

Brisas marinas en Mallorca: ensayo metodológico para su identificación a partir de datos REDMAR, REDEXT y SIMAR

Sea-Breezes in Mallorca: A methodological essay for their identification using REDMAR, REDEXT, and SIMAR datasets

MAGDALENA ALOY-ESTELRICH¹

GABRIEL ALOMAR-GARAU¹  0000-0003-0101-5944

¹Universitat de Barcelona

Resumen

En el presente trabajo se ensaya un método de identificación de brisas marinas en la isla de Mallorca, basado en el análisis de los datos de viento provenientes de estaciones situadas en un ámbito terrestre y marino, correspondientes a dos unidades regionales: la bahía meridional de Palma y la bahía septentrional de Alcúdia. La fuente de datos principal han sido los mareógrafos terrestres de la red REDMAR (Puertos del Estado), los resultados de cuyo análisis han servido para compararlos con datos de la boya de Dragonera, de la red REDEXT, situada fuera de la zona de influencia de las brisas marinas, así como con datos de la serie temporal de puntos SIMAR, localizados sobre la superficie del mar. Estas tres fuentes se han demostrado útiles para examinar y caracterizar sumariamente el campo de viento de las brisas marinas, un fenómeno atmosférico con una muy alta recurrencia en la isla.

Palabras clave: brisas marinas; Mallorca; REDMAR; REDEXT; SIMAR

Fechas • Dates

Recibido: 2023.10.15
Aceptado: 2024.09.02
Publicado: 2024.10.24

Autor/a para correspondencia Corresponding Author

Magdalena Aloy-Estelrich
maidala@gmail.com

Abstract

In this study, we tested a method for identifying sea breezes on the island of Mallorca. Our approach is based on the analysis of wind data collected from stations located in both terrestrial and marine environments, which correspond to two regional units: the southern bay of Palma and the northern bay of Alcudia. Our primary source of data was the terrestrial tide gauges from the REDMAR network (managed by Puertos del Estado). We compared the results of our analysis with data from the Dragonera buoy of the REDEXT network, situated outside the influence of sea breezes. Additionally, we used data from the time series of SIMAR points, located on the sea surface. These three data sources were valuable in examining and providing a summary of the wind patterns associated with sea breezes, which are a highly recurrent atmospheric phenomenon on the island.

Keywords: sea-breezes; Mallorca; REDMAR; REDEXT; SIMAR

1. Introducción

Las brisas marinas son un típico fenómeno atmosférico de las zonas costeras de latitudes medias y bajas. Su estudio es de gran importancia para la comprensión de los regímenes eólicos locales, de ahí que disponer de una mejor comprensión de las características y los mecanismos de este fenómeno en las regiones costeras en las que se presenta, permite desarrollar modelos más precisos de predicción local del tiempo atmosférico. También permite disponer de información valiosa para la planificación y gestión de actividades relacionadas con el turismo costero (Martínez-Ibarra *et al.*, 2019), así como para la eventual localización de parques eólicos para la generación de electricidad (Mazon *et al.*, 2015). En relación con estas instalaciones, el Gobierno de las Islas Baleares tiene publicado en abierto un mapa de zonas de aptitud para ubicar parques de energía eólica terrestre *-onshore-* para generar electricidad. En Mallorca no hay parques eólicos de este tipo, aunque subsisten los formados por antiguos molinos de viento para la extracción de agua del subsuelo, ubicados, casi sin excepción, en las tres cuencas subsidentes orientadas al mar –Palma, Sa Pobla-Muro y Campos-Ses Salines–.

En el archipiélago balear, el único parque eólico existente hasta la fecha para la producción de electricidad, conocido como Milà, se inauguró en 2004 en la localidad menorquina de Maó, con cuatro aerogeneradores. Su vida útil ha finalizado en 2024, aunque está prevista su repotenciación sobre la base de unos nuevos cálculos de la velocidad media del viento y unos aerogeneradores de mayor altura (> 50 m). En esta isla es bien conocido su régimen de vientos dominado por la *tramuntana* (Jansà, 1933), el viento del norte canalizado por el valle del Ródano. También ha sido descrito un régimen menorquín de brisas marinas estivales (Cladera, 2019), aunque de mucha menor magnitud que las de Mallorca. En términos de velocidad y frecuencia del viento, la aptitud de Menorca para la instalación de parques eólicos ha sido corroborada por distintos estudios técnicos, entre ellos el del frustrado proyecto para el equipamiento de ocho aerogeneradores en Son Angladó, en el noroeste de la isla, con una torre de medición de viento instalada en 1999, cuyos datos reflejaban velocidades medias anuales superiores a 7 m/s a 40 m de altura, con lo que quedaba garantizado el éxito de la explotación. También el Plan de Ordenación del Espacio Marítimo (POEM) de la demarcación marina levantino-balear, aprobado en España por el Real Decreto 150/2023, de 28 de febrero, identifica en el noreste y el este de la isla de Menorca dos respectivas zonas de alto potencial para la energía eólica marina *-offshore-*, considerando como requisitos previos una profundidad máxima de 1000 m y una velocidad del viento media anual superior a

7,5 m/s a una altura de 100 m sobre la superficie del mar. Estos requisitos son favorables para el caso de los aerogeneradores marinos sobre plataforma flotante, pues frente a los aerogeneradores con cimentación fija, aprovechan mejor el potencial energético de la energía eólica y minimizan el eventual impacto visual, al situarse en zonas más alejadas de la costa.

Los estudios técnicos que se requieren para instalaciones eólicas de este tipo cuentan con redes de medida de la entidad Puertos del Estado, entre las que se encuentra el conjunto de datos de la red SIMAR, formado por series temporales de parámetros de viento y oleaje procedentes de modelado numérico. El uso combinado de estos datos, junto con los de las boyas de la red RE-DEXT, fondeadas en aguas abiertas y profundas, puede proporcionar una imagen más clara de la dinámica atmosférica y mareal de las zonas marinas más alejadas de la costa. Para el caso de los dominios marinos más cercanos a ella, en los que operan las brisas marinas, la calidad y gran resolución temporal de los datos de la red SIMAR los hacen potencialmente útiles para el análisis del comportamiento espacial de las brisas que operan sobre el mar.

Desde un punto de vista físico, las brisas de mar son vientos que se forman a causa de la diferencia de temperatura entre un medio marino y otro terrestre (Miller *et al.*, 2003). Durante el día, el sol calienta rápidamente la superficie terrestre, lo que a su vez calienta el aire en contacto con ella. A medida que el aire se calienta, se vuelve menos denso y asciende, creando un área de baja presión sobre tierra. En contraste, la superficie marina mantiene una temperatura más fresca y constante debido a su mayor inercia térmica. Como resultado, el aire situado sobre el mar es más frío y denso. La diferencia de densidad entre el aire sobre tierra y el aire sobre el mar crea un gradiente de presión que induce al aire a moverse desde el mar hacia tierra, generando típicos episodios de brisas marinas. A su vez, el aire cálido sobre tierra gana altitud y se desplaza en altura mar adentro, donde tiene lugar una subsidencia que cierra la circulación térmica. Durante la noche el proceso se invierte, pues la tierra se enfría más rápidamente que el mar, y el aire más frío y denso sobre tierra se desplaza hacia el mar, generando brisas terrestres o ‘terrales’.

Orlanski (1975) sitúa las brisas de mar-tierra dentro del grupo de fenómenos meteorológicos de mesoescala- β , lo que representa una dimensión horizontal de unos 30 km y un ciclo de vida de unas 10 horas. Estas circulaciones cuentan con un amplio espectro de trabajos científicos y enfoques, unos de carácter teórico (Neumann y Mahrer, 1971) y otros de carácter descriptivo, tanto en lo que se refiere al análisis de los datos de campo como a las simulaciones numéricas de las brisas de distintas regiones costeras del mundo (Mahrer y Pielke, 1977; Klara, 1998; Liu *et al.*, 2001, entre otros). En numerosas localidades costeras de la región mediterránea, las brisas constituyen un frecuente tipo de circulación del viento a niveles bajos. Esto hace que desempeñen un papel clave en un gran número de aspectos meteorológicos, climáticos, atmosféricos, territoriales y aún culturales, tales como, respectivamente, las precipitaciones de escala micro-continental (Baker *et al.*, 2001; Olcina-Cantos y Azorin-Molina, 2004), la variación del régimen anual de vientos de una región (Physick y Byron-Scott, 1977), la calidad del aire (Grossi *et al.*, 2000), la localización y emplazamiento de infraestructuras agrarias y de servicios (Alomar-Garau y Grimalt-Gelabert, 2021), o la huella toponímica del viento –es decir, su huella cultural. En el caso de la isla de Mallorca, las determinaciones ambientales, territoriales y humanas de las brisas son de tal magnitud que el fenómeno se ha hecho patente en la lengua a través de la fijación popular de un nombre propio que lo describe: la palabra *embat*, un caso ejemplar de eolonimia.

