

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS AIREP EN EL ESPACIO AÉREO ESPAÑOL (2014-2024)

Nota técnica 47 de AEMET

Javier MARTÍN MARTÍN

Benito José FUENTES LÓPEZ

Enrique PORTILLA LÓPEZ

Javier DE LUIS CUARTERO

Ignasi MARTÍ MARTÍ





Aviso Legal: los contenidos de esta publicación podrán ser reutilizados, citando la fuente y la fecha, en su caso, de la última actualización



Edita:

© Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
Agencia Estatal de Meteorología
Madrid, 2026

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:
<https://cpage.mpr.gob.es>

NIPO: 666-26-011-2
<https://doi.org/10.31978/666-26-011-2>

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)
C/ Leonardo Prieto Castro, 8
28040 Madrid
<http://www.aemet.es/>

 @Aemet_Esp

 <https://www.facebook.com/AgenciaEstataldeMeteorologia>

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS AIREP EN EL ESPACIO AÉREO ESPAÑOL (2014-2024)

Nota técnica 47 de AEMET

Javier MARTÍN MARTÍN¹, Benito José FUENTES LÓPEZ¹, Enrique PORTILLA LÓPEZ¹,
Javier DE LUIS CUARTERO¹, Ignasi MARTÍ MARTÍ²

¹*Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)*

²*Universidad de Valencia*

jmartinm@aemet.es, bfuentesl@aemet.es, eportillal@aemet.es, jluisc@aemet.es, marmarig@alumni.uv.es

RESUMEN

Se presenta un análisis estadístico de los AIREP de turbulencia, engelamiento y ondas de montaña emitidos en el espacio aéreo español entre 2014 y 2024. El estudio incluye su distribución temporal (anual y mensual), espacial (por FIR y principales sistemas montañosos), así como las altitudes más afectadas.

Palabras clave: AIREP, turbulencia, engelamiento, ondas de montaña, FIR España, meteorología aeronáutica.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. ANÁLISIS ANUAL DE LOS AIREP EN EL ESPACIO AÉREO ESPAÑOL	6
2.1 Análisis anual por Región de Información de Vuelo (FIR/UIR)	7
3. ANÁLISIS MENSUAL DE LOS AIREP EN EL ESPACIO AÉREO ESPAÑOL	10
3.1 Análisis mensual por Región de Información de Vuelo (FIR/UIR).....	12
4. ANÁLISIS MENSUAL POR ALTITUDES DE LOS AIREP EN EL ESPACIO AÉREO ESPAÑOL	15
4.1 La turbulencia.....	15
4.2 El engelamiento	20
5. TURBULENCIA Y ONDAS DE MONTAÑA EN LOS PRINCIPALES SISTEMAS OROGRÁFICOS DE LA PENÍNSULA IBÉRICA.....	27
5.1 Los Pirineos	31
5.2 La cordillera Cantábrica	33
5.3 El sistema Ibérico	35
5.4 El sistema Central.....	37
5.5 El sistema Bético	39
6. CONCLUSIONES.....	41
7. REFERENCIAS	44
8. ANEXO	46

1. INTRODUCCIÓN

Los informes de condiciones meteorológicas significativas observadas por aeronaves en vuelo, conocidos como *Aircraft Reports* AIREP o ARS, se fundamentan en fenómenos meteorológicos que comprometen la seguridad aérea, tal y como reflejan las estadísticas de accidentes asociados al engelamiento y a la turbulencia desarrolladas por (Eick, 2015a y 2015b). Por ello, constituyen una valiosa fuente de información para la vigilancia y mejora de la seguridad operacional. Estos reportes, generados en tiempo real por las tripulaciones, complementan otras fuentes de observación meteorológica, especialmente en niveles de vuelo donde la cobertura de sensores remotos es limitada.

Es importante tener en cuenta que estos informes incluyen una componente subjetiva, ya que se basan en la percepción y evaluación del piloto a bordo, a lo que se suma la propia geometría de la aeronave. Esta naturaleza cualitativa puede influir en la consistencia de los datos reportados, especialmente en lo que respecta a la intensidad y a la localización exacta de los fenómenos meteorológicos que se van a analizar.

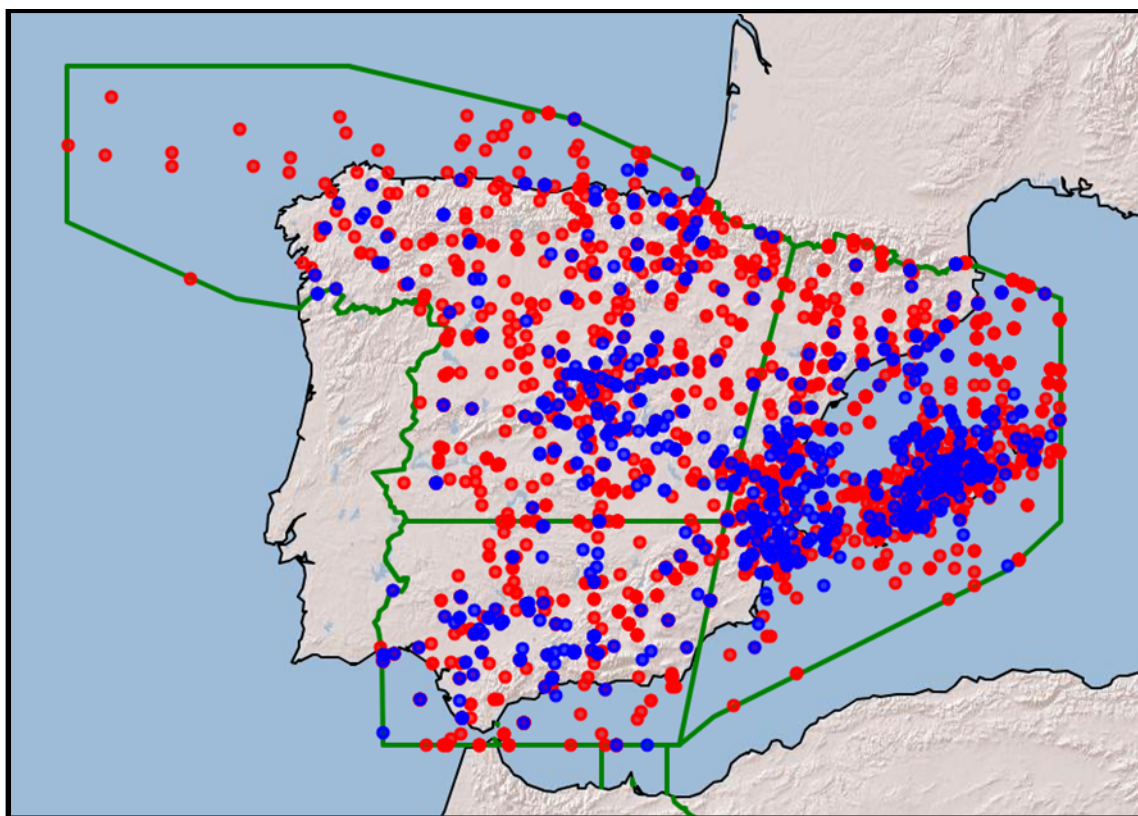


Figura 1. Distribución espacial de las posiciones de los AIREP de turbulencia (en rojo) y del engelamiento (en azul), periodo 2014-2024.

En este documento se presenta un análisis de los AIREP relacionados con fenómenos de turbulencia y engelamiento, en sus grados moderado (MOD) y severo (SEV), recibidos por las Oficinas de Vigilancia Meteorológica (OVM) de AEMET. Se incluyen estadísticas anuales, mensuales y segmentadas por región FIR (Madrid, Barcelona y Canarias) y sistemas montañosos, recopiladas entre 2014 y 2024. Tras un riguroso proceso de depuración, se

descartaron un total de 492 informes que presentaban errores tipográficos o campos incompletos, ya que impedían el cálculo automatizado de los estadísticos. Asimismo, se descartaron los reportes cuyas coordenadas no se encontraban dentro de los FIR objeto de estudio. Como resultado, se recopilaron 5285 AIREP asociados a fenómenos de engelamiento y turbulencia, cuya distribución espacial se muestra en la figura 1 y su distribución anual viene descrita en la tabla 1. Al desglosar los reportes por intensidad, se identifican 3200 casos de turbulencia moderada (MOD), 1156 de turbulencia severa (SEV), 766 de engelamiento moderado (MOD) y 163 de engelamiento severo (SEV). Además, se identificaron 112 AIREP relacionados con ondas de montaña, de los cuales 99 se registran dentro del espacio aéreo español. De estos, 60 se concentran dentro de los polígonos que representan los principales sistemas orográficos peninsulares.

AÑO	AIREP	ICE SEV/MOD (%)	TURB SEV/MOD (%)
2014	12	17	83
2015	247	21	79
2016	240	15	85
2017	366	11	89
2018	676	17	83
2019	693	16	84
2020	357	15	85
2021	435	18	82
2022	594	19	81
2023	747	19	81
2024	918	20	80

Tabla 1. Registro anual de los AIREP para el espacio aéreo español, periodo 2014-2024.

Las posiciones de las aeronotificaciones se corresponden con puntos discretos definidos por códigos asignados por ENAIRE, que están publicados en su Servicio de Información Aeronáutica (AIP) (<https://aip.enaire.es/AIP/>). Cada identificador está asociado a una ubicación geográfica específica, determinada por sus coordenadas de latitud y longitud. Por este motivo, cada punto representado en la figura 1 contiene una cantidad variable de reportes, observándose una mayor concentración en las proximidades de los aeropuertos principales, donde el tráfico aéreo es más intenso, principalmente en los meses estivales.

A partir de esto se observa que existe una mayor correlación de las observaciones con la densidad del tráfico aéreo que con la distribución espacial real de los fenómenos meteorológicos que originan la turbulencia y el engelamiento. En otras palabras, la distribución espacial de los AIREP está condicionada por la concentración de las aeronaves en determinadas áreas.

En la actualidad, la detección y predicción de turbulencia se apoya en índices más avanzados, como los índices de Ellrod1 y Ellrod2 (TI1 y TI2), la cizalladura vertical del viento (VWS), el número de Richardson y el *Eddy Dissipation Rate* (EDR), que se ha convertido en el estándar de referencia recomendado por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). En el ámbito nacional, desde la OVM de Valencia se ha realizado una adaptación específica para el espacio aéreo español de un índice de turbulencia combinado y normalizado descrito por (Belo-Pereira, 2022). Este enfoque combina distintos índices de diagnóstico, entre ellos el

índice Ellrod2, la cizalladura vertical, la deformación horizontal y otros predictores derivados del modelo numérico *Integrated Forecast System* IFS del *European Centre for Medium-Range Weather Forecast* ECMWF, con el objetivo de mejorar la capacidad de detección de zonas de turbulencia significativa.

Estudios recientes como el de (Wen *et al.*, 2025) respaldan la idea de que el engelamiento tiene lugar en el rango de temperaturas entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una frecuencia más alta de ocurrencia en el rango entre $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, y siendo todavía más probable que el engelamiento severo se produzca en el rango entre $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, con humedades relativas por encima del 65 %. Es por ello, que desde la OVM se pronostica el engelamiento con el contenido de agua líquida en nubes entre las isotermas de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Además, se ha llevado a cabo una adaptación del índice SFIPO obtenido por (Belo-Pereira, 2015) para el modelo numérico IFS, basado en el contenido de agua líquida subfundida, la velocidad vertical, la humedad relativa y la temperatura.

Por ello, los AIREP recibidos en tiempo real resultan de vital importancia, ya que constituyen prácticamente nuestra única fuente directa de verificación de las predicciones. Además, la vigilancia se complementa a partir de las imágenes de satélite y sus productos derivados, obtenidos mediante los postprocesos proporcionados por el NWC SAF de EUMETSAT (<https://www.nwcsaf.org/>).

2. ANÁLISIS ANUAL DE LOS AIREP EN EL ESPACIO AÉREO ESPAÑOL

El análisis conjunto de los AIREP recibidos en las tres regiones FIR durante el periodo 2014-2024 revela una evolución marcada por un crecimiento sostenido interrumpido únicamente por el impacto de la pandemia en 2020, (véanse la figura 2 y la tabla A-1). En total, se observa un incremento significativo tanto en fenómenos moderados como severos, alcanzando en ambos casos sus máximos en 2024, con 727 y 191 registros respectivamente.

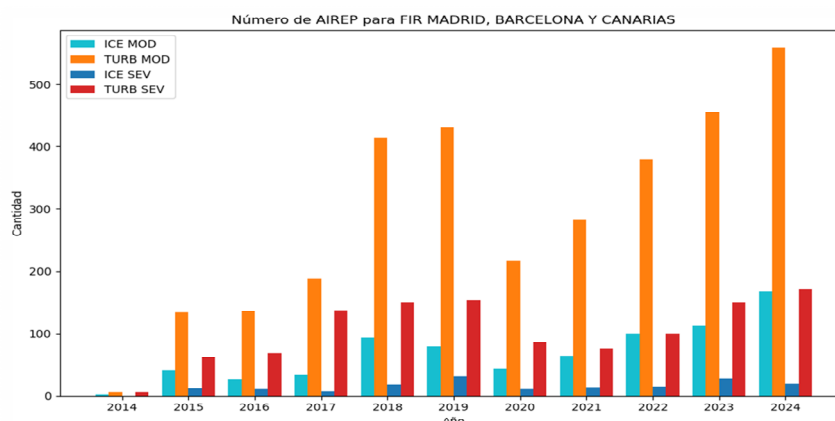


Figura 2. Registros de AIREP para FIR Madrid, Barcelona y Canarias, periodo 2014-2024.

En lo que respecta a los fenómenos moderados, la tendencia general es claramente ascendente. La turbulencia moderada representa la mayor parte de los registros, con un crecimiento especialmente acusado entre 2016 y 2019, y una recuperación sólida tras la pandemia que culmina en 2024 con 559 informes. El engelamiento moderado, aunque con menor volumen, también muestra una evolución positiva, pasando de apenas 2 registros en 2014 a 168 en 2024.

Los fenómenos severos, aunque menos frecuentes, siguen una evolución similar. La turbulencia severa es el fenómeno dominante dentro de esta categoría, con un pico en 2019 de 153 registros y un posterior aumento constante desde 2021 hasta alcanzar los 172 registros en 2024. El engelamiento severo, por su parte, presenta una evolución más irregular, con picos en 2019 de 31 registros y en 2023 de 28, y un ligero descenso en 2024 de 19 registros. En cuanto al engelamiento, cabe destacar los años 2016 y 2019, en los que las notificaciones severas representaron aproximadamente un 40 % del total de las moderadas. En el caso de la turbulencia severa, el año 2017 resulta especialmente relevante, ya que los reportes severos supusieron un 72 % respecto de las moderadas. Por otro lado, aunque en 2014 se registró un número similar de notificaciones de turbulencia severa y moderada, este resultado no se considera estadísticamente significativo debido al bajo volumen de reportes recopilados ese año.

El aumento de eventos observado está fuertemente relacionado con la recuperación del volumen de tráfico aéreo tras la pandemia, así como con las limitaciones estructurales del sistema actual de transmisión de AIREP, donde se implican las tripulaciones, el personal de ENAIRE en los Centros de Control de Área (CCA) y personal de la OVM de AEMET. Este procedimiento, al depender de múltiples intermediarios, puede introducir variabilidad en la recepción y registro de los informes. Por este motivo, no resulta posible establecer una relación directa entre la evolución de las observaciones y una intensificación real de los fenómenos meteorológicos.

2.1 Análisis anual por Región de Información de Vuelo (FIR/UIR)

La Región de Información de Vuelo (*Flight Information Region*, FIR), es un espacio aéreo de dimensiones definidas, establecido por la OACI, desde el cual se proporcionan servicios de información de vuelo y de alerta. El espacio aéreo español, gestionado por el proveedor de servicios para la navegación aérea ENAIRE, se divide en tres regiones FIR: Madrid, Barcelona y Canarias, cuyas dimensiones horizontales pueden observarse en la figura 1. Cabe destacar que la región FIR Madrid está subdividida en una subregión norte gestionada por el CCA de Torrejón de Ardoz (Madrid) y otra subregión sur, cuya responsabilidad recae sobre el CCA de Sevilla. En esta última se integra también el Corredor de Melilla, cuyo espacio aéreo hasta el nivel de vuelo FL060 es gestionado operativamente por el CCA de Sevilla. En lo relativo a su extensión vertical, tanto la subregión norte como la sur se extiende desde la superficie (SFC) hasta el nivel de vuelo FL245, y por encima de este límite, se sitúan sus respectivos *Upper Information Region* (UIR), que abarcan el espacio aéreo superior hasta altura ilimitada.

Durante el periodo 2014-2024, la mayoría de los AIREP analizados se concentraron en las FIR de Madrid y Barcelona, con una contribución claramente minoritaria en la FIR de Canarias. En conjunto, las FIR de Madrid y Barcelona acumularon el 94.8 % del total de registros, mientras que Canarias apenas representó el 5.2 %.

La región FIR Madrid, aunque ligeramente superior al FIR Barcelona, concentró el mayor número de AIREP durante el periodo 2014-2024, con un total de 2527 registros, lo que representa el 47.8 % del conjunto analizado. Tal como se muestra en la figura 3 y en la tabla A-2, tras la drástica caída registrada en 2020 como consecuencia de la pandemia, se observó una recuperación sostenida que culminó en 2024 con el máximo anual de 454 informes.

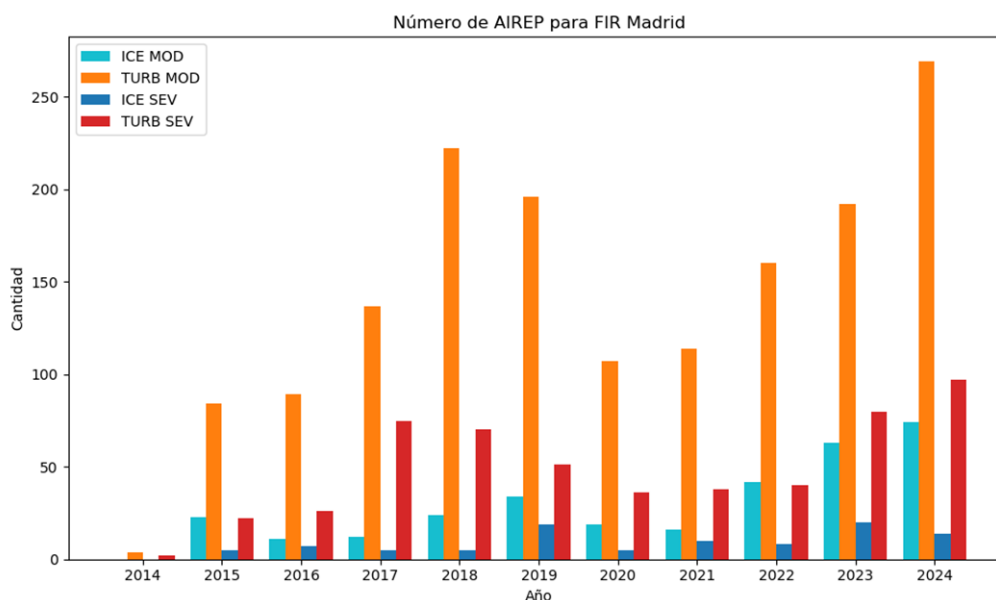


Figura 3. Registro anual de AIREP para la región FIR Madrid, periodo 2014-2024.

En cuanto a la turbulencia moderada, se alcanzó un máximo absoluto en 2024 con 269 registros, superando el pico relativo de 2018 (222 registros). La evolución de la turbulencia severa siguió una tendencia similar, con un máximo relativo en 2017 (75 registros) y un incremento posterior que culminó en 2024 con 97 registros, el valor más alto del periodo.

Respecto al engelamiento moderado, se observó un crecimiento progresivo desde 2019 (34 registros) hasta alcanzar los 74 en 2024. En el caso del engelamiento severo, destaca el máximo relativo de 2019 (19 registros), seguido de un repunte pospandémico que llevó al máximo absoluto en 2023, con 20 registros.

La FIR Barcelona registró un total de 2485 AIREP durante el periodo 2014-2024, lo que representa el 47 % del total analizado. Su evolución interanual fue muy similar a la observada en la FIR Madrid, (véanse figura 4 y tabla A-3). Presenta un máximo en 2019 (389 registros), seguido de una marcada disminución en 2020 como consecuencia de la pandemia, para luego volver a la senda de una recuperación progresiva que culminó en 2024 con un valor de 349 registros.

