

## PROYECCIONES FUTURAS DE LOS PRECURSORES DE ONDAS DE MONTAÑA EN LA SIERRA DE GUADARRAMA UTILIZANDO MODELOS CLIMÁTICOS DE CMIP6

Javier DÍAZ-FERNÁNDEZ<sup>1,2</sup>, Carlos CALVO-SANCHO<sup>3</sup>, Pedro BOLGIANI<sup>1</sup>, José Ignacio FARRÁN<sup>2</sup>, María Yolanda LUNA<sup>3</sup> and María Luisa MARTÍN<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica. Facultad de Físicas. Universidad Complutense de Madrid. Madrid.*

<sup>2</sup>*Departamento de Matemática Aplicada. Facultad de Ingeniería Informática. Universidad de Valladolid. Segovia.*

<sup>3</sup>*Departamento de Desarrollo y Aplicaciones. Agencia Estatal de Meteorología. Madrid*

<sup>4</sup>*Instituto de Matemática Interdisciplinar (IMI). Universidad Complutense de Madrid. Madrid.*

[javidi04@ucm.es](mailto:javidi04@ucm.es)

### RESUMEN

Las ondas de montaña formadas a sotavento de los principales sistemas montañosos representan riesgos significativos para la aviación al inducir, en numerosas ocasiones, distintos grados de turbulencias y potencial engelamiento en las aeronaves. Aquí se analiza el impacto potencial del cambio climático global en las variables atmosféricas precursoras de la formación de episodios de ondas de montaña con nubosidad asociada en el Sistema Central de la Península Ibérica. Para ello, se evalúa la capacidad de varios Modelos Climáticos Globales (GCMs) del proyecto CMIP6 para predecir dichos entornos, utilizando los datos de reanálisis del ERA5 como referencia de validación.

El análisis se organiza en dos periodos: datos históricos (2001–2014) y proyecciones climáticas futuras bajo el escenario SSP5–8.5 (2015–2100). Los resultados obtenidos muestran variaciones y tendencias significativas en los entornos precursores de las nubes de onda de montaña al comparar ambos periodos. En particular, destaca la expansión futura del anticiclón de las Azores hacia la Península Ibérica, conllevando aumento de los vientos zonales en la región de estudio. No obstante, este incremento no parece ser suficiente para alterar sustancialmente la frecuencia de episodios futuros de nubes de onda de montaña. Los resultados obtenidos señalan además que el modelo climático EC-EARTH3 es el que presenta una mayor concordancia con el reanálisis ERA5.

**Palabras clave:** CMIP6, EC-EARTH3, ondas de montaña.

### ABSTRACT

Mountain waves generated on the leeward side of major mountain ranges represent substantial threats to aviation because they regularly induce varying degrees of turbulence and likely aircraft icing. Herein, the possible influence of global climate

change on atmospheric variables which preceded the development of mountain wave episodes and associated cloudiness in the Iberian Peninsula's Central System is analyzed. To this purpose, several Global Climate Models (GCMs) from the CMIP6 project are evaluated for their ability to anticipate such conditions, with ERA5 reanalysis data acting as a validation reference.

The analysis is separated into two time periods: historical data (2001–2014) and future climate forecasts under the SSP5-8.5 scenario (2015–2100). When comparing the two periods, results reveal significant differences and trends in the preceding environments of mountain lee wave clouds. The projected progression of the Azores anticyclone towards the Iberian Peninsula is particularly noteworthy, since it will result in greater zonal winds in the study region. However, this increase appears to be insufficient to make a significant difference the frequency of future mountain wave cloud events. The results also demonstrate that the EC-EARTH3 climate model has the best agreement with the ERA5 reanalysis.

**Key words:** CMIP6, EC-EARTH3, mountain lee waves

## 1. INTRODUCCIÓN

Las ondas de montaña tienen un impacto significativo en la seguridad aérea, ya que las turbulencias (producidas por cizalladura) y el engelamiento asociado a éstas son peligrosas para las aeronaves (Wallace y Hobbs, 2006; Bolgiani et al., 2018; European Union Aviation Safety Agency, 2022). Las ondas de montaña se forman cuando una masa de aire es forzada dinámicamente a ascender por las laderas de barlovento de una montaña, encontrándose con condiciones atmosféricas estables a sotavento y dando lugar a la formación de ondas a través de las fuerzas restauradoras de la gravedad y la flotabilidad (Lin, 2007). Las características de estas ondas dependen de varios factores, como la estabilidad atmosférica, la velocidad del viento y la altura de las montañas (Scorer, 1949; Díaz-Fernández et al., 2021). En condiciones favorables, estas ondas suelen ser visibles como bandas de nubes alternas debido al descenso de la temperatura y al aumento del contenido de agua líquida en las corrientes ascendentes (Smith et al., 2002; Bolgiani et al., 2018).

