

# **Trabajo de Fin de Grado**

## *Grado en Ingeniería Aeroespacial*

**Análisis de la dispersión en la predicción meteorológica proporcionada por ECMWF-EPS.**

Autor: Sandra Castro Arjona

Tutor: Alfonso Valenzuela Romero

*Dpto. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos*  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2018





**Trabajo de Fin de Grado**  
*Grado en Ingeniería Aeroespacial*

**Análisis de la dispersión en la predicción  
meteorológica proporcionada por ECMWF-EPS.**

Autor: Sandra Castro Arjona  
Tutor: Alfonso Valenzuela Romero

Dpto. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**  
Sevilla, 2018



**Trabajo de Fin de Grado:** Análisis de la dispersión en la predicción meteorológica proporcionada por ECMWF-EPS

**Autor:** Sandra Castro Arjona

**Tutor:** Alfonso Vázquez Valenzuela

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, estará compuesto por:

**Presidente:**

**Vocales:**

**Secretario:**

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*





# Agradecimientos

---

*Realmente tengo que agradecer haber llegado hasta aquí a aquellas personas que me dieron su apoyo incondicional, las que están y las que se fueron, porque después de todo, no puedo sentirme más afortunada de tenerlos.*



# Resumen

---

En este proyecto se pretende estudiar la dispersión en la predicción meteorológica proporcionada por ECMWF-EPS. Actualmente, la planificación es un aspecto fundamental en el sector de la aviación, tanto en el cálculo de las trayectorias como en la gestión de afluencia. Es por eso que la planificación debe tener en cuenta la incertidumbre definida en las predicciones meteorológicas.

Hoy en día muchos productos utilizan el sistema de predicción por conjuntos, a partir del cual se obtienen pronósticos que resultan fundamentales para poder realizar la planificación anteriormente comentada. Es por ello que este documento se centrará en la representación de resultados que proporcionen información relevante sobre los valores característicos de dispersión que define el pronóstico utilizado.

Por lo tanto, a partir del análisis de una zona determinada, cuya localización es relevante en el ámbito de la aviación, se pretende obtener los valores característicos de dispersión. Para ello, se considerarán bajo estudio variables que resulten de interés dentro de las condiciones meteorológicas por las que puede verse afectada una aeronave.

A partir de este estudio, se obtendrán conclusiones relevantes, y la clarificación de las tendencias y comportamientos característicos que experimentan los valores de dispersión definidos, en función de las variables estudiadas. De forma análoga a cómo se actúa en la realidad, se tendrán en cuenta diferentes horizontes temporales de predicción, normalmente utilizados en la práctica.

Por último, a través de un reanálisis del pronóstico, también se pretenden obtener resultados acerca del ajuste con la realidad, comparando los valores proporcionados por el pronóstico con los obtenidos mediante el reanálisis, para cada una de las variables sometidas a estudio.

# Abstract

---

This project intends to study the dispersion in the meteorological prediction provided by ECMWF-EPS. Currently, planning is a fundamental aspect in the aviation sector, both in the calculation of trajectories and in air traffic flow management. That is why planning must take into account the uncertainty defined in weather forecasts.

Nowadays, many products use the Ensemble Prediction Systems (EPS), from which forecasts are obtained. These forecasts are fundamental to be able to carry out the planning. This document will focus on the representation of results that provide relevant information about the characteristic dispersion values that define the used forecast.

Therefore, from the analysis of a specific area, whose location is relevant in the field of aviation, it is intended to obtain the characteristic values of dispersion. To do this, variables that are of interest within the meteorological conditions for which an aircraft may be affected will be considered under study.

From this study, relevant conclusions will be obtained, and the clarification of the trends and characteristic behaviors that the defined dispersion values will experience, based on the studied variables. Analogously to reality, different temporal horizons of prediction will be taken into account, which are used in practice.

Finally, through a reanalysis of the forecast, it also intends to obtain results about the adjustment with reality, comparing the values provided by the forecasts with those values obtained through the reanalysis, for each variable under study.

# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xii</b>
<b>Índice</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xiv</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>xv</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>18</b>
<b>2. Sistemas de predicción por conjuntos</b>	<b>19</b>
2.1. Descripción	19
2.2. Tipos de EPS	20
2.3. Parámetros generados a partir de EPS	21
2.4. Post-Procesamiento de datos	22
<b>3. Análisis de un día determinado</b>	<b>24</b>
3.1. Valores medios y dispersiones para diferentes horizontes temporales	25
3.2. Correlación entre valor medio y dispersión	32
3.3. Evolución temporal del valor mínimo, medio y máximo de la dispersión	34
3.4. Histogramas para los diferentes horizontes temporales	37
<b>4. Análisis de varios días a lo largo del año</b>	<b>41</b>
4.1. Evolución temporal del valor mínimo, medio y máximo de la dispersión	41
4.2. Histogramas	48
<b>5. Evolución temporal de la predicción y ajuste con la realidad</b>	<b>54</b>
<b>6. Conclusiones</b>	<b>61</b>
<b>Referencias</b>	<b>62</b>
<b>Glosario</b>	<b>63</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