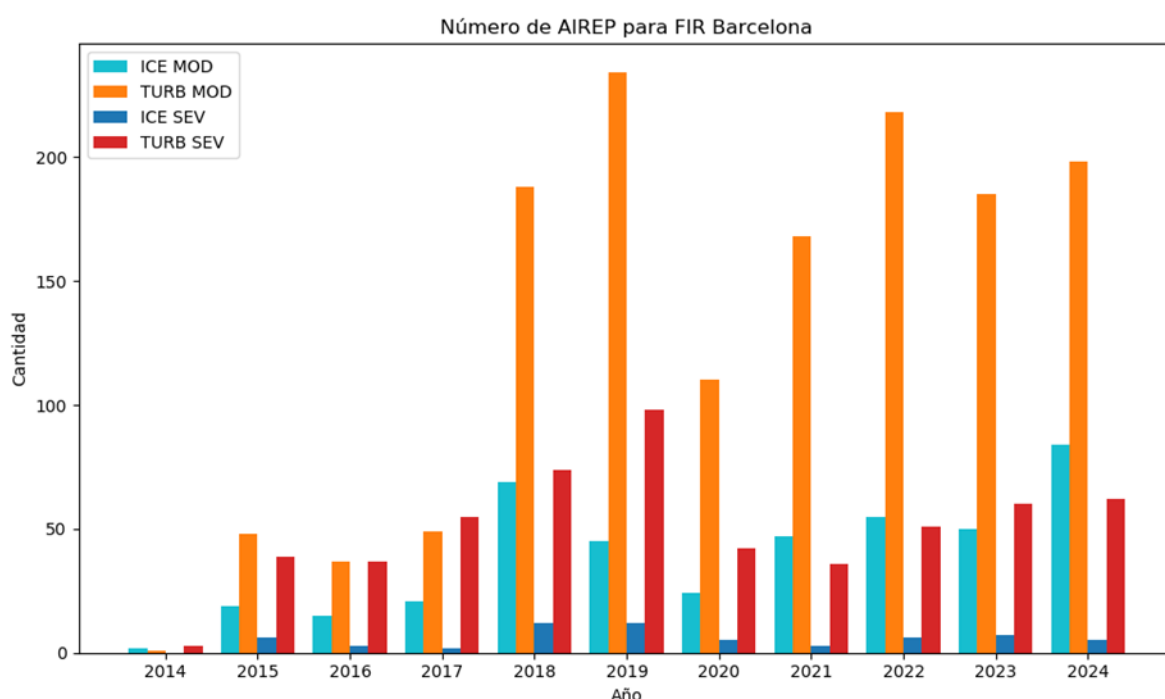


Figura 4. Registro anual de AIREP para la región FIR Barcelona, periodo 2014-2024.

En lo que respecta a la turbulencia moderada, se produjo un máximo absoluto en 2019 con 234 registros, para luego ir recuperándose en periodo post pandemia hasta alcanzar los 198 registros en 2024 y destacando los 218 de 2022. En el caso de la turbulencia severa, también se observó un pico en 2019 con 98 registros, seguido de una caída y una recuperación parcial que llevó a un máximo relativo en 2024 de 62 registros.

El engelamiento moderado mostró una evolución ascendente tras un primer pico en 2018 (69 registros), alcanzando su máximo absoluto en 2024 con 84 registros. Por su parte, el engelamiento severo presentó sus valores más altos en 2018 y 2019, con 12 registros en cada uno de esos años, sin que se hayan superado posteriormente.

La FIR Canarias presentó una actividad significativamente reducida en comparación con las regiones FIR peninsulares, con tan solo 273 AIREP registrados durante el periodo 2014-2024, lo que representa apenas el 5.2 % del total analizado, (véanse figura 5 y tabla A-4). La pandemia de COVID-19 no tuvo un impacto apreciable en la emisión de observaciones en esta región, dado que se disponen de pocos registros hasta 2022.

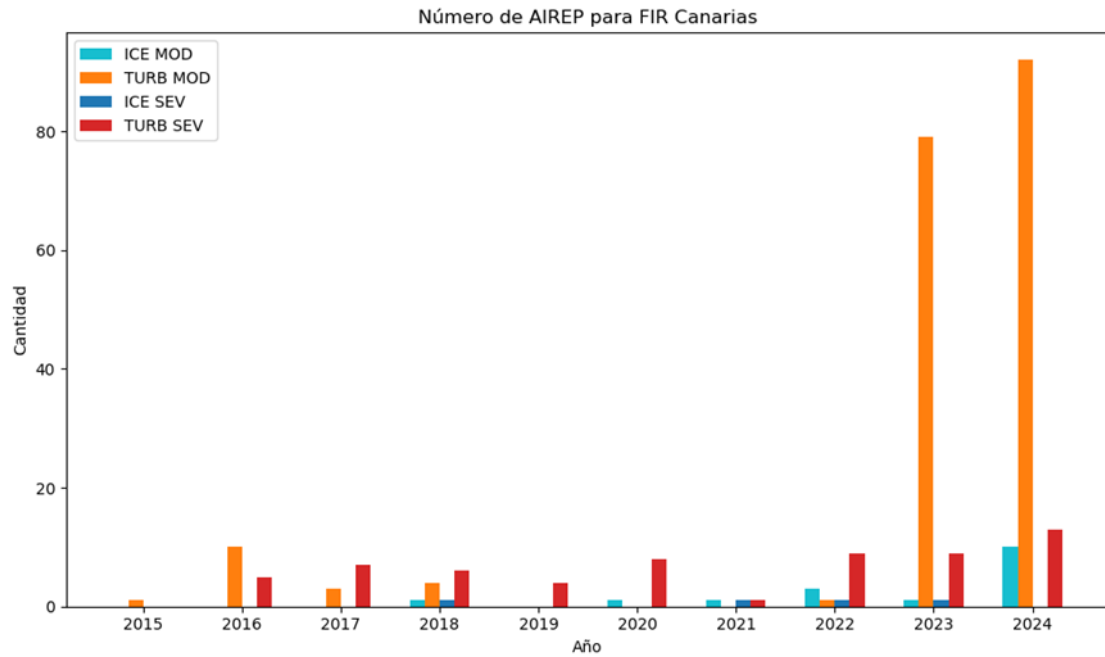


Figura 5. Registro anual de AIREP para la región FIR Canarias, periodo 2014-2024.

En cuanto a la turbulencia moderada, se observa un incremento muy acusado en los dos últimos años del periodo de estudio, alcanzándose el máximo en 2024 con 92 registros, seguido de 2023 con 79. El engelamiento moderado presenta una frecuencia muy baja durante toda la serie, registrándose con un máximo de 10 casos en 2024 y valores aislados en 2018, 2020, 2021, 2022 y 2023.

La turbulencia severa se presentó a partir de 2016, con un máximo en 2024 de 13 registros. Por otro lado, el engelamiento severo fue prácticamente inexistente, con tan solo algunos casos aislados en 2018, 2021, 2022 y 2023.

3. ANÁLISIS MENSUAL DE LOS AIREP EN EL ESPACIO AÉREO ESPAÑOL

El análisis mensual de los AIREP registrados en el conjunto de las regiones FIR españolas durante el periodo 2014-2024 revela una estacionalidad marcada en la ocurrencia de fenómenos meteorológicos significativos, especialmente en lo relativo a la turbulencia y el engelamiento, como muestran los datos en la figura 6 y en la tabla A-5. Esta estacionalidad se manifiesta en una mayor frecuencia de reportes durante los meses invernales y de transición, en contraste con los meses estivales, donde la actividad disminuye notablemente.

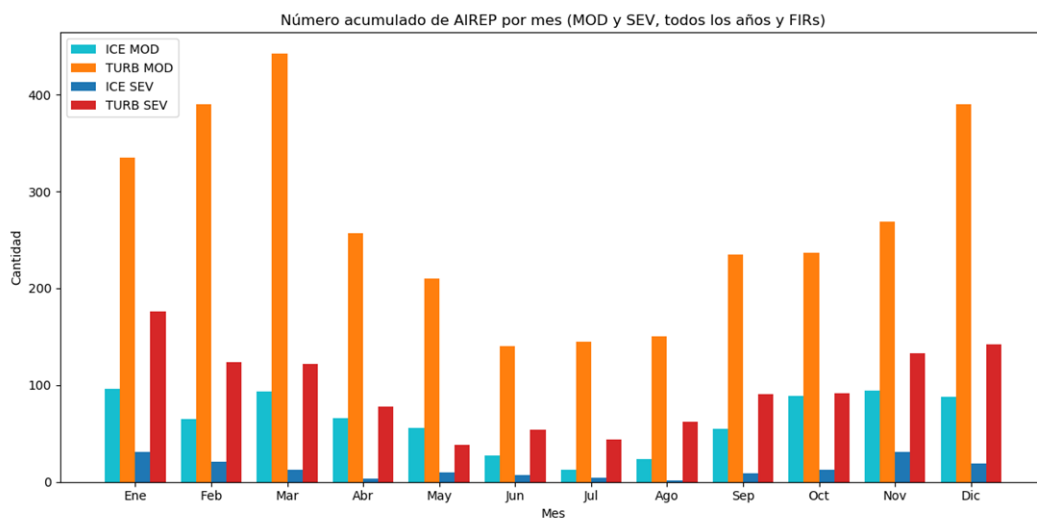


Figura 6. Registros mensuales de AIREP para las FIR Madrid, Barcelona y Canarias, periodo 2014-2024.

Los fenómenos moderados presentan una distribución claramente invernal. El mes de marzo se sitúa como el más activo del periodo, con un total de 535 registros moderados, seguido de diciembre (478), febrero (455) y enero (431). Esta concentración de reportes coincide con los meses de mayor inestabilidad atmosférica y condiciones propicias para la formación de hielo y la generación de turbulencia.

La turbulencia moderada es el fenómeno más reportado, con picos en marzo (442), febrero (390), diciembre (390) y enero (335), lo que refleja la intensificación de los *jet streams* y la mayor incidencia de turbulencia en aire claro (CAT) durante el invierno, donde estudios recientes (Hermoso *et al.*, 2024) analizan que el *jet* se localiza a latitudes más bajas durante el invierno, y se produce un aumento del gradiente de temperatura meridional (ecuador-polo) y por ende, un aumento del transporte de energía o lo que es lo mismo un incremento en la intensidad de este. La relación entre la CAT y los máximos de viento del *jet stream* es bien conocida, donde ya a mediados del siglo pasado se relacionaba con la fuerte cizalladura vertical cerca o dentro del *jet stream* (Clem, 1955). Además, se produce un aumento de la turbulencia orográfica y de las ondas de montaña en los meses invernales, generadas por la interacción del viento con el relieve bajo ciertas condiciones de estabilidad atmosférica y cizalladura vertical longitudinal. La turbulencia severa es el fenómeno severo más frecuente, con máximos en enero (176), diciembre (142), noviembre (133), febrero (124) y marzo (122). Durante los meses de verano (junio, julio y agosto), la actividad disminuye notablemente, debido al desplazamiento

del *jet stream* hacia latitudes más septentrionales, como por la menor frecuencia de las condiciones que dan lugar a la formación de ondas de montaña.

El engelamiento moderado también muestra una distribución invernal, con máximos en enero (96), marzo (93), octubre (89), noviembre (94) y diciembre (88). Este patrón está en consonancia con la mayor actividad frontal característica de la estación, que se asocia a una mayor presencia de nubes estratiformes que contienen gotas superenfriadas, condiciones que favorecen el engelamiento. Hay estudios empíricos, como (Fernández-González *et al.*, 2014), donde demuestran la relación entre el engelamiento y las nubes estratiformes, que además puede verse realizado por otros factores de mesoescala orográficos, como son la presencia de una baja a sotavento o la generación de ondas de montaña bajo la presencia de una inversión térmica por encima de la nube. Cabe destacar que el engelamiento tiende a presentarse con mayor intensidad en nubes convectivas, pero su extensión espacial es más localizada y las aeronaves tratan de reducir al máximo su exposición. Aun así, la presencia de nubes convectivas puede tener cierta relevancia en los reportes que se generan en época estival. El engelamiento severo alcanza su pico en enero y en noviembre con (31), seguido por febrero (21), lo que refleja la mayor presencia de condiciones favorables para el engelamiento estructural en aeronaves durante la temporada fría.

Es importante señalar que, aunque no puede extraerse una conclusión de la evolución anual de los AIREP frente a la variación de fenómenos meteorológicos significativos, ya que la principal explicación de su aumento estaba condicionada por el aumento progresivo del número de vuelos, sí que puede determinarse que existe una relación estacional de los fenómenos meteorológicos que generan condiciones de turbulencia y engelamiento, ya que la evolución mensual de los AIREP es inversa al número de operaciones aéreas.

Estos factores explican la concentración de AIREP durante los meses fríos, lo que podría sugerir la necesidad de una vigilancia meteorológica reforzada en ese período, desde el punto de vista de la predicción operativa. Sin embargo, desde la perspectiva de la gestión del riesgo aeronáutico asociado con la meteorología, el verano constituye la estación con un mayor impacto para la Península y Baleares a pesar de las estadísticas obtenidas, en parte debido al incremento del tráfico aéreo, principalmente en los aeropuertos situados en el Mediterráneo, y a la influencia de la convección. A continuación, la tabla 2 muestra la evolución anual de la convección para la Península y Baleares para el periodo 2007-2016, a partir de la climatología de descargas eléctricas elaborada y publicada por (Núñez *et al.*, 2019), donde se observa que se produce un aumento de la actividad en los meses de verano, con un pico en septiembre, que supone el 23.9 % del total de las descargas anuales.

mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
%	1.3	1.1	1.6	4.4	7.8	11.7	12.8	15.5	23.9	11.8	6.1	2.0

Tabla 2. Porcentaje mensual de las descargas eléctricas en la Península y Baleares, periodo 2007-2016.

En el caso de Canarias, a diferencia del entorno peninsular, la actividad eléctrica no presenta una concentración estival, sino que se distribuye predominantemente durante los meses fríos. La tabla 3 recoge la distribución mensual de las descargas eléctricas en las islas Canarias para el periodo 2007-2016, a partir de la climatología elaborada por (Núñez *et al.*, 2019). El tráfico aéreo de los aeropuertos canarios presenta una distribución más homogénea durante todo el

año, asociada al clima más suave que ofrece este archipiélago y a su condición de destino turístico durante todas las estaciones, tal y como se publican en estadísticas como (AENA, 2025).

mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
%	7.2	12.2	11.1	0.5	0.8	0.2	0.4	4.4	2.2	13.2	31.7	16.1

Tabla 3. Porcentaje mensual de las descargas eléctricas en las islas Canarias, periodo 2007-2016.

3.1 Análisis mensual por Región de Información de Vuelo (FIR/UIR)

La evolución mensual de los AIREP en la FIR Madrid durante el periodo 2014-2024 muestra una marcada estacionalidad, con una disminución significativa de registros durante los meses de verano, especialmente en julio y agosto, tal como los resultados muestran en la figura 7 y en la tabla A-6. Dado que este FIR concentra aproximadamente el 47.8 % del total de AIREP analizados, su comportamiento mensual resulta altamente representativo del conjunto del espacio aéreo español.

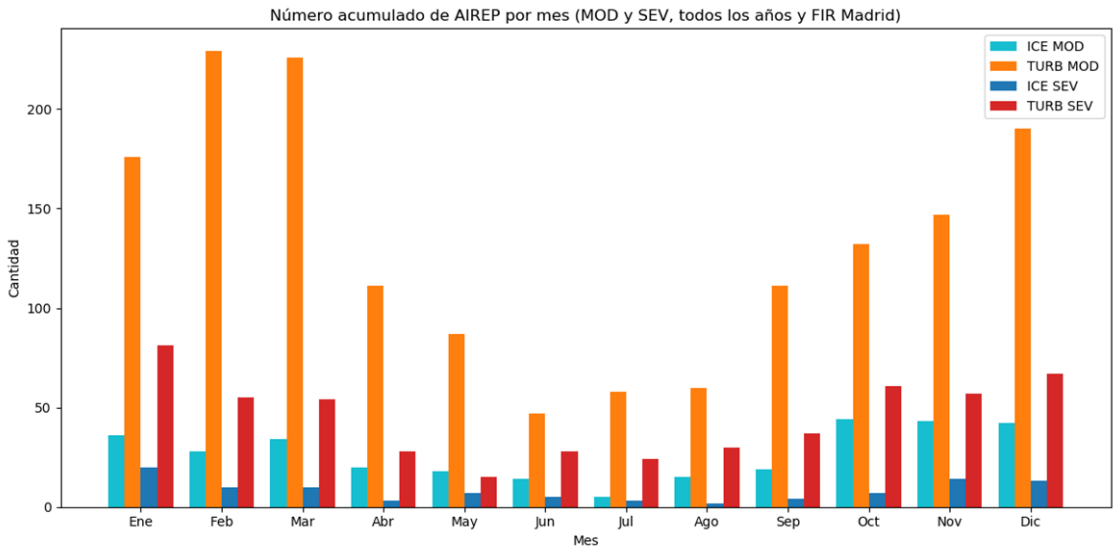


Figura 7. Registro mensual de AIREP para la región FIR Madrid, periodo 2014-2024.

En lo que respecta a la turbulencia moderada, se observa un claro predominio durante los meses fríos, alcanzando su máximo en febrero con 229 registros.

El engelamiento moderado, por su parte, presenta su mayor incidencia entre octubre y enero. Esta distribución es coherente con el inicio de la temporada fría, cuando las condiciones de temperatura y humedad favorecen la formación de hielo en niveles de vuelo.

En cuanto a los fenómenos severos, la turbulencia severa alcanza su punto máximo en enero con 81 registros, manteniéndose en valores elevados durante el invierno y el otoño. El engelamiento severo también presenta su mayor frecuencia en enero, con 20 registros, lo que

refuerza la estacionalidad invernal de este tipo de fenómeno y su potencial impacto en la seguridad operacional.

La evolución mensual de los AIREP en la FIR Barcelona durante el periodo 2014-2024 muestra una distribución estacional similar a la observada en la FIR Madrid, véase figura 8 y tabla A-7. Existe una menor actividad durante los meses de verano, especialmente en julio y agosto. Esta tendencia está asociada a una menor incidencia de fenómenos meteorológicos adversos, a pesar de que se produce un aumento del tráfico aéreo en los meses estivales.

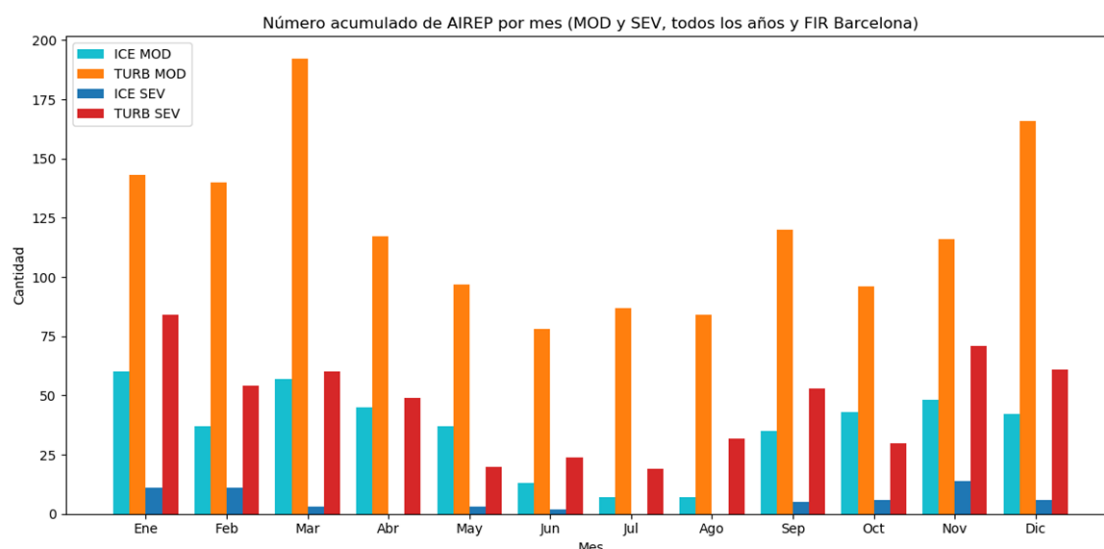


Figura 8. Registro mensual de AIREP para la región FIR Barcelona, periodo 2014-2024.

La turbulencia moderada alcanza su máximo en el mes de marzo, con 192 registros, seguida de cerca por diciembre y enero. Por su parte, el engelamiento moderado presenta su mayor frecuencia en enero, con 60 registros, lo que coincide con las condiciones más propicias para la formación de hielo en vuelo.

En cuanto a los fenómenos severos, la turbulencia severa muestra su pico en enero con 83 registros, manteniéndose en niveles elevados en noviembre y diciembre. El engelamiento severo alcanza su máximo en noviembre, con 14 registros.

El análisis mensual de los AIREP en la FIR Canarias durante el periodo 2014-2024 confirma la escasa representatividad estadística de esta región, que apenas aporta el 5.2 % del total de registros, véase figura 9 y tabla A-8. Esta baja densidad de datos impide establecer tendencias mensuales consistentes, aunque se pueden destacar algunos valores puntuales.

En cuanto a la turbulencia moderada, los valores más elevados se registran en los meses de invierno y primavera, destacando diciembre con 34 registros, seguido de abril (29), mayo (26) y marzo (24), lo que refleja una mayor actividad en este periodo frente a los meses estivales, donde los valores son considerablemente más bajos, llegando incluso a ser nulos en julio. Por su parte, el engelamiento moderado presenta una frecuencia reducida, con un máximo de 4 registros en diciembre y valores puntuales en el resto de los meses, siendo inexistente en varios periodos del año.

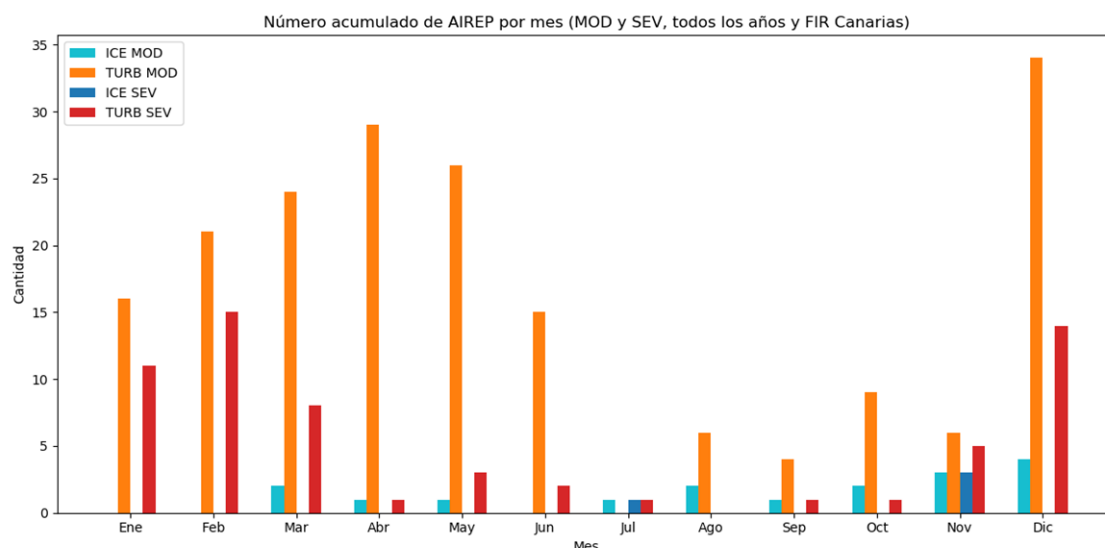


Figura 9. Registro mensual de AIREP para la región FIR Canarias, periodo 2014-2024.