Por su configuración geográfica y su localización latitudinal, Mallorca constituye un espacio idóneo para el establecimiento de un régimen de brisas típico bajo condiciones de bajo o nulo

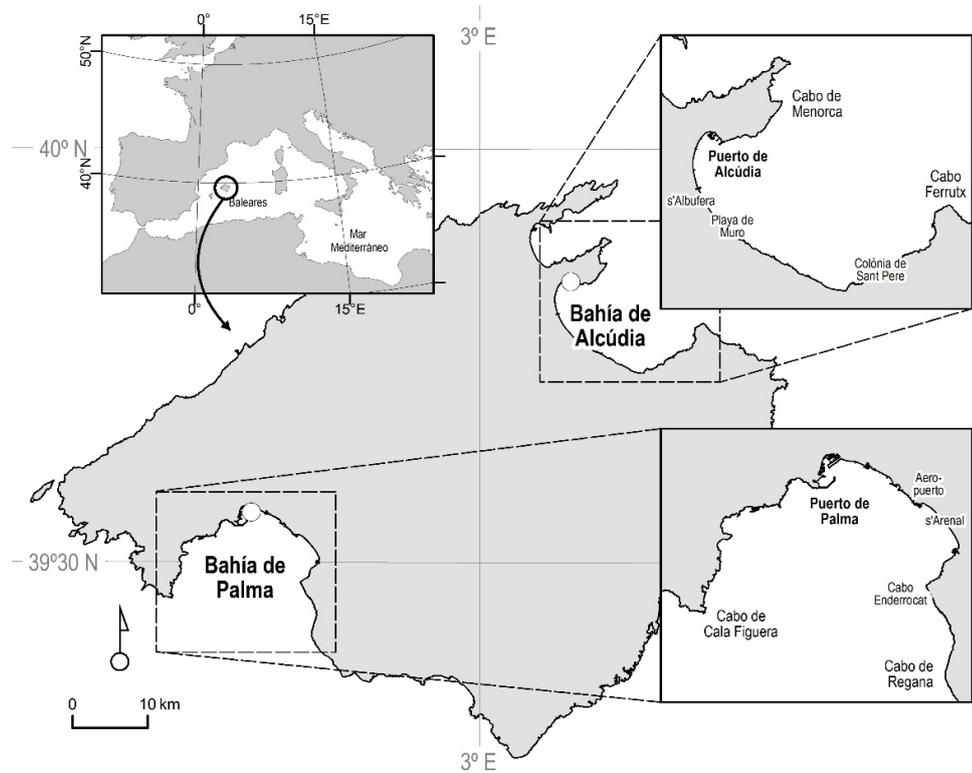
gradiente de presión atmosférica en la escala sinóptica. Estas condiciones aparecen fundamentalmente en situaciones anticiclónicas como las que se presentan en el Mediterráneo Occidental durante el verano, bajo la influencia del anticiclón de las Azores, que en esta época se desplaza hasta ocupar parte de las latitudes medias (Jansà, 1980; Katsoulis et al., 1998; Martin-Vide y Olcina-Cantos, 2001). A lo largo de un recorrido diario que en Mallorca llega a decenas de kilómetros tierra adentro, las brisas van eliminando vientos de ladera y formando chimeneas convectivas, que son el detonante de chubascos estivales (Guijarro y Heredia, 2004; Azorin-Molina et al., 2009). De hecho, el fenómeno ha sido descrito por sus significativos impactos en las condiciones atmosféricas de la isla y los patrones de circulación local, de ahí que haya sido objeto de atención preferente de no pocos investigadores, desde el estudio pionero de Jansà y Jaume (1946) hasta los estudios relativamente recientes de Ponce de León y Orfila (2013), Grau et al. (2021) o Alomar-Garau y Grimalt-Gelabert (2022).

El presente trabajo tiene como principal objetivo ensayar el uso de datos de mareógrafos de la red REDMAR, boyas de la red REDEXT y puntos de datos SIMAR, ofrecidos por la entidad española Puertos del Estado, con vistas a la identificación y caracterización sucinta de las brisas marinas tal como se presentan en dos ámbitos geográficos diferenciados de Mallorca: la bahía de Palma al sur de la isla y la bahía de Alcúdia al norte. Se trata de dos ámbitos en los que la frecuencia y efectividad del fenómeno se constata empíricamente, lo que facilita la subsiguiente verificación científica. El trabajo incorpora, igualmente a modo de ensayo, un método inédito de validación del fenómeno tal como se presenta en la bahía de Palma, consistente en la comparación de los registros de dirección y velocidad del viento dentro del campo de acción marina de las brisas, y fuera de él.

2. Área de estudio

La isla de Mallorca está situada en un área céntrica del Mediterráneo Occidental (39° de latitud Norte y 2° de longitud Este), y es la mayor del archipiélago de las Baleares (Figura 1). Con una extensión de 3.620 km² y un perímetro litoral de 676 km, presenta dos alineaciones montañosas que corren paralelas a los lados noroccidental y suroriental de la isla, separados por dos cuencas subsidentes que constituyen las bahías de Palma y de Alcúdia. Esta configuración topográfica general determina las principales características de la brisa marina, de tal manera que en la zona de la bahía de Palma la brisa sopla hipotéticamente del S-SO, mientras que en la de Alcúdia sopla del NE. Ambas bahías están unidas por una extensa depresión central, conformada por valles abiertos y relieves pequeños y suaves.

Figura 1. La isla de Mallorca y sus dos principales bahías, en el marco geográfico del archipiélago balear, del Mediterráneo y de Europa.



Fuente: Elaboración propia.

2.1. La bahía de Palma

En la parte meridional de Mallorca y orientada al suroeste, la herradura de la bahía de Palma tiene una distancia de unos 19 km entre un extremo y otro de su entrada –entre el cabo de Cala Figuera y el cabo de Regana–, y de unos 14 km entre el centro de la cuerda que une estos dos puntos y el fondo de la bahía. Ésta cubre una superficie de 214 km². Desde un punto de vista geomorfológico, en el lado occidental se combinan la costa baja rocosa y los acantilados, y aparecen algunas pequeñas playas como la de Cala Major o Illetes, o más exiguos arenales como los de Son Maties o Magalluf. En el lado este, la costa es igualmente baja y en general rocosa entre la ciudad de Palma y Can Pastilla, emplazamiento a partir del cual se abre una extensa playa –s'Arenal–. La costa de esta bahía, que en su parte central es prácticamente rectilínea, está alineada en el sentido noroeste-sureste, de forma que la teórica perpendicularidad de las brisas marinas a la línea litoral se traduce en una típica componente del SO.

2.2. La bahía de Alcúdia

La bahía de Alcúdia se sitúa en la parte septentrional de la isla, y desde un punto de vista morfoestructural se trata de la apertura hacia el mar de la depresión central de Mallorca, por su lado nororiental. Al este está limitada por el promontorio avanzado del cabo Ferrutx, y al oeste por el cabo de Menorca. La anchura de la boca tiene unos 15 km entre ambos cabos, y la distancia entre el centro de la cuerda que une estos puntos y el fondo de la bahía es de unos 11 km. En conjunto, totaliza 166 km² de superficie. Tierra adentro se abre una extensa llanura –modificada en parte por elevaciones comparativamente poco significativas y más o menos dispersas–, que se inclina

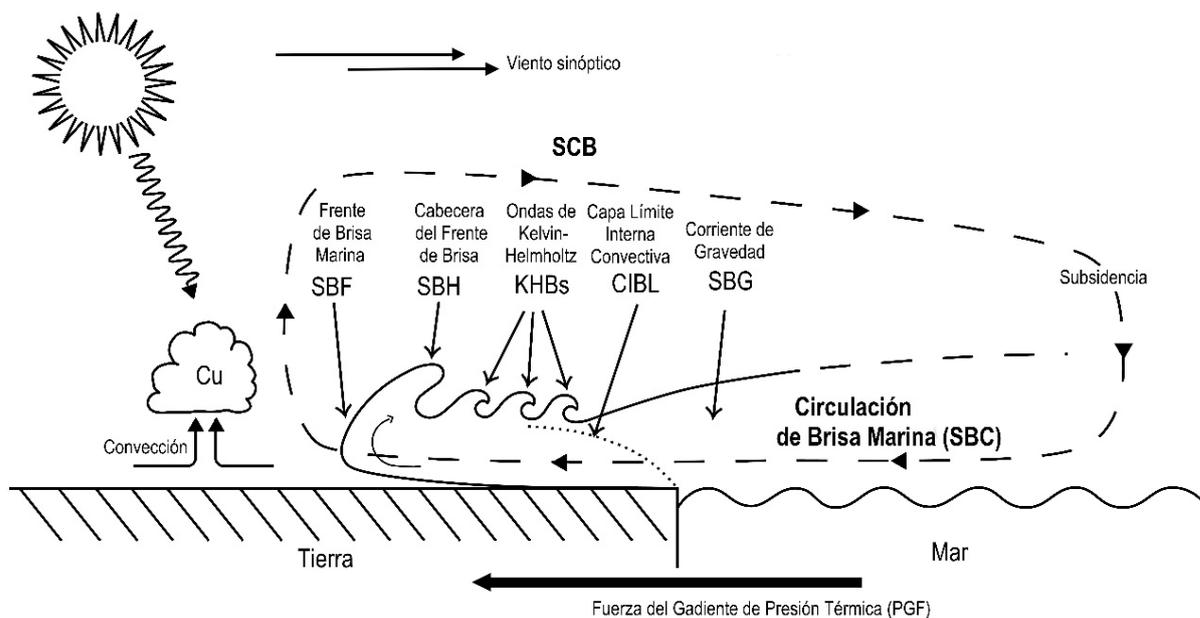
suavemente hacia el mar. También hay una albufera –s'Albufera– con un perímetro de unos 32 km, separada del mar por un cordón arenoso o restinga de 8 km de largo y una anchura de entre 250 y 500 m. En cuanto a la morfología costera, la bahía se presenta en forma de una extensa y cóncava costa baja y arenosa, sin importantes indentaciones, más algunos sectores de costa baja rocosa en la parte sur. A partir de la Colònia de Sant Pere, la costa se hace bastante más alta, con acantilados.

3. Las brisas diurnas de Mallorca. Esquema general

Un sistema de brisa marina se compone típicamente de las siguientes partes (Miller et al., 2003) (Figura 2): la circulación de brisa marina (*sea breeze circulation*, SBC); la corriente de gravedad de brisa marina (*sea breeze gravity current*, SBG); el frente de brisa marina (*sea breeze front*, SBF); la cabecera del frente de brisa (*sea breeze head*, SBH); la capa límite interna convectiva (*convective internal boundary layer*, CIBL) y las ondas de Kelvin-Helmholtz (*Kelvin-Helmholtz billows*, KHB).