<b>Tabla 1.</b> Valor del coeficiente de correlación Pearson para las variables de viento meridional ( $P_{WV}$ ), viento zonal ( $P_{WH}$ ) y temperatura ( $P_T$ ).	30
<b>Tabla 2.</b> Parámetros significativos de los histogramas obtenidos a partir de los valores de viento meridional.	37
<b>Tabla 3.</b> Parámetros significativos de los histogramas obtenidos a partir de los valores de viento zonal.	37
<b>Tabla 4.</b> Parámetros significativos de los histogramas obtenidos a partir de los valores de temperatura.	39
<b>Tabla 5.</b> Valores de dispersión característicos de los días estudiados (en promedio), correspondientes a los horizontes temporales de 0 y 72 horas.	52
<b>Tabla 6.</b> Estudio de los intervalos de definición de las variables según el coeficiente $\alpha$ .	57
<b>Tabla 7.</b> Porcentaje de ajuste de la predicción frente a lo acontecido en la realidad.	60

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

- Figura 1.** Evolución temporal de los valores medios del viento meridional. De izquierda a derecha y de arriba abajo aparecen los resultados para los horizontes temporales de 0h, 24h, 48h y 72h, respectivamente. 26
- Figura 2.** Evolución temporal de la dispersión del viento meridional. De izquierda a derecha y de arriba abajo aparecen los resultados para los horizontes temporales de 0h, 24h, 48h y 72h, respectivamente. 27
- Figura 3.** Evolución temporal de los valores medios del viento zonal. De izquierda a derecha y de arriba abajo aparecen los resultados para los horizontes temporales de 0h, 24h, 48h y 72h, respectivamente. 28
- Figura 4.** Evolución temporal de la dispersión del viento zonal. De izquierda a derecha y de arriba abajo aparecen los resultados para los horizontes temporales de 0h, 24h, 48h y 72h, respectivamente. 29
- Figura 5.** Evolución temporal de los valores medios de la temperatura. De izquierda a derecha y de arriba abajo aparecen los resultados para los horizontes temporales de 0h, 24h, 48h y 72h, respectivamente. 30
- Figura 6.** Evolución temporal de la dispersión de la temperatura. De izquierda a derecha y de arriba abajo aparecen los resultados para los horizontes temporales de 0h, 24h, 48h y 72h, respectivamente. 31
- Figura 7.** Coeficiente de correlación Pearson para las variables variables estudiadas (de arriba abajo, corresponden con WV, WH y Temp respectivamente). Se definen de izquierda a derecha los horizontes temporales de 24 y 72 horas. 34
- Figura 8.** Dispersión máxima, media y mínima de las variables de viento respecto el tiempo. Los valores de dispersión correspondientes al viento meridional aparecen en la parte superior, y los de viento zonal, en la parte inferior de la figura. 35
- Figura 9.** Dispersión máxima, media y mínima de la temperatura respecto del tiempo. 36
- Figura 10.** Histogramas de la dispersión, obtenidos para las variables de viento meridional (parte superior) y viento zonal (parte inferior), en función de cada uno de los horizontes temporales estudiados (0h, 24h 48h y 72h, respectivamente). 38
- Figura 11.** Histograma de la dispersión, obtenido para la variable de temperatura, en función de cada uno de los horizontes temporales estudiados (0h, 24h 48h y 72h, respectivamente). 40
- Figura 12.** Dispersión máxima, media y mínima de cada uno de los días analizados, respecto los diferentes horizontes temporales estudiados (0h, 24h, 48h y 72h, respectivamente). De arriba hacia abajo, aparecen representados dichos valores de dispersión correspondientes con el viento meridional (WV), viento zonal (WH) y temperatura (TEMP), respectivamente. 42
- Figura 13.** Representación de los valores de dispersión máximos y mínimos para cada uno de los días analizados (valores extremos de las líneas verticales). Con un ‘-‘ se han marcado los percentiles del 95% y del 5%. La mediana de los valores (percentil del 50%) se destaca a través de una ‘x’. Dichos valores de dispersión se han representado de arriba abajo, para las variables de viento meridional, viento zonal y temperatura, respectivamente, para el horizonte temporal de 0 horas. 44
- Figura 14.** Representación de los valores de dispersión máximos y mínimos para cada uno de los días analizados (valores extremos de las líneas verticales). Con un ‘-‘ se han marcado los percentiles del 95% y del 5%. La mediana de los valores (percentil del 50%) se destaca a través de una ‘x’. Dichos valores de dispersión se han representado de arriba abajo, para las variables de viento meridional, viento zonal y temperatura, respectivamente, para el horizonte temporal de 24 horas. 45
- Figura 15.** Representación de los valores de dispersión máximos y mínimos para cada uno de los días analizados (valores extremos de las líneas verticales). Con un ‘-‘ se han marcado los percentiles del 95% y del 5%. La mediana de los valores (percentil del 50%) se destaca a través de una ‘x’. Dichos valores de dispersión se han representado de arriba abajo, para las variables de viento meridional, viento zonal y temperatura, respectivamente, para el horizonte temporal de 48 horas. 46