La turbulencia severa muestra una distribución irregular, con mayor incidencia en los meses de invierno, especialmente en febrero (15), diciembre (14) y enero (11), mientras que en primavera y verano los registros son mucho más escasos. En cuanto al engelamiento severo, su aparición es muy limitada, registrándose únicamente en julio (1 caso) y noviembre (3 casos), sin presencia en el resto del periodo analizado.

En el caso de Canarias, los máximos de turbulencia están relacionados básicamente con dos factores. Por un lado, con la intensificación y aproximación del chorro subtropical, que se produce durante los meses de invierno y primavera (Cuevas, 2001). El chorro subtropical suele ser menos intenso que el polar y lo habitual es que genere turbulencia moderada, y en raras ocasiones severa. Por otro lado, con los descolgamientos de vaguadas polares hasta latitudes próximas al archipiélago, que terminan formando danas y/o bajas frías aisladas (BFA) en el entorno de las islas. Este tipo de situaciones son más frecuentes en los meses de noviembre a enero, aunque pueden aparecer también en primavera (Font Tullot, 1956). Debido a la presencia o aproximación de un chorro polar intenso y su cizalladura asociada, así como de convección más organizada y extensa, es más frecuente que aparezcan aeronotificaciones de turbulencia severa en estos casos.

El mínimo observado durante el verano y el inicio del otoño se asocia al debilitamiento del chorro subtropical en esta época del año, y a la ausencia de perturbaciones asociadas al chorro polar que se desplaza notablemente al norte del archipiélago.

4. ANÁLISIS MENSUAL POR ALTITUDES DE LOS AIREP EN EL ESPACIO AÉREO ESPAÑOL

Este apartado tiene como propósito caracterizar la evolución mensual de las altitudes de dos fenómenos meteorológicos relevantes para la aviación: la turbulencia y el engelamiento. Para ello, se han utilizado datos procesados y visualizados correspondientes a un año completo. De un total de 5285 registros disponibles, se han excluido 27 observaciones debido a la ausencia de información en los campos de altitud en niveles de vuelo. En consecuencia, el análisis se ha realizado sobre un conjunto depurado de 5258 registros válidos correspondientes al periodo de estudio (2014-2024).

4.1 La turbulencia

En la figura 10 se representa la evolución mensual de la extensión vertical de las aeronotificaciones de turbulencia. El área sombreada corresponde al rango intercuartílico (RIC), que refleja la dispersión estadística entre el primer cuartil (Q1, 25 % de los datos) y tercer cuartil (Q3, 75 % de los datos). Además, se representa la mediana de cada mes en una línea continua, que nos proporciona una referencia central de la distribución.

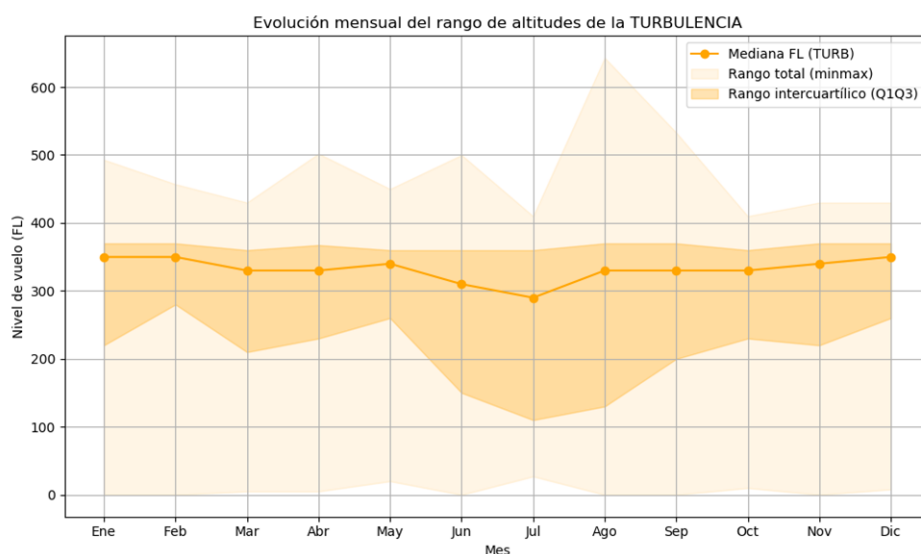


Figura 10. Registros mensuales para la turbulencia en niveles de vuelo (FL) para todo el espacio aéreo español, periodo 2014-2024.

La gran mayoría de eventos de turbulencia se concentran entre los niveles de vuelo FL300 y FL390, especialmente en los meses fríos, esta franja coincide con la altitud típica de los chorros polares (*jet streams*). Este hecho se observa con mayor claridad en la figura 11, donde se representa la densidad mensual de las observaciones en función de su altitud expresada en niveles de vuelo. En los meses de invierno, la corriente circumpolar desciende de latitud debido al mayor gradiente térmico entre el Ártico y latitudes medias, por lo que el *jet* se intensifica y se posiciona más al sur, afectando directamente a la península ibérica y Baleares. Esto da lugar a que se observe una mayor densidad de observaciones en los meses fríos entre los niveles de vuelo, siendo coherente con la CAT, muy común cerca de los máximos de viento del chorro.

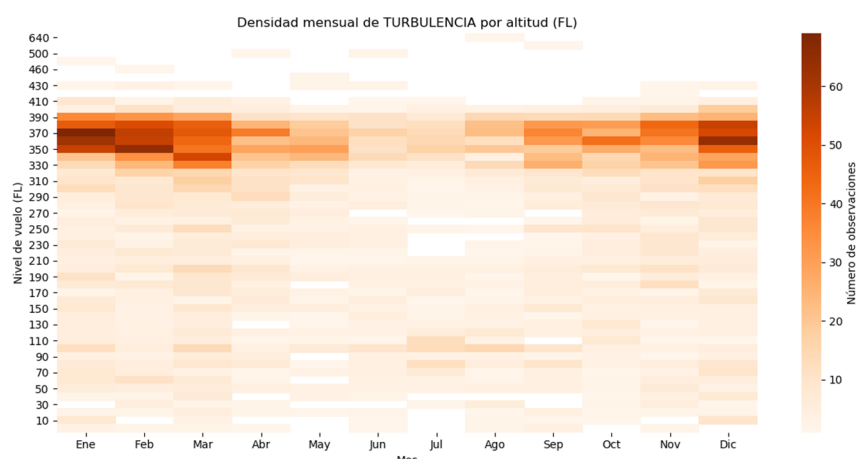


Figura 11. Densidad mensual para la turbulencia en niveles de vuelo (FL) para todo el espacio aéreo español, periodo 2014-2024.

Por el contrario, en los meses de verano el chorro es más débil y se desplaza hacia el norte, causando menos CAT sobre el espacio aéreo español, por lo que el número de observaciones disminuye notablemente, dando lugar a que los eventos destacados estén distribuidos de una manera más homogénea en la vertical, posiblemente porque estén asociados a desarrollos convectivos o turbulencia orográfica.

El análisis de la distribución mensual de la turbulencia por niveles de vuelo en la FIR Madrid muestra un patrón claramente estructurado y coherente a lo largo del año. La mayor densidad de aeronotificaciones se concentra de forma persistente en niveles altos de la troposfera, principalmente entre FL330 y FL390, donde se localiza el núcleo de máximos de frecuencia (ver figuras 12 y 13, tabla A-10). Este comportamiento queda reforzado por la evolución mensual del rango altitudinal, donde la mediana de los reportes se mantiene notablemente estable, oscilando en torno a FL340-360 durante todo el año. Asimismo, el RIC (Q1-Q3) permanece relativamente acotado dentro de estos niveles, lo que indica una baja dispersión vertical de los eventos más representativos.

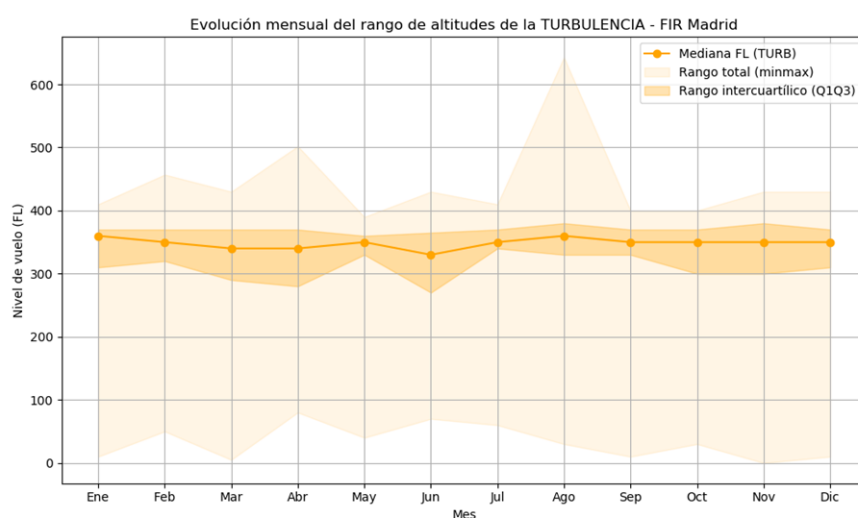


Figura 12. Registro mensual de la turbulencia en niveles de vuelo (FL) en la región FIR Madrid, periodo 2014-2024.

Desde el punto de vista estacional, se observa en la figura 13 una intensificación de la señal en los meses invernales (diciembre a marzo), donde aumenta la densidad de observaciones en niveles altos, mientras que en los meses estivales la actividad disminuye y se presenta de forma más dispersa. No obstante, incluso en verano, la mayor parte de los reportes continúan concentrándose en niveles compatibles con la CAT.

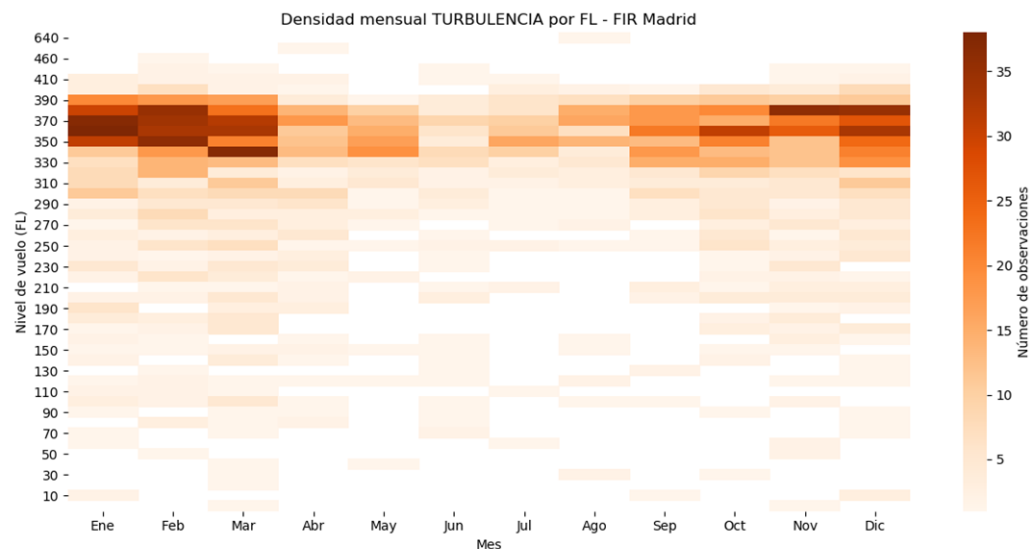


Figura 13. Densidad mensual de la turbulencia en niveles de vuelo (FL) en la región FIR Madrid, periodo 2014-2024.

Además, se produce una disminución de la turbulencia a lo largo de la troposfera media y baja durante los meses estivales, lo que podría estar relacionado con una menor contribución de la turbulencia de origen orográfico. En esta época del año, la menor intensidad de los flujos sinópticos y la reducción de las situaciones favorables para la generación de ondas de montaña limitan tanto la turbulencia asociada a su ruptura como las de carácter mecánico inducida por la interacción mecánica del viento con la orografía. Por tanto, los eventos convectivos, pasarían a ser un mecanismo más dominante frente a la menor contribución de los procesos dinámicos y orográficos.

En conjunto, estos resultados evidencian que la turbulencia en la FIR Madrid presenta un comportamiento vertical muy consistente, dominado por procesos dinámicos de gran escala asociados a la corriente en chorro y a la cizalladura vertical del viento, con una contribución limitada de mecanismos locales o convectivos. Esta homogeneidad altitudinal sugiere, además, una mayor previsibilidad del fenómeno en comparación con otras regiones.

En relación con este último punto sobre la procedencia de la turbulencia, se observan diferencias al analizar la FIR Barcelona (figuras 14 y 15, tabla A-11) respecto al FIR Madrid. El rango intercuartílico en la FIR Barcelona se expande considerablemente, abarcando la troposfera media y alta. Esta expansión es especialmente notable durante los meses estivales, cuando la mediana desciende de forma acusada hacia niveles medios, en contraste con el comportamiento más estable observado en la FIR Madrid. Por tanto, existe una mayor influencia a procesos que no están asociados a la CAT que proporcionan los chorros asociados al frente polar.

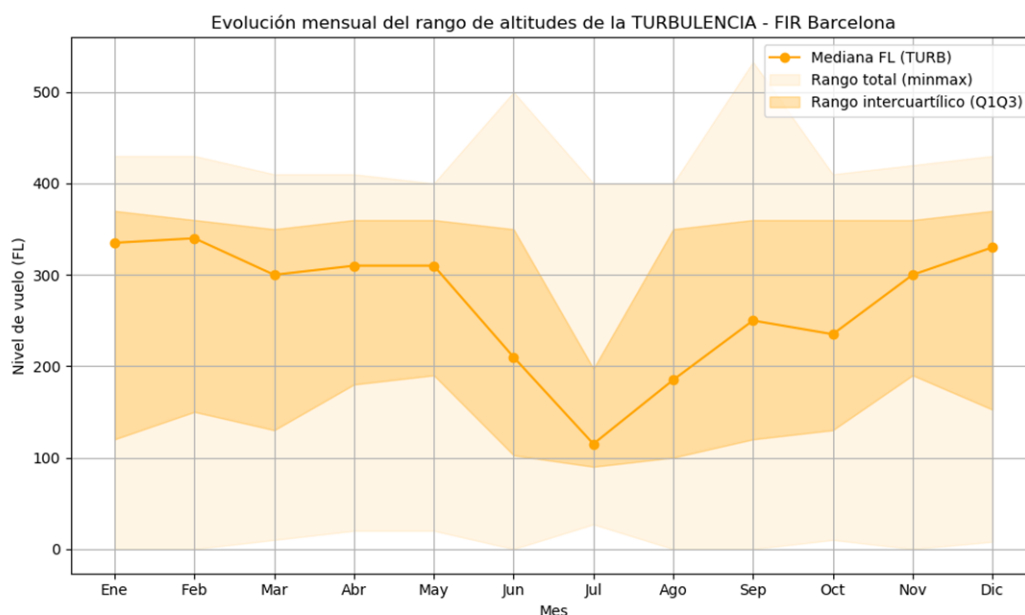


Figura 14. Registro mensual de la turbulencia en niveles de vuelo (FL) en la región FIR Barcelona, periodo 2014-2024.

Este comportamiento puede explicarse por la influencia combinada de varios factores. En primer lugar, la proximidad al mar Mediterráneo favorece un mayor aporte de humedad y, por tanto, mayor frecuencia de situaciones de inestabilidad atmosférica, lo que se traduce en una mayor actividad convectiva. Este tipo de turbulencia, de carácter más localizado y verticalmente desarrollado, contribuye a ampliar el rango de altitudes afectadas.

En segundo lugar, la interacción del flujo con la compleja orografía del noreste peninsular, especialmente en el entorno de los Pirineos y del sistema Ibérico, favorece la generación de turbulencia orográfica en distintos niveles de la troposfera. A diferencia de la FIR Madrid, donde domina la señal asociada al chorro, en esta región los mecanismos orográficos pueden tener un peso más relevante.

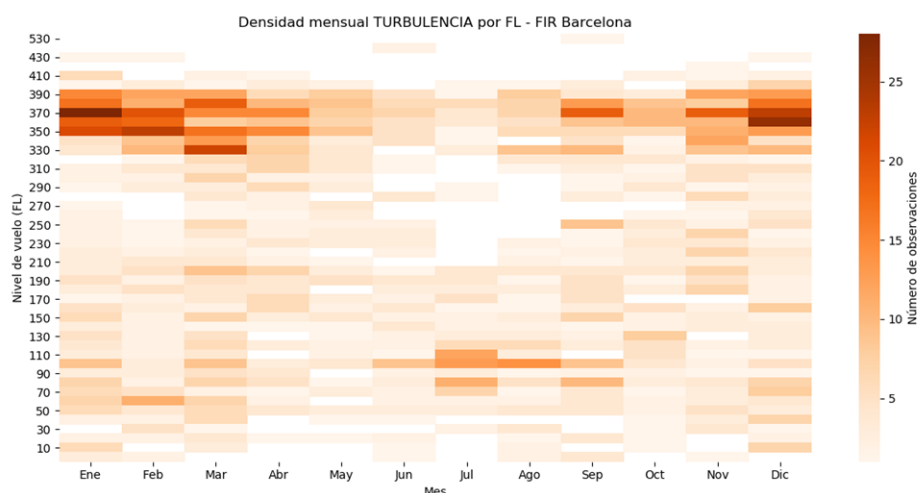


Figura 15. Densidad mensual de la turbulencia en niveles de vuelo (FL) en la región FIR Barcelona, periodo 2014-2024.

En tercer lugar, puede considerarse que, en determinadas situaciones sinópticas, la FIR Barcelona puede verse relativamente más influenciada por el chorro subtropical en comparación con la FIR Madrid. Además de la turbulencia que puede generar el propio chorro por la cizalladura asociada, su presencia puede aportar forzamiento dinámico en niveles altos, favoreciendo el desarrollo de convección elevada en entorno del Mediterráneo. Este tipo de convección está asociado a situaciones bien conocidas y ha sido relacionado, entre otros fenómenos, a las *rissagas* que se producen en Ciutadella (Menorca) (Jansà *et al.*, 2007). En este escenario, se produce una advección de aire cálido procedente del norte de África en torno a 850 hPa, que da lugar a la formación de una capa muy estable en niveles inferiores. Como consecuencia, los mecanismos de disparo convectivo quedan desacoplados de la superficie y se desarrollan por encima de dicha inversión, en capas medias de la troposfera caracterizadas por una mayor inestabilidad. Este escenario puede dar lugar a la generación de turbulencia en niveles medios y altos, contribuyendo a la ampliación del rango intercuartílico y a una mayor dispersión vertical de las aeronotificaciones en la FIR Barcelona.

En las figuras 16 y 17, se puede ver cómo se distribuyen verticalmente las aeronotificaciones por turbulencia para el FIR de Canarias a lo largo del año. Destaca que los meses de invierno y primavera (con un mayor número de eventos) presentan un comportamiento regular y con RIC relativamente estrecho en torno al nivel de vuelo FL350. Como se ha comentado anteriormente, se puede asociar al máximo del chorro subtropical que se produce en esta época del año y a las perturbaciones de origen polar que se descuelgan hasta las islas.

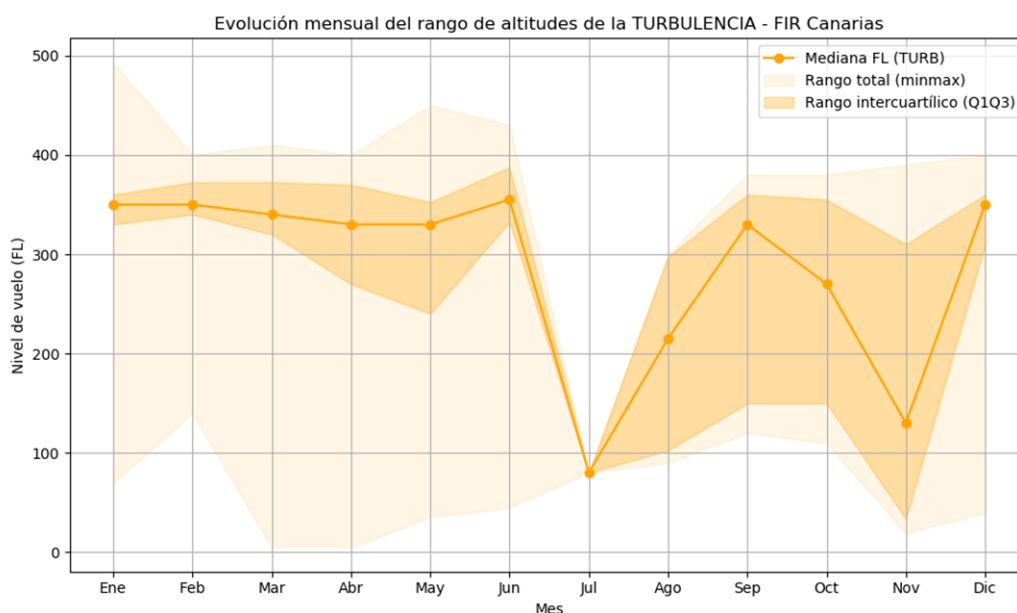


Figura 16. Registro mensual de la turbulencia en niveles de vuelo (FL) en la región FIR Canarias, periodo 2014-2024.

