

## **CLIMATOLOGÍA DE ONDAS DE MONTAÑA EN LA SIERRA DE GUADARRAMA: CARACTERIZACIÓN CON EL MODELO METEOROLÓGICO DE ALTA RESOLUCIÓN WRF**

Javier DÍAZ-FERNÁNDEZ<sup>1</sup>, María Yolanda LUNA<sup>2</sup>, Pedro BOLGIANI<sup>1</sup>, Daniel SANTOS-MUÑOZ<sup>3</sup>, Mariano SASTRE<sup>1</sup>, Francisco VALERO<sup>1,4</sup>, José Ignacio FARRÁN<sup>5</sup>, Juan Jesús GONZÁLEZ-ALEMÁN<sup>2</sup>, Lara QUITIÁN-HERNÁNDEZ<sup>5</sup>,  
María Luisa MARTÍN<sup>5</sup>

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

<sup>2</sup>*Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).*

<sup>3</sup>*Instituto Meteorológico Danés (DMI)*

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

<sup>5</sup>*Departamento de Matemáticas Aplicada. Facultad de Informática. Universidad de Valladolid*

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

### **RESUMEN**

Las ondas de montaña se forman a sotavento de una barrera orográfica y son un tipo de ondas de gravedad a menudo asociadas con fenómenos meteorológicos adversos. Un ejemplo de ellos es la turbulencia, que afecta a la seguridad aérea y ha aparecido en numerosos informes como causa de accidentes aéreos. Por ello, el estudio de las ondas de montaña es un tema importante para prevenir sus efectos en la aviación. En este trabajo se simulan y analizan 68 eventos de ondas de montaña utilizando el modelo numérico de predicción meteorológica de alta resolución Weather Research and Forecasting (WRF). Debido a la frecuencia de estos eventos y al interés socioeconómico, el área de estudio se centra en las inmediaciones del principal aeropuerto de España (Adolfo Suárez Madrid-Barajas). La temperatura de brillo del satélite Meteosat Second Generation ha sido seleccionada como variable observacional para validar las simulaciones de la nubosidad asociada a las ondas de montaña. Se ha comprobado que el WRF es capaz de simular las ondas de montaña incluso sin nubosidad asociada. Además, se ha elaborado una caracterización de los eventos de ondas de montaña en la zona de estudio mediante el análisis de las variables atmosféricas que intervienen en la formación de las ondas de montaña. Los resultados obtenidos muestran diferencias significativas entre los eventos de ondas de montaña con nubosidad asociada y sin ella en las variables de velocidad de viento y de contenido de agua líquida.

**Palabras clave:** Caracterización, engelamiento, ondas de montaña, turbulencia, WRF.

### **ABSTRACT**

Mountain lee waves form in the leeward of an orographic barrier and are a type of gravity wave often associated with adverse meteorological conditions. One example

is turbulence, which affects aviation safety and has been reported in several reports as a cause of aircraft accidents. Therefore, the study of mountain lee waves is an important topic in order to prevent their effects on aviation. In this paper, 68 mountain lee wave events are simulated and analyzed using the high-resolution numerical weather prediction model Weather Research and Forecasting (WRF). Due to the frequency of these events and the socio-economic interest, the study area is focused on the vicinity of the main airport in Spain (Adolfo Suárez Madrid-Barajas). The brightness temperature of the Meteosat Second Generation satellite has been selected as an observational data to validate the simulations of the cloudiness associated with mountain lee waves. The results show the ability of WRF to simulate mountain lee waves even without cloudiness associated. In addition, a characterization of mountain lee wave events in the study area has been developed by analyzing the atmospheric variables involved in mountain lee wave formation. The results obtained show significant differences between mountain lee wave events with and without associated cloudiness in the wind speed and liquid water content variables.