**Figura 16.** Representación de los valores de dispersión máximos y mínimos para cada uno de los días analizados (valores extremos de las líneas verticales). Con un ‘-‘ se han marcado los percentiles del 95% y del 5%. La mediana de los valores (percentil del 50%) se destaca a través de una ‘x’. Dichos valores de dispersión se han representado de arriba abajo, para las variables de viento meridional, viento zonal y temperatura, respectivamente, para el horizonte temporal de 72 horas. 47

**Figura 17.** Histograma de la dispersión para cada uno de los días estudiados (cada línea corresponde a uno de los 24 días analizados), respecto el horizonte temporal de 0 horas. De arriba abajo aparecen los valores de dispersión asociados a la variable de viento meridional, viento zonal y temperatura, respectivamente. 49

**Figura 18.** Histograma de la dispersión para cada uno de los días estudiados (cada línea corresponde a uno de los 24 días analizados), respecto el horizonte temporal de 24 horas. De arriba abajo aparecen los valores de dispersión asociados a la variable de viento meridional, viento zonal y temperatura, respectivamente. 50

**Figura 19.** Histograma de la dispersión para cada uno de los días estudiados (cada línea corresponde a uno de los 24 días analizados), respecto el horizonte temporal de 48 horas. De arriba abajo aparecen los valores de dispersión asociados a la variable de viento meridional, viento zonal y temperatura, respectivamente. 51

**Figura 20.** Histograma de la dispersión para cada uno de los días estudiados (cada línea corresponde a uno de los 24 días analizados), respecto el horizonte temporal de 72 horas. De arriba abajo aparecen los valores de dispersión asociados a la variable de viento meridional, viento zonal y temperatura, respectivamente. 52

**Figura 21.** Intervalo de valores que define cada una de las variables estudiadas (de izquierda a derecha y de arriba abajo, WV, WH y TEMP, respectivamente), en cada uno de los horizontes temporales estudiados (líneas horizontales cuyo valor de horizonte temporal queda definido a través del eje de ordenadas). 56

**Figura 22.** Histograma del coeficiente  $\alpha$  comparando los horizontes temporales de 0 y 24 horas. De arriba abajo, aparecen dichos histogramas para las variables WV, WH y TEMP, respectivamente. 59





# 1. INTRODUCCIÓN

---

Hoy en día, la planificación es un aspecto fundamental en el sector de la aviación, sobre todo en lo que se refiere a la gestión del tráfico aéreo. En este ámbito, destaca la importancia de la predicción de trayectorias en el cálculo de los tiempos de llegada de las aeronaves [1], las cargas de combustible [2], el control de tráfico aéreo [3] o la gestión de afluencia [4]. Cada uno de estos aspectos resultan cruciales tanto para que las infraestructuras aeroportuarias y las compañías aéreas puedan cumplir con los servicios ofertados como para no incurrir en costes imprevistos que afecten de forma negativa al desarrollo de las actividades.

Por este motivo, resulta de gran interés el estudio de las predicciones de las condiciones meteorológicas que se pueden desarrollar en una ubicación concreta para un horizonte temporal determinado. La incertidumbre afecta a la planificación, por lo que es un aspecto a tener en cuenta a la hora de realizar una óptima gestión de las operaciones aéreas. Actualmente, existen productos meteorológicos que proporcionan una medida de la incertidumbre de predicción, la cuál será fundamental para poder conocer la fiabilidad de los resultados que pueden garantizar las predicciones.

En este proyecto se tiene por objetivo conocer cuáles son los valores habituales de incertidumbre proporcionados por estos productos, además del estudio que permita establecer cómo evoluciona esta de acuerdo a los horizontes temporales de predicción. Para ello se realizará el análisis, en particular, sobre la temperatura del aire y el viento.

Para poder alcanzar el objetivo que se persigue con este proyecto, se siguen los siguientes pasos. En primer lugar, se establece una exposición teórica acerca de los sistemas de predicción por conjuntos, centrándose en sus tipos y en las características representativas de los mismos (sección 2).