A partir de junio se ve un cambio de patrón, julio destaca con una casi ausencia de reportes y para final de verano e inicio del otoño el comportamiento es más errático con una distribución más heterogénea y un RIC más amplio que va desde el nivel de vuelo FL100 hasta por encima del FL300. La escasez de números de reportes durante estos meses no ayuda a sacar conclusiones claras, pero sí que puede reflejar que es la época del año en la que se pueden dar más variedad de situaciones, dado que son los meses más proclives para la presencia de ondas

del este o de perturbaciones de origen tropical y subtropical (en las que son más habituales que los forzamientos dinámicos tengan más importancia en la troposfera baja-media que en la alta), y en los que pueden aparecer las primeras borrascas del semestre invernal.

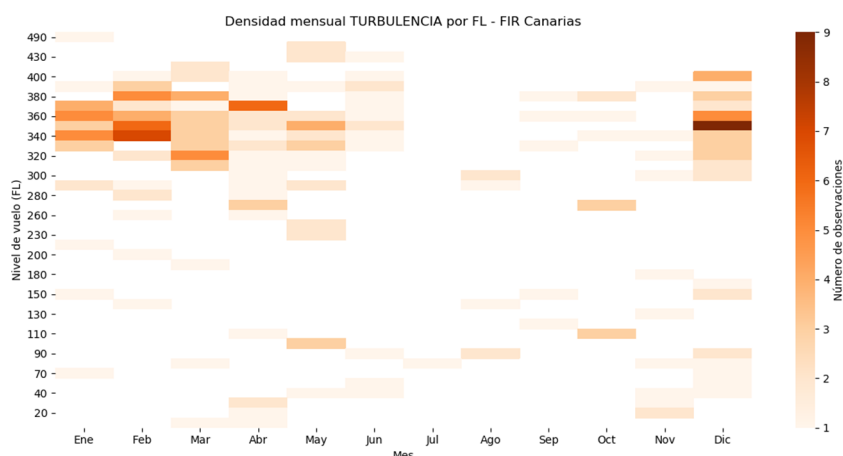


Figura 17. Densidad mensual de la turbulencia en niveles de vuelo (FL) en la región FIR Canarias, periodo 2014-2024.

4.2 El engelamiento

La mayoría de los casos de engelamiento se concentran entre FL100 y FL220, rango en el que se sitúa el RIC (Q1-Q3) durante prácticamente todo el año, véase la figura 18 y tabla A-13. No obstante, se observan eventos aislados tanto en niveles muy bajos (desde FL010), debido a incursiones de aire muy frío procedente de latitudes septentrionales en época invernal, así como a altitudes superiores a FL450, cuya procedencia está asociada a procesos convectivos que permiten que el engelamiento se dé a temperaturas más bajas de lo habitual y por tanto, se produzcan registros a alturas más altas.

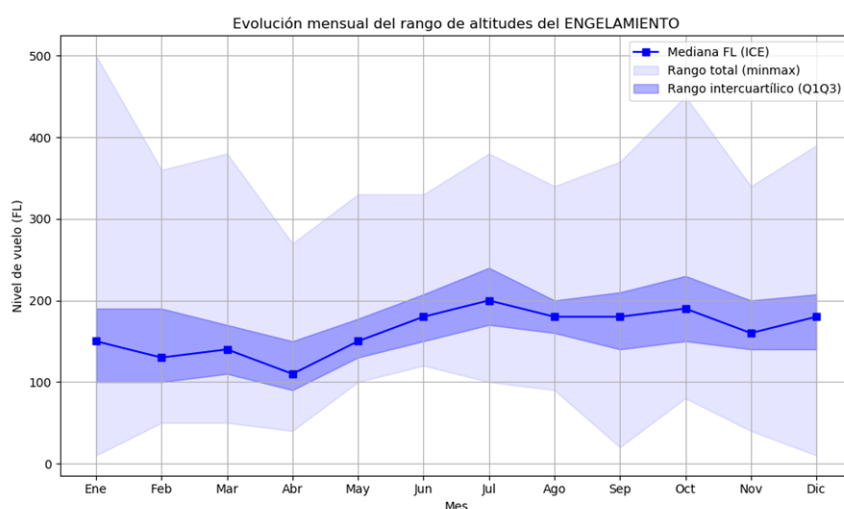


Figura 18. Registro mensual del engelamiento en niveles de vuelo (FL) para todo el espacio aéreo español, periodo 2014-2024.

Debe recordarse que el rango de temperaturas en el que el engelamiento resulta más eficiente para situaciones estratiformes se sitúa, en términos generales, entre 0 °C y –12 °C, alcanzando su máxima eficacia entre –4 °C y –8 °C, intervalo en el que las gotas de agua superenfriada son más abundantes y de mayor tamaño. A partir de –15 °C, la eficiencia del engelamiento disminuye notablemente, ya que la mayoría del contenido líquido de las nubes tiende a transformarse en cristales de hielo, reduciendo así el riesgo de formación de hielo en aeronaves.

No obstante, en el caso de nubes convectivas, el engelamiento más severo puede producirse en un rango térmico más amplio, que abarca desde el nivel de congelación hasta alcanzar incluso temperaturas de –40 °C, gracias a la presencia de corrientes ascendentes intensas que lo desplazan desde capas inferiores. Estas corrientes son capaces de mantener en suspensión gotas subfundidas de gran tamaño (*SLD*), lo que favorece una dispersión vertical más amplia del fenómeno y permite que el engelamiento se manifieste a altitudes significativamente más elevadas que en situaciones estratiformes. Las gotas suspendidas en las corrientes ascendentes alcanzan su tope, generalmente ubicado en la tropopausa, donde se esparcen horizontalmente a lo largo y ancho del yunque hasta distancias muy alejadas de la fuente principal (decenas de km). Por tanto, cuando la aeronave bordea la tormenta y se adentra en la (inofensiva, *a priori*) delgada capa de cirros, puede encontrarse con la presencia inesperada de engelamiento. Cabe resaltar que la eficiencia del engelamiento también depende del tiempo de exposición a este fenómeno.

Durante los meses de invierno y primavera (enero a abril), el engelamiento tiende a localizarse en niveles más bajos, con el primer cuartil (Q1) situado generalmente en torno a FL080-100. Esto es coherente con la presencia de una atmósfera más fría y húmeda en niveles medios y bajos, donde se favorece la existencia de nubes superenfriadas de tipo estratiforme asociadas frecuentemente a superficies frontales, típicas de la dinámica invernal que afecta a la península ibérica.

En los meses estivales (junio a agosto), se produce una disminución significativa en el número de observaciones, pero se observa un ascenso del nivel medio de vuelo afectado por engelamiento, alcanzando máximos cercanos a FL200-220. Este comportamiento responde a un aumento generalizado de las temperaturas, que desplaza las capas de temperatura de congelación a altitudes más elevadas. A pesar del descenso en frecuencia, el rango vertical de afectación se mantiene amplio, reflejo de la variabilidad altitudinal introducida por los procesos convectivos típicos del verano, en los que el engelamiento se asocia a estructuras más localizadas y dinámicas, como cúmulos y cumulonimbos.

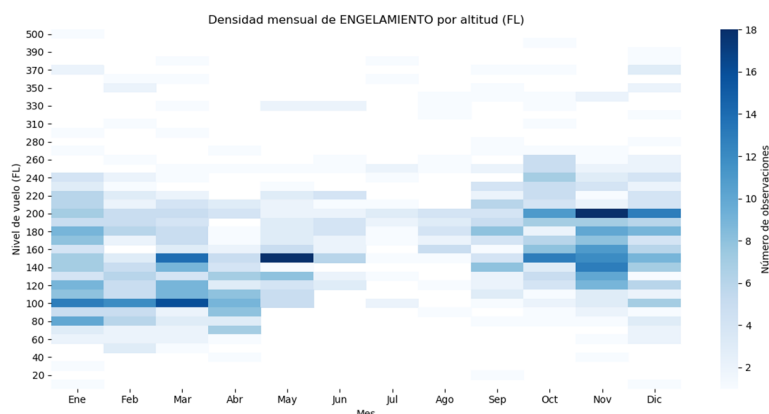


Figura 19. Densidad mensual del engelamiento en niveles de vuelo (FL) para todo el espacio aéreo español, periodo 2014-2024.

En resumen, la figura 19 muestra que el engelamiento presenta un comportamiento estacional bien definido: en invierno domina en capas ligeramente más bajas y está ligado a sistemas frontales y nubosidad estratiforme, mientras que en el verano, aunque menos frecuente, puede producirse a mayor altitud y está más asociado a la convección, manteniendo una dispersión vertical significativa.

El análisis de las aeronotificaciones de engelamiento en la FIR Madrid muestra una clara modulación estacional, tanto en frecuencia como en distribución vertical. Como se muestra en la figura 20 y la tabla A-14, el RIC presenta una variabilidad moderada a lo largo del año, y se produce un desplazamiento de la distribución hacia alturas más altas en época estival, en consonancia con la evolución de la estructura térmica de la troposfera. Por su parte, el rango total (mínimo-máximo) evidencia una elevada variabilidad en todos los meses, con extremos que pueden abarcar desde niveles muy bajos, en torno a FL010, intrusiones de aire muy frío, hasta altitudes cercanas a FL400, especialmente en situaciones atmosféricas más inestables.

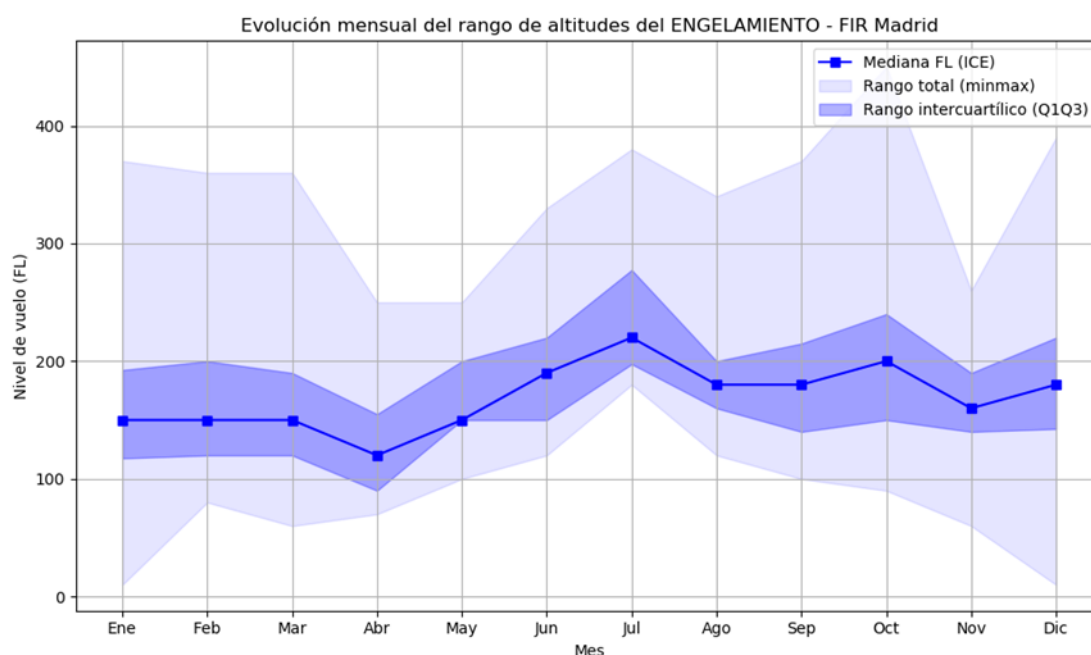


Figura 20. Registros mensuales del engelamiento en niveles de vuelo (FL) en la región FIR Madrid, periodo 2014-2024.

En términos de densidad (figura 21), el engelamiento se concentra preferentemente en los niveles medios de la troposfera, con un máximo recurrente entre FL120 y FL200. La presencia de engelamiento en niveles altos (por encima de FL300) es muy limitada y puede estar relegada a eventos convectivos.

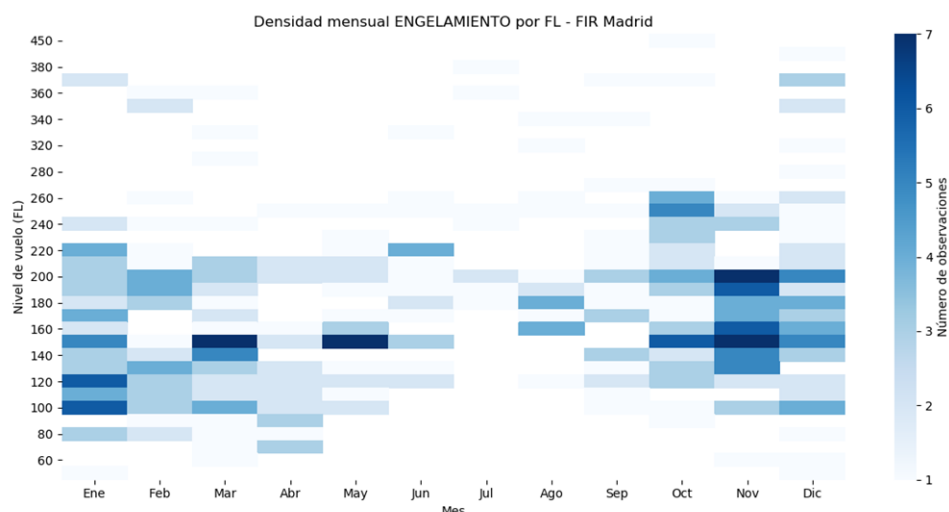


Figura 21. Densidad mensual del engelamiento en niveles de vuelo (FL) en la región FIR Madrid, periodo 2014-2024.

En la FIR Barcelona (figuras 22 y 23, tabla A-15), se aprecia que el engelamiento se concentra en ambos casos principalmente entre los niveles de vuelo FL100 y FL220, al igual que ocurría para la FIR Madrid, franja que coincide con la zona atmosférica típica de presencia de nubes superenfriadas. No obstante, se observan diferencias en la evolución mensual y en el comportamiento altitudinal entre ambos espacios aéreos. En la FIR Barcelona, la distribución altitudinal del engelamiento es más estable a lo largo del año, con una mediana que generalmente se mantiene entre FL140 y FL180. En contraste, en la FIR Madrid, la mediana del engelamiento es ligeramente superior durante prácticamente todo el año, y muestra una oscilación mensual más marcada, con un ascenso claro en los meses de verano.

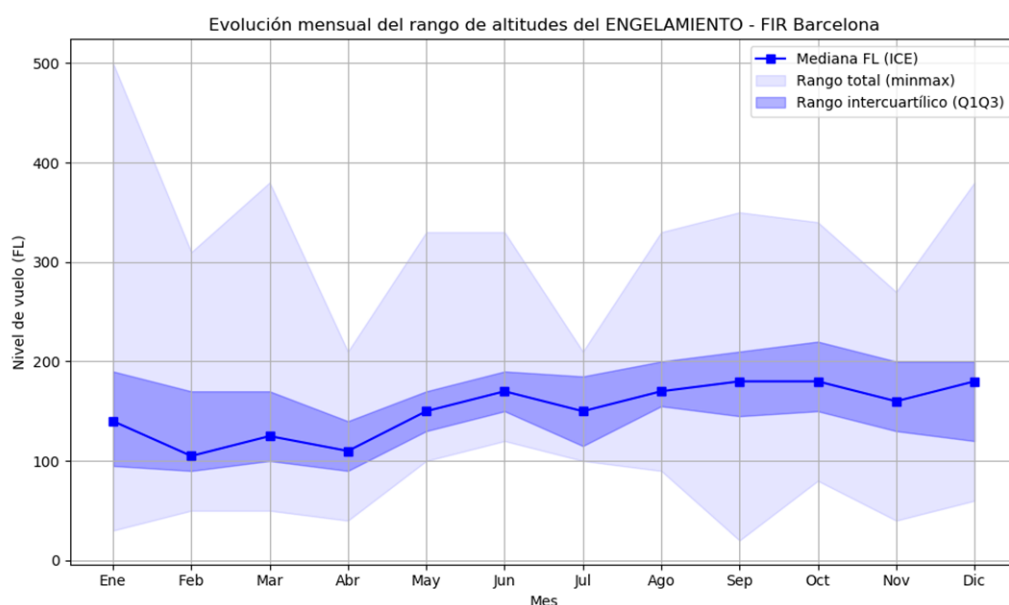


Figura 22. Registro mensual del engelamiento en niveles de vuelo (FL) en la región FIR Barcelona, periodo 2014-2024.

Desde el punto de vista físico en los meses estivales, en la FIR Barcelona, la proximidad al Mediterráneo favorece la persistencia de perfiles más húmedos en niveles bajos y medios, dando lugar a que las bases de los entornos convectivos se produzcan a altitudes más bajas. Por el contrario, la mayor elevación estival de la altitud en el FIR Madrid puede asociarse a procesos convectivos con bases nubosas más altas, típicos del interior peninsular en verano, cuando el perfil vertical en niveles bajos suele estar dominado por masas de aire cálidas y secas. En estas condiciones, el nivel de condensación y la isocero ascienden, lo que da lugar a que las bases de los cumulonimbos sean más elevadas y, por tanto, a fenómenos de engelamiento que se vean obligados a comenzar en capas superiores. Para una comprensión más detallada, se remite al lector a la comprensión de los niveles de condensación (NCA y NCC) del siguiente módulo (UCAR/COMET, 2012).

Adicionalmente, la FIR Barcelona muestra en varios meses, especialmente durante el otoño, una mayor concentración de observaciones (figura 23), lo que podría estar relacionado con situaciones caracterizadas por un mayor contenido de humedad y dinamismo atmosférico en el entorno mediterráneo. En este contexto, las intrusiones de aire frío en altura favorecen la inestabilidad al interactuar con un mar Mediterráneo todavía relativamente cálido, incrementando los flujos de calor latente y humedad desde la superficie y potenciando el desarrollo convectivo. Este mecanismo contribuye a la generación de entornos propicios para la formación de agua líquida superenfriada en niveles medios, y, por tanto, a una mayor probabilidad de engelamiento. En conjunto, estas diferencias ponen de manifiesto el papel clave de los factores termodinámicos y de la influencia marítima en la modulación vertical del engelamiento entre ambas regiones.

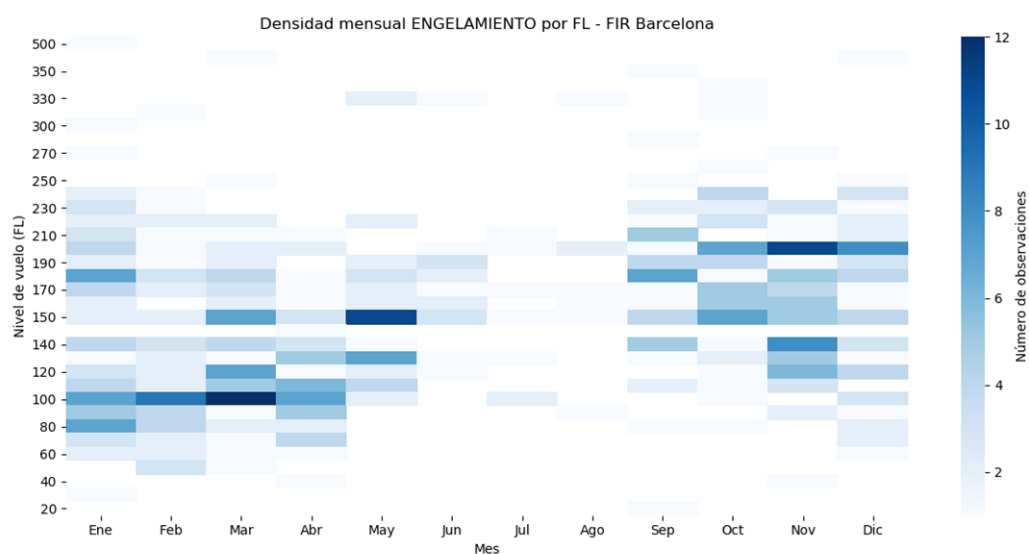


Figura 23. Densidad mensual del engelamiento en niveles de vuelo (FL) en la región FIR Barcelona, periodo 2014-2024.

Por el contrario, la FIR Barcelona muestra un perfil altitudinal más estable y moderado, con la mediana de la altitud generalmente más baja y una variación estacional menos acusada, véase la figura 22. No obstante, también se observa un ligero descenso en las altitudes medias durante los meses más fríos, coherente con una atmósfera más húmeda en capas bajas y condiciones

favorables para la formación de nubes estratiformes con gotas superenfriadas, que además repercute en un aumento de la densidad de reportes que se observa claramente en la figura 23.

La escasez de aeronotificaciones de engelamiento en la FIR de Canarias (véase la figura 24 y la tabla A-16) puede explicarse por dos motivos. Por un lado, una componente estrictamente meteorológica, asociada al predominio de un entorno subsidente y seco en los niveles más habituales de formación de este fenómeno durante gran parte del año, así como a la relativa escasez de perturbaciones potencialmente generadoras en comparación con los FIR de Madrid y Barcelona. Por otro lado, influyen las características del tráfico aéreo que predomina en este FIR. Los vuelos entre islas apenas superan el nivel de vuelo FL080-FL090, nivel que está asociado a altitudes que incluso en invierno es muy difícil que presente temperaturas aptas para la formación de engelamiento. Los vuelos transoceánicos que comunican Europa con Sudamérica suelen volar en niveles de vuelo por encima de FL330-FL360, en los que tampoco es habitual el engelamiento. Finalmente, los vuelos que unen las islas con Europa, que atraviesan los niveles de vuelo potencialmente favorables en una zona concreta, donde se suelen localizar las escasas aeronotificaciones de engelamiento.