**Key words:** Characterization, aircraft icing, mountain waves, turbulence, WRF.

## **1. INTRODUCCIÓN**

La meteorología tiene una relación directa con la aviación. No en vano, este medio de transporte está intrínsecamente conectado con la troposfera, donde se producen un gran número de fenómenos meteorológicos adversos que afectan a la aviación y a la seguridad aérea. El engelamiento y la turbulencia asociadas a las ondas de montaña pueden ser peligrosas para la aviación, especialmente en las operaciones de aterrizaje y despegue (Buck, 2000; Bolgiani et al., 2018; European Union Aviation Safety Agency, 2019). Para prevenir/eliminar la acumulación de hielo, las aeronaves suelen incorporar sistemas antihielo y/o de deshielo. Aun así, estos dispositivos son insuficientes cuando existe un engelamiento extremo.

La National Transportation Safety Board (2014), informó que entre los años 2000 y 2011 en USA, el 37% de los accidentes registrados estuvieron relacionados con condiciones meteorológicas adversas. La European Union Aviation Safety Agency (2019) clasifica el engelamiento y la turbulencia asociada a las ondas de montaña como el 3º y el 23º riesgo más peligroso para la aviación.

Las ondas de montaña son un tipo de ondas de gravedad que se forman a sotavento de una barrera orográfica cuando el flujo de viento es de cierta intensidad y perpendicular a la barrera. Estas ondas de montaña de sotavento pueden propagarse vertical u horizontalmente varios kilómetros, cuando existe una capa ligeramente estable sobre las cumbres (Lin, 2007; Broutman et al., 2001). A sotavento se producen bandas de nubes alternas debidas a las corrientes ascendentes y descendentes causadas por las ondas de montaña (Bolgiani et al., 2018). En las corrientes descendentes, las temperaturas son más altas debido al proceso adiabático de compresión. Sin embargo, el proceso adiabático de expansión que se produce en las corrientes ascendentes genera una disminución de la temperatura y, por condensación, un aumento del contenido de agua líquida (LWC) (Smith et al., 2002; Geresdi y Rasmussen, 2005).

Las nubes más frecuentes asociadas a las ondas de montaña son lenticulares. Sin embargo, pueden estar ausentes en eventos de ondas de montaña si el aire es demasiado seco. En el caso de que una onda de montaña genere turbulencias, pero no nubes, podemos hablar de un evento de turbulencia en aire claro (Sharmann et al., 2012; Evans, 2014). Las nubes lenticulares pueden favorecer la formación de hielo si se desarrollan en entornos con temperaturas inferiores a 0 °C. El engelamiento es definido por Gent et al. (2000) como la acumulación de hielo en la superficie de los aviones debido a la presencia de hidrometeoros líquidos subfundidos en la atmósfera. Este fenómeno afecta a la seguridad aérea debido a los importantes cambios en la aerodinámica generados por la acumulación de hielo (Moran, 1989; Buck, 2000).

El pronóstico de las ondas de montaña no es sencillo, debido a varios factores: orografía, patrones sinópticos, velocidad y dirección del viento...

El principal objetivo de esta comunicación es caracterizar los eventos de ondas de montaña que se han producido durante los años 2001-2020 en el entorno del aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas (LEMD según el código ICAO), usando para ello la parametrización óptima del modelo Weather Research Forecast (WRF) para el estudio de ondas de montaña definida por Díaz-Fernández et al. (2020). Se trata de un modelo numérico de predicción meteorológica no hidrostático, que ha demostrado ser una herramienta muy útil en una amplia variedad de fenómenos meteorológicos. Además, Regmi et al. (2017) y Bolgiani et al. (2018) utilizaron el modelo WRF para estudiar los patrones sinópticos implicados en diferentes eventos de engelamiento asociados a ondas de montaña.

## **2. DATOS Y METODOLOGÍA**

### **2.1. Área de estudio, datos y modelo**

El área de estudio comprende las inmediaciones de 4 aeropuertos, siendo LEMD el aeropuerto de mayor tráfico aéreo de España (Fig. 1a). En esta zona, las ondas de montaña se forman debido a la presencia de la Sierra de Guadarrama a 40 km al noroeste del aeropuerto, que actúa como barrera orográfica. Dentro de la zona de estudio, se establecen 120 puntos de malla (Fig. 1a) para realizar la caracterización, mediante las principales variables atmosféricas que intervienen en la formación, de las ondas de montaña: 24 de ellos a barlovento, 8 sobre la Sierra de Guadarrama y 88 a sotavento. .