Posteriormente, para conocer los valores habituales de incertidumbre, se realizará el análisis de un día determinado de la totalidad del periodo estudiado (sección 3). Sobre este, se destacarán aspectos representativos sobre los valores de dispersión obtenidos. Quedando analizada la predicción de un día concreto, se procederá a un análisis de carácter anual, a partir de una muestra determinada de varios días a lo largo del año (sección 4). Del mismo modo, se pretende mostrar tanto de forma cualitativa como cuantitativa la influencia de la incertidumbre sobre los análisis de la predicción, además de las restricciones y pérdidas de efectividad que pueden tener las predicciones debido a la aparición de dicha incertidumbre.

Por último, se analizará el ajuste de la predicción con la propia realidad acontecida en la zona estudiada en el marco temporal determinado y cómo la predicción va convergiendo a medida que nos acercamos al instante predicho (sección 5). Este aspecto facilitará la obtención de una serie de conclusiones acerca de los valores de dispersión característicos sobre la predicción meteorológica analizada.

## 2. SISTEMAS DE PREDICCIÓN POR CONJUNTOS

---

### 2.1. Descripción

El centro europeo de pronósticos meteorológicos a medio plazo (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) proporciona predicciones numéricas sobre el tiempo atmosférico. Los datos que produce son totalmente accesibles por los servicios meteorológicos de cada país integrante en la organización, por lo que las matrices de datos que proporciona esta entidad serán las que marquen el punto inicial de la elaboración del estudio [5].

Los sistemas de predicción por conjuntos (Ensemble Prediction Systems, EPS) son sistemas numéricos de predicción meteorológica (NWP, Numerical Weather Prediction) que nos permiten estimar la incertidumbre de un pronóstico meteorológico a través del resultado más probable [6]. Los NWP utilizan los modelos más actualizados de atmósfera, de forma que son sistemas muy potentes y de gran utilidad para la producción de pronósticos meteorológicos. Actualmente, numerosos modelos proporcionan una representación suficientemente buena de una situación meteorológica, la cual también puede ser útil para proporcionar predicciones automáticas básicas, partiendo de la salida directa del modelo [7].

Generalmente, los pronósticos se basan en observables y modelos matemáticos que describen el comportamiento dinámico y físico de la atmósfera. Dichos modelos consisten en conjuntos de ecuaciones diferenciales parciales no lineales, de ámbito hidro-termodinámico, las cuales se encuentran acopladas entre sí. Estas ecuaciones únicamente proporcionan soluciones numéricas y dependen en gran medida de las condiciones iniciales que se definan. Además, hay que tener en cuenta la teoría del caos, es decir, la forma en la que evoluciona la atmósfera es muy sensible a pequeños errores en el análisis inicial, de modo que un pequeño error (a menudo demasiado pequeño para que pueda ser apreciado) puede convertirse en un gran error de pronóstico) [8].

Con el objetivo de reducir las incertidumbres derivadas de la ausencia de condiciones iniciales fiables o del propio proceso de cálculo numérico para la predicción meteorológica, una posible solución es ejecutar los modelos partiendo de condiciones de partida ligeramente perturbadas. Si los diferentes pronósticos en el conjunto son muy similares entre sí, podemos confiar en el pronóstico obtenido, pero si todos se desarrollan de forma diferenciada y, por ejemplo, algunos desarrollan una gran tormenta mientras otros definen una depresión mucho más débil, no se debe estar tan seguro de la fiabilidad del pronóstico [9].

Por lo tanto, en lugar de ejecutar el modelo NWP una vez (lo cual se corresponde con un pronóstico determinista), en el EPS el modelo se ejecuta numerosas veces, partiendo de condiciones iniciales ligeramente diferentes [10]. A menudo, la física del modelo también se perturba, además de que en algunos casos se usa más de un modelo, o el mismo modelo, pero con diferentes combinaciones de parametrización física. Las soluciones individuales del NWP que componen el conjunto se identifican a menudo como los miembros del conjunto [7].

El rango de las diferentes soluciones que obtenemos del pronóstico nos permite evaluar la incertidumbre de este y cómo de seguros podríamos estar del pronóstico determinista. La incertidumbre en el pronóstico meteorológico puede variar ampliamente día a día, sobre todo de acuerdo a las variables meteorológicas que se definen a nivel de superficie.

El EPS ha sido diseñado para muestrear la función de distribución de probabilidad (Probability Distribution Function, PDF) del pronóstico y, a menudo, es utilizado para evaluar la probabilidad de que ocurran ciertos fenómenos. Mediante la observación de la proporción de miembros del conjunto que predicen un fenómeno meteorológico, podemos elaborar una estimación de la probabilidad de la aparición de dicho fenómeno [11].