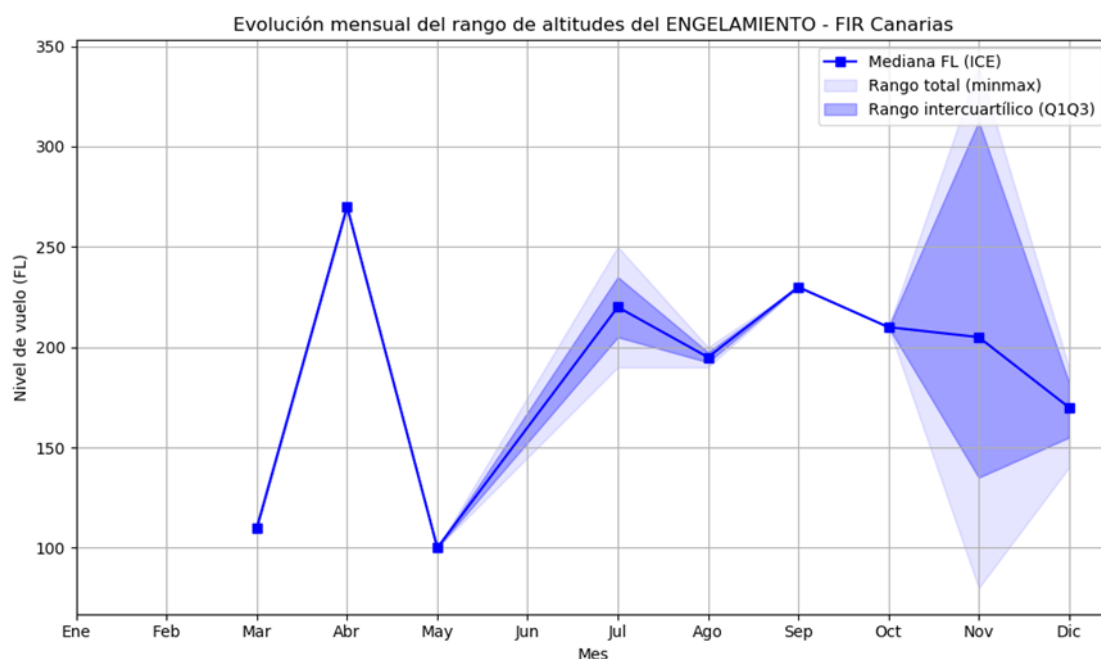


Figura 24. Registro mensual del engelamiento en niveles de vuelo (FL) en la región FIR Canarias, periodo 2014-2024.

La figura 25 refuerza esta interpretación, mostrando una ocurrencia muy limitada y episódica del fenómeno, con ausencia total de registros en varios meses del año. Las observaciones son muy escasas y están repartidas entre los niveles de vuelo FL080-FL340. Además de las razones expuestas anteriormente, esta gran escasez en las observaciones, sugieren la necesidad de hacer más eficiente y automático su envío con el objetivo de que se notifiquen en tiempo real y se inserten en la base de datos.

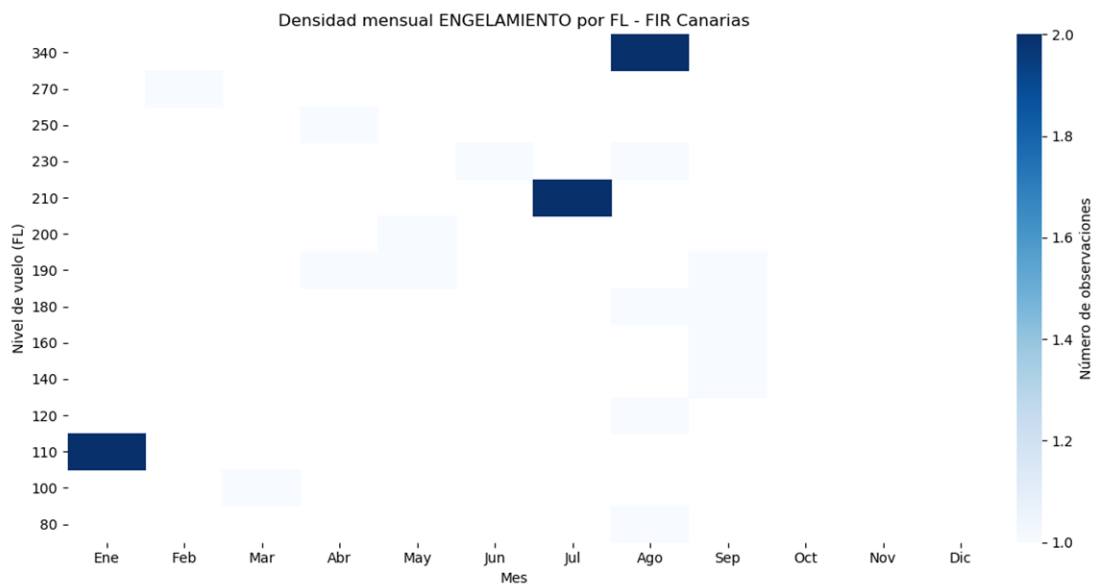


Figura 25. Densidad mensual del engelamiento en niveles de vuelo (FL) en la región FIR Canarias, periodo 2014-2024.

5. TURBULENCIA Y ONDAS DE MONTAÑA EN LOS PRINCIPALES SISTEMAS OROGRÁFICOS DE LA PENÍNSULA IBÉRICA

Además de la turbulencia asociada a los chorros en altura (*jets*) o a la turbulencia mecánica generada en niveles bajos por la interacción puramente mecánica del flujo con la orografía, existe otro fenómeno relevante en entornos montañosos: las ondas de montaña. Estas se forman cuando una masa de aire estable es forzada a ascender al encontrarse con una barrera orográfica. Bajo determinadas condiciones de estabilidad atmosférica (perfil de temperatura y humedad) y cizalladura del viento (cambios verticales en velocidad y/o dirección), este ascenso forzado puede generar ondas estacionarias que se propagan en sentido vertical y horizontal a sotavento de la cordillera, para más detalle se recomienda una lectura del curso (UCAR/COMET, 2014).

Si estas ondas encuentran un entorno favorable, como una estratificación estable sobre una capa de cizalladura intensa o una inversión térmica, pueden amplificarse verticalmente. En determinadas situaciones, estas ondas alcanzan tal amplitud que se vuelven dinámicamente inestables, lo que provoca su ruptura, de forma análoga a como rompe una ola en el océano. Esta ruptura genera regiones de turbulencia intensa que pueden extenderse desde niveles bajos hasta la tropopausa e incluso penetrar en la baja estratosfera. (Clark y Peltier, 1977) sugieren que cuando las líneas isentrópicas en una onda de montaña se invierten, se forma una cavidad resonante entre el terreno y la región de ruptura, todo ello ocurre bajo unas condiciones críticas donde el número de Richardson es menor de 0.25, (Clark y Peltier, 1983).

En teoría, este tipo de fenómeno debería identificarse específicamente en los informes AIREP ARS mediante la etiqueta 'MTW' (Mountain Wave). No obstante, en la práctica, la identificación de la fuente de la turbulencia queda sujeta a la interpretación subjetiva del piloto que la reporta. Como resultado, es frecuente que episodios de turbulencia generados por ondas de montaña se registren simplemente como 'TURB', sin distinción del mecanismo físico responsable. Además, podría ocurrir que episodios etiquetados como 'MTW' estén asociados a turbulencia de otro origen.

Por ello, si se quiere hacer un análisis más específico de cada evento, habría que analizar las condiciones atmosféricas reinantes en el momento del informe, como el perfil vertical de estabilidad, la dirección e intensidad del viento, y la posición relativa respecto a sistemas montañosos, o simplemente verificar si se han formado cirrostratos (Cs) a sotavento de la cordillera en las imágenes de satélite de WV6.2, WV7.3 o incluso IR10.8, para discriminar adecuadamente si una notificación etiquetada como TURB puede deberse en realidad a una onda de montaña que ha roto en su vertical.

En este apartado se presenta la evolución anual y mensual del número de notificaciones de turbulencia (TURB) y ondas de montaña (MTW) asociadas a los principales sistemas montañosos de la península ibérica. Este análisis permite obtener una visión global del comportamiento estacional de estos fenómenos y de su frecuencia de reporte en las zonas orográficas más significativas.

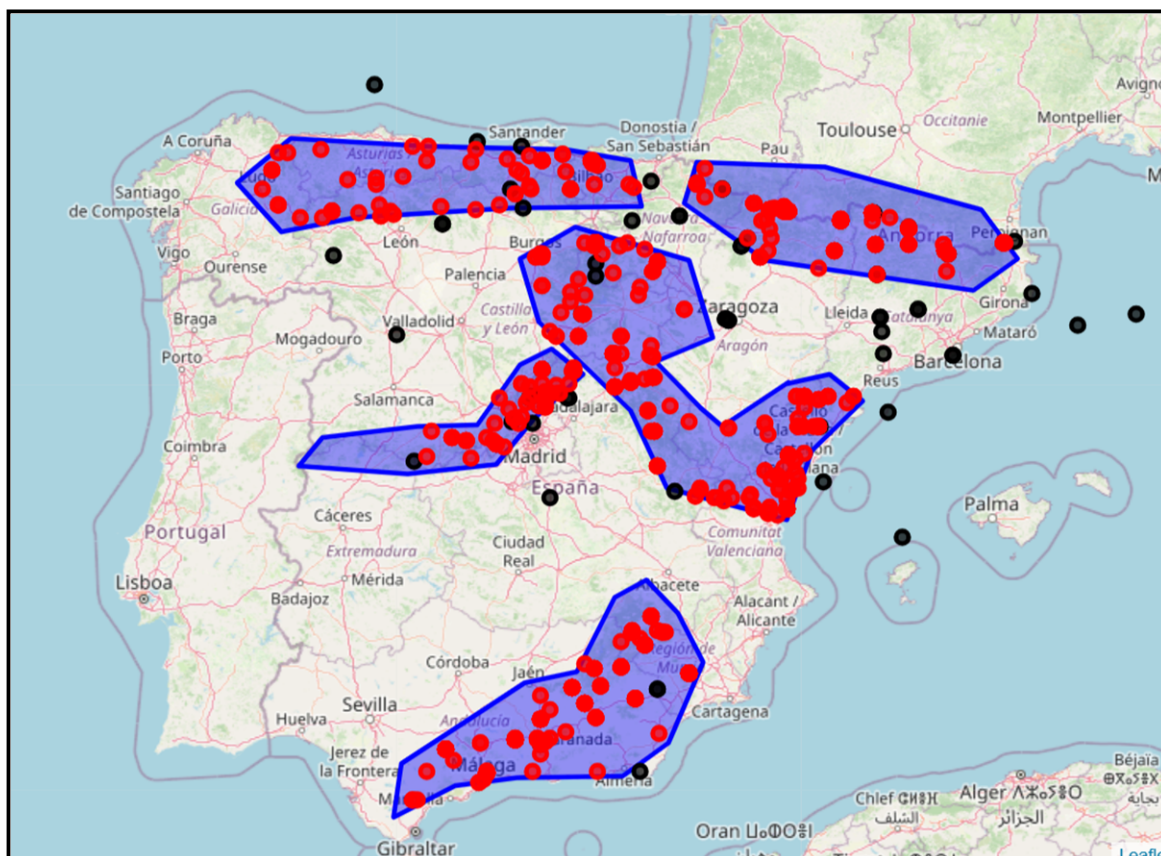


Figura 26. Distribución de AIREP de onda de montaña (en negro) en los FIR de Madrid y Barcelona, y de turbulencia (en rojo) sobre los principales sistemas orográficos de la península ibérica, periodo 2014-2024.

En la figura 26 se muestran, en color negro, las observaciones identificadas como onda de montaña, destacando por su escasa frecuencia en el periodo de estudio. Por otro lado, en rojo se representan las notificaciones de turbulencia localizadas dentro de los principales sistemas montañosos, lo que permite visualizar su posible relación con la orografía. Cabe destacar que no hay registros de onda de montaña para la FIR Canarias.

A la hora de interpretar las aeronotificaciones, es importante recordar que su registro no depende únicamente de la frecuencia real del fenómeno físico que genera la turbulencia, con independencia de su origen o mecanismo. También está condicionado por factores operativos y humanos, como el volumen de tráfico aéreo que atraviesa cada sistema montañoso, la proactividad del piloto en la emisión del informe, y la actuación del Jefe de Sala del ACC responsable en su gestión y difusión. Asimismo, no debe descartarse la posible introducción de errores humanos durante la transmisión de la aeronotificación desde las OVM de AEMET.

Si se analiza la evolución anual de los AIREP ARS en los principales sistemas montañosos de la península ibérica, desglosando los fenómenos de TURB y MTW por su intensidad (moderada y severa), se observa una clara predominancia de los reportes de turbulencia frente a los de onda de montaña, véase figura 27 y tabla A-17.

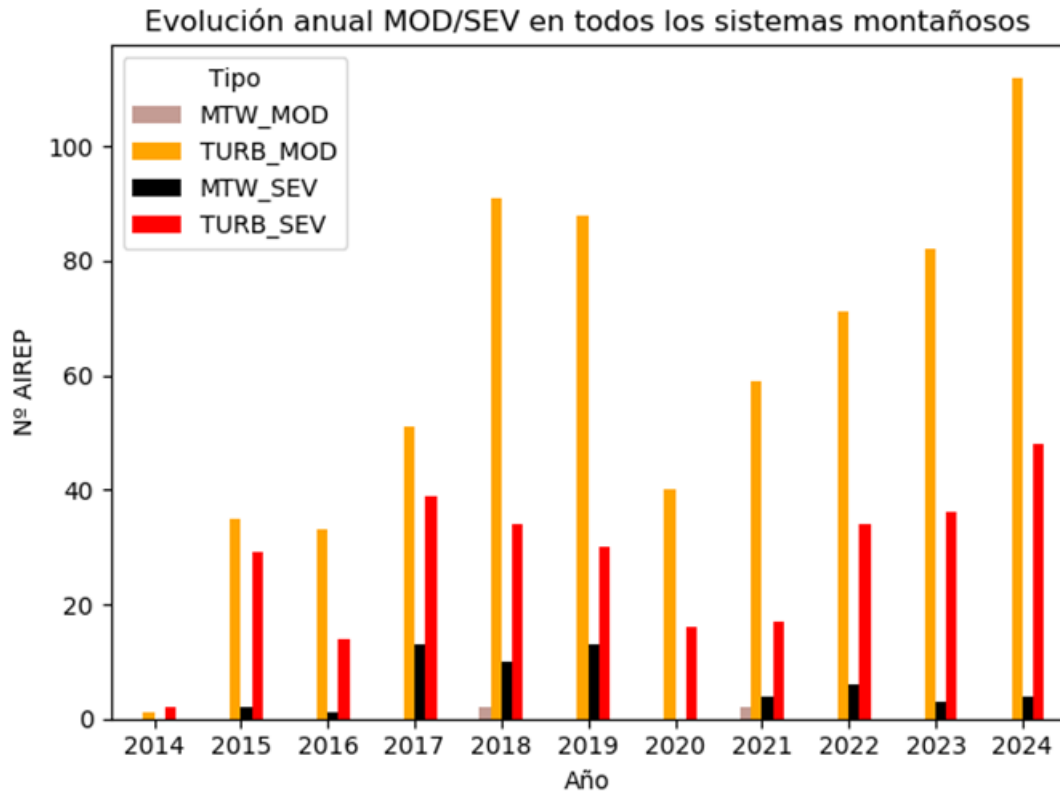


Figura 27. Registro anual de AIREP de turbulencia y onda de montaña para todos los sistemas montañosos, periodo 2014-2024.

En particular, los reportes de turbulencia moderada muestran una tendencia creciente desde 2014, con un descenso notable en 2020 debido al impacto de la pandemia de COVID-19, seguido de una recuperación sostenida hasta alcanzar su máximo en 2024. La turbulencia severa sigue un patrón similar, aunque con menor volumen total.

Por otro lado, los reportes de onda de montaña son significativamente más escasos. Resulta llamativo que los casos de onda de montaña severa superen en número a los de intensidad moderada, lo cual podría deberse a una mayor facilidad de identificación o reporte de eventos más intensos. Estos reportes de MTW moderada aparecen de forma puntual en 2018 y 2021, con solamente dos registros respectivamente.

El análisis mensual de los reportes AIREP muestra una clara predominancia de notificaciones de turbulencia y ondas de montaña durante los meses invernales, especialmente entre diciembre y marzo, véase la figura 28 y la tabla A-18. Esta distribución estacional está en consonancia con la dinámica atmosférica que se ha tratado en epígrafes anteriores, según la cual, durante las estaciones frías en latitudes medias, los chorros en niveles medios y altos descienden en latitud y tienden a intensificarse por el mayor gradiente térmico meridional característico de estas regiones. Bajo estas condiciones, cuando hay predominio de confluencias en altura (corriente arriba de una vaguada o abajo de una dorsal), las subsidencias generan las condiciones de estabilidad adecuadas sobre los sistemas orográficos y los chorros en altura proporcionan la suficiente cizalladura longitudinal que permiten que las ondas orográficas rompan en la vertical. Como se ha indicado anteriormente, los reportes etiquetados explícitamente como “MTW” son escasos, es probable que muchos de estos episodios se encuentren codificados como “TURB” debido a la subjetividad inherente en la percepción del fenómeno por parte de los pilotos. A

pesar de esta limitación, el patrón observado en los datos refleja un claro aumento de turbulencia moderada y severa en los meses de invierno, lo que sugiere una influencia significativa de las ondas de montaña, aunque su procedencia también pueda tener otro origen.

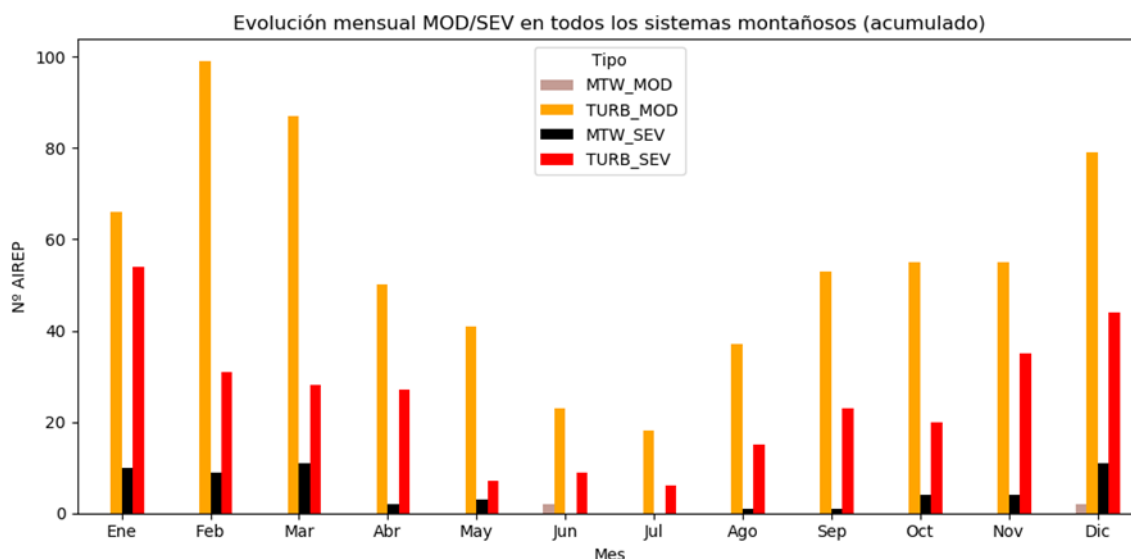


Figura 28. Registro mensual de AIREP acumulados de turbulencia y onda de montaña para todos los sistemas montañosos, periodo 2014-2024.

Por el contrario, durante los meses estivales, especialmente entre junio y agosto, el número de notificaciones de turbulencia se reduce de manera notable. En esta época del año, la convección térmica es un mecanismo más habitual de generación de turbulencia, pero su naturaleza localizada y su desarrollo vertical en columnas estrechas y transitorias, hace que no siempre coincida con trayectorias de aeronaves o que pueda evitarse fácilmente en vuelo. Además, la convección genera una turbulencia de tipo distinto a la orográfica, generalmente menos extendida espacialmente y más dependiente de la evolución diurna. Todo ello contribuye a que el número total de reportes AIREP en zonas montañosas sea considerablemente menor durante el verano.

La distribución mensual de los reportes muestra patrones estacionales bastante marcados:

La turbulencia es el fenómeno más reportado durante todo el año pero con sus máximos valores en los meses invernales. Los picos de la turbulencia moderada están presentes en febrero (99), marzo (87) y diciembre (79), mientras que la turbulencia severa presenta su mayor incidencia en enero (54) y diciembre (44).

La onda de montaña severa tiene una presencia más puntual, con máximos en marzo (11) y diciembre (11), mientras que la moderada es prácticamente inexistente, salvo en junio y diciembre, con solo 2 reportes en cada uno. Aunque menos frecuentes, estos eventos tienden a concentrarse también en los meses fríos.

5.1 Los Pirineos

El polígono geográfico definido para la cordillera de los Pirineos presenta un perímetro de 863 km y abarca una superficie de 34 184 km². Para que se generen las condiciones favorables que permitan el desarrollo y posterior ruptura de ondas de montaña con propagación vertical, es fundamental que los chorros en niveles altos adquieran una marcada componente meridional. Esta configuración favorece que el flujo de aire atraviese perpendicularmente el eje axial de la cordillera, condición óptima para la formación de ondas orográficas bien desarrolladas, tal y como se observa en el caso de (EUMETSAT, 2004) para la Península y Baleares. Es en situaciones de flujo con una alta componente norte cuando las ondas generadas pueden romper a sotavento, dando lugar a turbulencia significativa en el espacio aéreo español. En algunos casos de severidad elevada, dicha turbulencia puede manifestarse incluso mediante una banda seca que destaca por su apariencia oscura en las imágenes de satélite de vapor de agua, asociadas a intensas corrientes descendentes y variaciones bruscas de altitud.