En este estudio se analizan los cambios futuros en las condiciones atmosféricas que conducen a eventos de ondas de montaña en un contexto de cambio climático sobre la sierra de Guadarrama (zona próxima al aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas). Cabe señalar que el objetivo de este trabajo no es identificar las ondas de montaña a través de los Modelos Climáticos Globales (MCG), ya que esto sería imposible debido a la restringida resolución horizontal de los MCG actuales. Díaz-Fernández et al. (2021, 2022) establecieron una metodología para analizar y simular varios episodios de ondas de montaña. A partir de sus estudios, se determinan tres variables atmosféricas básicas que intervienen en la formación de ondas de montaña con nubosidad asociada: velocidad y dirección del viento y humedad. A partir de varios MCG del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados, fase 6 (CMIP6), se evalúan estas variables, para identificar diferencias y/o tendencias entre episodios de ondas de montaña actuales y futuros.

## **2. DATOS Y METODOLOGÍA**

El presente estudio se basa en la metodología aplicada en Díaz-Fernández et al. (2021, 2022), quienes utilizaron un conjunto de datos observacionales de 68 ondas de montaña durante el invierno (noviembre a marzo) para realizar una caracterización de las condiciones asociadas a estas ondas cerca de la sierra de Guadarrama entre los años 2001 y 2014. Los primeros resultados se basaron en simulaciones de alta resolución con los modelos HARMONIE-AROME y WRF-ARW utilizando los datos del ERA5 como condiciones iniciales. El reanálisis ERA5 emplea una resolución de malla horizontal de 0,25°, una temporal de 6 horas y 137 niveles híbridos para la resolución vertical, cubriendo el periodo desde 1950 hasta el presente (Hersbach et al., 2020). Basándose en los resultados de Díaz-Fernández et al. (2021, 2022), y teniendo en cuenta la resolución y configuración del ERA5, este reanálisis puede considerarse un punto de referencia apropiado con el que poder comparar otros MCG cuando se simulan las condiciones precursoras de las ondas de montaña.

De acuerdo con los estudios de Díaz-Fernández et al. (2021, 2022), una configuración sinóptica será precursora de eventos de ondas de montaña en la Sierra de Guadarrama si el conjunto de datos ERA5 cumple las siguientes condiciones: la dirección del viento se encuentra entre 256° (percentil 95, p95) y 016° (percentil 5, p5); la velocidad del viento es superior a 4,6 m/s (p5) y la humedad relativa es superior al 5% (p5).

Para todo el dominio espacial (018° W/001° E x 35° N/52° N), estas condiciones se deben cumplir a 700 hPa ya que en esta altitud se presentan los valores más altos de contenido de agua líquida identificados por Bolgiani et al. (2018) y Díaz-Fernández et al. (2020). Los percentiles calculados son usados como umbrales para incluir el 90% de los eventos de ondas de montaña observados de noviembre a marzo por Díaz-Fernández et al. (2022). Todas estas condiciones se aplican al conjunto de datos ERA5 que se utilizará como referencia. A continuación, los eventos con condiciones favorables de ondas de montaña identificados se comparan con datos históricos, de 2001 a 2014 (HIST), y con un escenario climático futuro SSP5-8.5 (S5-8.5), desde los años 2015 a 2100, utilizando los datos de varios MCG del CMIP6. La proyección climática futura SSP5-8.5 del CMIP6 se basa en un escenario en el que las emisiones de CO<sub>2</sub> aumentarán rápidamente hasta 2080, y luego disminuirán gradualmente hasta finales de siglo, con un forzamiento radiativo máximo de 8,5 W/m<sup>2</sup> en 2100, lo que provocará un aumento de la temperatura media global del aire de unos 5 °C en comparación con la era preindustrial y de unos 4 °C en comparación con el periodo actual (Eyring et al., 2016).

De todos los MCG del CMIP6, los modelos considerados para el presente análisis disponen de datos cada 6 horas tanto para HIST como para S5-8.5. Asimismo, sólo se seleccionan los MCG que disponen de datos a 700 hPa para analizar las condiciones atmosféricas favorables de ondas de montaña con nubosidad asociada (velocidad y dirección del viento y humedad relativa). Además, se utiliza la altura geopotencial de 700 hPa para estudiar la configuración sinóptica de los eventos de ondas de montaña. Teniendo en cuenta estas restricciones, se seleccionan los siguientes MCG: EC-Earth3 (en adelante EC3; Döscher et al., 2022), MPI-ESM1-2-HR (en adelante MPI; Mauritsen et al., 2019) y MRI-ESM2-0 (sucesivamente MRI; Yukimoto et al., 2019). Estas bases de datos se descargan a través del portal de datos Earth System Grid Federation (<https://esgf-node.llnl.gov/>).