Cuando se observan pronósticos de corto alcance (anticipación de uno o dos días), el patrón general del tiempo suele ser mucho más predecible, pero aun así se pueden encontrar diferencias importantes entre los miembros del conjunto cuando se observan los detalles locales de las condiciones meteorológicas de una zona. Ocasionalmente, la evolución a gran escala puede ser incierta incluso a corto plazo, sobre todo en el desarrollo de grandes tormentas, de forma que resulta importante tener en cuenta el EPS incluso en pronósticos a corto plazo. Por ello, en estos casos, se suele seleccionar el miembro más representativo del conjunto (p.ej. el modo de la función de distribución de probabilidad) como guía para la definición de un resultado más probable. A pesar de ello, puede que no exista suficiente correlación entre variables para que dicha variable seleccionada ofrezca una buena representación del conjunto. Consecuentemente, se debe evaluar la incertidumbre del pronóstico y actualizar este para permitir el estudio de su evolución.

Para analizar la propia dispersión, se emplean comúnmente los parámetros de salida del EPS que se definirán posteriormente, tales como los mapas de espagueti o representaciones de la varianza de las variables en estudio. A escala local, se emplean los cuantiles y el análisis de meteogramas para la determinación de la dispersión que define el conjunto [12].

Desde su primera implementación operativa, el método por conjuntos se ha convertido en una técnica ampliamente utilizada en todo el mundo. Los resultados de los sistemas de predicción por conjuntos dependen en gran medida de la calidad del sistema de asimilación de datos que sea utilizado para crear las mejores condiciones iniciales (no perturbadas) posibles, y del modelo numérico que se utilice para generar dichas predicciones. Asimismo, un sistema exitoso en este ámbito, debe simular el efecto tanto de las incertidumbres iniciales como de las relacionadas con el modelo de error del pronóstico.

## 2.2. Tipos de EPS

Hay tres tipos principales de EPS para la realización de predicciones meteorológicas: EPS global, regional y a escala convectiva. Al igual que en el caso de los modelos deterministas NWP, dichos EPS abordan diferentes escalas de tiempo en los pronósticos que realizan.

Dentro de cada categoría aparecen variantes que se pueden modificar, como la forma de crear las perturbaciones y la aplicación de los modelos para obtener las predicciones. Sin embargo, los principios de ejecución son idénticos en todos los casos.

### - EPS Global

Normalmente se diseña para ser aplicado en pronósticos de rango medio, con una anticipación en un intervalo de tres a quince días. Utilizan modelos globales NWP y se ejecutan a resoluciones relativamente bajas en redes de longitud entre 30 y 70 kilómetros.

Aunque están diseñados para la predicción en un rango medio, debido a su cobertura global también pueden proporcionar predicciones de corto alcance en regiones donde no hay disponibles otro tipo de EPS. En líneas generales, el EPS global no podrá resolver variables que requieran un gran detalle en su predicción, ya que sus valores de resolución limitan el detalle que se puede esperar de las predicciones.

### - EPS Regional

Su uso destaca en áreas continentales o países de gran extensión, de modo que su pronóstico se centra en un corto plazo (de uno a tres días). Utilizan mayor resolución que los anteriores, generalmente con una extensión de 7 a 30 kilómetros, por lo que permiten pronosticar más detalles locales sobre las condiciones meteorológicas.

Sin embargo, también presentan limitaciones en la resolución. Por ejemplo, un EPS regional no puede predecir detalles de sistemas de pequeña escala como podrían ser las tormentas eléctricas. Este EPS debe tener en cuenta las condiciones de contorno de sus límites laterales (es decir, las características de los sistemas meteorológicos que se mueven alrededor del área a analizar, fuera del dominio de estudio) a partir de la información proporcionada por los EPS globales [5].

### - **EPS a escala convectiva**

En este caso, se establecen cuadrículas de longitudes pequeñas (de 1 a 4 kilómetros), definiéndose así dominios más restringidos. Estos modelos permiten resolver algunos detalles de grandes sistemas convectivos, de forma que pueden intentar predecir variables tales como la ubicación y la intensidad de fenómenos a pequeña escala (siendo un ejemplo de estos las tormentas eléctricas). Si bien esto presenta un gran potencial para mejorar las predicciones, los sistemas convectivos evolucionan rápidamente y tienen escalas de tiempo de predicciones cortas (tan solo de unas horas), de forma que los pronósticos que se realizan pueden verse rápidamente afectados por la característica caótica de la atmósfera.

Por lo tanto, los sistemas de predicción por conjuntos son muy importantes para los modelos NWP a esta escala, ya que la inestabilidad convectiva añade una incertidumbre adicional no resuelta en escalas de tiempo mucho más cortas. Además de la propia convección, estos modelos de resolución han mejorado enormemente la capacidad de predecir otros aspectos de la meteorología local, tales como nubes bajas y visibilidad, lo cual resulta de gran interés para la aviación.