Cabe destacar que la turbulencia no siempre está asociada a la ruptura de ondas de montaña. La simple interacción mecánica entre el flujo y el relieve pirenaico puede generar turbulencia significativa. Dado que gran parte de la cordillera alcanza altitudes superiores a los 3000 metros, favorece la propagación de la turbulencia generada hasta la troposfera media. Ejemplos destacados de estos picos elevados son el Aneto (3404 m), el Posets (3368 m) y el Monte Perdido (3355 m). Adicionalmente, puede registrarse turbulencia en niveles medios y altos asociada a los máximos de viento en el chorro, incluso en ausencia de interacción directa con la orografía, lo que refuerza la complejidad del entorno turbulento sobre esta región.

El área que representa los Pirineos presenta el porcentaje más alto de severidad respecto al resto de sistemas orográficos, con el 62.4 %. Además, se ha notificado una actividad notable en términos absolutos (221 registros). Este comportamiento es coherente con su compleja orografía y su interacción con los flujos atmosféricos mencionados anteriormente, lo que lo convierte en la región más crítica de cara a la operatividad.

En el caso de los Pirineos, la actividad convectiva constituye un factor relevante en la generación de turbulencia, especialmente durante los meses cálidos. Según la climatología de descargas eléctricas en España (Núñez *et al.*, 2019), esta cordillera presenta una elevada densidad de rayos en verano, con máximos más acusados en su sector oriental. Este comportamiento está relacionado con la interacción entre el forzamiento orográfico y la influencia del Mediterráneo, que aporta humedad y favorece el desarrollo de convección profunda. La topografía pirenaica actúa como un mecanismo eficaz de disparo convectivo, dando lugar a tormentas que pueden alcanzar un notable desarrollo vertical. La convección asociada contribuye a la generación de turbulencia en niveles medios y altos mediante corrientes ascendentes intensas, descendentes y zonas de cizalladura. Este hecho puede explicar la recurrencia de aeronotificaciones de turbulencia en periodo estival en esta región, especialmente en el Pirineo oriental, complementando los episodios asociados a ondas de montaña.

La evolución anual de los reportes AIREP tal y como muestra la figura 29 y la tabla A-19 muestra una variabilidad notable en la frecuencia tanto de la turbulencia como de ondas de montaña. Se observa que los años con mayor actividad, como 2018, 2022 y 2024, registran picos significativos de turbulencia moderada y severa. Se produce una disminución en 2020 y 2021 que está asociado a la disminución de vuelos como consecuencia del COVID-19.

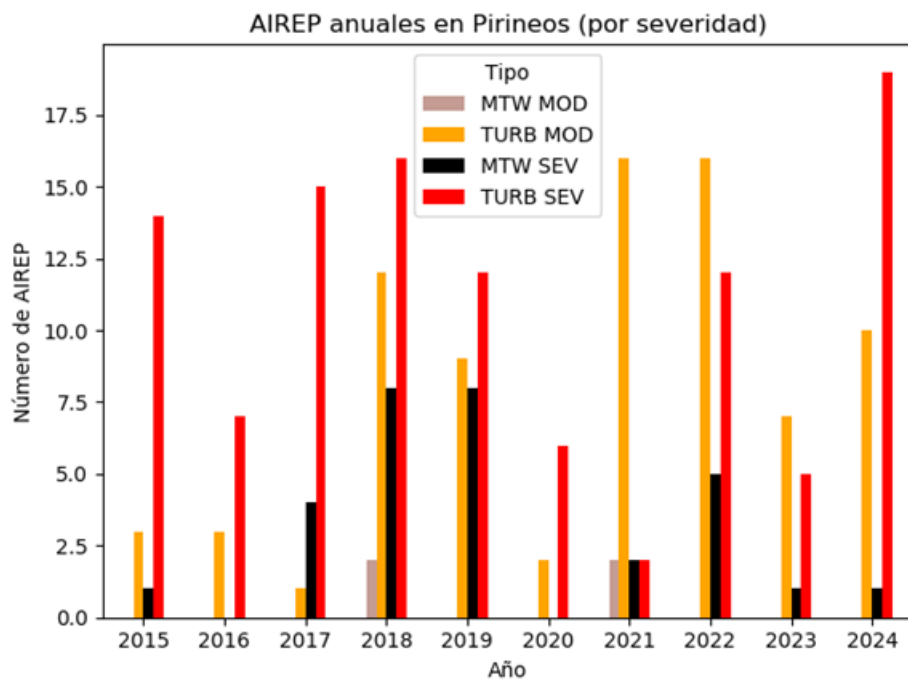


Figura 29. Registros de AIREP de turbulencia y onda de montaña en los Pirineos, periodo 2014-2024.

El análisis mensual que se muestran en la figura 30 y la tabla A-20, confirma que los meses invernales concentran la mayor actividad turbulenta, destacando enero, febrero y diciembre, donde se registran valores elevados de turbulencia severa y ondas de montaña severa.

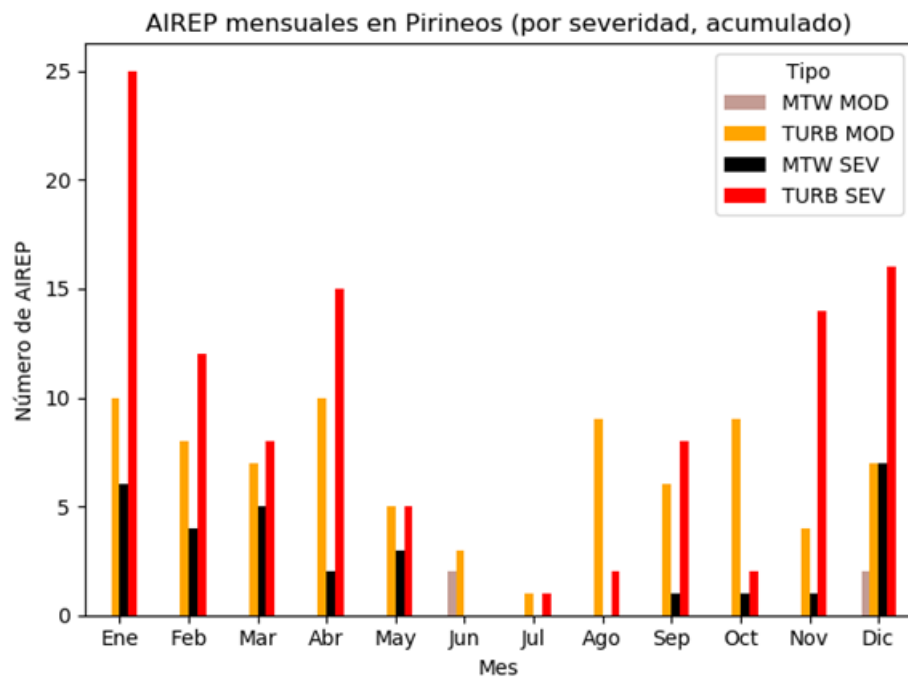


Figura 30. Registros mensuales de AIREP acumulados de onda de montaña y turbulencia en los Pirineos, periodo 2014-2024.

5.2 La cordillera Cantábrica

El polígono geográfico definido para la cordillera Cantábrica presenta un perímetro de 1002 km y abarca una superficie de 32 244 km². Es común que para una configuración de viento procedente del cuadrante NW, se puedan observar las ondas de montaña atrapadas en la horizontal en la cordillera Cantábrica y otros sistemas montañosos, un ejemplo de ello es un estudio que realizaron (Díaz-Fernández *et al.*, 2022). Otra configuración atmosférica favorable para la generación de ondas de montaña se produce cuando la cordillera se sitúa en el sector cálido de una borrasca baroclina. En este contexto, se establece en ciertas ocasiones un estrato de estabilidad por encima de las cumbres, condición necesaria para el desarrollo de ondas orográficas. La presencia de vientos ábregos, del suroeste, que inciden con cierta perpendicularidad sobre la cordillera desde la meseta norte, favorece la amplificación y eventual ruptura de dichas ondas en niveles superiores. Una vez que se aproxima el frente frío, la atmósfera comienza a inestabilizarse de abajo a arriba y el flujo del suroeste tiende a girar hacia el noroeste, cesando la posibilidad de que continúen las ondas de montaña.

Al igual que en el caso anterior, la interacción mecánica del flujo con la orografía también puede generar turbulencia de origen dinámico que alcanza niveles medios troposféricos. Este fenómeno es particularmente relevante en áreas fronterizas de León, Asturias y Cantabria, donde destacan numerosas cumbres que superan los 2500 metros de altitud, como Torre Cerrredo (2650 m), Torre Blanca (2619 m) o Peña Vieja (2616 m). Dada su ubicación septentrional dentro de la península ibérica, esta región presenta una mayor probabilidad, en comparación con otros sistemas montañosos, de experimentar turbulencia en niveles medios y altos asociada a los máximos de viento de los chorros.

La contribución de la actividad convectiva a la generación de turbulencia es, en términos generales, limitada. Según la climatología de descargas eléctricas (Núñez *et al.*, 2019), esta región presenta una densidad relativamente baja de rayos en comparación con otras áreas peninsulares, lo que sugiere un menor desarrollo de convección profunda. En consecuencia, la turbulencia observada en este sistema está más frecuentemente asociada a la interacción entre flujos y el relieve, así como a procesos dinámicos de mayor escala, que a fenómenos convectivos.

El entorno escogido para representar a la cordillera Cantábrica muestra una actividad total reducida, pero un porcentaje de severidad relativamente alto (40.8 %). Esto indica que, aunque se hayan recogido con menos frecuencia fenómenos, cuando se notifican tienden a presentar mayor intensidad, lo que puede tener implicaciones relevantes en la gestión del tráfico aéreo.

Entre 2015 y 2024, puede observarse en la figura 31 y la tabla A-21, que la mayoría de las notificaciones registradas en la cordillera Cantábrica corresponden a turbulencia moderada, con un incremento general en la segunda mitad del periodo analizado, destacando los años 2017 (7 casos) y 2022 (8 casos). La turbulencia severa también se ha reportado de forma más frecuente desde 2017, alcanzando un máximo de 8 notificaciones en ese mismo año. En cuanto a las ondas de montaña, las notificaciones han sido escasas, especialmente en su versión moderada, con ausencia total durante todo el periodo. Únicamente se registran dos casos de ondas severas, en los años 2019 y 2024.

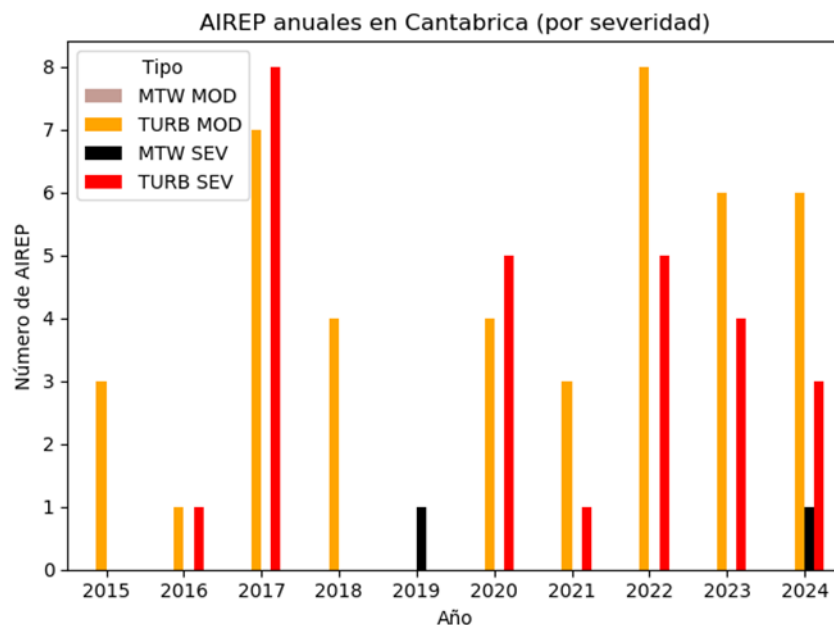


Figura 31. Registro anual de AIREP de turbulencia y onda de montaña en la cordillera Cantábrica, periodo 2014-2024.

A nivel mensual, se observa en la figura 32 y la tabla A-22 que, debido a las escasas notificaciones de turbulencia, aparentemente la distribución de los AIREP es relativamente uniforme a lo largo del año. Marzo y noviembre son los únicos meses donde se ha reportado algún caso de onda de montaña severa. En general, la mayoría de los eventos se agrupan entre los meses fríos (noviembre a marzo), lo que sugiere una cierta estacionalidad con el aumento de la turbulencia con diversos orígenes en los meses más fríos.

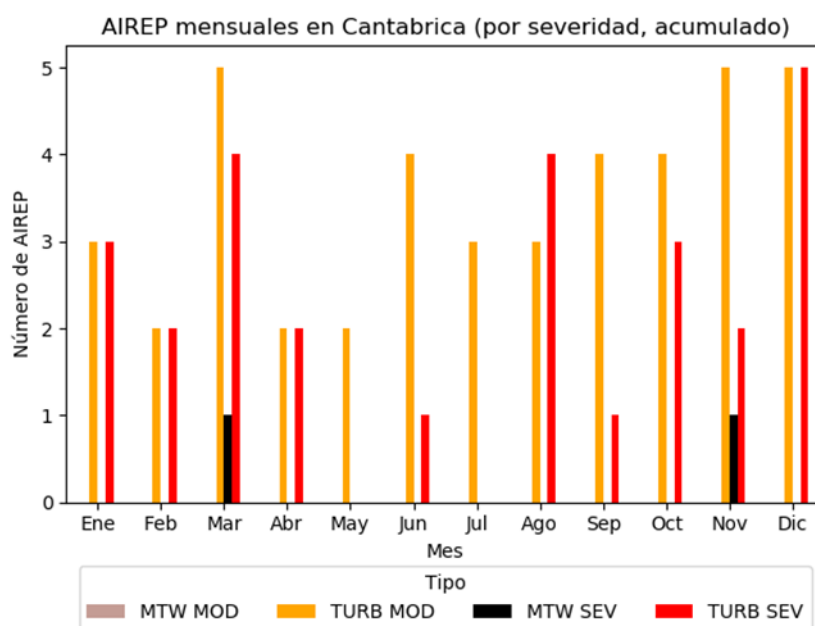


Figura 32. Registro mensual de AIREP acumulados de onda de montaña y turbulencia en la cordillera Cantábrica, periodo 2014-2024.

5.3 El sistema Ibérico

El polígono geográfico definido para la cordillera del sistema Ibérico presenta un perímetro de 1322 km y abarca una superficie de 53 894 km². Con la finalidad de caracterizar la situación sinóptica que da lugar a la turbulencia asociada a las ondas de montaña, se subdivide este sistema en dos sectores principales: el sector noroccidental, que comprende fundamentalmente áreas limítrofes de Soria, La Rioja y Burgos, y donde se encuentran cumbres destacadas que superan los 2000 metros, como el San Lorenzo (2271 m), el Moncayo (2314 m) y el Urbión (2228 m); y el sector suroriental, que abarca principalmente las provincias de Teruel y Castellón, así como zonas adyacentes, donde también se localizan altitudes significativas como Javalambre (2020 m), Peñarroya (2028 m) y Penyagolosa (1813 m). En ambos sectores, un escenario atmosférico propicio para la generación de ondas de montaña se da bajo la presencia de flujos del noroeste en niveles bajos, habitualmente asociados al flanco posterior de una vaguada, que aportan cizalladura longitudinal favorable para el desarrollo de estructuras ondulatorias. Además, en el sector noroccidental pueden establecerse condiciones idóneas para la formación de ondas de montaña con vientos ábregos, especialmente cuando el flujo adquiere cierta perpendicularidad respecto al relieve dominante.

Es importante señalar que la actividad convectiva desempeña también un papel relevante en el sistema Ibérico, especialmente en su sector suroriental. Según la climatología de descargas eléctricas en España elaborada por (Núñez *et al.*, 2019), esta región alberga uno de los máximos de densidad de rayos de la Península, localizado en el área del Maestrazgo (Teruel-Castellón). Este comportamiento evidencia una elevada frecuencia de episodios convectivos, particularmente durante los meses cálidos, asociados a la inestabilidad atmosférica y al aporte de humedad proporcionado por las brisas procedentes del Mediterráneo, así como a la interacción entre los forzamientos dinámicos y los efectos orográficos. En consecuencia, esta componente convectiva podría explicar parcialmente la recurrencia de AIREP de turbulencia en el sistema Ibérico, especialmente en los meses estivales, reforzando su carácter como una de las regiones más activas desde el punto de vista aeronáutico.

El recinto definido para el sistema Ibérico combina una actividad relativamente elevada con un porcentaje de severidad intermedio (34.2 %). Este comportamiento lo sitúa como una región relevante tanto en frecuencia como en intensidad.

Durante el periodo 2014-2024, la figura 33 y la tabla A-23, muestran que el sistema Ibérico presenta una actividad significativa en lo que respecta a turbulencia moderada, con una tendencia creciente, interrumpida por la COVID-19, y un máximo absoluto en 2024, con 38 notificaciones. Otros años con alta frecuencia de reportes son 2018 (25) y 2021-2022 (21 cada uno). La turbulencia severa también ha sido recurrente a lo largo del periodo, con picos destacados en 2019 (13 casos), 2023 (18) y 2024 (12). En cuanto a las ondas de montaña severas, se han registrado en menor proporción, con valores máximos en 2019 (3) y 2017 (2), y ausencia total en los años más recientes (2022-2024).

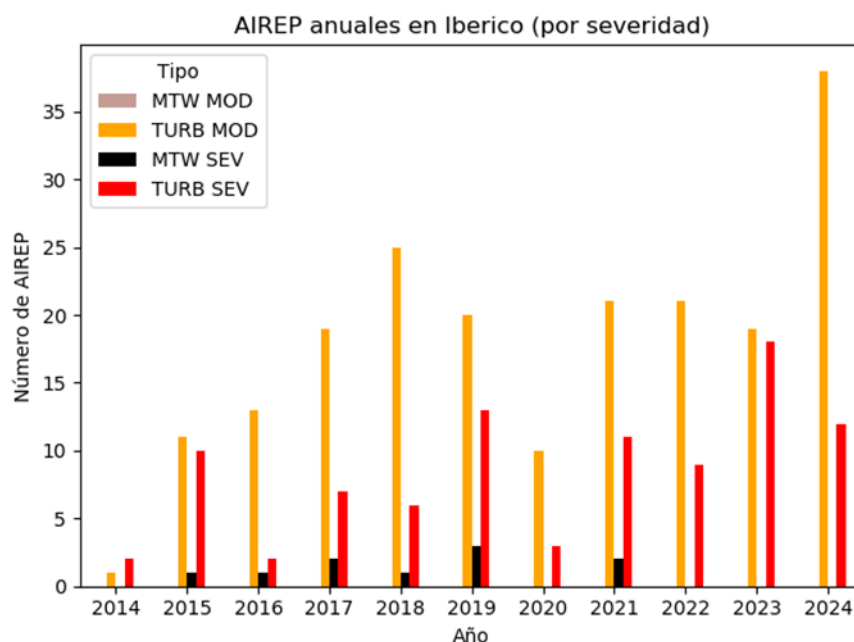


Figura 33. Registro anual de AIREP de turbulencia y onda de montaña en el sistema Ibérico, periodo 2014-2024.

A nivel mensual, la figura 34 y la tabla A-24, reflejan una clara concentración de notificaciones durante el trimestre invernal. Enero, febrero y marzo son los meses con mayor actividad conjunta, acumulando más del 30 % de los reportes anuales. En particular, febrero y marzo concentran los valores máximos de ondas severas, mientras que desde octubre hasta marzo, destacan por su elevada frecuencia de turbulencia severa. En contraposición, el periodo comprendido entre mayo y agosto presenta una actividad claramente reducida. Este patrón mensual indica una fuerte influencia de la dinámica sinóptica invernal en el sistema.

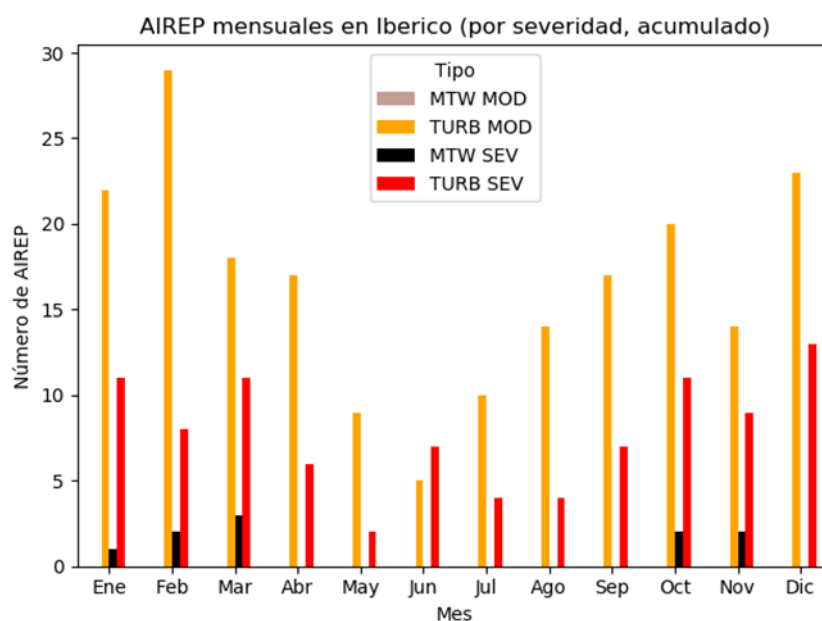


Figura 34. Registro mensual de AIREP acumulados de onda de montaña y turbulencia en el sistema Ibérico, periodo 2014-2024.