Dado que los MCG seleccionados tienen diferentes resoluciones horizontales, todos los conjuntos de datos de los modelos se reajustan a una rejilla común de 0,703° de latitud/longitud, coincidente con la resolución espacial del EC3, con el objetivo de evaluar la señal del cambio climático sobre las condiciones favorables de las ondas de montaña. A continuación, los tres conjuntos de datos de los MCG se combinan en un ensemble medio (en lo sucesivo, ENS).

Tras un análisis previo de las condiciones sinópticas de los tres modelos seleccionados (no mostrado), se ha comprobado que el modelo EC3 era el MCG que más se asemejaba a los datos de reanálisis del ERA5. Por ello, solo se muestran los resultados asociados al EC3. Para estudiar los patrones sinópticos se han realizado compuestos (*composites*) de todas las situaciones sinópticas de todos los eventos de ondas de montaña con nubosidad asociada que se han detectado para cada MCG, obteniendo una configuración sinóptica media para cada modelo. Así, los *composites* de los patrones sinópticos del ERA5, del EC3 y del ENS se analizan y comparan tanto en HIST como en S5-8.5. Posteriormente, se calculan y comparan las distribuciones de densidad (*violinplots*) de dirección y velocidad del viento y humedad relativa para los conjuntos de datos seleccionados en HIST y S5-8.5. Se aplica la prueba no paramétrica de Mann-Whitney (Mann y Whitney, 1947) para evaluar estadísticamente las diferencias significativas con un nivel de significación del 5% y la prueba no paramétrica de tendencias de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) para identificar las tendencias significativas de cada variable atmosférica desde el periodo HIST hasta el S5-8.5. El valor  $p$  utilizado es 0,05.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **3.1. Caracterización de las condiciones de ondas de montaña en escenarios históricos y futuros**

Para cada modelo se selecciona el número de días que cumplen las condiciones atmosféricas favorables a las ondas de montaña. Mientras que ERA5 registra 116 días, MRI<sub>HIST</sub> anota 112 días, detectando ambos una media anual de 8 eventos. EC3<sub>HIST</sub> y MPI<sub>HIST</sub> registran más días con condiciones de onda (169 y 157, respectivamente). Por otro lado, bajo el escenario S5-8.5, el MRI (756 días) muestra el menor número de días con condiciones adecuadas de onda de montaña, mientras que el EC3 y el MPI registran 942 y 927 (11/año) días respectivamente. Sin embargo, al aplicar la prueba de Mann-Kendall, ninguno de los conjuntos de datos muestra tendencias estadísticamente significativas en la frecuencia de días con condiciones atmosféricas favorables de ondas de montaña.

En la Fig.1 se muestran los *composites* de geopotencial a 500 y 700 hPa para los eventos con condiciones favorables de ondas de montaña detectados en los conjuntos de datos del ERA5 y de los MCG para los periodos HIST y S5-8.5. Los geopotenciales a ambos niveles muestran diferencias estadísticamente significativas entre EC3<sub>HIST</sub> y EC3<sub>S5-8.5</sub> (Figs.1b y c), mostrando una tendencia futura al aumento de la componente zonal del viento, ya que el anticiclón de las Azores se acerca a la Península Ibérica y las vaguadas son más cortas que en el periodo HIST.

Por el contrario, las diferencias en los resultados de ENS entre HIST y S5-8.5 son menos notables (Figs. 1d-e). Además, para el periodo HIST, el patrón sinóptico más

similar a los resultados del ERA5 (Fig.1a) es el EC3<sub>HIST</sub> (Fig.1b), ya que no existen diferencias estadísticamente significativas ( $p \approx 0,7$ ). Este resultado sugiere que el EC3 simula patrones atmosféricos más realistas en comparación con los demás resultados. Cresswell-Clay et al. (2022) utilizaron datos de observación y de reanálisis para examinar la variación del anticiclón de las Azores durante los meses de invierno del siglo XX. Según sus resultados, aumenta el tamaño y la intensidad del anticiclón cerca de la Península Ibérica, lo que influye en la distribución de las precipitaciones sobre Europa Occidental. Esto concuerda con la expansión del anticiclón de las Azores observada en la Fig.1.