Los episodios de ondas de montaña han sido registrados en una base de datos formada por 327 episodios identificados a través de imágenes del canal visible del satélite Meteosat Second Generation Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager. Estos eventos han sido registrados durante los meses de noviembre a marzo en los últimos 20 años (2001-2020) entre las 08:00 y 17:00 UTC. Los episodios de ondas de montaña seleccionados para este estudio han sido aquellos más claramente observables siguiendo los criterios de Díaz-Fernández et al. (2021). Por tanto, la base de datos de este estudio recoge un total de 68 episodios de ondas de montaña en las inmediaciones del aeropuerto LEMD durante el periodo 2001-2020.

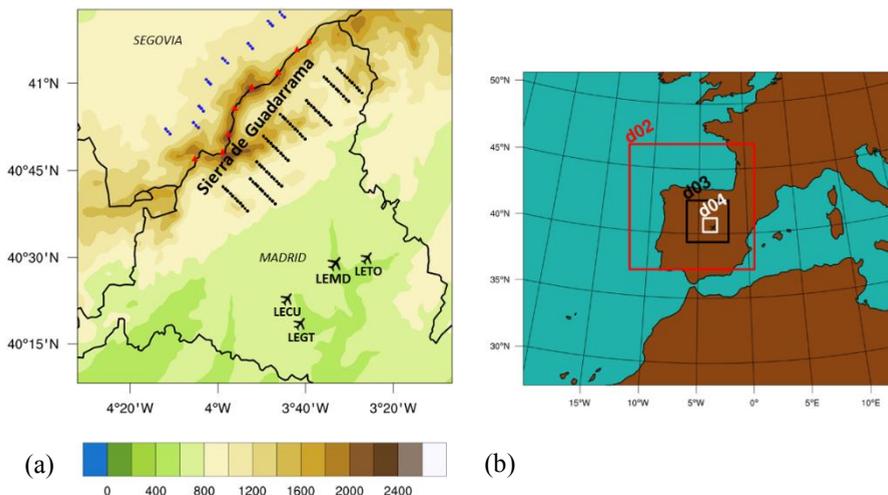


Fig. 1: (a) Orografía de la zona de estudio (m). Puntos azules (barlovento), triángulos rojos (Guadarrama) y puntos negros (sotavento) indican los puntos de malla donde se realiza la caracterización de las ondas de montaña. Los símbolos aeronáuticos representan los aeropuertos. (b) Configuración de los diferentes dominios del modelo WRF.

El modelo numérico de predicción meteorológica utilizado es el WRF versión 4.0.3 (Skamarock et al., 2019). Las condiciones iniciales han sido tomadas del NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), con una resolución horizontal de  $0,5^\circ$  y una resolución temporal de 6 h (Saha et al., 2010). Cada episodio seleccionado se simula en periodos de 24 h, considerando las primeras 6 h como *spin-up*. Se definen cuatro dominios anidados (Fig. 1b) utilizando  $121 \times 121$  puntos de malla en las direcciones norte-sur y este-oeste y 60 niveles verticales sigma. La resolución horizontal de los dominios es de 27, 9, 3 y 1 km, respectivamente. Las parametrizaciones físicas del modelo WRF seleccionadas han sido las utilizadas y validadas como configuraciones óptimas para episodios de ondas de montaña en la zona de estudio por Díaz-Fernández et al. (2020). Estas son: esquema de onda corta Dudhia (Dudhia, 1989), esquema de onda larga RRTM (Mlawer et al., 1997), modelo de superficie terrestre de Unified Noah (Tewari et al., 2004), capa superficial del MM5 revisado (Jiménez et al., 2012), PBL de Yonsei University (YSU; Hong et al., 2006) y microfísica de Thompson (Thompson et al., 2008).