La circulación de la brisa marina se activa cuando el contraste entre la temperatura del mar y de la tierra crea, a escala local, una fuerza de gradiente de presión (*pressure gradient force*, PGF) que se dirige del mar hacia tierra, desplazando sobre ella una capa de aire marino poco profunda.

Figura 2. Esquema de la estructura de circulación de la brisa marina (fase diurna).



Fuente: Reelaboración propia, adaptada de Miller et al. (2003).

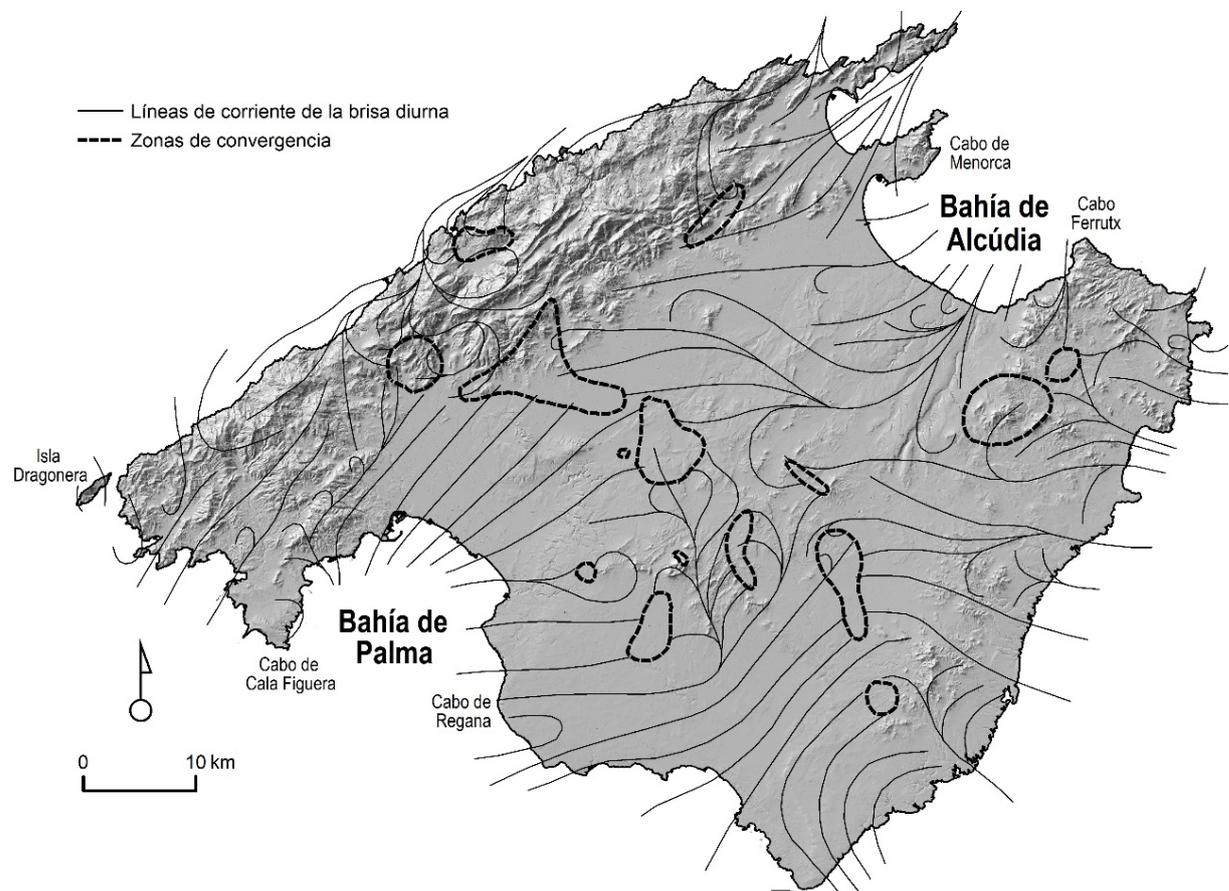
Por partes, la SBC es una célula de mesoescala que rota verticalmente, con un flujo hacia la costa cerca de la superficie terrestre, corrientes de aire ascendentes tierra adentro, corrientes difusas de hundimiento o subsidencia varios kilómetros mar adentro, y, normalmente, un flujo de retorno hacia el mar cerca de los 900 hPa. La SBG es el flujo hacia tierra del aire marino frío y húmedo en el brazo horizontal inferior de la SBC. Esta corriente se forma cuando un fluido denso atraviesa un entorno menos denso, y en la atmósfera se presentan en forma de salidas de tormentas o de brisas marinas (Simpson, 1994). El SBF es el borde de ataque de la SBG y la SBC, a menudo asociado con cambios repentinos de temperatura, humedad y viento. Su aproximación puede estar

marcada por el desarrollo de cúmulos de buen tiempo (*Cu*). La SBH es la cabecera de la parte frontal de la corriente de gravedad, que se eleva por encima e inmediatamente detrás del SBF a causa de las corrientes ascendentes en la zona de convergencia, siendo aproximadamente el doble de alta que el flujo posterior, aunque el viento sinóptico puede aplanarla. La CIBL es una región inestable dentro de la masa de aire marino, que aparece en la costa y aumenta en profundidad con la distancia hacia el interior. Las KHB son ondas que eventualmente pueden desarrollarse a lo largo del límite superior del SBG durante los periodos de baja estabilidad estática (mediodía).

Es importante tener en cuenta que la brisa marina genera un mar de viento de periodo corto y poca energía, y un *fetch* –la distancia sobre la que sopla el viento– relativamente corto, típicamente entre 5 y 15 km. A medida que avanza el día y aumenta la fuerza de la brisa, el *fetch* se extiende cada vez más mar adentro, hasta alcanzar un máximo. Esto significa que más allá de este máximo no hay viento, o sus características son distintas de las que se establecen para la brisa costera.

Como consecuencia de su insularidad, las brisas de Mallorca, durante el ciclo diurno, operan de manera opuesta y simultánea desde las diferentes costas y penetran hacia áreas del interior en las que convergen típicamente. Este esquema teórico fue empíricamente demostrado por vez primera por Jansà y Jaume (1946), en un estudio precursor que aparece resumido en el libro de referencia de Simpson (1994), *Sea Breeze and Local Winds*. En ese estudio, el sistema de brisas viene representado por un repertorio de mapas, de tipo cualitativo, entre los cuales destaca el de las líneas de corriente de la brisa operando sobre el conjunto del espacio insular (Figura 3).

Figura 3. Líneas de corriente de la brisa marina en la isla de Mallorca y zonas típicas de convergencia.



Fuente: Reelaboración propia a partir de la *Carta I. Líneas de corriente* (Jansà y Jaume, 1946).

A falta de una red de estaciones anemométricas, este mapa se confeccionó a partir de la información oral proporcionada por campesinos y pescadores de la isla, que respondieron una encuesta específicamente diseñada con preguntas relativas a la hora a la que se presentaba la brisa, su dirección más frecuente y su duración (Miró-Granada, 1998). El mapa muestra una circulación horizontal del aire marítimo soplando de mar hacia tierra, siguiendo el esquema teórico de la perpendicularidad a las costas. La corriente inferior de la brisa se arrastra completamente acoplada al suelo, y está sometida a la servidumbre del relieve incluso por debajo de los 50 metros. Los vientos rodean radialmente la isla, siguiendo la dirección de las agujas del reloj: NE en las bahías de Pollença y de Alcúdia, SE en la costa de Levante, y S y SO entre el cabo de Ses Salines y la isla de Dragonera. En el lado occidental de la isla, la cadena montañosa de la sierra de Tramuntana hace de pantalla orográfica que impide cualquier desarrollo eficaz de la brisa. Este modelo general ha sido validado por simulaciones numéricas como las ensayadas por Ramis et al. (1990) o Ramis y Romero (1995).

La organización espacial de los episodios de brisa hace que la isla quede separada a lo largo del día por al menos dos regímenes principales de brisas: el régimen septentrional de las bahías de Alcúdia y Pollença, y el meridional de la bahía de Palma y las costas del sur. Ambos regímenes colisionan en los alrededores de la zona central de la isla, formando áreas de convergencia, detectables a simple vista por la presencia de líneas de nubes cumuliformes (*Cu*, *Cb*).

4. Método y datos

4.1. Método de identificación de días con brisa marina

Los trabajos de caracterización de las brisas describen necesariamente los criterios a partir de los cuales quedan identificados los días con brisas para descartarlos de los días en los que el viento reinante no se corresponde genuinamente con el fenómeno. Sin renunciar a la aplicación combinada de filtros de validación alternativos (nubosidad, horas de insolación, aumento de la humedad relativa, duración del flujo marino), la mayoría de autores destaca como criterio selectivo fundamental el cambio rápido en la dirección y la velocidad del viento en superficie, relacionado con el inicio de la brisa marina (Banfield, 1991; Furberg et al., 2002; Azorin-Molina y Chen, 2009, entre otros). Este cambio se produce en algún momento de la mañana, cuando la diferencia entre la temperatura de la tierra y la del mar (ΔT) es positiva.

Además, hay un requisito atmosférico primordial para que se active un sistema de brisas: las condiciones regionales sinópticas deben ser estables, por lo que debe haber un gradiente de presión débil a nivel de superficie (Steyn y Faulkner, 1986; Gustavsson et al., 1995; Borne et al., 1998). En cualquier caso, la identificación de los días de brisa es enormemente dependiente de las diferencias en los criterios de selección que se aplican, pero también de los objetivos del estudio acometido, de la estructura de los datos disponibles, de la definición que el investigador hace de tales episodios, y de las características topográficas de cada localización estudiada.

