas costeras porque traen una corriente del Atlántico, océano que aparece en el imaginario colectivo como un mar más frío que el Mediterráneo. Al contrario, las aguas cálidas que se acumulan contra la costa tal y como se muestra en el esquema de la Figura 3B, y que elevan la temperatura de la superficie del mar a lo largo de la costa norte de Alborán (Figura 2A), son precisamente las aguas que han entrado recientemente desde el Atlántico a través del estrecho de Gibraltar, y son muy parecidas a las que podríamos encontrar en el golfo de Cádiz: Son aguas atlánticas. Por el contrario, las aguas que afloran a la superficie y que enfrían las costas malagueñas, son aguas mediterráneas. Es decir, son las aguas en las que se transformaron las del Atlántico a lo largo de su viaje hacia el este, tras sufrir un progresivo aumento de salinidad debido a la evaporación neta del Mediterráneo, y un enfriamiento causado por las intensas pérdidas de calor del invierno. Esto hace que, aunque no lo notemos, los descensos bruscos de temperatura en las costas españolas de Alborán, causados por el viento, vayan acompañados de un aumento de la salinidad, mientras que los aumentos de temperatura se asocian a aguas más atlánticas y, por tanto, menos saladas.

Però como ya adelantamos, la hidrodinámica de Alborán es compleja. La figura 2B muestra especialmente bien el sistema de corrientes y algunos de los fenómenos que se producen en esta región del Mediterráneo, y que tienen su reflejo en la

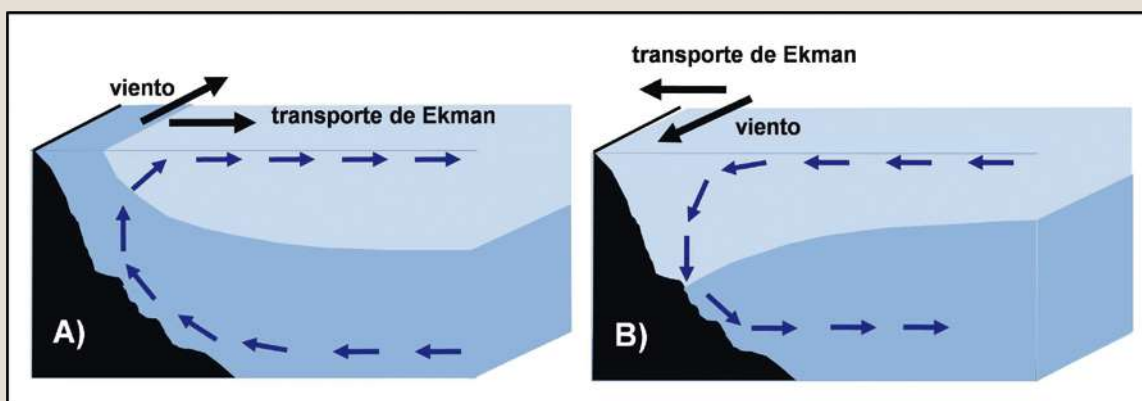


Figura 3. Esquema del fenómeno de transporte Ekman en el hemisferio norte para un proceso de afloramiento (A) y un proceso de convergencia de aguas superficiales contra la costa (B).