ERA5

EC3

ENS

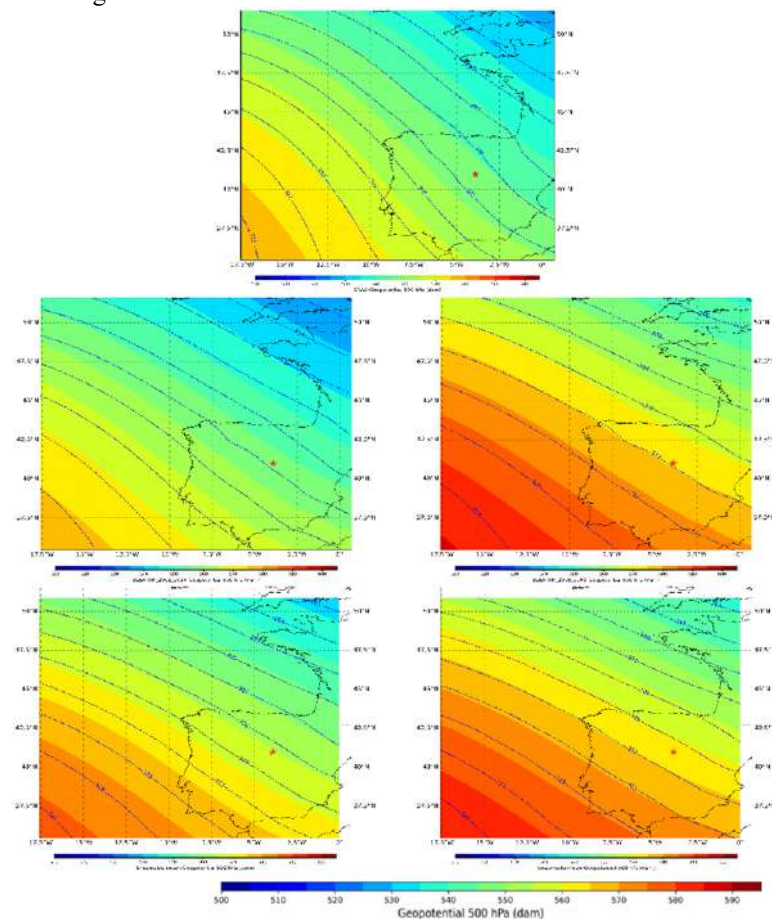
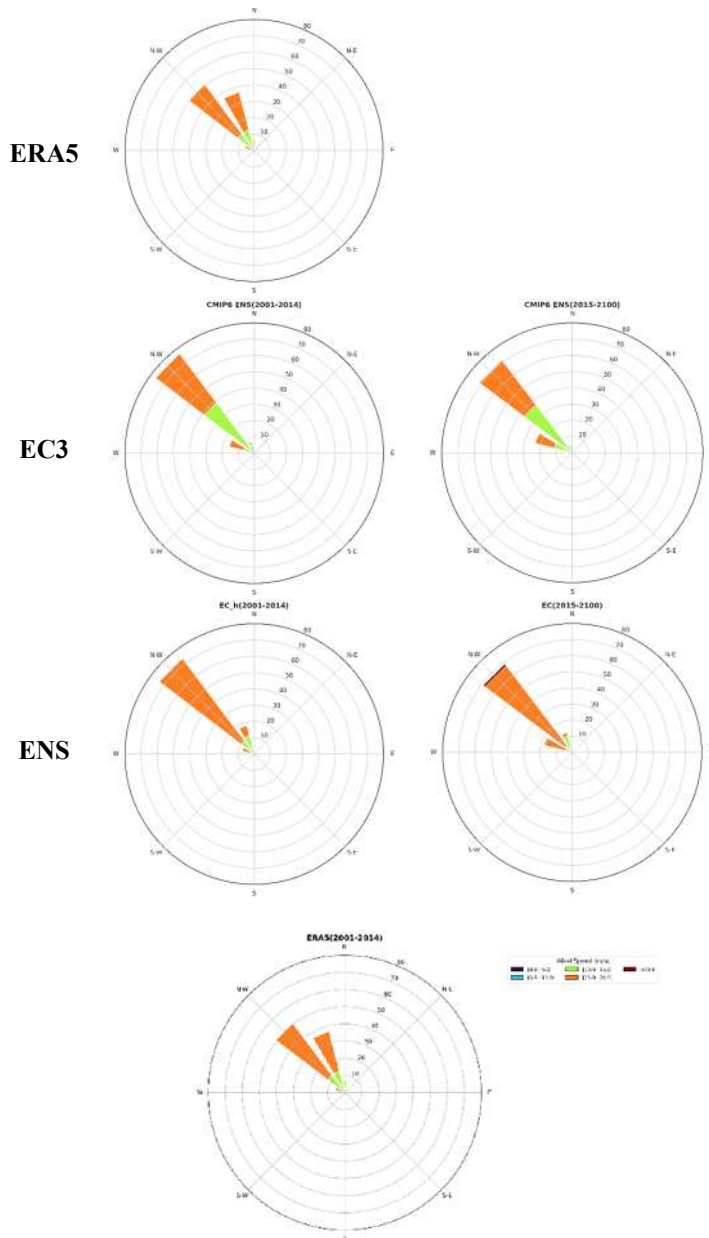