En el caso del presente trabajo se ha adoptado un método simple de filtrado condicional (Borne et al., 1998; Azorin-Molina et al., 2011; Furberg et al., 2002; Steele et al., 2015), que reduce a dos los filtros de validación: 1) un cambio o reversión diurna y nocturna de la dirección del viento en superficie, acompañado de un período de viento de dirección predominante en cada zona examinada; y 2) un cambio en la velocidad del viento en superficie entre los ciclos diurno y nocturno,

acompañado del establecimiento de un umbral de velocidad por debajo o por encima del cual operan las brisas de mar y las de tierra. Los métodos de filtrado como este tienen la ventaja de identificar con poca ambigüedad los días de brisa marina, aunque puedan producir climatologías que subestimen su frecuencia (Steele *et al.*, 2015).

En la elección de los dos criterios expuestos se ha tenido en cuenta que éstos se encuentran determinados por la disponibilidad de datos meteorológicos con registros horarios de dirección y velocidad del viento. En nuestro caso, estos datos provienen del conjunto de datos REDMAR, procedentes de la Red de Mareógrafos portuarios de la entidad española Puertos del Estado (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España) (Figura 4). Para la identificación estadística de las brisas de la bahía de Palma se han utilizado datos meteorológicos registrados cada hora en el mareógrafo instalado en el puerto comercial de Palma, en el interior de la bahía homónima (Mareógrafo de Palma de Mallorca, 3851, 39.56° Lat. N y 2.64 Long. E). Para el caso de la bahía de Alcúdia se han utilizado los datos del mareógrafo instalado en el muelle de carga del puerto homónimo (Mareógrafo de Alcúdia, 3853, 39.83° Lat. N y 3.14 Long. E).

Figura 4. Distribución espacial en Mallorca de los dos mareógrafos terrestres de Palma y Alcúdia (red REDMAR), la boya de aguas profundas de Dragonera (red REDEXT) y los puntos de datos simulados de la red SIMAR.



Fuente: <https://www.puertos.es>

La identificación de los días con brisa se ha realizado manualmente a partir de la revisión visual de los registros horarios de dirección y velocidad del viento, partiendo de la experiencia y el conocimiento empírico de las características del fenómeno en cada una de las bahías. Esta revisión

ha permitido disponer de una base de datos de los días con brisa entre el 1 de enero de 2016 y el 31 de diciembre de 2022, es decir un periodo de análisis de 7 años.

Las tablas de datos han sido debidamente depuradas para eliminar los registros con lagunas de diferente tipo. Para el caso de la bahía de Palma, de los 2.557 días de que consta el periodo completo analizado, han sido computados 2.493 (el 97,5%). Se han desechado, por tanto, 64 días, en 41 de los cuales falta la totalidad de datos horarios, y en 23 faltan los datos de dirección o intensidad del viento a las 13 UTC. Esta es la hora utilizada como referencia principal para identificar episodios de brisas marinas durante el ciclo diurno, pues coincide con el momento en el que, según Azorin-Molina *et al.* (2007) o Alomar-Garau y Grimalt-Gelabert (2022), las brisas marinas de ambas bahías aparecen mejor desarrolladas. Para el caso de Alcúdia han sido computados 2.522 días (el 98,6%) de los 2.557 de que consta el periodo de análisis. No han sido computados, por tanto, 35 días, unas veces (23 días) porque falta el registro horario de los datos de velocidad e intensidad del viento, y otras veces (12 días) porque faltan estos datos a las 13 UTC.

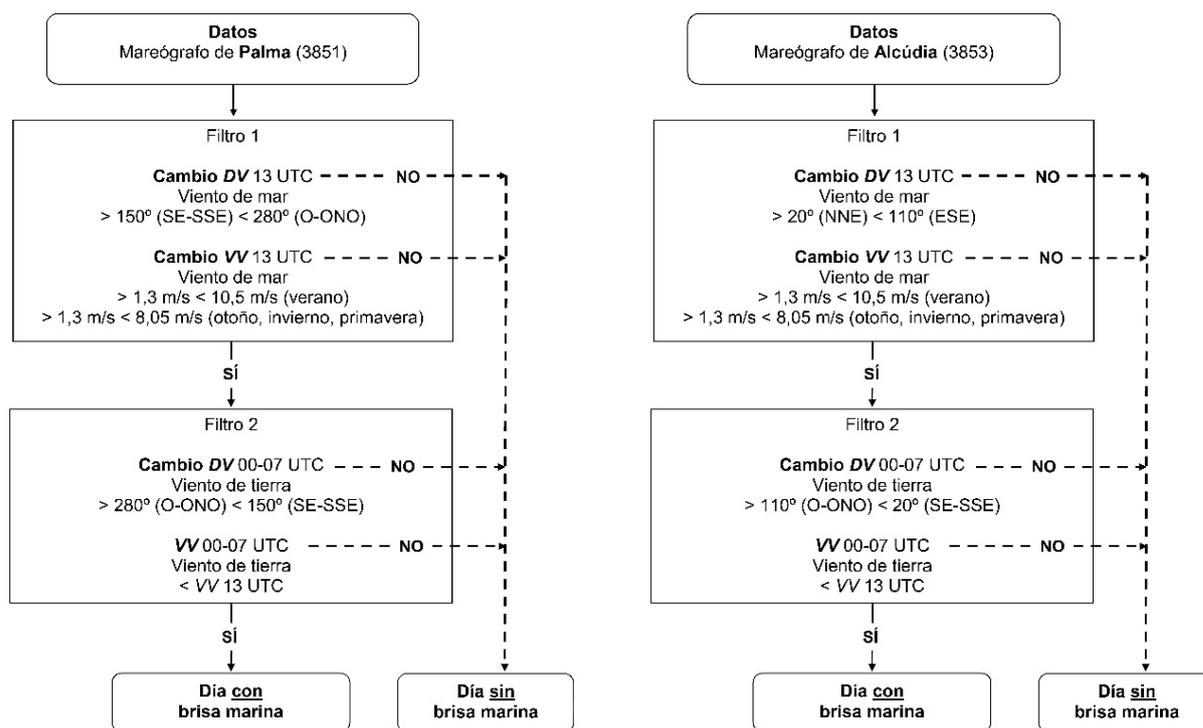
El análisis de los registros horarios de dirección y velocidad del viento parte de la presunción según la cual el inicio de la brisa de mar se detecta y se caracteriza esencialmente por un relativamente rápido cambio en los valores de estas dos variables, pasando de una situación de calma o débil flujo de tierra, a otra de flujo moderado de mar. Este enfoque es parecido al utilizado por Borne *et al.* (1998) para seleccionar los días en los que es posible asegurar el establecimiento de una típica circulación de brisas marinas. También hay que considerar que la orientación de la línea de costa define los ejes centrales de las brisas marinas y terrestres (Gustavsson *et al.* 1995; Furberg *et al.* 2002). De esta manera, en Mallorca, las brisas de mar deberían soplar del NE en la bahía de Alcúdia, guardando la perpendicularidad a su costa central, mientras que las de la bahía de Palma deberían soplar del SO. Esta regla general puede quedar parcialmente alterada por los accidentes topográficos locales y por la misma línea litoral (Miao *et al.*, 2003).

La Figura 5 muestra dos diagramas de flujo de los filtros aplicados para identificar días de brisa marina en las bahías de Palma y Alcúdia, a partir de la revisión manual de los datos de viento de los respectivos mareógrafos portuarios. Para el caso de Palma, si no hay viento en calma, su dirección durante la noche y a primera hora de la mañana (entre las 00 y 07 UTC) debe situarse fuera del rango de direcciones entre los 150° (SE-SSE) y 280° (O-ONO), es decir que debe ser viento terral. La velocidad debe ser inferior al máximo de velocidad registrado durante el ciclo diurno. A partir de las 07 UTC y a lo largo de la mañana, debe producirse una reversión de la dirección del viento, hasta situarse, a las 13 UTC, entre los 150° y los 280°, es decir el rango de direcciones que en esta bahía se corresponde con brisas perpendiculares a la costa. La velocidad debe haberse incrementado hasta situarse, también a las 13 UTC, entre 1,3 y 10,5 m/s en verano, y entre 1,3 y 8,05 m/s el resto del año (otoño, invierno y primavera). A lo largo de la tarde, la velocidad debe ir disminuyendo, y en algún momento de la noche se produce una nueva reversión de la dirección del viento, que vuelve a ser terral durante el periodo nocturno, efecto que pronostica un nuevo episodio de brisas de mar al día siguiente.

Para la bahía de Alcudia, entre las 00 y 07 UTC el viento debe estar en calma o ser débil, y su dirección debe estar fuera del rango entre los 20° (NNE) y los 110° (ESE), es decir viento terral en esta bahía. Su velocidad debe ser inferior al máximo de velocidad registrado durante el ciclo diurno precedente. A partir de las 07 UTC y a lo largo de la mañana, debe producirse una reversión de la dirección del viento, hasta situarse, a las 13 UTC, entre los 20° y 110°. Este rango direccional, siendo en parte de componente NE y por tanto perpendicular a la costa, se ha estirado

hasta los 110° debido a la localización del mareógrafo de Alcúdia en un extremo occidental de la bahía, donde las brisas del NE rolan hasta soplar del ESE, que es perpendicular a la costa en este emplazamiento. La velocidad del viento debe haberse incrementado hasta situarse, a las 13 UTC, entre 1,3 y 10,5 m/s en verano, y entre 1,3 y 8,05 m/s en otoño, invierno y primavera. A lo largo de la tarde, este rango de velocidades debe ir disminuyendo, y en algún momento de la noche debe producirse una nueva reversión de la dirección del viento, que pasa a ser terral durante el periodo nocturno.

Figura 5. Diagramas de flujo de los filtros aplicados a la identificación de días de brisa en las bahías de Palma y Alcúdia. DV indica "Dirección del viento", y VV indica "Velocidad del viento".



Fuente: Elaboración propia.