El EPS a escala convectiva está en continuo desarrollo, ya que actualmente tiene un alto coste de ejecución, y aún la experiencia de las predicciones a través de este ámbito es escasa. Por ello, se espera una resolución mucho más alta de este tipo de EPS, hecho que permitirá la obtención de resultados con mayor exactitud de precisión que los proporcionados por los EPS globales y regionales [6].

## **2.3. Parámetros generados a partir de EPS**

Algunos de los parámetros que son generados a través de los EPS, resultan ser de gran utilidad para la obtención de predicciones meteorológicas. De esta forma, los más relevantes se describen brevemente a continuación.

### - **Media del conjunto**

Este parámetro define una media simple de la variable entre todos los miembros del conjunto. La media del conjunto normalmente define una verificación mejor del pronóstico que otras variables como la varianza o un coeficiente de correlación, ya que suaviza detalles impredecibles y presenta simplemente los elementos más predecibles del pronóstico realizado.

La media puede proporcionar una buena guía para el elemento que se quiere predecir, pero hay que tener precaución con dicha variable ya que no será capaz de predecir eventos extremos. Esto es un aspecto negativo, ya que tiende a suavizar los fenómenos impredecibles de menor escala, además de que normalmente no permite representar con exactitud la intensidad de sistemas meteorológicos de gran impacto. Por lo tanto, la media del conjunto no debe ser usada si el pronóstico se pretende realizar para fenómenos meteorológicos severos.

### - **Dispersión del conjunto**

A partir de este valor se define la desviación estándar (no sesgada) de una variable de salida del modelo, además de proporcionar una medida del nivel de incertidumbre del parámetro que se esté analizando. Se suele utilizar de forma superpuesta al valor de la media, para así analizar la evolución de la variable en estudio [9].

### - **Probabilidad básica**

La probabilidad suele estimarse mediante una simple proporción de los miembros del conjunto, los cuales predicen que un evento se produzca en una localización concreta. Hay que destacar que la definición de esta probabilidad no es una probabilidad bayesiana como tal, pero proporciona una estimación útil para los fines que se pretenden. Dicha definición de probabilidad permite que el modelo obtenido refleje con precisión la distribución de las características meteorológicas de un determinado fenómeno. Los pronósticos de probabilidad obtenidos de este modo deben ser verificados a través de una gran extensión de muestras de casos determinados para establecer el grado en el que las probabilidades del pronóstico se relacionan con las frecuencias de los eventos [7].

### 2.3.1. Cuantiles

Un conjunto de cuantiles de la distribución del conjunto puede proporcionar un breve resumen de la incertidumbre. Los cuantiles que se utilizan generalmente son el máximo y mínimo de la distribución del conjunto y los percentiles de 25%, 50% (punto medio de la distribución de la función de probabilidad, mediana) y del 75% (también del 5 y 95 %).

### 2.3.2. 'Spaguetti Chart'

Este tipo de gráficos muestran contornos de las variables seleccionadas (p.ej. Diferentes valores de presión a una determinada altura geopotencial) de entre los miembros que forman el conjunto. A través de ellos, se puede obtener una representación útil para una mejor predictibilidad de la zona en estudio. Si todos los contornos del miembro del conjunto seleccionado se encuentran próximos entre sí, la previsibilidad será alta y se establecerá lo opuesto si dichos contornos se encuentran separados unos de otros.

### 2.3.3. 'Postage Stamp Maps'

Un conjunto de pequeños mapas muestra representaciones de contornos de cada variable individual que conforma el conjunto. A partir de dichos gráficos se pueden visualizar los diferentes escenarios en los que se definen las variables, de forma que se puedan evaluar los posibles riesgos de fenómenos extremos [5].

### 2.3.4. Meteogramas específicos

Las variables de salida del modelo se pueden extraer para localizaciones específicas. Existen numerosas representaciones que pueden ser útiles, tales como los gráficos de probabilidad de precipitación. Uno de los más usados suele ser el meteograma de conjunto (EPSgram) el cual usa un diagrama en el que se muestran los principales puntos de percentiles definidos en la distribución del pronóstico para una o más variables [8].

## 2.4. Post-Procesamiento de datos

Una vez que se obtienen los diferentes parámetros que resultan de utilidad para la realización de una predicción meteorológica, se realiza el procesamiento de datos para poder obtener un análisis de los resultados. Aquí se mencionarán las técnicas más relevantes en la gestión de los datos proporcionados por el EPS.

### - Post-procesamiento estadístico

En general, será necesario para corregir errores sistemáticos en los modelos. Dichos errores suelen afectar fundamentalmente a parámetros de superficie como temperatura o humedad. Dicho método de post-procesamiento destaca por eliminar los sesgos sistemáticos, ajustar la dispersión del conjunto y cuantificar la incertidumbre del pronóstico obtenido mediante el EPS.