5.4 El sistema Central

El polígono geográfico definido para la cordillera del sistema Central presenta un perímetro de 783 km y abarca una superficie de 16 794 km². Desde el punto de vista de generación de ondas de montaña, cabe dividirlo en dos sectores. El primero se extiende zonalmente, de oeste a este, destacando la sierra de Gredos, donde varias de sus cumbres superan los 2300 metros, destacando el Pico Almanzor con 2592 m. El mismo escenario del sector cálido descrito anteriormente para la cordillera Cantábrica, genera los vientos ábregos que son capaces de generar turbulencia asociada a ondas de montaña en la vertiente a sotavento de Castilla y León. El eje del segundo sector presenta una orientación aproximada de suroeste a noreste, donde destaca la sierra de Guadarrama, donde varias de sus cumbres superan los 2200 metros, siendo Peñalara (2428 m) su mayor elevación. Un escenario propicio para generar ondas de montaña, es el flujo de NW que incide sobre la vertiente segoviana y en niveles altos, lleva asociado la parte trasera de una vaguada, donde predominan las confluencias y por tanto, las subsidencias que estabilizan la columna troposférica desde niveles altos hasta niveles bajos, pudiendo dar lugar a que se genere una inversión sobre la cordillera. Se han realizado estudios sobre la sierra de Guadarrama debido a su alto impacto, ya que la turbulencia asociada a las ondas de montaña puede afectar el *Terminal Maneuvering Area* (TMA) de Madrid. Díaz-Fernández *et al.* (2022) analizaron episodios de ondas de montaña mediante el modelo de alta resolución HARMONIE-AROME, evaluando su capacidad para representar estos fenómenos en España y sus implicaciones para la seguridad aeronáutica.

La actividad convectiva adquiere cierta relevancia durante los meses cálidos, favorecida por el calentamiento diurno y el efecto del forzamiento orográfico. De acuerdo con (Núñez *et al.*, 2019), la densidad de descargas eléctricas en esta región es moderada, reflejando la presencia de tormentas de evolución diurna, generalmente de carácter local. No obstante, su impacto presenta una marcada dependencia espacial, siendo más relevante en áreas con mayor densidad de tráfico aéreo, como el entorno de la sierra de Guadarrama. En términos generales, la frecuencia de convección es inferior a la observada en el sistema Ibérico y en el Pirineo.

La delimitación adoptada para el sistema Central muestra el segundo mayor porcentaje de severidad (59.1 %), si bien sobre un número total reducido de aeronotificaciones (66). Estas se concentran mayoritariamente en el entorno de la sierra de Guadarrama, lo que podría estar vinculado tanto a una mayor densidad de tráfico aéreo en la zona como a una posible mayor proactividad de los intermediarios dentro de un sistema de notificación que presenta ciertas ineficiencias.

Durante el periodo 2014-2024, se observa en la figura 35 y la tabla A-25, que el sistema Central presenta una actividad un poco más significativa en cuanto a reportes de ondas de montaña severas, con un total de 10 notificaciones. El año 2017 destaca por registrar el mayor número de casos, con cuatro episodios. Durante el resto del periodo se observa una menor frecuencia, con un único caso registrado en 2018, 2019, 2022 y 2023, mientras que en 2024 se contabilizaron dos casos. En cuanto a la turbulencia, la forma más reportada ha sido la moderada, con un incremento muy notable en 2023 y especialmente en 2024, cuando se contabilizan 6 y 11 eventos, respectivamente. La turbulencia severa también muestra una tendencia ascendente en los últimos años, con picos destacados en 2023 (5 casos) y 2024 (9 casos).

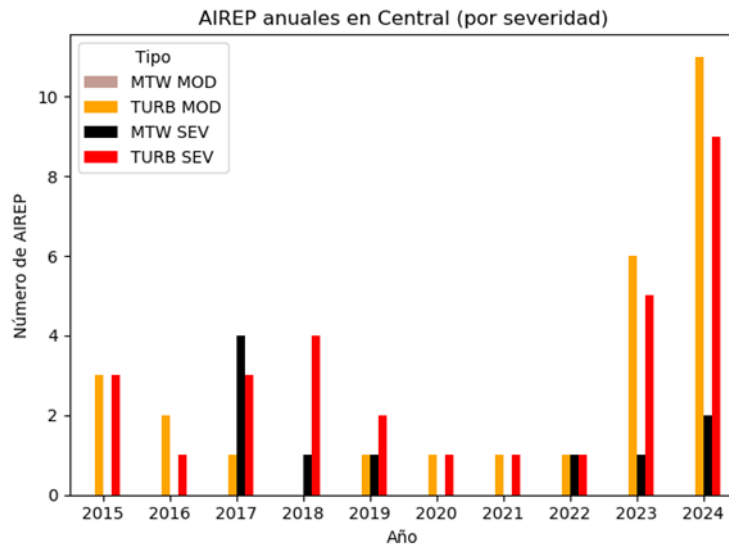


Figura 35. Registro anual de AIREP de turbulencia y onda de montaña en el sistema Central, periodo 2014-2024.

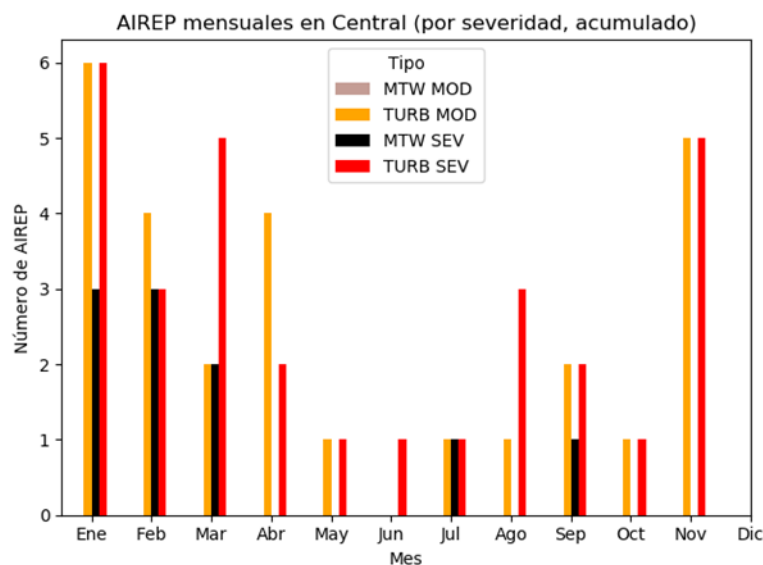


Figura 36. Registro mensual de AIREP acumulados de onda de montaña y turbulencia en el sistema Central, periodo 2014-2024.

Desde el punto de vista mensual, tanto la figura 36 como la tabla A-26 evidencian que la mayoría de las notificaciones se concentran en los meses invernales, siendo enero el mes con mayor actividad conjunta, con un total de 15 registros. Febrero y marzo también destacan por la presencia recurrente de notificaciones de ondas de montaña severas, lo que confirma un patrón estacional bien definido: existe una mayor tendencia a la formación de ondas orográficas intensas durante la estación fría. En contraste, durante los meses cálidos, especialmente entre mayo y julio, la actividad de AIREP es prácticamente residual. Este comportamiento refleja la influencia de la dinámica sinóptica invernal, caracterizada por la expansión y ondulación de la corriente circumpolar, que favorece tanto la presencia de turbulencia de distintos orígenes como el establecimiento de condiciones propicias para el desarrollo y la ruptura vertical de ondas de montaña.

5.5 El sistema Bético

El polígono geográfico definido para la cordillera del sistema Bético tiene un perímetro de 1055 km y abarca una superficie de 46 366 km², siendo el polígono que presenta una mayor extensión. Se subdivide en la cordillera Prebética, Subbética y Penibética, siendo esta última la que presenta las mayores elevaciones por encima de los 3000 m en Sierra Nevada, donde destaca el Mulhacén (3479 m), como elevación más alta de la península ibérica.

El polígono escogido para cubrir el sistema Bético presenta el mayor número total de aeronotificaciones del conjunto analizado. Sin embargo, el porcentaje de fenómeno severos es el más bajo (12.4 %), lo que indica que, aunque la turbulencia es frecuente, predomina claramente la intensidad moderada. Este comportamiento puede llevar implícito que los fenómenos de origen dinámico que dan lugar a la turbulencia sean menos críticos desde el punto de vista operativo.

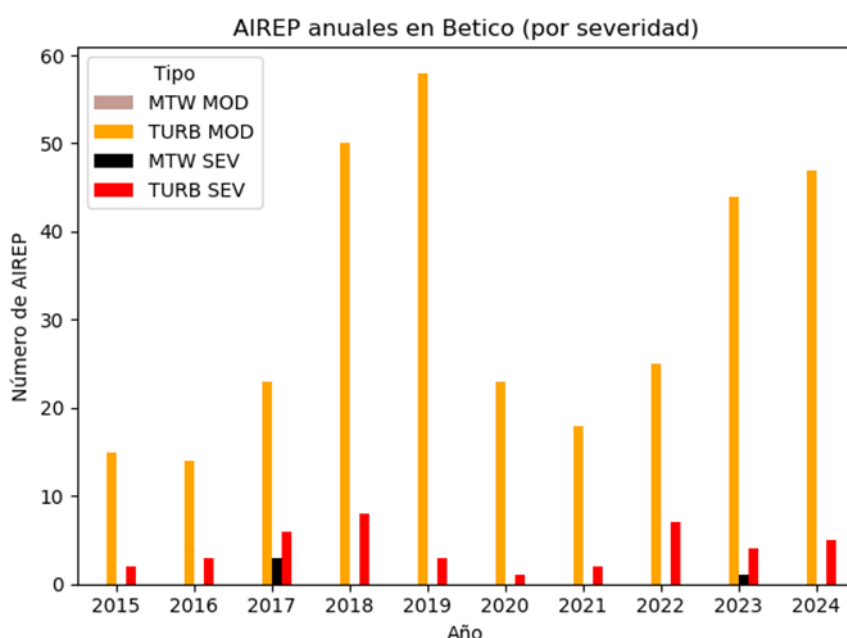


Figura 37. Registro anual de AIREP de turbulencia y onda de montaña en el sistema Bético, periodo 2014-2024.

Durante el periodo 2015-2024, se deduce de la figura 37 y la tabla A-27, que el sistema Bético ha mostrado una elevada frecuencia de notificaciones de turbulencia moderada, especialmente a partir de 2017, con una tendencia creciente interrumpida por la COVID-19 en 2020 y presentando máximos en 2019 (58 casos), 2018 (50) y 2024 (47). La turbulencia severa, aunque menos frecuente, ha estado presente a lo largo de todo el periodo con valores moderados, destacando 2018 (8 casos), 2017 (6) y 2022 (7). En cuanto a las ondas de montaña severas, su aparición ha sido puntual y limitada a dos años: 2017 (3 casos), 2023 (1 caso). No se han registrado notificaciones de MTW en intensidad moderada.

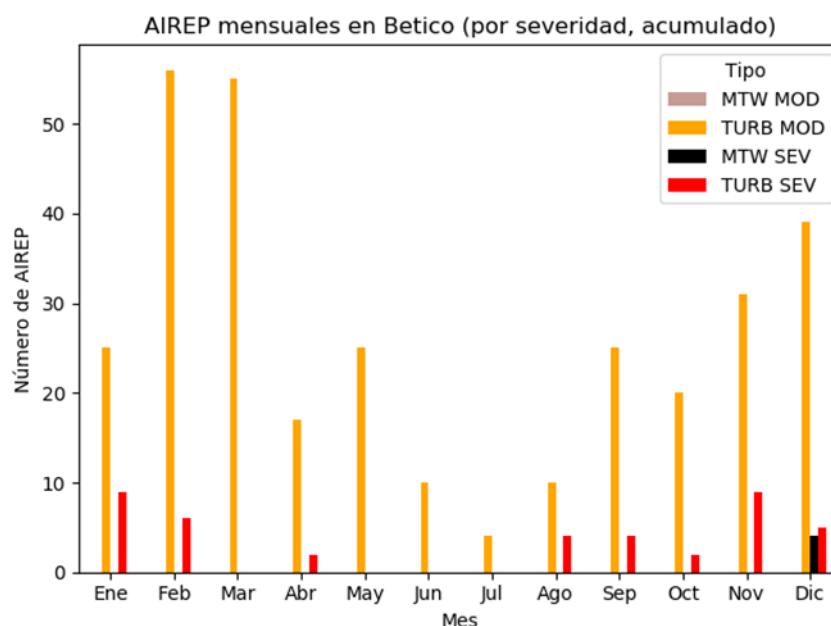


Figura 38. Registro mensual de AIREP acumulados de onda de montaña y turbulencia en el sistema Bético, periodo 2014-2024.

A nivel mensual, se observa en la figura 38 y la tabla A-28, que el comportamiento estacional es muy marcado: el mayor volumen de AIREP se concentra entre enero y marzo, siendo febrero y marzo los meses con mayor número de reportes (62 y 55 respectivamente). No obstante, los eventos de onda de montaña severa se han concentrado exclusivamente en diciembre, cuando se registraron 4 casos. También se observan picos de turbulencia severa en enero (9 casos) y noviembre (9 casos), lo que sugiere que los meses de transición e invierno son más propensos a generar condiciones favorables para la turbulencia orográfica. En cambio, entre junio y agosto la actividad es mínima, lo que refleja una clara influencia de la circulación sinóptica invernal en la génesis de estos fenómenos.

6. CONCLUSIONES

El presente análisis de los AIREP (ARS) emitidos entre 2014 y 2024 en los FIR de Madrid, Barcelona y Canarias ha permitido obtener una visión detallada del comportamiento temporal y espacial de los fenómenos de turbulencia y engelamiento, tanto en intensidad moderada (MOD) como severa (SEV), así como su vinculación con la orografía en los principales sistemas montañosos de la península ibérica. A partir de los resultados, se pueden extraer las siguientes conclusiones principales:

1. Limitación inherente a la subjetividad de los AIREP

Los AIREP dependen de la percepción subjetiva de los pilotos, de las características de la aeronave y de la fase de vuelo, por lo que se introducen ciertos sesgos en la intensidad e incertidumbres en su posición espacial y temporal. Por ello, aunque constituyen una fuente muy valiosa de información, sus resultados hay que interpretarlos con cierta cautela y complementarlos con otros sistemas de observación y modelización.

2. Alta concentración geográfica en FIR Madrid y Barcelona

El 94.8 % de los reportes se sitúan en los FIR de Madrid y Barcelona. La FIR Canarias presenta con un 5.2 % una densidad reducida de AIREP, lo que sugiere limitaciones en la observación o en la transmisión de datos que pueden depender de la configuración del tráfico aéreo en esta región.

3. Aumento sostenido de los reportes tras la pandemia

Durante la última década se ha registrado un incremento en el número total de AIREP, que fue interrumpido con el impacto de la pandemia de COVID-19 en 2020. Esta tendencia se refleja tanto en fenómenos moderados como severos, con máximos que tienden a posicionarse en 2024. Esta tendencia está altamente relacionada con el volumen del tráfico aéreo.

4. Desacople entre la distribución de AIREP y la realidad meteorológica.

La distribución espacial de los AIREP está fuertemente condicionada por la densidad del tráfico aéreo, lo que implica que no representa necesariamente la distribución real de los fenómenos meteorológicos. Este sesgo limita su uso directo para estudios climatológicos y refuerza la necesidad de combinar estas observaciones con modelos numéricos y otras fuentes independientes.

5. Predominio de la turbulencia sobre el engelamiento

La turbulencia representa el fenómeno más reportado en el conjunto de AIREP analizados, especialmente en su forma moderada. En comparación, el engelamiento es menos frecuente, aunque también muestra una tendencia creciente, sobre todo en los últimos años del periodo analizado.

6. Estacionalidad marcada

La mayoría de los reportes se concentran en los meses fríos (diciembre a marzo), tanto para la turbulencia como para el engelamiento. Este patrón responde por parte de la turbulencia a la intensificación y el descenso latitudinal de los *jets streams* en invierno (favoreciendo CAT y cizalladura). Y por parte del engelamiento, a la presencia de sistemas frontales activos y masas de aire húmedo y frío, que favorecen el engelamiento en niveles bajos y medios. La concentración de AIREP durante la época estival se vincula principalmente a fenómenos

convectivos. Su carácter local, tanto en el espacio como en el tiempo, explica la menor frecuencia de notificaciones en comparación con otras estaciones. No obstante, este tipo de fenómenos puede tener un elevado impacto en la gestión del tráfico aéreo, lo que hace imprescindible una vigilancia y predicción precisas para reforzar la seguridad operacional y mitigar las consecuencias económicas asociadas.

7. Altitudes características diferenciadas

La turbulencia se reporta mayoritariamente entre FL300-FL390, coherente con el posicionamiento de los chorros polares. En la FIR Barcelona, además, se observa una mayor dispersión vertical de notificaciones en comparación con la FIR Madrid, probablemente está asociado a una mayor actividad convectiva por el aporte de humedad del Mediterráneo y a procesos orográficos. El engelamiento se concentra entre FL100-FL220, aunque en verano se produce una dispersión vertical más alta como consecuencia de las fuertes corrientes ascendentes asociadas a los procesos convectivos. Asimismo, en los meses cálidos se observa en la FIR Madrid una mayor altitud de los reportes en comparación con la FIR Barcelona. Esta diferencia puede explicarse por la presencia de aire seco y cálido en el interior peninsular durante dicho periodo, lo que favorece una elevación tanto de las bases nubosas como del nivel de la isocero.

8. Infrarrepresentación de ondas de montaña

Las aeronotificaciones identificadas explícitamente como “MTW” son escasas. Sin embargo, el análisis geográfico y estacional revela que muchos episodios de turbulencia reportados como “TURB” podrían tener un origen orográfico. Esta subjetividad en la codificación por parte de los pilotos limita la identificación precisa del fenómeno.

9. Influencia orográfica significativa

Los principales sistemas montañosos muestran una clara estacionalidad en los reportes, con máximos en invierno, cuando la interacción del flujo con el relieve bajo condiciones de estabilidad y cizalladura favorece la generación de ondas de montaña y turbulencia orográfica severa.

El análisis conjunto pone de manifiesto un claro contraste entre frecuencia e intensidad de los fenómenos. Mientras que el sistema Bético concentra el mayor número de aeronotificaciones, estas son mayoritariamente de carácter moderado. Por el contrario, los Pirineos, la cordillera Cantábrica y el sistema Central, aunque con menor volumen de casos, presentan una proporción significativamente mayor de fenómenos severos, lo que los convierte en las regiones de mayor riesgo potencial. El sistema Ibérico ocupa una posición intermedia, combinando una actividad relativamente alta con una severidad moderada.

En conjunto, estos resultados evidencian la importancia de considerar no solo la frecuencia de los eventos, sino también su intensidad, siendo los Pirineos el sistema montañoso más relevante desde el punto de vista operativo en términos de peligrosidad.

10. Necesidad de mejoras operativas y metodológicas

Dado el elevado volumen de tráfico aéreo y la frecuencia de eventos relacionados con turbulencia y engelamiento, se recomienda optimizar los procedimientos de recogida y transmisión de AIREP, evolucionando hacia sistemas más automáticos. Durante este periodo de estudio de 11 años, se ha observado que el número de notificaciones en el espacio aéreo español ha sido escaso, lo que limita la capacidad de análisis y respuesta ante estos fenómenos. Para poner en contexto el bajo número de notificaciones respecto a la cantidad de operaciones

que se producen, solamente en 2024 se gestionaron 2.3 millones de vuelos según una nota de prensa de (ENAI, 2025).

Para ello, resulta necesario promover la formación meteorológica de los pilotos y personal de los CCA para mejorar la codificación de fenómenos orográficos (MTW vs TURB). Por tanto, una mejora en la sistematización y en la frecuencia de los reportes contribuiría de forma significativa a reforzar la seguridad operacional, así como a mejorar la calidad de la vigilancia meteorológica y, en consecuencia, la toma de decisiones estratégicas en el ámbito aeronáutico.

11. Posibilidad de futuras líneas de trabajo

En primer lugar, este estudio abre la puerta a realizar un análisis exhaustivo de la caracterización de los escenarios sinópticos y mesoescalares que propician la formación de los fenómenos meteorológicos responsables de la emisión de estas observaciones. En trabajos futuros, sería pertinente profundizar en la identificación sistemática de dichos escenarios, estableciendo patrones recurrentes. Asimismo, se podría plantear el desarrollo de metodologías automatizadas que permitan relacionar de manera cuantitativa las condiciones sinópticas y mesoescalares con la frecuencia e intensidad de los eventos observados, lo que contribuiría a mejorar la comprensión de los procesos atmosféricos implicados y, en última instancia, a optimizar las estrategias de predicción y monitoreo.

En segundo lugar, a pesar de sus limitaciones, los AIREP constituyen una de las pocas fuentes directas de observación en niveles de vuelo, lo que los convierte en una herramienta fundamental para el desarrollo de procesos automáticos que realicen una validación o verificación de los productos de predicción de la turbulencia y del engelamiento, especialmente en entornos donde la teledetección presenta limitaciones.

Por último, la integración de AIREP con otras fuentes observacionales (AMDAR y SSR Mode-S) en vuelo abre una línea prometedora para el desarrollo de técnicas de postproceso basadas en aprendizaje automático, capaces de calibrar y mejorar los índices de predicción de turbulencia y engelamiento, reduciendo la incertidumbre asociada a los modelos numéricos.