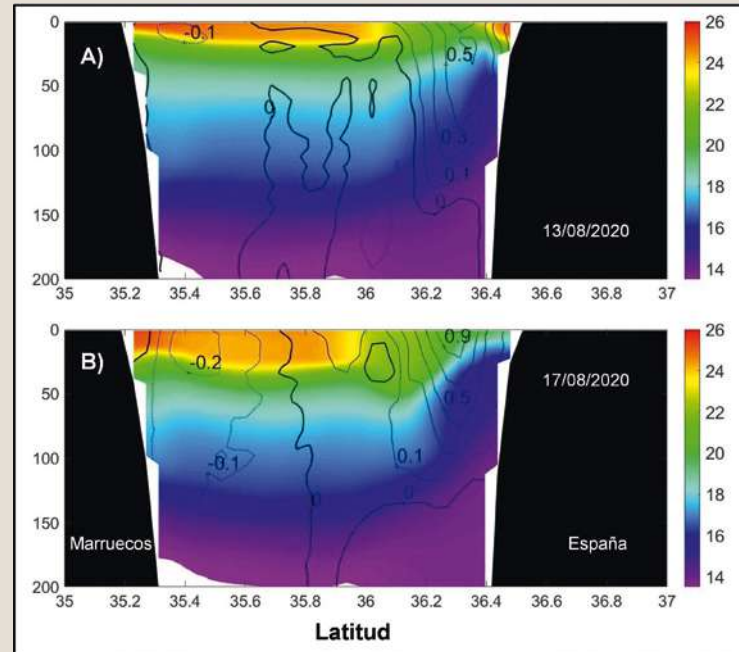
temperatura superficial del mar (ver Vargas Yáñez et al., 2019 para una revisión de la circulación en Alborán, http://www.ieo.es/es_ES/web/ieo/temas-de-oceanografia). El primer rasgo de esta figura que llama la atención es la lengua de agua fría que se extiende en dirección noreste desde el estrecho de Gibraltar. Siguiendo el “rastros” de estas aguas frías, podemos deducir la dirección de la corriente atlántica que de forma esquemática se ha representado con una curva blanca en la figura 2B. Esta corriente entra en el mar de Alborán en di-

Trazas de la temperie

Figura 4. Distribución de temperatura (escala de colores) y componente zonal de la velocidad del mar en los 200 m más superficiales a lo largo de una sección vertical desde Marruecos a España a la altura de la Punta de Calaburras. Las líneas continuas representan velocidades positivas (hacia el este), y las discontinuas corresponden a valores negativos (hacia el oeste). Los datos corresponden a un reanálisis de Copernicus Marine Service; A) corresponde al 13 de agosto de 2020, y B) al 17 de agosto de 2020.

rección nordeste debido a la inclinación en esta dirección del eje del Estrecho. Posteriormente es desviada hacia la derecha por la fuerza de Coriolis, de tal forma que la corriente gira de forma anticiclónica. Una parte del agua que entra a través de Gibraltar recircula dentro de este giro anticiclónico, mientras que la mayor parte de ella, tras incidir contra el cabo Tres Forcas, gira de nuevo hacia el nordeste para describir un segundo giro anticiclónico en la parte oriental del mar de Alborán. Finalmente, el agua procedente del Atlántico continúa su camino hacia el este a lo largo del talud continental de Argelia, formando la llamada corriente Argelina. Al decir que la presencia de la corriente atlántica puede detectarse siguiendo la señal en superficie de las aguas más frías, podría pensarse que estamos incurriendo en una contradicción, al haber afirmado anteriormente que los descensos de temperatura que se observan en las costas malagueñas no están asociados a una corriente de agua más fría por tener procedencia atlántica. Ahora es el momento de matizar estas afirmaciones. En efecto, las aguas que se encuentran en el golfo de Cádiz, y que finalmente entran en el Mediterráneo, no son más frías, o no mucho más, que las que encontramos a igual latitud en el Mediterráneo, es decir, en el mar de Alborán o frente a Argelia. Estas aguas, al entrar en el estrecho de Gibraltar, tienen que atravesar un canal estrecho (mínima anchura de 14 km al sur de Tarifa) y poco profundo (máxima profundidad en torno a 300 m). Este canal es compartido por las aguas atlánticas que entran, con las aguas mediterráneas que salen, de tal forma que entre ambas corrientes se produce una fuerte cizalla de velocidades que genera una intensa mezcla. Esta mezcla es potenciada por la marea interna en el propio estrecho. Se trata de oscilaciones, forzadas por la marea, de hasta más de 100 metros de altura, que se producen en la superficie que separa las aguas atlánticas de las mediterráneas. De esta forma, ese enfriamiento que se observa en las imágenes de temperatura superficial de Alborán, indica una vez más la influencia de las aguas profundas de carácter mediterráneo.

La corriente atlántica describe dos anticiclones en cada una de las sub-cuencas que forman el mar de Alborán, al oeste y al este del cabo Tres Forcas. Estos anticiclones se caracterizan por la elevación de la superficie libre del mar en su interior, un hundimiento de las isopícnas o superficies de igual densidad, en el centro de estos giros, y su elevación en la periferia del giro. En realidad el hundimiento de las isopícnas se debe a un hundimiento de las aguas atlánticas que se acumulan en el centro del giro anticiclónico, llevando aparejado un hundimiento de las isotermas e isohalinas (superficies de igual temperatura y salinidad).