Fig.1: Composiciones de la altura geopotencial a 500 hPa (coloreada; dam) y a 700 hPa (contornos azules; dam) para eventos con condiciones atmosféricas favorables de onda de montaña para a) ERA5, b) EC3<sub>HIST</sub>, c) EC3<sub>S5-8.5</sub>, d) ENS<sub>HIST</sub> y e) ENS<sub>S5-8.5</sub>. La estrella roja en a) indica la Sierra de Guadarrama y los alrededores del aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas.



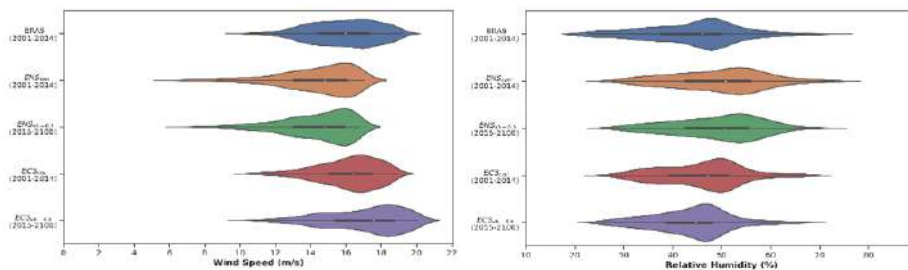
*Fig.2: Distribución de la rosa de vientos para los eventos con condiciones atmosféricas favorables de ondas de montaña para a) ERA5, b) ENS<sub>HIST</sub>, c) ENS<sub>S5-8.5</sub>, d) EC3<sub>HIST</sub> y e) EC3<sub>S5-8.5</sub>*

En las Figs.2 y 3 se presentan las distribuciones (rosas de vientos y *violinplots*) de la velocidad y dirección del viento y la humedad relativa a 700 hPa para los eventos seleccionados con condiciones atmosféricas favorables de ondas de montaña para ERA5, EC3<sub>HIST</sub>, EC3<sub>SS-8.5</sub>, ENS<sub>HIST</sub> y ENS<sub>SS-8.5</sub>.

Las distribuciones de las rosas de vientos (Figs. 2a-e) muestran una dirección predominante del viento del noroeste en más del 65% de los eventos para ambos conjuntos de datos, EC3 y ENS, y sólo en el 51% de los episodios para ERA5. Existen diferencias estadísticamente significativas entre ellos. Estas rosas de viento concuerdan con los resultados mostrados en los geopotenciales (Fig. 1), con predominio de vientos zonales. Díaz-Fernández et al. (2021) utilizaron los modelos numéricos WRF-ARW y HARMONIE-AROME para caracterizar varios eventos de ondas de montaña en la sierra de Guadarrama. Encontraron un intervalo predominante en la dirección del viento entre 295° y 003° en el 80% de los eventos de ondas de montaña de acuerdo con la distribución de la rosa de vientos mostrada para el conjunto de datos ERA5 (Fig. 2a).

En la Fig. 3a se muestran las distribuciones de la velocidad del viento para los eventos con condiciones favorables de ondas de montaña de los cinco conjuntos de datos utilizados. Antes de profundizar en esta figura, hay que señalar que el sesgo (datos simulados menos datos de referencia) entre ENS<sub>HIST</sub> y ERA5 es de -1,6 m/s, y de 0,3 m/s entre EC3<sub>HIST</sub> y ERA5. En cuanto a los resultados sinópticos, la distribución de la velocidad del viento para EC3<sub>HIST</sub> muestra valores más próximos a ERA5. Existen diferencias significativas en la velocidad del viento entre el EC3<sub>SS-8.5</sub> y el EC3<sub>HIST</sub>, con valores de velocidad del viento más elevados para el EC3<sub>SS-8.5</sub>, en consonancia con el escenario de cambio climático considerado. Sin embargo, no existen diferencias estadísticamente significativas entre ENS<sub>HIST</sub> y ENS<sub>SS-8.5</sub>. La distribución de la velocidad del viento coincide con la encontrada por Díaz-Fernández et al. (2021). Además, el aumento de la velocidad del viento para el conjunto de datos EC3<sub>SS-8.5</sub> es consistente con los resultados de Andrés-Martín et al. (2023), que utilizan el modelo WRF para investigar los cambios en la velocidad del viento en superficie en la península Ibérica en un conjunto CMIP6 (en el que participan los MCG utilizados aquí). Estos autores obtuvieron aumentos de la velocidad del viento en superficie de + 0,06 m/s por década a finales de siglo, bajo el escenario SSP5-8.5.