En conjunto, este estudio pone de manifiesto el valor estratégico de los AIREP dentro del sistema de vigilancia meteorológica aeronáutica, no solo como herramienta de diagnóstico, sino como elemento clave para el desarrollo de nuevas metodologías de predicción más precisas, integradas y orientadas a la mejora continua de la seguridad operacional.

7. REFERENCIAS

- AEMET (2012). Pronóstico de englamamiento y ondas de montaña mediante teledetección y modelos. 6º Simposio Nacional de Predicción, Agencia Estatal de Meteorología, Madrid. Disponible en: <https://repositorio.aemet.es>
- AENA (2025). Estadísticas de tráfico aéreo de los aeropuertos españoles. AENA, Madrid. Disponible en: <https://www.aena.es/es/estadisticas/inicio.html>
- Belo-Pereira, M. (2015). Comparison of in-flight aircraft icing algorithms based on ECMWF forecasts. *Meteorological Applications*, 22, 705-715. <https://doi.org/10.1002/met.1505>
- Belo-Pereira, M. (2022). Aviation Turbulence Forecasting over the Portuguese Flight Information Regions: Algorithm and Objective Verification. *Atmosphere*, 13(3), 422.
- Clark, T. L., y Peltier, W. R. (1977). On the Evolution and Stability of Finite-Amplitude Mountain Waves. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 34, 1715-1730.
- Clark, T. L., y Peltier, W. R. (1983). Nonlinear Mountain Waves in Two and Three Spatial Dimensions. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 109, 527-554.
- Clem, L. H. (1955). Clear-Air Turbulence Near the Jet-Stream Maxima. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 36(2), 53-60.
- Cuevas, E. (2001). Variabilidad del chorro subtropical y su influencia en la atmósfera sobre Canarias. Instituto Nacional de Meteorología (INM), Centro de Investigación Atmosférica de Izaña.
- Díaz-Fernández, J., Quitián-Hernández, L., Santos-Muñoz, D., Fernández-González, S., Valero, F., Merino, A., García-Ortega, E., Sánchez, J. L., Sastre, M., y Martín, M. L. (2022). Mountain wave episodes using the high-resolution HARMONIE-AROME model in Spain. Preprint. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/2205.00109>
- Eick, D. (2015a). Aircraft Icing Accidents. Presentación en el NCAR In-flight Icing Users Technical Interchange Meeting (TIM), Washington, D.C., febrero de 2015. National Transportation Safety Board (NTSB), Office of Aviation Safety. Disponible en: <https://ral.ucar.edu/sites/default/files/docs/eick-ntsb-ncar-icing-presentation.pdf>
- Eick, D. (2015b). Turbulence-Related Accidents and Incidents. National Transportation Safety Board (NTSB) / UCAR–NCAR Research Applications Laboratory (RAL). Disponible en: <https://ral.ucar.edu/sites/default/files/docs/eick-turbulencerelatedaccidents.pdf>
- ENAIRES (2025). ENAIRES logra su mejor registro histórico: más de 2.3 millones de vuelos gestionados en 2024. ENAIRES, Nota de prensa, 15 de enero de 2025. Disponible en: https://www.enaire.es/es_ES/2025_01_15/ndp_enaire_logra_mejor_registro_historico_mas_2_millones_vuelos
- EUMETSAT (2004). Case study: Mountain waves – Spain and the Balearic Islands, 28 December 2004. EUMETSAT Case Studies, Darmstadt. Disponible en: <https://www.eumetsat.int>
- Fernández-González, S., Sánchez, J. L., Gascón, E., López, L., García-Ortega, E., y Merino, A. (2014). Weather features associated with aircraft icing conditions: a case study. *The Scientific World Journal*, 2014, Article ID 279063, 18 pp.

Font Tullot, I. (1956). El tiempo atmosférico en las Islas Canarias. Instituto Nacional de Meteorología (actual AEMET).

Hermoso, A., Rivière, G., Harvey, B., Methven, J., & Schemm, S. (2024). A dynamical interpretation of the intensification of the North Atlantic jet. *Journal of Climate*.

Jansà, A., Monserrat, S., y Gomis, D. (2007). The rissaga of 15 June 2006 in Ciutadella (Menorca), a meteorological tsunami. *Advances in Geosciences*, 12, 1-4.

Núñez Mora, J. Á., Riesco Martín, J., y Mora García, M. A. (2019). Climatología de descargas eléctricas y de días de tormenta en España. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Disponible en: <https://repositorio.aemet.es/>

UCAR/COMET (2012). Dominio del diagrama oblicuo T – log p. MetEd: Meteorology Education and Training. University Corporation for Atmospheric Research (UCAR), Boulder, Colorado. Disponible en: <https://www.meted.ucar.edu>

UCAR/COMET (2014). Mountain Waves and Downslope Winds. MetEd: Meteorology Education and Training. University Corporation for Atmospheric Research (UCAR), Boulder, Colorado. Disponible en: <https://www.meted.ucar.edu>

UCM-AEMET (2022). Climatología de ondas de montaña en la Sierra de Guadarrama. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y Universidad Complutense de Madrid. Disponible en: <https://repositorio.aemet.es>

Wen, Y., Wang, C., Wang, Z., Wang, R., y Yuan, M. (2025). Analysis of the characteristics of four severe aircraft icing events in Southwest China during the winter of 2023. *Frontiers in Earth Science*, 13, 1586116. <https://doi.org/10.3389/feart.2025.1586116>

8. ANEXO

AÑO	ICE MOD	TURB MOD	ICE SEV	TURB SEV
2014	2	5	0	5
2015	42	133	11	61
2016	26	136	10	68
2017	33	189	7	137
2018	94	414	18	150
2019	79	430	31	153
2020	44	217	10	86
2021	64	282	14	75
2022	100	379	15	100
2023	114	456	28	149
2024	168	559	19	172

Tabla A-1. Registros de AIREP para FIR Madrid, Barcelona y Canarias, periodo 2014-2024.

AÑO	ICE MOD	TURB MOD	ICE SEV	TURB SEV
2014	0	4	0	2
2015	23	84	5	22
2016	11	89	7	26
2017	12	137	5	75
2018	24	222	5	70
2019	34	196	19	51
2020	19	107	5	36
2021	16	114	10	38
2022	42	160	8	40
2023	63	192	20	80
2024	74	269	14	97

Tabla A-2. Registro anual de AIREP para la región FIR Madrid, periodo 2014-2024.

AÑO	ICE MOD	TURB MOD	ICE SEV	TURB SEV
2014	2	1	0	3
2015	19	48	6	39
2016	15	37	3	37
2017	21	49	2	55
2018	69	188	12	74
2019	45	234	12	98
2020	24	110	5	42
2021	47	168	3	36
2022	55	218	6	51
2023	50	185	7	60
2024	84	198	5	62

Tabla A-3. Registro anual de AIREP para la región FIR Barcelona, periodo 2014-2024.

AÑO	ICE MOD	TURB MOD	ICE SEV	TURB SEV
2015	0	1	0	0
2016	0	10	0	5
2017	0	3	0	7
2018	1	4	1	6
2019	0	0	0	4
2020	1	0	0	8
2021	1	0	1	1
2022	3	1	1	9
2023	1	79	1	9
2024	10	92	0	13

Tabla A-4. Registro anual de AIREP para la región FIR Canarias, periodo 2014-2024.

AÑO	ICE MOD	TURB MOD	ICE SEV	TURB SEV
ENERO	96	335	31	176
FEBRERO	65	390	21	124
MARZO	93	442	13	122
ABRIL	66	257	3	78
MAYO	56	210	10	38
JUNIO	27	140	7	54
JULIO	13	145	4	44
AGOSTO	24	150	2	62
SEPTIEMBRE	55	231	9	91
OCTUBRE	88	235	13	92
NOVIEMBRE	94	269	31	133
DICIEMBRE	88	390	19	142

Tabla A-5. Registros de AIREP para las FIR Madrid, Barcelona y Canarias, periodo 2014-2024.

AÑO	ICE MOD	TURB MOD	ICE SEV	TURB SEV
ENERO	36	176	20	81
FEBRERO	28	229	10	55
MARZO	34	226	10	54
ABRIL	20	111	3	28
MAYO	18	87	7	15
JUNIO	14	47	5	28
JULIO	5	58	3	24
AGOSTO	15	60	2	30
SEPTIEMBRE	19	111	4	37
OCTUBRE	44	132	7	61
NOVIEMBRE	43	147	14	57
DICIEMBRE	42	190	13	67

Tabla A-6. Registro mensual de AIREP para la región FIR Madrid, periodo 2014-2024.

AÑO	ICE MOD	TURB MOD	ICE SEV	TURB SEV
ENERO	60	143	11	83
FEBRERO	37	140	11	54
MARZO	57	192	3	60
ABRIL	45	117	0	49
MAYO	37	97	3	20
JUNIO	13	78	2	24
JULIO	7	87	0	19
AGOSTO	7	84	0	32
SEPTIEMBRE	35	120	5	53
OCTUBRE	43	96	6	30
NOVIEMBRE	48	116	14	71
DICIEMBRE	42	166	6	61

Tabla A-7. Registro mensual de AIREP para la región FIR Barcelona, periodo 2014-2024.

AÑO	ICE MOD	TURB MOD	ICE SEV	TURB SEV
ENERO	0	16	0	11
FEBRERO	0	21	0	15
MARZO	2	24	0	8
ABRIL	1	29	0	1
MAYO	1	26	0	3
JUNIO	0	15	0	2
JULIO	1	0	1	1
AGOSTO	2	6	0	0
SEPTIEMBRE	1	4	0	1
OCTUBRE	2	9	0	1
NOVIEMBRE	3	6	3	5
DICIEMBRE	4	34	0	14

Tabla A-8. Registro mensual de AIREP para la región FIR Canarias, periodo 2014-2024.

MES	Altitud Mediana FL	Altitud min FL	Altitud max FL	Nº AIREP
ENERO	350	0	493	510
FEBRERO	350	0	457	510
MARZO	330	5	430	561
ABRIL	330	5	502	334
MAYO	340	20	450	245
JUNIO	310	0	500	191
JULIO	290	27	410	189
AGOSTO	330	0	643	212
SEPTIEMBRE	330	0	533	325
OCTUBRE	330	10	410	329
NOVIEMBRE	340	0	430	400
DICIEMBRE	350	8	430	528

Tabla A-9. Registro mensual de la turbulencia en niveles de vuelo (FL), periodo 2014-2024.

MES	Altitud Mediana FL	Altitud min FL	Altitud max FL	Nº AIREP
ENERO	360	10	410	257
FEBRERO	350	50	457	282
MARZO	340	5	430	278
ABRIL	340	80	502	138
MAYO	350	40	390	102
JUNIO	330	70	430	75
JULIO	350	60	410	82
AGOSTO	360	30	643	90
SEPTIEMBRE	350	10	400	148
OCTUBRE	350	30	400	193
NOVIEMBRE	350	0	430	202
DICIEMBRE	350	10	430	256

Tabla A-10. Registro mensual de la turbulencia en niveles de vuelo (FL) en la región FIR Madrid, periodo 2014-2024.

MES	Altitud Mediana FL	Altitud min FL	Altitud max FL	Nº AIREP
ENERO	335	0	430	226
FEBRERO	340	0	430	192
MARZO	300	10	410	251
ABRIL	310	20	410	166
MAYO	310	20	400	115
JUNIO	210	0	500	102
JULIO	115	27	400	106
AGOSTO	185	0	400	116
SEPTIEMBRE	250	0	533	172
OCTUBRE	235	10	410	126
NOVIEMBRE	300	0	420	187
DICIEMBRE	330	8	430	226

Tabla A-11. Registro mensual de la turbulencia en niveles de vuelo (FL) en la región FIR Barcelona, periodo 2014-2024.

MES	Altitud Mediana FL	Altitud min FL	Altitud max FL	Nº AIREP
ENERO	330	70	493	27
FEBRERO	350	140	400	36
MARZO	340	5	410	32
ABRIL	330	5	400	30
MAYO	330	5	450	28
JUNIO	355	45	430	14
JULIO	80	80	80	1
AGOSTO	215	90	300	6
SEPTIEMBRE	330	120	380	5
OCTUBRE	270	110	380	10
NOVIEMBRE	130	19	390	11
DICIEMBRE	350	40	400	46

Tabla A-12. Registro mensual de la turbulencia en niveles de vuelo (FL) en la región FIR Canarias, periodo 2014-2024.

MES	Altitud Mediana FL	Altitud min FL	Altitud max FL	Nº AIREP
ENERO	150	10	500	127
FEBRERO	130	50	360	85
MARZO	140	50	380	105
ABRIL	110	40	270	69
MAYO	150	100	330	66
JUNIO	180	120	330	34
JULIO	200	100	380	17
AGOSTO	180	90	340	26
SEPTIEMBRE	180	20	370	63
OCTUBRE	190	80	450	101
NOVIEMBRE	160	40	340	125
DICIEMBRE	180	10	390	106

Tabla A-13. Registro mensual de engelamiento en niveles de vuelo (FL), periodo 2014-2024.

MES	Altitud Mediana FL	Altitud min FL	Altitud max FL	Nº AIREP
ENERO	150	10	370	56
FEBRERO	150	80	360	37
MARZO	150	60	360	43
ABRIL	120	70	250	23
MAYO	150	100	250	25
JUNIO	190	120	330	19
JULIO	220	180	380	8
AGOSTO	180	120	340	17
SEPTIEMBRE	180	100	370	23
OCTUBRE	200	90	450	50
NOVIEMBRE	160	60	260	57
DICIEMBRE	180	10	390	54

Tabla A-14. Registro mensual del engelamiento en niveles de vuelo (FL) en la región FIR Madrid, periodo 2014-2024.

MES	Altitud Mediana FL	Altitud min FL	Altitud max FL	Nº AIREP
ENERO	140	30	500	71
FEBRERO	105	50	310	48
MARZO	125	50	380	60
ABRIL	110	40	210	45
MAYO	150	100	330	40
JUNIO	170	120	330	15
JULIO	150	100	210	7
AGOSTO	170	90	330	7
SEPTIEMBRE	180	20	350	39
OCTUBRE	180	80	340	49
NOVIEMBRE	160	40	270	62
DICIEMBRE	180	60	380	48

Tabla A-15. Registros mensuales del engelamiento en niveles de vuelo (FL) en la región FIR Barcelona, periodo 2014-2024.

MES	Altitud Media FL	Altitud min FL	Altitud max FL	Nº AIREP
ENERO	---	---	---	0
FEBRERO	---	---	---	0
MARZO	110	110	110	2
ABRIL	270	270	270	1
MAYO	100	100	100	1
JUNIO	---	---	---	0
JULIO	220	190	250	2
AGOSTO	195	190	200	2
SEPTIEMBRE	230	230	230	1
OCTUBRE	210	210	210	2
NOVIEMBRE	205	80	340	6
DICIEMBRE	170	140	190	4

Tabla A-16. Registro mensual del engelamiento en niveles de vuelo (FL) en la región FIR Canarias, periodo 2014-2024.

AÑO	MTW MOD	TURB MOD	MTW SEV	TURB SEV
2014	0	1	0	2
2015	0	35	2	29
2016	0	33	1	14
2017	0	51	13	39
2018	2	91	10	34
2019	0	88	13	30
2020	0	40	0	16
2021	2	59	4	17
2022	0	71	6	34
2023	0	82	3	36
2024	0	112	4	48

Tabla A-17. Registro anual de AIREP de onda de montaña y turbulencia para todos los sistemas montañosos, periodo 2014-2024.

MES	MTW MOD	TURB MOD	MTW SEV	TURB SEV
ENERO	0	66	10	54
FEBRERO	0	99	9	31
MARZO	0	87	11	28
ABRIL	0	50	2	27
MAYO	0	41	3	7
JUNIO	2	23	0	9
JULIO	0	18	0	6
AGOSTO	0	37	1	15
SEPTIEMBRE	0	53	1	23
OCTUBRE	0	55	4	20
NOVIEMBRE	0	55	4	35
DICIEMBRE	2	79	11	44

Tabla A-18. Registro mensual de AIREP de turbulencia y onda de montaña para todos los sistemas montañosos, periodo 2014-2024.

AÑO	MTW MOD	TURB MOD	MTW SEV	TURB SEV
2014	0	0	0	0
2015	0	3	1	14
2016	0	3	0	7
2017	0	1	4	15
2018	2	12	8	16
2019	0	9	8	12
2020	0	2	0	6
2021	2	16	2	2
2022	0	16	5	12
2023	0	7	1	5
2024	0	10	1	19

Tabla A-19. Registro anual de AIREP de onda de montaña y turbulencia para los Pirineos, periodo 2014-2024.

MES	MTW MOD	TURB MOD	MTW SEV	TURB SEV
ENERO	0	10	6	25
FEBRERO	0	8	4	12
MARZO	0	7	5	8
ABRIL	0	10	2	15
MAYO	0	5	3	5
JUNIO	2	3	0	0
JULIO	0	1	0	1
AGOSTO	0	9	0	2
SEPTIEMBRE	0	6	1	8
OCTUBRE	0	9	1	2
NOVIEMBRE	0	4	1	14
DICIEMBRE	2	7	7	16

Tabla A-20. Registro mensual de AIREP de turbulencia y onda de montaña para los Pirineos, periodo 2014-2024.

AÑO	MTW MOD	TURB MOD	MTW SEV	TURB SEV
2014	0	0	0	0
2015	0	3	0	0
2016	0	1	0	1
2017	0	7	0	8
2018	0	4	0	0
2019	0	0	1	0
2020	0	4	0	5
2021	0	3	0	1
2022	0	8	0	5
2023	0	6	0	4
2024	0	6	1	3

Tabla A-21. Registro anual de AIREP de onda de montaña y turbulencia para la cordillera Cantábrica, periodo 2014-2024.

MES	MTW MOD	TURB MOD	MTW SEV	TURB SEV
ENERO	0	3	0	3
FEBRERO	0	2	0	2
MARZO	0	5	1	4
ABRIL	0	2	0	2
MAYO	0	2	0	0
JUNIO	0	4	0	1
JULIO	0	3	0	0
AGOSTO	0	3	0	4
SEPTIEMBRE	0	4	0	1
OCTUBRE	0	4	0	3
NOVIEMBRE	0	5	1	2
DICIEMBRE	0	5	0	5

Tabla A-22. Registro mensual de AIREP de turbulencia y onda de montaña para la cordillera Cantábrica, periodo 2014-2024.

AÑO	MTW MOD	TURB MOD	MTW SEV	TURB SEV
2014	0	1	0	2
2015	0	11	1	10
2016	0	13	1	2
2017	0	19	2	7
2018	0	25	1	6
2019	0	20	3	13
2020	0	10	0	3
2021	0	21	2	11
2022	0	21	0	9
2023	0	19	0	18
2024	0	38	0	12

Tabla A-23. Registro anual de AIREP de onda de montaña y turbulencia para el sistema Ibérico, periodo 2014-2024.

MES	MTW MOD	TURB MOD	MTW SEV	TURB SEV
ENERO	0	22	1	11
FEBRERO	0	29	2	8
MARZO	0	18	3	11
ABRIL	0	17	0	7
MAYO	0	9	0	2
JUNIO	0	5	0	7
JULIO	0	10	0	4
AGOSTO	0	14	0	4
SEPTIEMBRE	0	17	0	7
OCTUBRE	0	20	2	11
NOVIEMBRE	0	14	2	9
DICIEMBRE	0	23	0	13

Tabla A-24. Registro mensual de AIREP de turbulencia y onda de montaña para el sistema Ibérico, periodo 2014-2024.

AÑO	MTW MOD	TURB MOD	MTW SEV	TURB SEV
2014	0	0	0	0
2015	0	3	0	3
2016	0	2	0	1
2017	0	1	4	3
2018	0	0	1	4
2019	0	1	1	2
2020	0	1	0	1
2021	0	1	0	1
2022	0	1	1	1
2023	0	6	1	5
2024	0	11	2	9

Tabla A-25. Registro anual de AIREP de onda de montaña y turbulencia para el sistema Central, periodo 2014-2024.

MES	MTW MOD	TURB MOD	MTW SEV	TURB SEV
ENERO	0	6	3	6
FEBRERO	0	4	3	3
MARZO	0	2	2	5
ABRIL	0	4	0	2
MAYO	0	0	0	0
JUNIO	0	1	0	1
JULIO	0	0	0	1
AGOSTO	0	1	1	1
SEPTIEMBRE	0	1	0	3
OCTUBRE	0	2	1	2
NOVIEMBRE	0	1	0	1
DICIEMBRE	0	5	0	5

Tabla A-26. Registro mensual de AIREP de turbulencia y onda de montaña para el sistema Central, periodo 2014-2024.

AÑO	MTW MOD	TURB MOD	MTW SEV	TURB SEV
2014	0	0	0	0
2015	0	15	0	2
2016	0	14	0	3
2017	0	23	3	6
2018	0	50	0	8
2019	0	58	0	3
2020	0	23	0	1
2021	0	18	0	2
2022	0	25	0	7
2023	0	44	1	4
2024	0	47	0	5

Tabla A-27. Registro anual de AIREP de onda de montaña y turbulencia para el sistema Bético, periodo 2014-2024.

MES	MTW MOD	TURB MOD	MTW SEV	TURB SEV
ENERO	0	25	0	9
FEBRERO	0	56	0	6
MARZO	0	55	0	0
ABRIL	0	17	0	2
MAYO	0	25	0	0
JUNIO	0	10	0	0
JULIO	0	4	0	0
AGOSTO	0	10	0	4
SEPTIEMBRE	0	25	0	4
OCTUBRE	0	20	0	2
NOVIEMBRE	0	31	0	9
DICIEMBRE	0	39	4	5

Tabla A-28. Registro mensual de AIREP de turbulencia y onda de montaña para el sistema Bético, periodo 2014-2024.