4.2. Validación adicional de las brisas diurnas de la bahía de Palma

Al ya descrito criterio combinado del cambio diurno de la dirección del viento y el incremento de su velocidad, se ha sumado la comparación entre estas dos variables tal como se presentan dentro del campo de acción de las brisas en el interior de la bahía de Palma, y fuera de ella, es decir en mar abierto. Allí, el viento está hipotéticamente en calma, o bien adopta unos valores de dirección y velocidad que pertenecen a la escala sinóptica y no a la local. Este análisis comparativo es útil para confirmar la hipótesis de que el *fetch* de la brisa de mar –o la célula de circulación de la brisa cuando se expande horizontalmente no sólo hacia el interior terrestre sino también mar adentro– se limita a un área más o menos definida.

El límite del alcance de la brisa mar adentro puede identificarse mediante un cambio de parámetros meteorológicos tales como la dirección y la velocidad del viento (Finkele et al., 1995). Para el caso del presente trabajo, el campo marítimo de acción de la brisa marina en el interior de la bahía de Palma y del viento sinóptico fuera de ella, ha sido comparado, respectivamente, a partir

de los datos de viento de los sensores meteorológicos del mareógrafo de Palma de Mallorca –bahía de Palma– y de los sensores de la boya de Dragonera. Esta boya (39.56° Lat. N, 2.10° Long. E) forma parte de la Red de Boyas de Aguas Profundas (Red Exterior o REDEXT, fondeadas lejos de la costa, de manera que los datos de viento de la boya reproducen las condiciones atmosféricas no perturbadas por efectos locales tales como los de las brisas. Dicho de otra manera, mientras que los parámetros de dirección y velocidad del viento de la boya de Dragonera reproducen la situación imperante a escala sinóptica, estos mismos parámetros, recogidos por el mareógrafo portuario situado en el fondo de la bahía de Palma, reproducen la acción de la brisa marina operando localmente en su interior.

Para validar los episodios de brisa marina formados en esta bahía se parte de la presunción según la cual la brisa sopla sobre un área marina adyacente a la costa y en dirección a ella. Esta área es más o menos extensa y constituye el área de la corriente gravitatoria de brisa marina (SBG), es decir el flujo hacia tierra de aire marino frío y húmedo en el brazo horizontal inferior de la circulación de la brisa (SBC). Fuera del campo marítimo de esa corriente, el viento puede soplar en cualquier dirección o estar en calma. De esta manera, si la dirección del viento en la boya de Dragonera es diferente de la dirección de las brisas que soplan en la bahía de Palma, puede confirmarse la autonomía de éstas respecto de las condiciones de viento reinantes a escala sinóptica, lo que se traduce en un carácter efectivo y genuino de las brisas. Al mismo tiempo, si fuera del campo de acción marítima de las brisas el viento sopla en su misma dirección, su velocidad debe ser inferior a la de la brisa marina soplando en el interior de la bahía, ya que a medida que esta corriente se acerca a la costa, aumenta su velocidad. Igualmente, si la dirección del viento coincide en ambos escenarios, pero la velocidad es mayor en la boya de Dragonera, se deduce que el viento en la bahía es de tipo sinóptico. En conjunto, durante la mañana la brisa avanza progresivamente desde la costa hacia el interior, y a lo largo de la tarde va cesando primero en el interior y luego en la costa.

4.3. *Campo de viento de la brisa marina a partir de datos modelizados de la serie SIMAR*

El conjunto de datos SIMAR, suministrado por Puertos del Estado, está formado por series temporales de parámetros de viento y oleaje procedentes de modelado numérico, es decir inferidos a partir de modelos numéricos de oleaje, viento y nivel del mar. Son, por tanto, datos simulados que no proceden de medidas directas de tales parámetros. Los datos se generan mediante un proceso de *hindcast*, o técnica que permite simular condiciones meteorológicas para reconstruir datos de viento y oleaje en momentos específicos del pasado. En los alrededores de Mallorca, un conjunto formado por más de 50 nodos SIMAR (Figura 4) permite representar el campo de viento marítimo de la isla. Esta representación puede servir como método visual para comprobar la extensión espacial de las brisas marinas sobre la superficie del mar, y al mismo tiempo examinar la efectividad del fenómeno dentro del campo de acción de las bahías de Palma y Alcúdia.

Esto se ha ensayado para los casos de la bahía de Palma y la de Alcúdia, y para episodios de brisa representativos correspondientes al 15 y el 31 de agosto de 2022 (Palma), y al 6 de junio y 10 de julio de 2022 (Alcúdia). Los datos de dirección y velocidad del viento de los puntos SIMAR han sido interpolados manualmente para hallar otros puntos de datos, con los cuales se han creado sendas imágenes del campo de viento dentro y fuera de las bahías.

5. Resultados y discusión

La identificación estadística de las brisas marinas de Mallorca cuenta con trabajos en los que el análisis se ha realizado a partir de datos meteorológicos procedentes de estaciones automáticas terrestres pertenecientes a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) o a la red del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SiAR) (Grau *et al.*, 2021; Alomar-Garau y Grimalt-Gelabert, 2022, entre otros). En el presente trabajo se han utilizado dos diferentes fuentes de datos de Puertos del Estado –REDMAR y REDEXT– para identificar y validar días con brisas marinas operando en las dos principales bahías de la isla, Palma y Alcúdia. Tres estaciones meteorológicas instaladas respectivamente en dos mareógrafos y en una boya han sido seleccionadas por su ubicación estratégica y por su capacidad para proporcionar datos fiables y precisos de dirección e intensidad del viento. Estos dos parámetros han servido para crear manualmente un algoritmo de identificación de días de brisa marina a partir de un método de filtrado condicional, para el periodo 2016-2022. Ya que esta identificación depende de las características de cada área de estudio (fundamentalmente, la orientación de la línea de costa), así como de la estructura de los datos, el método propuesto de la revisión manual de los registros de dirección y velocidad del viento se ha considerado el más apropiado, en tanto que permite crear un algoritmo de identificación de días de brisa adaptado a la experiencia y el conocimiento empírico de las características distintivas de la brisa marina en cada una de las bahías.

Por lo que se refiere a la identificación de días con brisas marinas a partir de los datos de viento de los mareógrafos de la red REDMAR, el método aplicado arroja los siguientes resultados (Tabla 1). En Palma, el 53,2 % de los días analizados son días con brisas (1.327 días de un total de 2.493). En verano (junio, julio y agosto), este porcentaje se eleva sustancialmente hasta el 76,4 % del total estival. En otoño, invierno y primavera los días con brisa se reducen hasta el 41,7 %, cifra que, aunque es la menor estacionalmente, demuestra que no se trata de un fenómeno exclusivo de la estación estival. En la bahía del Alcúdia, los días con episodios de brisa suponen el 39,4 % del total analizado (994 días de un total de 2.522). En verano, la cifra se eleva hasta 55,3 %, mientras que en otoño, invierno y primavera es del 31,4 %.

Tabla 1. Resumen estadístico de los días con y sin brisas en las bahías de Palma y Alcúdia para el periodo de análisis 2016-2022.

		Días del periodo 2016-2022	Días examinados	Días con brisa marina (filtrado condicional)	Días con brisa marina (filtrado condicional) (%)
Bahía de Palma	Otoño, Invierno, Primavera	1.703	1.667	696	41,7
	Verano	854	826	631	76,4
	Total	2.557	2.493	1.327	
Bahía de Alcúdia	Otoño, Invierno, Primavera	1.703	1.674	525	31,4
	Verano	854	848	469	55,3
	Total	2.557	2.522	994	

Fuente: Datos de la red de mareógrafos REDMAR (Puertos del Estado).

El hecho de que en Palma la frecuencia de días con brisa sea más alta que en Alcúdia, puede estar relacionado con la amplitud del rango de direcciones posibles de las brisas que se ha establecido para ambas bahías. En la de Palma el rango es de 130° (280° - 150°), mientras en la de Alcúdia es de 90° (110° - 20°), de manera que la probabilidad de episodios de brisa aumenta a medida que

se amplía el rango de direcciones posibles desde las cuales operan las brisas de cada bahía. En cualquier caso, el hecho de que más de la mitad de los días con viento en Palma, y más de un tercio en Alcúdia, se atribuyan a la formación de brisas, demuestra hasta qué punto este fenómeno caracteriza el régimen aéreo de la isla a lo largo de año, y hasta qué punto condiciona su régimen climático de vientos.

Por lo que se refiere a la validación adicional de los episodios de brisas mediante la comparación de su comportamiento espacial dentro y fuera de las bahías, esta validación se ha ensayado para el caso de la bahía de Palma, ya que para hacerlo se cuenta con datos de dirección y velocidad del viento procedentes de una boya de la Red de Boyas Exteriores REDEXT, situada en las inmediaciones de la isla Dragonera. La de Dragonera forma parte de la red de boyas oceanográficas fondeadas a profundidades entre 200 y 1.000 m en aguas abiertas en todo el litoral español, y que proporcionan datos horarios de oleaje, viento, corrientes, temperatura del agua y del aire, presión atmosférica y salinidad. Los datos de esta boya reproducen el viento imperante a escala sinóptica, de manera que el viento que opere en el interior de la bahía, si es de componente SO, corresponde a un episodio genuino de brisas diurnas sólo si fuera de esta bahía, mar adentro, la dirección e intensidad del viento son diferentes de las que se consignan en el interior de aquella.

El análisis arroja unos resultados positivos (Tabla 2), según los cuales, en verano, el 93,9 % de los episodios de brisa identificados en la bahía de Palma mediante el método del filtrado condicional (583 episodios de un total de 621), operan de manera autónoma e independiente de las condiciones del viento imperantes mar adentro, es decir fuera del campo de acción de la brisa. En las estaciones de otoño, invierno y primavera, un 83,3 % de los episodios de brisa consignados (580 episodios de un total de 696) son brisas genuinas. Estas cifras muestran, por una parte, la capacidad de la circulación de brisas para formarse y organizarse como un sistema local y autónomo dentro de la situación sinóptica en condiciones de estabilidad atmosférica; por otra parte, avalan la fiabilidad del filtrado condicional utilizado, basado en dos únicas pero decisivas variables: dirección y velocidad del viento.