Los errores de dispersión y sesgos a menudo aparecen en los pronósticos proporcionados por los EPS. Como característica distintiva de estos, aparece una tendencia de dispersión hacia alguno de los extremos (normalmente hacia la izquierda, 'under-dispersive') y necesitan de un procesamiento estadístico posterior para definir una obtención de resultados equiparables a la realidad (ya que inicialmente se caracterizan como 'uncalibrated'). Estas terminologías hacen referencia al hecho de que una vez se obtienen los resultados de los valores de dispersión de las predicciones proporcionadas, se observa cómo en la definición de las magnitudes de las variables estudiadas aparece una tendencia de definición de valores desviada hacia la izquierda.

Esto se traduce en la obtención de unas funciones de densidad de probabilidad que experimentan dicha desviación, de modo que los valores de dispersión que se obtienen se acumulan en gran medida en valores más bajos que la media de la dispersión, definiéndose en estos las mayores probabilidades de aparición.

Aunque este hecho no resulte crucial, ni en un primer momento pueda considerarse algo perjudicial, dicha característica desencadena en la definición de largas colas de dispersión. Consecuentemente, para determinados horizontes temporales esto implica la definición de valores de dispersión muy elevados. Por lo tanto, las colas de dispersión son una característica a destacar en estos pronósticos.

Estos fenómenos se han observado en varios sistemas de predicción con conjuntos actualmente operativos. Asimismo, una vez comprobada la aparición de dichas deficiencias, se concluye que un post-procesamiento de los resultados hará posible la obtención de una mejor calibración de la probabilidad, así como una mejor precisión en los pronósticos que les permita presentar una mayor semejanza con la realidad [10]. Posteriormente, en la sección 5 se verá si para el viento y la temperatura en altitud es necesario dicho post-procesamiento.

- **Reducción de escala**

Se puede hacer uso de varios métodos para agregar algunos detalles locales a las predicciones generadas con modelos de baja resolución, de forma que dichas técnicas pueden ser aplicadas a los pronósticos de EPS. Se puede llevar a cabo una reducción de escala dinámica, agregando detalles meteorológicos forzados por características topográficas de la zona. Por otro lado, aparece la reducción de escala topográfica usando modelos físicos simples, a través de la cual se podrán ajustar con mayor exactitud variables de superficie que pueden aparecer con un mayor valor de incertidumbre en el modelo.

- **Técnicas de agrupamiento**

Estas serán de gran utilidad para sintetizar la gran cantidad de información que manejan los conjuntos. Existen diferentes tipos, tales como la agrupación de miembros con una evolución similar sobre una región geográfica o la agrupación de miembros en función de la proximidad de su media a la media obtenida del conjunto.

- **Seguimiento de funciones**

En algunos casos será de gran utilidad llevar a cabo un análisis del movimiento de alguna característica meteorológica determinada, aunque la predicción de esta no sea muy fiable. Por ejemplo, en el caso de los ciclones tropicales, no se puede esperar que un EPS prediga con exactitud la intensidad de los vientos que lo definen, pero el movimiento de dicho fenómeno sí estará bien determinado [8].

### 3. ANÁLISIS DE UN DÍA DETERMINADO

---

En este apartado se pretenden obtener los valores característicos de dispersión que experimentan las variables analizadas: viento meridional, viento zonal y temperatura del aire. Por lo tanto, para este análisis se dividirá la información en dos bloques principales. En primer lugar, en esta sección se proporcionará el estudio de un día concreto del año, en este caso, el uno de julio del año analizado.

Posteriormente, en la sección 4 del documento, se realizará un estudio centrado en el análisis de una muestra de días a lo largo del año 2017, cogiendo para ello los días uno y quince de cada mes. Esto permitirá conocer los valores de dispersión característicos de las variables a lo largo del periodo estudiado, así como la observación de si existe algún tipo de tendencia en ellos. Para ello, se enlazará la información proporcionada en el día estudiado a continuación con el cómputo general del año (sección 4), para poder facilitar la comprensión de los resultados expuestos. Se pondrá de manifiesto la interconexión que existe entre cada día estudiado individualmente frente al análisis general del periodo anual.

En este análisis, se ha considerado el EPS proporcionado por ECMWF, el cual será de tipo global, en base a la zona de estudio que motiva el desarrollo de este proyecto. Este tipo de EPS es el adecuado en este análisis puesto que tal y como se explicó en la sección 2, el EPS global se utiliza para ser aplicado a pronósticos de rango medio, con una anticipación de unos días, tal y como ocurre en las predicciones utilizadas, siendo de interés los horizontes temporales de 0h, 24h, 48h y 72 horas. Además, el EPS queda compuesto por cincuenta miembros, los cuales proporcionan cincuenta valores para cada punto analizado, en función de cada variable y horizonte temporal determinados.