## 2.2. Caracterización de las ondas de montaña.

Los datos de las variables relacionadas con la formación de ondas de montaña (dirección del viento, velocidad del viento, estabilidad atmosférica y LWC) son extraídos en cada uno de los 120 puntos de malla evaluados (Fig. 1a) a 2800 m de altitud, nivel en el que se detectaron los valores más altos de LWC, de acuerdo con Díaz-Fernández et al. (2020) y Bolgiani et al. (2018). Además, se evalúa la razón de

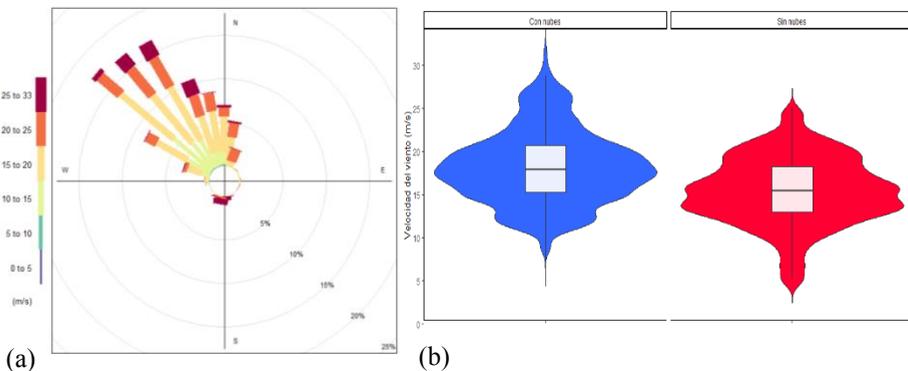
disipación turbulenta (EDR) y la temperatura para caracterizar los posibles eventos de turbulencia y engelamiento asociado a ondas de onda montaña.

Las variables analizadas muestran resultados muy similares para cada punto seleccionado en cada una de las 3 zonas definidas, por lo que los puntos son reagrupados y promediados en tres zonas: barlovento, Guadarrama y sotavento. Finalmente, se calculó la distribución (*violinplots*) y los percentiles (P) 10, 25, 50, 75 y 90 (*boxplots*) para cada una de las seis variables en las tres zonas.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados permiten establecer umbrales de varias variables atmosféricas que influyen en la formación de las ondas de montaña. Para ello, se evalúan los resultados de las variables seleccionadas hora a hora en los 68 eventos. Para caracterizar la dirección del viento, la velocidad del viento y la estabilidad atmosférica se toman los valores promedio a 2800 m. Sin embargo, con el objetivo de capturar las ondas de montaña formadas a sotavento, se considera el punto de malla que contiene el LWC máximo, EDR máximo y temperatura mínima para cada hora.

Tanto la velocidad como la dirección del viento son evaluadas a barlovento, ya que es donde estas variables rigen la génesis de las ondas de montaña antes de que el flujo de viento sea perturbado por la barrera orográfica. La Fig. 2a muestra que la dirección del viento predominante para el total de eventos con nubes es del NO, con una dirección de viento predominante entre 295° y 003° en el 80% de las horas. Estos resultados concuerdan con la orografía de la zona de estudio, ya que la Sierra de Guadarrama tiene una alineación aproximada SO-NE. La distribución de la velocidad del viento (Fig. 2b) muestra valores ligeramente superiores cuando existe nubosidad asociada a ondas de montaña. Los percentiles en eventos con nubes asociadas muestran que en el 80% de las horas la velocidad del viento se encuentra entre 12,7 y 24,2 m/s.