Tabla 2. Resumen estadístico de los días con brisa diurna en la bahía de Palma identificados mediante el método de filtrado condicional, validados mediante el método de comparación con los datos de dirección y velocidad del viento en la boya de Dragonera (2016-2022).

	Días con brisa marina. Filtrado condicional. Datos del mareógrafo de Palma (REDMAR)	Días con brisa marina (%). Filtrado condicional. Datos del mareógrafo de Palma (REDMAR)	Días con brisa marina genuina. Validación con datos de viento de la boya de Dragonera (REDEXT)	Días con brisa marina genuina (%). Validación con datos de viento de la boya de Dragonera (REDEXT)
Otoño, Invierno, Primavera	696	41,7	580	83,3
Verano	621	76,4	583	93,9
Total	1.327			

Fuente: Datos de la red de mareógrafos portuarios REDMAR y la red de boyas de aguas profundas REDEXT (Puertos del Estado).

El análisis manual de los datos para detectar el consabido cambio rápido y simultáneo en la dirección del viento (de un flujo de tierra a otro de mar) y su velocidad ($> 1,3$ m/s, 4,7 kph), es prioritario y fundamental en el sentido de que este cambio atestigua, teóricamente, que las condiciones regionales sinópticas son estables y que la diferencia de temperatura tierra-mar es positiva. Esto no significa que un episodio de brisa pueda verse interferido por factores sinópticos o mesoescales, provocando un retraso en la hora de inicio, ligeras variaciones en la dirección del viento, el

refuerzo de su velocidad o un flujo sinóptico sobrevenido acoplado al mismo sector de dirección de la brisa marina (Azorin-Molina y Martin-Vide, 2007). Sin embargo, el criterio principal es reconocer un episodio de brisa marina como la ocurrencia de una clara inversión de la dirección del viento en superficie y un incremento de su velocidad al inicio de la brisa, no atribuidos a una circulación de escala sinóptica.

En el caso del presente trabajo, el uso de un método manual como el descrito para identificar días de brisa marina no es nuevo en el ámbito español, ni aún en el del Mediterráneo. Entre muchos otros, ha sido ensayado por Redaño *et al.* (1991) para el litoral de la ciudad de Barcelona, por Furberg *et al.* (2002) para 12 estaciones costeras de la isla de Cerdeña, o por Azorin-Molina *et al.* (2011) para la bahía de Alicante. En este último estudio, sus autores recuerdan que los datos de velocidad y dirección del viento en superficie son las variables meteorológicas más importantes para distinguir episodios de brisa marina, y comprueban la importancia de privilegiar el condicionante del cambio en la dirección y la velocidad del viento –de vientos en calma o flujos débiles de tierra a vientos moderados de mar–. Los resultados obtenidos por Azorin-Molina *et al.* (2011) para la bahía de Alicante no pueden compararse con los del presente trabajo para las bahías de Palma y Alcúdia, pues los métodos de selección de días de brisa difieren tanto en el periodo analizado –6 años en el caso de Alicante y 7 en el de Mallorca– como en las fuentes de datos, así como en el número de filtros utilizados –2 para el caso de Mallorca, y entre 6 o 10 para Alicante, según se trata de un método manual o automatizado–.

En cualquier caso, los resultados obtenidos en el presente trabajo –el 53,2% y el 39,4% de los días analizados para un periodo de 7 años son, respectivamente, días con brisas marinas en Palma y Alcúdia–, son coherentes con los resultados obtenidos por Bedoya-Valestt *et al.* (2023) en un estudio que cuantifica los días potenciales de brisa marina en 16 localidades del Este de España, durante el periodo 1961-2019 (58 años): a nivel de la región entera, un 43,4% de los días del periodo son días de brisa; a nivel costero, en la región de las Baleares (aeropuertos de Palma, Menorca e Ibiza, y puerto de Palma) los días de brisa suponen el 39,2% del periodo, mientras que a nivel de estación meteorológica, en la del puerto de Palma suponen el 33,7% del periodo. Resultados como estos ponen de manifiesto que las circulaciones de brisas dominan la circulación local de las regiones costeras mediterráneas y juegan un papel importante en el clima local.

Como ejemplo de comparación entre el campo de viento en el interior de la bahía de Palma y fuera de ella, mar adentro, la Tabla 3 muestra, respectivamente, la dirección y velocidad del viento a las 13 UTC en el mareógrafo de Palma de Mallorca (REDMAR) y en la boya de Dragonera (RE-DEXT), para los días 15 y 31 de agosto de 2022. En ambas fechas se confirman sendos episodios de brisa marina en la bahía, pues a las 13 UTC la dirección del viento es del SO, perpendicular a la costa, y su velocidad se ha incrementado sustancialmente en relación con la de la noche anterior (00 UTC) y el comienzo del día (07 UTC). La reversión diurna del viento a las 13 UTC respecto de la dirección de la noche anterior (terral), revela la formación de una circulación de brisa marina (SBC) en respuesta a la fuerza del gradiente de presión (PFG) causada por el contraste de temperatura entre el mar y tierra a mediodía. Los datos de la boya de Dragonera muestran un campo de viento que en mar abierto difiere del mismo campo en el interior de bahía. En el momento de máximo desarrollo de la brisa marina –13 UTC–, ésta se individualiza en la bahía de Palma respecto del viento sinóptico de superficie en los alrededores de la isla de Dragonera.

Tabla 3. Aplicación del filtrado condicional de selección de días de brisa marina en la bahía de Palma (mareógrafo de Palma de Mallorca), y comparación con los parámetros de dirección (°) y velocidad (m/s) del viento en la boya de Dragonera, para los días 15 y 31 de agosto de 2022.

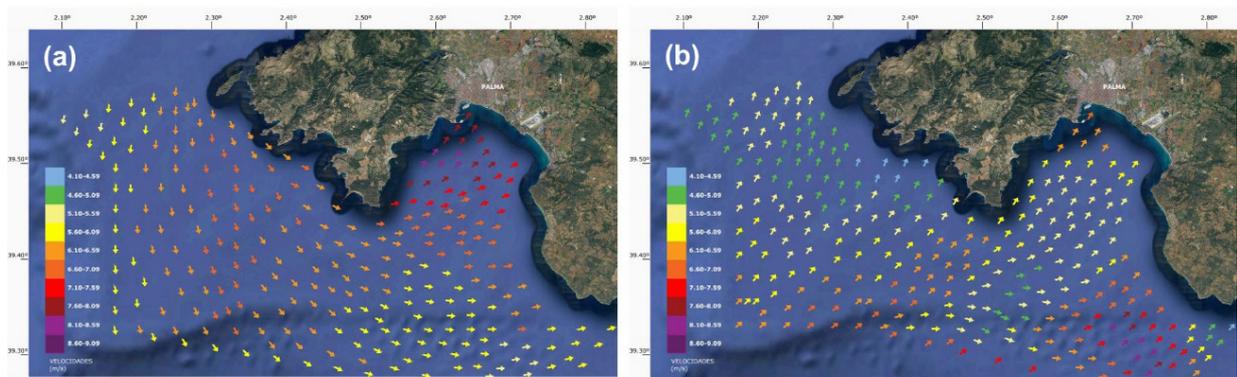
	Fecha	Dir. 00 UTC	Vel. 00 UTC	Dir. 07 UTC	Vel. 07 UTC	Dir. 13 UTC	Vel. 13 UTC	Dir. 18 UTC	Vel. 18 UTC	Brisa Marina
Mareógrafo de Palma (REDMAR)	15/08/2022	353 (N)	1,80	125 (ESE)	3,80	225 (SO)	6,10	75 (ENE)	5,00	✓
	31/08/2022	104 (ESE)	2,60	234 (SO)	3,50	218 (SO)	7,10	220 (SO)	2,50	✓
Boya de Dragonera (REDEXT)	15/08/2022	165 (SSE)	3,04	75 (ENE)	2,57	2 (N)	4,45	47 (NE)	3,98	
	31/08/2022	81 (E)	3,51	255 (OSO)	7,26	188 (S)	5,15	157 (SSE)	3,98	

Las diferencias de los campos de viento en el interior de la bahía de Palma y fuera de ella, así como el alcance de la brisa mar adentro, pueden representarse cartográficamente a partir de datos modelizados de la serie de puntos SIMAR. En trabajos como los de Ramos et al. (2021) o Rodríguez-Santalla et al. (2021), este tipo de datos ha servido para caracterizar regímenes de viento de puntos específicos del territorio –los propios nodos SIMAR– a partir de rosas de viento, y en general para el estudio del clima marítimo y la dinámica litoral.

Para el presente trabajo se ha tomado un conjunto de nodos SIMAR localizados en el interior y el exterior de las bahías de Palma y de Alcúdia, interpolándolos para examinar visualmente los campos de viento de ambas regiones a mediodía –13 UTC–. La imagen de la Figura 6a corresponde al campo de viento del 15 de agosto de 2022 en la bahía de Palma y alrededores, con un típico flujo del SO en el interior de la bahía, y velocidades que alcanzan 6 m/s o más (fuerza 4 en la escala Beaufort). Fuera de ella, el flujo es del N en la isla de Dragonera y del E en el cabo de Regana, con menores velocidades. Esto descubre la autonomía de la circulación de brisas marinas respecto del viento reinante en mar abierto. El campo de acción de la brisa tiene su comienzo en la boca de la bahía y alcanza el fondo de la misma. Es relevante que en la bahía de Palma, como también en la de Alcúdia, la línea exterior entre las puntas actúa como si fuese la línea de costa del fondo de la bahía, de manera que la bahía entera se comporta como si fuese tierra (Jansà y Ramis, 1990).