Para analizar la nubosidad potencial implicada en los eventos con condiciones favorables de onda de montaña, se calculan las distribuciones de humedad relativa para los cinco conjuntos de datos (Fig. 3b). Los valores medios de humedad relativa para ERA5, EC3<sub>HIST</sub>, y ENS<sub>HIST</sub> son todos significativamente diferentes ( $p = 0,00$ ). Entre los datos ERA5 e HIST, el sesgo de la humedad relativa es del 6,1% (ENS<sub>HIST</sub>) y del 1,9% (EC3<sub>HIST</sub>). De nuevo, no hay diferencias estadísticamente significativas en la humedad relativa entre ENS<sub>HIST</sub> y ENS<sub>SS-8.5</sub> ( $p = 0,57$ ). Sin embargo, la humedad relativa disminuye en EC3<sub>SS-8.5</sub> en comparación con EC3<sub>HIST</sub>.



*Fig.3: Violinplots de los cinco conjuntos de datos (ERA5 = azul; ENS<sub>HIST</sub> = naranja; ENS<sub>S5-8.5</sub> = verde; EC3<sub>HIST</sub> = rojo y EC3<sub>S5-8.5</sub> = morado para: a) velocidad del viento, y b) humedad relativa. Los valores medios están representados por puntos blancos.*

Teniendo en cuenta los patrones de distribución y los *composites* anteriores, y considerando el ERA5 una referencia fiable para reproducir las condiciones atmosféricas relacionadas con las ondas de montaña, se deduce razonablemente que el EC3 es el MCG más adecuado para evaluar las condiciones atmosféricas futuras de las ondas de montaña con nubosidad asociada.

### **3.2. Evolución de las condiciones atmosféricas favorables de las ondas de montaña**

Teniendo en cuenta los resultados mostrados anteriormente, se obtienen las tendencias (2001-2100) de las componentes del viento, la velocidad del viento y la humedad relativa para EC3 y ENS. Bajo las direcciones de viento predominantes (vientos del noroeste), las tendencias zonales del viento para los eventos de ondas de montaña seleccionados en el EC3 (Fig. 4a) muestran un aumento global estadísticamente significativo en el noroeste de la Península Ibérica, y particularmente a barlovento de la sierra de Guadarrama, con valores de viento zonal crecientes por encima de 4 m/s. La Fig. 4d muestra un aumento estadísticamente significativo de las tendencias del viento zonal para el ENS en el noroeste de la Península, aunque estos aumentos son inferiores (hasta 2 m/s) a los del EC3 y están lejos de la Sierra de Guadarrama. Las tendencias del viento meridional también muestran una tendencia positiva estadísticamente significativa en torno a + 2 m/s para ambos conjuntos de datos. Esto significaría que la intensidad global del viento meridional será menor en el escenario S5-8.5. Sin embargo, para EC3, el área abarca el sur y el este de la Península, así como una pequeña región en el centro, justo a sotavento de la Sierra de Guadarrama (Fig. 4b), mientras que el área incluye casi todo el dominio para ENS (Fig. 4e). Además, las tendencias de la velocidad del viento para los eventos seleccionados muestran aumentos estadísticamente significativos (+ 2 m/s) en unos pocos puntos del noroeste para EC3 (Fig. 4c) pero ninguna tendencia para ENS sobre la Península (Fig. 4f). Cabe señalar que, a pesar de la tendencia creciente de los vientos zonales a barlovento de la Sierra de Guadarrama, el viento zonal de EC3<sub>HIST</sub> (ENS<sub>HIST</sub>) tiene un sesgo de 1,9 m/s (3,9 m/s) mayor que el ERA5 a 700 hPa (no mostrado).