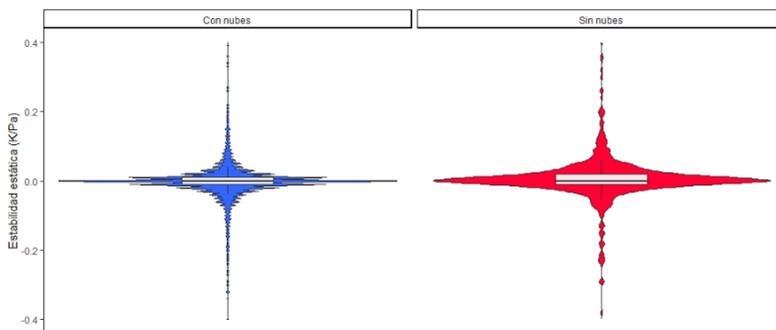


*Fig. 2: (a) Rosa de vientos simulada a barlovento para eventos con nubosidad asociada a ondas de montaña. (b) Distribución y boxplot de la velocidad del viento media (m/s) simulada a barlovento para eventos con y sin nubosidad asociada a ondas de montaña.*

Los resultados relativos a la dirección del viento coinciden con

la climatología del viento en superficie en la zona de estudio realizada por Lorente-Plazas et al. (2015). Además, Bolgiani et al. (2018) observaron en un evento de ondas de montaña en la Sierra de Guadarrama una velocidad de viento de 21,1 m/s y direcciones oeste-noroeste a 3300 m de altitud.

Una de las condiciones indispensables para la formación de ondas de montaña es la presencia de una atmósfera estable (estabilidad atmosférica  $> 0$  K/Pa) por encima de la región donde se propaga la onda. Además, una estabilidad neutra (estabilidad atmosférica  $= 0$  K/Pa) atenúa la propagación horizontal de las bandas de nubes a sotavento (Koch y O'Handley, 1997). Por tanto, la estabilidad atmosférica es evaluada sobre la sierra de Guadarrama (Fig. 3), donde se observa una distribución similar para los eventos con nubes y sin nubes. El valor modal se corresponde con una estabilidad neutra ( $\approx 0$  K/Pa) para ambos eventos. Díaz-Fernández et al. (2020) observaron una distribución leptocúrtica similar en la estabilidad atmosférica con resultados más concentrados en torno a la neutralidad en los eventos de ondas de montaña. Estos resultados coinciden con otros estudios relacionados con las ondas de montaña (Fernández-González et al., 2014; Fernández González et al., 2019).



*Fig. 3: Distribución y boxplot de la estabilidad atmosférica media (K/Pa) simulada en la Sierra de Guadarrama para eventos con y sin nubosidad asociada a ondas de montaña.*

Siguiendo el proceso de formación de las ondas de montaña, el EDR, LWC y temperatura se evalúan a sotavento, donde la onda de montaña ya está formada. La Fig. 4a muestra valores de EDR ligeramente más altos cuando hay presencia de nubes. De acuerdo con las categorías de turbulencia definidas por Sharman et al. (2006) para aeronaves medianas, se puede considerar turbulencia ligera cuando existen valores de EDR entre 15 y 20  $\text{m}^{2/3}/\text{s}$ , moderada entre 20 y 44  $\text{m}^{2/3}/\text{s}$ , severa entre 44 a 79  $\text{m}^{2/3}/\text{s}$  y extrema  $\text{EDR} \geq 79$   $\text{m}^{2/3}/\text{s}$ . Es destacable que el valor de EDR-P10 para la caracterización del WRF coincide con el umbral de turbulencia ligera (14  $\text{m}^{2/3}/\text{s}$ ) definido por estos autores. Según los resultados de la Fig.4a, la turbulencia es ligera en un 22% de los eventos de ondas de montaña con nubosidad asociada, moderada en un 59% y severa en un 5%. Por tanto, se puede concluir que el 86% de los eventos de ondas de montaña simulados por WRF generan turbulencia asociada.