La figura 4 muestra la distribución de temperatura (escala de colores) y la componente zonal de la velocidad del agua, en los primeros 200 m del mar, a lo largo de dos cortes verticales, desde la costa de Marruecos hasta la costa española (datos obtenidos de Copernicus Marine Service). Estos cortes o secciones verticales pasan por el centro del giro anticiclónico de la parte occidental de Alborán, aproximadamente sobre la longitud de la Punta de Calaburras. Tal y como hemos explicado, las aguas más cálidas se hunden en el centro del giro, mientras que las aguas más profundas y frías se elevan en la periferia del giro, en este caso cerca de las costas españolas y marroquíes. La componente zonal de la corriente marina es positiva cuando se dirige hacia el este, y en tal caso se representa con líneas continuas, y es negativa cuando va hacia el oeste, representándose en ese caso con líneas discontinuas. El giro en el sentido de las agujas del reloj en el interior de esta estructura anticiclónica implica que las aguas al norte del giro se dirigen hacia el este, y al sur del mismo hacia el oeste (ver Figura 4).

El día 13 de agosto, tras una situación continuada de vientos de levante (Figuras 2A y 4A), la capa superficial y cálida del mar es arrastrada hacia la costa española. El día 17 de agosto, tras varios días de viento de poniente, las aguas profundas y frías afloran a la superficie. En este caso este afloramiento se ve favorecido por la inclinación de las isotermas en la periferia del giro anticiclónico, tal y como ya hemos explicado. Es importante señalar que esta inclinación es más intensa en el contorno norte del giro, es decir, aquel que se aproxima a las costas malagueñas, debido a la mayor intensidad de la corriente. Este hecho hace que las aguas profundas, frías y saladas de carácter mediterráneo, se encuentren de forma general más cerca de la superficie en este sector norte del mar de Alborán, lo que potencia el efecto de los vientos de poniente.

Valores de récord: ¿Efecto del cambio climático?

El análisis de las series de temperatura y velocidad del viento en la costa norte del mar de Alborán, y las distribu-

ciones de temperatura superficial y a lo largo de una sección vertical a lo largo del giro anticiclónico occidental de Alborán, han mostrado como este tipo de fluctuaciones en la temperatura del agua de las costas malagueñas están asociadas a la alternancia de los vientos de poniente y levante. Los procesos de afloramiento causados por el poniente están potenciados por la proximidad de las aguas frías mediterráneas a la superficie en el contorno norte de estos giros. El carácter somero de estas aguas mediterráneas cerca de las costas españolas se debe a la intensidad de la corriente atlántica. Por el contrario, el aumento de la temperatura en las costas malagueñas requiere de la persistencia de vientos de levante durante un periodo de tiempo relativamente largo, como el que se produjo en julio y agosto de 2020. Pero, a pesar de esta explicación, podríamos preguntarnos, ¿es el máximo del día 10 de agosto de 2020 similar a otros anteriores? ¿Se debe este valor anómalo al calentamiento que las aguas de los océanos y mares del planeta están experimentando en la actualidad?

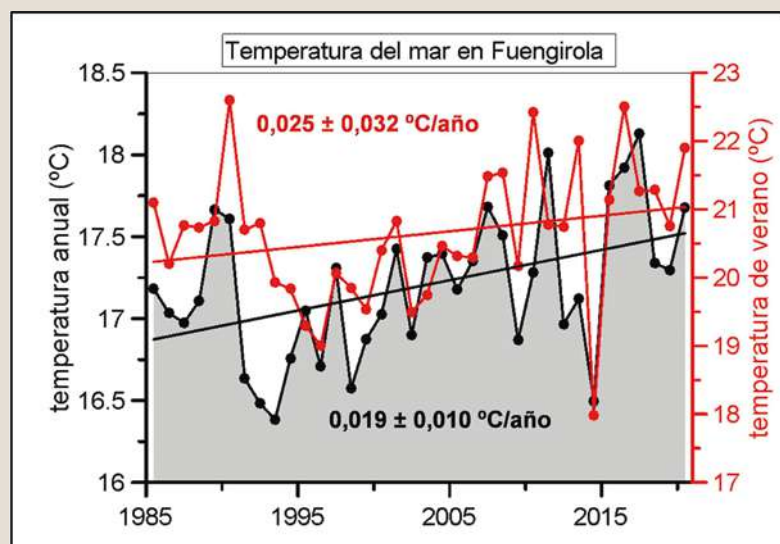


Figura 5. Evolución de la temperatura media anual en la playa de Fuengirola desde 1985 a 2020 (curva negra), y evolución de la temperatura estival (julio, agosto y septiembre) en la playa de Fuengirola entre los mismos años (curva roja).