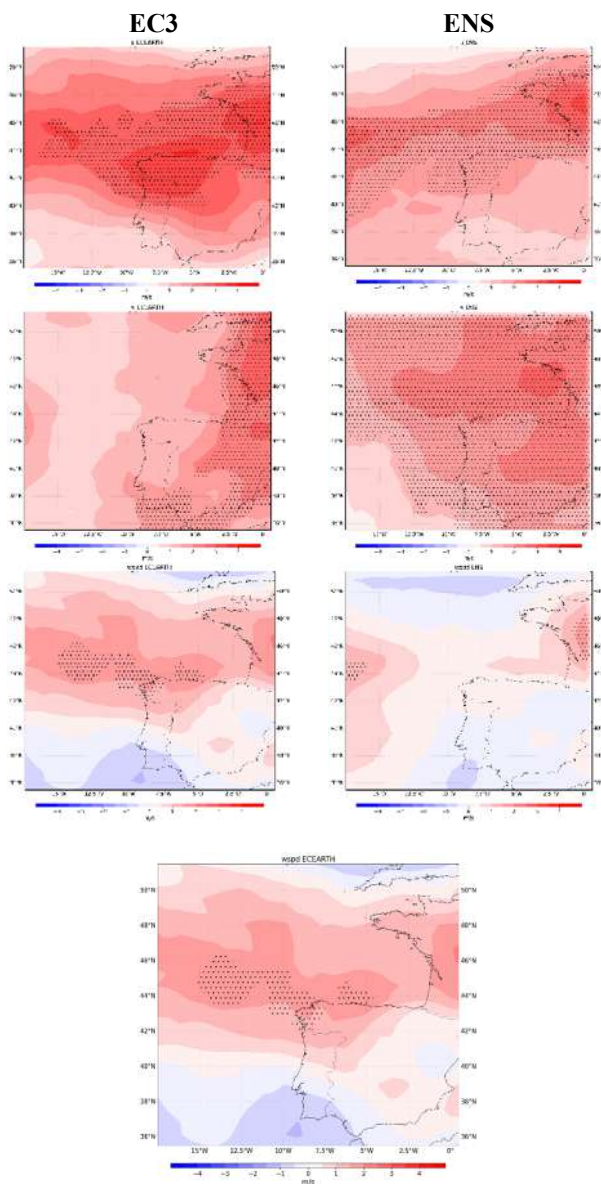


Fig.4: Tendencias para eventos con condiciones favorables de ondas de montaña (2001 – 2100) para a) viento zonal, b) viento meridional y c) velocidad del viento para EC3; d) viento zonal, e) viento meridional y f) velocidad del viento para ENS. Los puntos negros indican tendencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ).

Aunque algunos resultados parecen discordantes, una posible explicación puede ser el efecto de equilibrio entre las variables atmosféricas. Mientras que vientos zonales

más intensos pueden suponer un menor número de situaciones atmosféricas favorables para ondas de montaña en la Sierra de Guadarrama, este incremento no es suficiente para modificar el patrón de vientos (vientos del noroeste) asociado a las condiciones de ondas de montaña, tal y como se muestra en la Fig. 2.

#### **4. CONCLUSIONES**

Los eventos con condiciones atmosféricas favorables para las ondas de montaña con nubosidad asociada se definen a partir de los umbrales de dirección del viento ( $256^{\circ}$  -  $016^{\circ}$ ), velocidad del viento ( $> 5,6$  m/s) y humedad relativa ( $> 4,7\%$ ) del conjunto de datos ERA5. Basándose en ellos, se identifican 942 (11/año) eventos para EC3<sub>S5-8.5</sub> y 169 (12/año) para EC3<sub>HIST</sub>. Mientras que para ENS<sub>S5-8.5</sub> se identificaron 875 eventos (10/año) y para ENS<sub>HIST</sub> 146 (10/año). Sin embargo, no se observan tendencias estadísticamente significativas en ninguno de los conjuntos de datos. Por otro lado, en el periodo S5-8.5, los *composites* de geopotencial a 500 y 700 hPa muestran un aumento de los vientos zonales, observándose una expansión del Anticiclón de las Azores hacia la Península Ibérica, siendo el compuesto de patrones sinóticos de EC3<sub>HIST</sub> el más similar a ERA5.

El EC3 es el MCG más adecuado para predecir el comportamiento futuro de las condiciones favorables de ondas de montaña ya que los datos históricos de las variables atmosféricas seleccionadas se aproximan más a los datos de referencia (ERA5). Según los *composites* de altura geopotencial y otros estudios climáticos relevantes, las tendencias zonales del viento muestran una importante tendencia creciente (más de 4 m/s) a barlovento de la sierra de Guadarrama bajo la dirección predominante del viento. Sin embargo, este aumento no es suficiente para cambiar el patrón de vientos (vientos del noroeste) asociado a las ondas de montaña.