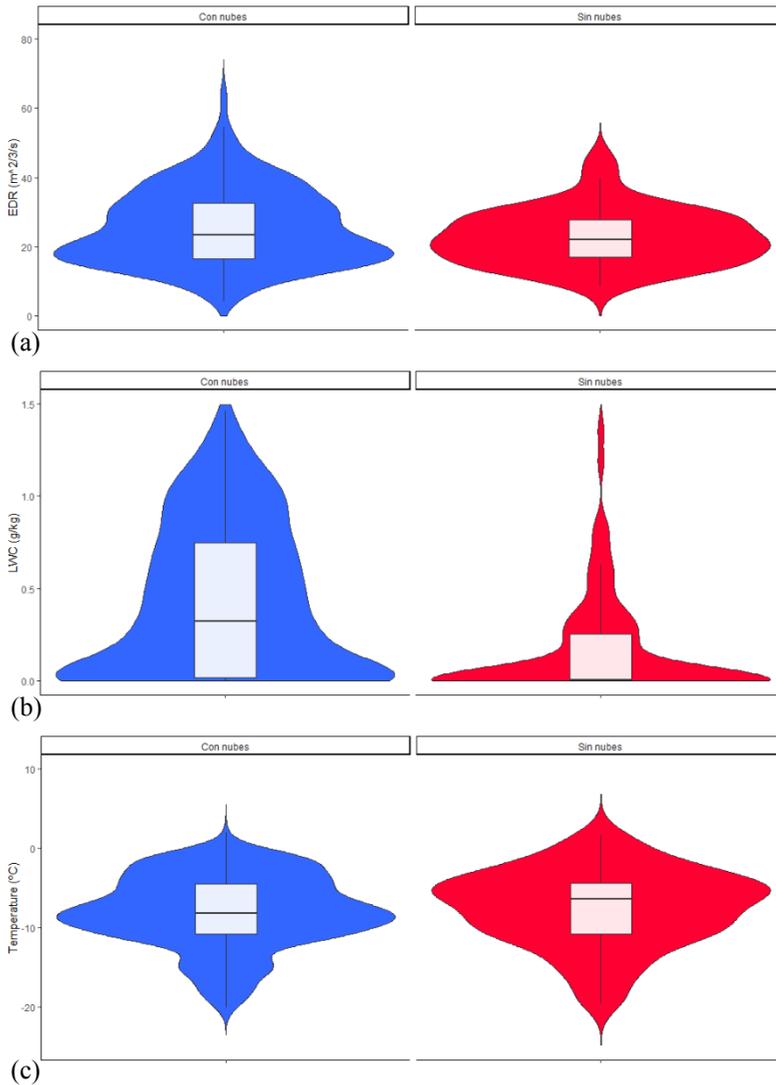


Fig. 4: (a) Distribución y boxplot de la turbulencia máxima (EDR;  $m^2/3s$ ) (b) Distribución y boxplot del LWC máximo (g/kg) (c) Distribución y boxplot de la temperatura mínima ( $^{\circ}C$ ) simuladas a sotavento para eventos con y sin nubosidad asociada a ondas de montaña.

La presencia de LWC es un requisito indispensable para que existan nubes asociadas a las ondas de montaña y la presencia de temperaturas inferiores a  $0^{\circ}C$  es necesaria para que se desarrollen condiciones de engelamiento (Rauber y Tokay, 1991; Buck, 2000). Los resultados de LWC (Fig. 4b) muestra una distribución decreciente a medida que aumentan los valores para los eventos con nubosidad. Al menos en el 79% de los eventos con nubosidad se detecta LWC (valores superiores a  $0$  g/kg). Las

categorías de engelamiento establecidas por Tafferner et al. (2003) y un estudio sobre las condiciones de engelamiento en la sierra de Guadarrama (Fernández-González et al., 2014) establecen 0,1 g/kg como umbral inferior de LWC para el riesgo de formación de engelamiento.