La imagen de la Figura 6b corresponde al campo de viento del 31 de agosto de 2022 en la bahía de Palma y alrededores, a las 13 UTC. Los datos de viento en superficie de los nodos SIMAR dibujan una circulación de brisas marinas formada en la misma bahía. En este caso, la típica dirección del SO se repite en mar abierto. La velocidad del viento es menor en la entrada de la bahía que en su fondo, pero se refuerza ligeramente a medida que se acerca a la costa. Mar adentro, hay zonas donde la velocidad es superior a la de la brisa que opera en el interior de la bahía. El conjunto apoya la idea de una circulación de brisas acoplada al viento imperante en la escala sinóptica, en que el flujo sinóptico soplando en la misma dirección que la de la brisa acrecienta la penetración del frente de brisa tierra adentro, según se desprende de estudios como los de Azorin-Molina y Chen (2009) o Gahmberg et al. (2010).

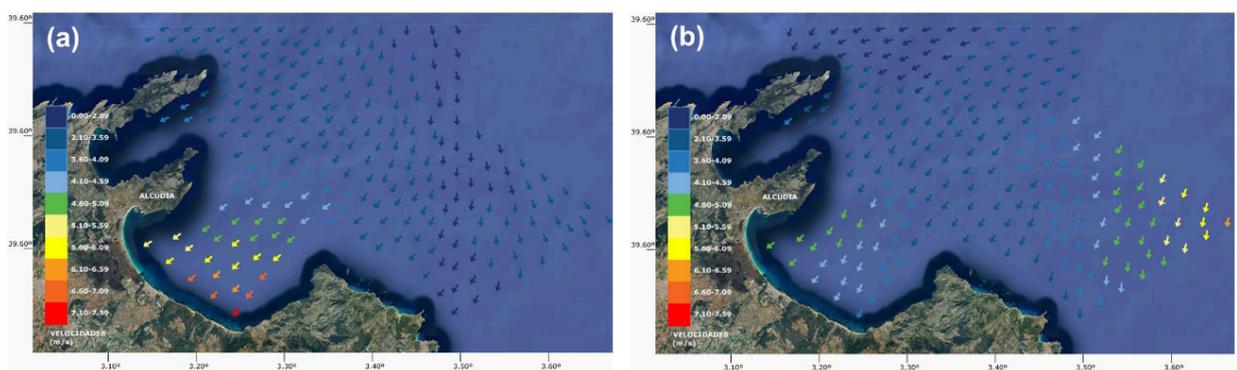
Figura 6. Puntos SIMAR representando el campo de viento (dirección y velocidad) a las 13 UTC del 15 de agosto (a) y del 31 de agosto (b) de 2022, entre la isla Dragonera y la bahía de Palma.



Fuente: Elaboración manual a partir de datos de puntos SIMAR (Puertos del Estado)

En el caso de Alcúdia, los datos de viento de los nodos SIMAR correspondientes a las 13 UTC de los días 6 de junio y 10 de julio de 2022, se han utilizado para representar cartográficamente los respectivos campos de viento en el interior de la bahía y fuera de ella. El escenario del día 6 de junio (Figura 7a) atestigua la atracción que ejerce esta bahía, capturando hacia su interior el flujo de aire marítimo y encauzando su desplazamiento para moverlo tierra adentro, empujado por el efecto de succión que provocan las bajas presiones térmicas formadas en el interior de la isla. En la misma bahía el viento se acelera a medida que se acerca a la costa, y se acaba independizando del flujo que concurre en el corredor marino situado entre las islas de Mallorca y Menorca. En el caso del día 10 de julio de 2022 (Figura 7b) se observa un incremento similar de la velocidad del viento cuando deja el dominio del canal de Menorca y entra en el de la bahía de Alcúdia. La dirección del viento –nornordeste– es prácticamente coincidente en ambos dominios, pero la forma y orientación de la bahía refuerzan esta misma dirección y la consolidan como brisa.

Figura 7. Puntos SIMAR representando el campo de viento (dirección y velocidad) a las 13 UTC del 6 de junio (a) y del 10 de julio (b) de 2022, en la bahía de Alcúdia y exteriores.



Fuente: Elaboración manual a partir de datos de puntos SIMAR (Puertos del Estado).

6. Conclusiones

En el presente trabajo se han realizado diferentes ensayos conducentes a la identificación estadística y representación cartográfica de episodios de brisa marina característicos de dos grandes ba-

hías de la isla de Mallorca (Palma y Alcúdia), para un periodo de estudio de 7 años (2016-2022). La novedad de los ensayos se encuentra en que se han acometido a partir de valores de dirección y velocidad del viento obtenidos de tres fuentes de datos, todavía poco exploradas para caracterizar los vientos locales que operan en la región costera española, especialmente las brisas marinas: los mareógrafos portuarios de la red REDMAR, las boyas de aguas profundas de la red REDEXT y los datos de la serie temporal de puntos SIMAR localizados sobre la superficie del mar. El uso combinado de estas fuentes permite trabajar simultáneamente con datos de estaciones meteorológicas terrestres y marinas, así como con una cuadrícula de puntos de datos de viento y oleaje. La alta resolución espacial de esta cuadrícula permite dibujar campos de viento y examinar el comportamiento espacial de este importante parámetro meteorológico y climático en una determinada región de mar.

Los datos de viento de los mareógrafos portuarios de la red REDMAR, situados en puntos estratégicos del frente costero español, suministran una información horaria e histórica con la bondad suficiente para identificar episodios de brisas marinas y caracterizar su régimen. En el caso de Mallorca, las brisas de la bahía meridional de Palma resultan ser estadísticamente más frecuentes (53,2 % del total de los días examinados) que las de la bahía septentrional de Alcúdia (39,4 %), aunque el filtro de selección utilizado para esta última región, con un rango de direcciones del viento más limitado que el utilizado para Palma, seguramente ha subestimado los días de brisa que concurren en Alcúdia. Los resultados también confirman la extraordinaria aptitud de la estación estival para que se formen brisas marinas, pues en Palma suponen el 76,4 % del total de días de verano, y en Alcúdia el 55,3 %.

El análisis combinado de datos de viento procedentes de boyas de la red REDEXT y de los puntos SIMAR también ofrece un buen método de trabajo para representar gráficamente la acción del viento sobre la superficie del mar, y comparar su desigual comportamiento en mar abierto y en el interior de las bahías. En la de Palma, la brisa marina presenta una marcada orientación perpendicular a la línea de costa del fondo de la bahía, y su velocidad es mayor que la del viento sinóptico que impera en mar abierto. Esto ratifica la autonomía del sistema de brisas respecto de la situación sinóptica en condiciones de estabilidad atmosférica, aunque las brisas diurnas también pueden presentarse acopladas a la dirección del viento en la escala sinóptica, reforzándose en el fondo de la bahía.

Lo que en este trabajo se ha presentado como un ensayo metodológico, abre líneas de investigación futuras sobre los regímenes de viento de regiones litorales españolas, en las que se hace necesario contar con datos que permitan identificar episodios de brisas marinas y estudiarlos. Por su riqueza informativa, los datos modelizados de la serie SIMAR, junto con los de la red REDEXT, pueden utilizarse para crear representaciones sistematizadas de la dirección e intensidad del viento en áreas cercanas y alejadas de la costa, mientras que los datos obtenidos por las estaciones meteorológicas de los mareógrafos portuarios de la red REDMAR ayudan a ampliar los obtenidos por estaciones terrestres de organismos oficiales como la Agencia Española de Meteorología (AEMET), y analizarlos con vistas al estudio sistemático de las circulaciones de brisa marina. Estas circulaciones son de gran interés científico no solo porque afectan a aspectos esenciales como son las lluvias, la agricultura, el confort térmico humano o la calidad del aire, sino también por su interés añadido en el emergente campo de la implantación territorial de parques eólicos terrestres y marinos.