#### **AGRADECIMIENTOS**

Javier Díaz-Fernández y Carlos Calvo-Sancho agradecen al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades la concesión de un contrato Margarita Salas de la Universidad Complutense de Madrid con fondos Next Generation de la UE y un contrato FPI (PRE2020-092343), respectivamente. Además, esta investigación ha sido apoyada por el proyecto del Ministerio de Ciencia e Innovación PID2023-146344OB-I00 (CONSCIENCE) y los proyectos especiales ECMWF (SPESMART y SPESVALE).

#### **REFERENCIAS**

Andrés-Martín, M., Azorín-Molina, C., Fernández-Álvarez, J.C., Sheng, C., Gimeno, L., Vicente-Serrano, S., Bedoya-Valestt, S., & Utrabo-Carazo, E. (2023). Projected near-surface wind speed changes over the Iberian Peninsula: Comparison of CMIP6 GCMS and a downscaled RCM using WRF. Conference: CLIVAR 2023: Towards and integrated view of climate.

Bolgiani, P., Fernández-González, S., Martin, M. L., Valero, F., Merino, A., García-Ortega, E., & Sánchez, J. L. (2018). Analysis and numerical simulation of an aircraft

icing episode near Adolfo Suárez Madrid-Barajas International Airport. *Atmospheric Research*, 200, 60-69.

Cresswell-Clay, N., Ummenhofer, C. C., Thatcher, D. L., Wanamaker, A. D., Denniston, R. F., Asmerom, Y., & Polyak, V. J. (2022). Twentieth-century Azores High expansion unprecedented in the past 1,200 years. *Nature Geoscience*, 15(7), 548-553.

Díaz-Fernández, J., Quitián-Hernández, L., Bolgiani, P., Santos-Muñoz, D., García Gago, Á., Fernández-González, S., ... & Martín, M. L. (2020). Mountain waves analysis in the vicinity of the Madrid-Barajas airport using the WRF model. *Advances in Meteorology*, 2020, 1-17.

Díaz-Fernández, J., Bolgiani, P., Santos-Muñoz, D., Quitián-Hernández, L., Sastre, M., Valero, F., et al. (2022). Comparison of the WRF and HARMONIE models ability for mountain wave warnings. *Atmospheric Research*, 265.

Díaz-Fernández, J., Bolgiani, P., Santos-Muñoz, D., Sastre, M., Valero, F., Sebastián-Martín, L. I., ... & Martín, M. L. (2021). On the characterization of mountain waves and the development of a warning method for aviation safety using WRF forecast. *Atmospheric Research*, 258, 105620.

Döscher, R., Acosta, M., Alessandri, A., Anthoni, P., Arsouze, T., Bergman, T., ... & Zhang, Q. (2022). The EC-Earth3 earth system model for the coupled model intercomparison project 6. *Geoscientific Model Development*, 15(7), 2973-3020.

European Union Aviation Safety Agency (2022). Annual Safety Review 2022. DOI: 10.2822/056444

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2015). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organisation. *Geoscientific Model Development Discussions*, 8(12).

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.

Kendall, M. G. (1948). Rank correlation methods. Charles Griffin, London

Lin, Y. L. (2007). *Mesoscale dynamics* (Vol. 630). Cambridge: Cambridge University Press.

Mann, H.B. (1945). Non-parametric tests against trend. *Econometrica*. 13, 245–259

Mann, H. B., & Whitney, D. R. (1947). On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *The annals of mathematical statistics*, 50-60.

Mauritsen, T., Bader, J., Becker, T., Behrens, J., Bittner, M., Brokopf, R., ... & Roeckner, E. (2019). Developments in the MPI-M Earth System Model version 1.2 (MPI-ESM1. 2) and its response to increasing CO<sub>2</sub>. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(4), 998-1038.

Scorer, R. S. (1949). Theory of waves in the lee of mountains. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 75(323), 41-56.

Smith, R. B., Skubis, S., Doyle, J. D., Broad, A. S., Kiemle, C., & Volkert, H. (2002). Mountain waves over Mont Blanc: Influence of a stagnant boundary layer.

Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: an introductory survey* (Vol. 92). Elsevier.

Yukimoto, S., Kawai, H., Koshiro, T., Oshima, N., Yoshida, K., Urakawa, S., ... & Ishii, M. (2019). The Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0, MRI-ESM2. 0: Description and basic evaluation of the physical component. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 97(5), 931-965.