Las funciones de distribución para la temperatura mínima (Fig. 4c) son similares para ambos eventos, si bien la temperatura es ligeramente inferior para los eventos con nubosidad. La existencia conjunta de suficiente LWC y temperaturas  $< 0$  °C es condición esencial para la presencia de agua líquida subfundida. En los eventos con nubosidad asociada el 99% de ellos registran temperaturas compatibles con las condiciones de engelamiento.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se realiza una caracterización de los episodios de ondas de montaña en el centro de la Península Ibérica. Basándose en esta caracterización, en el 80% de los eventos de ondas de montaña analizados la dirección del viento está entre 295° y 003° (noroeste) y la velocidad de viento entre 12,7 y 24,2 m/s. La estabilidad atmosférica toma valores de inestables (-0,06 K/Pa) a estables (0,05 K/Pa) en la Sierra de Guadarrama. A sotavento, el valor máximo de EDR esta entre 14 y 40  $m^{2/3}/s$ , el LWC máximo entre 0 y 1,06 g/kg y la temperatura mínima entre -2 y -14,7 °C.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está respaldado por los siguientes proyectos de investigación: PID2019-105306RB-I00, CGL2016-78702-C2-1-R y CGL2016-78702-C2-2-R (proyecto SAFEFLLIGHT), FEI-EU-17-16 y SPESMART AND SPESVALE (Proyectos Especiales del ECMWF). J. Díaz-Fernández agradece el apoyo económico del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (programa FPI BES-2017-080025).

#### REFERENCIAS

- Bolgiani, P., Fernández-González, S., Martín, 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.
- Broutman, D., Rottman, J.W., Eckermann, S.D., Hulburt, E.O. (2001). A hybrid method for wave propagation from a localized source, with application to mountain waves. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 127(571), 129-146. <https://doi.org/10.1256/smsqj.57107>
- Buck, R. (2000). *Aircraft Icing Handbook*. Safety Education and Publishing Unit.
- Díaz-Fernández, J., Qutián-Hernández, L., Bolgiani, P., Santos-Muñoz, D., García-Gago, A., Fernández-González, S., Valero, F., Merino, A., García-Ortega, E., Sánchez, J.L., Sastre, M., Martín, M.L. (2020). Mountain waves analysis in the vicinity of the Madrid-Barajas airport using the WRF model. *Adv. Meteorol*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8871546>.

- 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.
- Dudhia, J., 1989. Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.* 46 (20), 3077–3107. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1989\)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2).
- European Union Aviation Safety Agency. (2019). Annual Safety Review 2019. <https://doi.org/10.2822/098259>.
- Evans, J.K. (2014). An updated examination of aviation accidents associated with turbulence, wind shear and thunderstorm. Technical Report AMA Report Number 14-14, Analytical Mechanics Associates, Inc.
- Fernández González, S., Merino Suances, A., & Bolgiani, P. (2019). Pronóstico de engelamiento y ondas de montaña mediante modelos mesoescalares orientado a mejorar la seguridad aérea. In *Sexto Simposio Nacional de Predicción “Memorial Antonio Mestre*.
- Fernández-González, S., Sánchez, J. L., Gascón, E., López, L., García-Ortega, E., & Merino, A. (2014). Weather features associated with aircraft icing conditions: A case study. *The Scientific World Journal*, vol. 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/279063>
- Geresdi, I., Rasmussen, R. (2005). Freezing drizzle formation in stably stratified layer clouds. Part II: The role of giant nuclei and aerosol particle size distribution and solubility. *J. Atmos. Sci.* 62(7), 2037-2057. <https://doi.org/10.1175/JAS3452.1>.
- Gent, R.W., Dart, N.P., Cansdale, J.T. (2000). Aircraft icing. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* <https://doi.org/10.1098/rsta.2000.0689>.
- Hong, S.Y., Noh, Y., Dudhia, J., 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Weather Rev.* 134 (9), 2234–2318. <https://doi.org/10.1175/MWR3199.1>.
- Jiménez, P.A., Dudhia, J., González-Rouco, J.F., Navarro, J., Montávez, J.P., García-Bustamante, E., 2012. A revised scheme for the WRF surface layer formulation. *Mon. Weather Rev.* 140 (3), 898–918. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00056.1>.
- Koch, S. E., & O’Handley, C. (1997). Operational forecasting and detection of mesoscale gravity waves. *Weather and Forecasting*, 12(2), 253-281.
- Lin, Y. (2007). *Mesoscale Dynamics*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1st edition, ISBN: 9780511619649.
- Lorente-Plazas, R., Montávez, J. P., Jerez, S., Gómez-Navarro, J. J., Jiménez-Guerrero, P., & Jiménez, P. A. (2015). A 49 year hindcast of surface winds over the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 35(10), 3007-3023.
- Mlawer, E.J., Taubman, S.J., Brown, P.D., Iacono, M.J., Clough, S.A., 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res. Atmos.* 102 (D14), 16663–16682. <https://doi.org/10.1029/97jd00237>.
- Moran, J. M. (1989). *Meteorology: The Atmosphere and the Science of Weather* 5th ed. Prentice Hall, 628. ISBN: 9780023838415.
- National Transportation Safety Board. (2014). General aviation: Identify and communicate hazardous weather. [http://www.nts.gov/safety/mwl/Pages/mwl7\\_2014.aspx](http://www.nts.gov/safety/mwl/Pages/mwl7_2014.aspx). (accessed 7 March 2022).