La Figura 5 muestra la evolución de la temperatura anual en la playa de Fuengirola desde 1985 hasta 2020 (curva negra), así como la evolución de las temperaturas veraniegas, consideradas como las temperaturas medias de los meses de julio, agosto y septiembre (curva roja). Esta figura muestra que se han registrado veranos igual de cálidos o incluso más que el de 2020, como son los de 1990, 2011, 2014 o 2016. Valores puntuales extremadamente altos se midieron el 22 de agosto de 2013 (25.6 °C) y el 12 de agosto de 2016 (25.5 °C), también tras periodos prolongados de viento de levante. Sin embargo, hay que destacar que cuatro de los cinco veranos más cálidos en las aguas de Fuengirola se han registrado en los últimos diez años de la serie. Las temperaturas anuales muestra una tendencia positiva de 0.019 °C/año, (estadísticamente significativa en el nivel de confianza del 95 %), lo que

representaría (si se mantuviese este ritmo de calentamiento) un aumento de 1.9 °C en un siglo. La tendencia también creciente de las temperaturas estivales no es significativa, pero hay que señalar que todas las estaciones del año mostraron tendencias positivas.

Los resultados y análisis expuestos en este artículo nos permiten concluir, a modo de resumen, que las fluctuaciones, a veces muy acusadas, en la temperatura de las costas malagueñas, son un fenómeno que entra dentro de la dinámica natural del mar de Alborán, donde los vientos de levante acumulan aguas superficiales cálidas y poco saladas de origen atlántico contra la costa, elevando la temperatura de las aguas del litoral malagueño. Por el contrario, el viento de poniente puede producir descensos muy notables de la temperatura, debido al afloramiento de aguas profundas, el cual es favorecido por la elevación de dichas aguas en los contornos septentrionales de los giros anticiclónicos que ocupan el mar de Alborán. Al margen de estas fluctuaciones, las temperaturas

medias en la playa de Fuengirola muestran una clara tendencia positiva que podrían hacer que en el futuro las anomalías cálidas como la registrada en agosto de 2020 sean cada vez más altas. Otro tema distinto es si serán o no más frecuentes, lo que dependerá de si se produce un cambio en el régimen de vientos de Alborán.

Bibliografía

- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Pond, S., Pickard, G. L., 1983. *Introductory dynamical oceanography*. Second edition. Pergamon Press, Oxford, 329 pp.
- Salat, J., Pascual, J., 2006. *Principales tendencias climatológicas en el Mediterráneo Occidental a partir de 30 años de observaciones oceanográficas en la costa de catalana*. En: *Clima, sociedad y medioambiente*. J.M. Cuadrat Prats, M.A. Saz Sánchez, S.M. Vicente Serrano, S. Lanjeri, M. de Luis Arrillaga y J.C. González-Hidalgo (Eds.). Asociación Española de Climatología, 1-8.
- Song, X., Yu, L., 2017. *Air-sea heat flux climatologies in the Mediterranean Sea: Surface energy balance and its consistency with ocean heat storage*. *Journal of Geophysical Research*, 122, 4068-4087, doi: 10.1002/2016JC012254
- Vargas Yáñez, M., García Martínez, M. C., Moya Ruiz, F., López-Jurado Marqués, J. L., Serra Tur, M., Balbín Chamorro, R., Santiago Domenech, R., Salat, J., Pascual, J., Ramírez Cárdenas, T., Tel, E., Jiménez Gómez, M. P., Reul, A., Parrilla Barrera, G., 2019. *El estado actual de los ecosistemas marinos en el Mediterráneo español en un contexto de cambio climático*. *Temas de Oceanografía*, nº 12, Madrid: Instituto Español de Oceanografía. 283 p. NIPO: 696-19-002-X