Bibliografía

- Alomar-Garau, G., & Grimalt-Gelabert, M. (2021). Air Photo Interpretation for Spatial Analysis of Heritage Agrarian Structures in Mediterranean Settings as Sea-Breezes Proxy-Data. Application to the Island of Mallorca. *Remote Sensing*, 13 (22), 4652. doi: 10.3390/rs13224652
- Alomar-Garau, G., & Grimalt-Gelabert, M. (2022). Impacts of Coastal Breezes on the Environment and Human Life: The Case of Mallorca (Western Mediterranean). *Coasts*, 2, 17-35. doi: 10.3390/coasts2010002
- Arritt R.W. (1993). Effects of the large-scale flow on characteristics features of the sea breeze. *J. Appl. Meteor.* 32, 116-125. doi: 10.1175/1520-0450(1993)032<0116:EOTLSF>2.0.CO;2
- Azorin-Molina, C., Guijarro, J.A., Baena-Calatrava, R., & Jansà, A. (2007). "Sea breeze convergence and convective cloud frequencies from AVHRR data over the isle of Mallorca". En *7th EMS Annual Meeting/8th European Conference on Applications of Meteorology*. San Lorenzo del Escorial, 1-5 de octubre de 2007. Recuperado de <https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/11889>
- Azorin-Molina, C., & Martin-Vide, J. (2007). Methodological approach to the study of the daily persistence of the sea breeze in Alicante (Spain). *Atmósfera*, 20(1), 57-81.
- Azorin-Molina, C., & Chen, D. (2009). A climatological study of the influence of synoptic-scale flows on sea breeze evolution in the Bay of Alicante (Spain). *Theor. Appl. Climatol.*, 96, 249-260. doi: 10.1007/s00704-008-0028-2
- Azorin-Molina, C., Connell, B.H., & Baena-Calatrava, R. (2009). Sea-Breeze Convergence Zones from AVHRR over the Iberian Mediterranean Area and the Isle of Mallorca, Spain. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 48, 2069-2085. doi: 10.1175/2009JAMC2141.1
- Azorin-Molina, C., Chen, D., Tijm, S., & Baldi, M. (2011). A multi-year study of sea breezes in a Mediterranean coastal site: Alicante (Spain). *Int. J. Climatol.*, 31, 468-486. doi: 10.1002/joc.2064
- Baker, R.D., Lynn, B.H., Boone, A., Tao, W.K., & Simpson, J. (2001). The influence of soil moisture, coastline curvature, and land-breeze circulations on sea-breeze-initiated precipitation. *J. Hydrometeor.*, 2, 193-209. doi: 10.1175/1525-7541(2001)002<0193:TIOSMC>2.0.CO;2
- Banfield, C.E. (1991). The frequency and surface characteristics of sea breezes at St. Johns. Newfoundland. *Climatol. Bull.*, 25, 3-20.
- Bedoya-Valestt, S., Azorin-Molina, C., Gimeno, L. et al. (2023). Opposite trends of sea-breeze speeds and gusts in Eastern Spain, 1961–2019. *Clim. Dyn.*, 60, 2847-2869. doi: 10.1007/s00382-022-06473-0
- Borne, K., Chen, D., & Núñez, M. (1998). A method for finding sea breeze days under stable synoptic conditions and its application to the swedish west coast. *Int. J. Climatol.*, 18, 901-914. doi: 10.1002/(SICI)1097-0088(19980630)18:8<901::AID-JOC295>3.0.CO;2-F
- Cladera, P. (2019). Convergència dels vents en superfície. El règim de brises a Menorca. *Revista de Menorca*, 98, 219-231.
- Estoque, M.A. (1962). The sea breeze as function of the prevailing synoptic situation. *J. Atmos. Sci.*, 19, 244-250. doi: 10.1175/1520-0469(1962)019<0244:TSBAAF>2.0.CO;2
- Finkele, K., Hacker, J.M., Kraus, H., & Byron-Scott, R.A.D. (1995). A complete sea-breeze circulation cell derived from aircraft observations. *Boundary-Layer Meteorol.*, 73, 299-317. doi: 10.1007/BF00711261
- Furberg, M., Steyn, D.G., & Baldi, M. (2002). The climatology of sea breezes on Sardinia. *Int J. Climatol.*, 22, 917-932. doi: 10.1002/joc.780
- Gahmberg, M., & Savijärvi, H., & Leskinen, M. (2010). The influence of synoptic scale flow on sea breeze induced surface winds and calm zones. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 62 (2), 209-217. doi: 10.1111/j.1600-0870.2009.00423.x
- Grau, A., Jiménez, M.A., & Cuxart, J. (2021). Statistical characterization of the sea-breeze physical mechanisms through in-situ and satellite observations. *Int. J. Climatol.*, 41, 17-30. doi: 10.1002/joc.6606
- Grossi, P., Thunis, P., Martilli, A., & Clappier, A. (2000). Effect of sea breeze on air pollution in the greater Athens area. Part II: Analysis of different emission scenarios. *J. Appl. Meteor.*, 39, 563-575. doi: 10.1175/1520-0450(2000)039,0563:EOSBOA.2.0.CO;2
- Guijarro, J.A., & Heredia, M.A. (2004). Climatología de descargas eléctricas nube-tierra en las Islas Baleares. *Rev. Climatol.*, 4, 9-19.
- Gustavsson, T., Lindqvist, S., Borne, K., & Bogren, J. (1995). A study of sea and land breezes in an archipelago on the west coast of Sweden. *Int. J. Climatol.*, 15, 785-800. doi: 10.1002/joc.3370150706

- Jansà, J.M. (1933). *Contribución al estudio de la Tramontana en Menorca*. Serie A, 3. Servicio Meteorológico Español, Madrid.
- Jansà, A. (1980). El clima de las Baleares. Mediterraneidad e insularidad. *Treballs de Geografia*, 39, 39-43.
- Jansà, J.M., & Jaume, E. (1946). El régimen de brisas en la isla de Mallorca. *Revista de Geofísica*, IV, 19, 304-328.
- Jansà, A., & Ramis, C. (1990). "Simulación numérica de la brisa en Mallorca". En *II Simposio Nacional de Predicción del INM* (pp. 229-242). Madrid, Instituto Nacional de Meteorología.
- Katsoulis, B.D., Makrogiannis, T.J., & Goutsidou, Y.A. (1998). Monthly Anticyclonicity in Southern Europe and the Mediterranean Region. *Theor. Appl. Climatol.*, 59, 51-59. doi: 10.1007/s007040050012
- Klara, F. (1998). Inland and offshore propagation speeds of sea breeze from simulations and measurements. *Boundary Layer Meteorol.*, 87, 307-329. doi: 10.1023/A:1001083913327
- Liu, H., Chan, J.C.L., & Cheng, A.Y.S. (2001). Internal boundary layer structure under sea-breeze conditions in Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 35 (4), 683-692. doi: 10.1016/S1352-2310(00)00335-6
- Mahrer, Y., & Pielke, R.A. (1977). The Effects of Topography on Sea and Land Breezes in a Two-Dimensional Numerical Model. *Mon. Wea. Rev.*, 105, 1151-1162. doi: 10.1175/1520-0493(1977)105<1151:TEOTOS>2.0.CO;2
- Martín-Vide, J.; Olcina-Cantos, J. (2001). *Climas y tiempos de España*. Madrid, España: Alianza Editorial.
- Martínez-Ibarra, E., Gómez-Martín, M.B., Armesto-López, X.A., & Pardo-Martínez, R. (2019). Climate Preferences for Tourism: Perceptions Regarding Ideal and Unfavourable Conditions for Hiking in Spain. *Atmosphere*, 10 (11), 646. doi: 10.3390/atmos10110646
- Mazon, J., Rojas, J.L., Jou, J., Valle, A., Olmeda, D., & Sanchez, C. (2015). An assessment of the sea breeze energy potential using small wind turbines in peri-urban coastal areas. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 139, 1-7. doi: 10.1016/j.jweia.2015.01.002
- Miao, J-F, Kroon, L.J.M., Vilà-Guerau, J., & Holtslag, A.A.M. (2003). Impacts of topography and land degradation on the sea breeze over eastern Spain. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 84, 157-170. doi: 10.1007/s00703-002-0579-1
- Miller, S., Keim, B.D., Talbot, R.W., & Mao, H. (2003). Sea breeze: Structure, forecasting, and impacts. *Rev. Geophys.*, 41, 1011. doi: 10.1029/2003RG000124
- Miró-Granada, J. (1998). Josep, M. Jansà Guardiola. Notas biográficas. *Territoris*, 1, 17-45.
- Neumann, J., & Mahrer, Y. (1971). A Theoretical Study of the Land and Sea Breeze Circulation. *J. Atmos. Sci.*, 28, 532-542. doi: 10.1175/1520-0469(1971)028<0532:ATSOTL>2.0.CO;2
- Olcina Cantos, J., & Azorín Molina, C. (2004). Frentes de brisa en el Levante español. *Estudios Geográficos*, 65 (254), 61-100. doi: 10.3989/egeogr.2004.i254.192
- Orlandi, I. (1975). A Rational Subdivision of Scales for Atmospheric Processes. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 56(5), 527-530.
- Physick, W.L., & Byron-Scott, R.A. (1977). Observations of the sea breeze in the vicinity of a gulf. *Weather*, 32, 373-381. doi: 10.1002/j.1477-8696.1977.tb04481.x
- Ponce de León, S., & Orfila, A. (2013). Numerical study of the marine breeze around Mallorca Island. *Appl. Ocean Res.*, 40, 26-34. doi: 10.1016/j.apor.2012.12.003
- Ramis, C., Jansà, A., & Alonso, S. (1990). Sea breeze in Mallorca: A numerical study. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 42, 249-258. doi: 10.1007/BF01314828
- Ramis, C., & Romero, R. (1995). A first numerical simulation of the development and structure of the sea breeze on the island of Mallorca. *Ann. Geophys.*, 13, 981-994. doi: 10.1007/s00585-995-0981-3
- Ramos, J., Gomiz-Pascual, J.J., & Bruno, M. (2021). Analysis of wave and wind energy in the Cádiz gulf coast. *Proceedings of the 14th European Wave and Tidal Energy Conference 5-9th Sept 2021*, Plymouth, UK, pp. 2189-1-2189-10.
- Rodríguez-Santalla, I., Gomez-Ortiz, D., Martín-Crespo, T., Sánchez-García, M.J., Montoya-Montes, I., Martín-Velázquez, S., Barrio, F., Serra, J., Ramírez-Cuesta, J.M., & Gracia, F.J. (2021). Study and Evolution of the Dune Field of La Banya Spit in Ebro Delta (Spain) Using LiDAR Data and GPR. *Remote Sens.*, 13, 802. doi: 10.3390/rs13040802
- Simpson, J.E. (1994). *Sea Breeze and Local Wind*. New York, USA: Cambridge University Press.
- Steele, C. J., Dorling, S.R., von Glasow, R., & Bacon, J. (2015). Modelling sea-breeze climatologies and interactions on coasts in the southern North Sea: Implications for offshore wind energy, Q.J. *Roy. Meteor. Soc.*, 141, 1821-1835. doi: 10.1002/qj.2484

- Steyn, D.G., & Faulkner, D.A. (1986). The climatology of sea breezes in the lower Fraser Valley. *B. C. Climatol. Bull.*, 20, 21-39.

Agradecimientos

Aquí se especificará, de manera breve, el tipo de aportaciones que ha realizado cada autor durante la investigación y elaboración del trabajo.

Contribución de autorías

Aquí se especificará, de manera breve, el tipo de aportaciones que ha realizado cada autor durante la investigación y elaboración del trabajo.

Financiación

Aquí se especificarán las ayudas y financiación recibidas para la investigación y publicación del trabajo.

Conflicto de intereses

Los/as autores/as de este trabajo declaran que no existe ningún tipo de conflicto de intereses.