- Rauber, R. M., & Tokay, A. (1991). An explanation for the existence of supercooled water at the top of cold clouds. *Journal of Atmospheric Sciences*, 48(8), 1005-1023.
- Regmi, R.P., Kitada, T., Dudhia, J., Maharjan, S. (2017). Large-Scale Gravity Current over the Middle Hills of the Nepal Himalaya: Implications for Aircraft Accidents. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 56, 371–390. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0073.1>.
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y., Chuang, H., Juang, H. H., Sela, J., Iredell, M., Treadon, R., Kleist, D., Van Delst, P., Keyser, D., Derber, J., Ek, M., Meng, J., Wei, H., Yang, R., Lord, S., van den Dool, H., Kumar, A., Wang, W., Long, C., Chelliah, M., Xue, Y., Huang, B., Schemm, J., Ebisuzaki, W., Lin, R., Xie, P., Chen, M., Zhou, S., Higgins, W., Zou, C., Liu, Q., Chen, Y., Han, Y., Cucurull, L., Reynolds, R. W., Rutledge, G., & Goldberg, M. (2010). NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) 6-hourly Products, January 1979 to December 2010, Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research. Computational and Information Systems Laboratory. <https://doi.org/10.5065/D69K487J>. (accessed at 18 March 2022).
- Sharman, R. D., Tebaldi, C., Wiener, G., Wolff, J. (2006). An integrated approach to mid- and upper-level turbulence forecasting. *Wea. Forecasting*, 21, 268-287.
- Sharman, R. D., Trier, S. B., Lane, T. P., Doyle, J. D. (2012). Sources and dynamics of turbulence in the upper troposphere and lower stratosphere: A review. *Geophysical Research Letters*, 39(12).
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., ... & Huang, X. Y. (2019). A description of the advanced research WRF model version 4. National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO, USA, 145, 145.
- 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. *J. Atmos. Sci.* 59 (13), 2073–2092.
- Tafferner, A., Hauf, T., Leifeld, C., Hafner, T., Leykauf, H., & Voigt, U. (2003). ADWICE: Advanced diagnosis and warning system for aircraft icing environments. *Weather and forecasting*, 18(2), 184-203.
- Tewari, M., Chen, F., Wang, W., Dudhia, J., LeMone, M.A., Mitchell, K., Ek, M., Gayno, G., Wegiel, J., Cuenca, R.H., 2004. Implementation and Verification of the Unified Noah Land Surface Model in the WRF Model. 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction (2004), pp. 11-15 Formerly Paper Number 17.5)
- Thompson, G., Field, P.R., Rasmussen, R.M., Hall, W.D., 2008. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization. *Mon. Weather Rev.* 136 (12), 5095–5115. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2387.1>.