Antes de proceder a dicho análisis, resulta necesaria una mención acerca de cuál ha sido el área de estudio, así como la motivación que ha conducido a la realización de dicha elección. Dicho área se extiende a través de una amplia zona del Atlántico; esta queda definida en una latitud que ocupa desde los 70° Norte hasta los 20° Sur. Haciendo referencia a la longitud, se define desde los 130° Oeste hasta los 30° Este. La zona de estudio se define a modo de malla, de forma que existe un punto de estudio a lo largo de la latitud en cada incremento de 0.25°, y en el caso de la longitud ocurre algo similar, quedando definido un punto de estudio en cada incremento de 0.25°.

Por lo tanto, el análisis se reduce a 128841 puntos, resultado de la definición de 201 puntos en la latitud y de 641 puntos a lo largo de la longitud de la zona a estudiar. Asimismo, cada parámetro estadístico o representación que se obtenga será el resultado del análisis del conjunto de puntos, para una variable y un horizonte temporal dado.

El motivo de dicha elección está impulsado por dos grandes intereses, que han sido considerados cruciales a la hora de seleccionar la zona sobre la que se realizaría el estudio exhaustivo. Dichas motivaciones se exponen a continuación.

Por un lado, la gran cantidad de tráfico aéreo que experimenta la zona seleccionada, la cual cubre Estados Unidos y Europa, dos de las áreas mundiales con mayor tráfico aéreo, junto con el sureste asiático. Esto impulsa el interés por conocer los valores de dispersión que experimentan las predicciones, ya que existe un elevado número de aeronaves que cruzan dicho espacio aéreo y estas deben hacer uso de las herramientas de predicción meteorológica para la planificación de sus operaciones.

Por otro lado, existe una motivación derivada de la incertidumbre por conocer los valores característicos de dispersión de las predicciones en la zona donde se encuentra presente el fenómeno 'Jet Stream' de tan elevada importancia para el sector aéreo. Debido a su presencia, y a las elevadas velocidades de los vientos que trae consigo este fenómeno, resulta de gran interés el análisis de la zona seleccionada.



Dadas las dos motivaciones que han derivado en el presente estudio, se puede hacer referencia a ellas de nuevo para justificar las variables que han sido seleccionadas como muestra significativa del estudio. Dichas variables en este caso resultan ser el viento meridional (WV) y el viento zonal (WH), así como la temperatura (TEMP). Todas las variables se definen a una altitud de 200HPa (aproximadamente 11800m, 38600ft). Se ha considerado oportuno la elección de dichos parámetros ya que son fundamentales para la operación de las aeronaves, así como para la planificación.

Por lo tanto, haciendo uso de las hipermatrices proporcionadas por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF), se extraerán los datos necesarios cada una de las variables teniendo en cuenta cada horizonte temporal. Dicho de otro modo, a partir de los datos proporcionados por el ECMWF, se procede a la extracción del valor de cada una de las variables definidas en cada punto de la zona en la que se centra nuestro estudio. Todos estos valores se proporcionarán para cada horizonte temporal, desde 0 horas hasta 72 horas en intervalos de 24 horas.

Debido a que la motivación del proyecto es conocer qué ocurre en la planificación con incertidumbre, los horizontes temporales seleccionados son los adecuados en este caso, puesto que definen los tiempos característicos en los que se realiza la planificación de los vuelos. Cabe destacar que las predicciones realizadas apuntan al mismo instante, de forma que se generan en momentos diferentes. Es decir, a 72 horas vista del momento en el que se pretende obtener el pronóstico de las condiciones meteorológicas, se realiza una predicción y, 24 horas más tarde, se realiza de nuevo la predicción (a 48 horas vista del momento del que obtenemos el pronóstico) y así sucesivamente.

Consecuentemente, para cada variable sometida a estudio se proporcionan cuatro figuras, que corresponderán con la definición del valor de una variable determinada en cada horizonte temporal, sobre la zona estudiada, tal y como se pondrá de manifiesto posteriormente. Dichas figuras se tendrán que interpretar de izquierda a derecha y de arriba abajo, correspondiendo así con los horizontes temporales estudiados (0h, 24h, 48h, 72h, respectivamente). Este modo de representación nos permitirá hacer referencia a las notables variaciones que se observarán en cada caso, a medida que evolucionen las magnitudes con cada horizonte temporal concreto.

Como resultado, queda definido así, en líneas generales, el estudio que se desarrolla en esta sección. A continuación, se llevará a cabo la presentación de los resultados obtenidos, a través del establecimiento de los valores de las variables analizadas, así como las dispersiones que experimentan. De esta forma, se aportarán los comentarios que se consideren necesarios para la correcta comprensión e interpretación del estudio.

### **3.1. Valores medios y dispersiones para diferentes horizontes temporales**

En primer lugar, se realiza la presentación de los mapas de valores medios y los valores de la dispersión que experimenta cada punto del área sometida a estudio. El motivo de analizar conjuntamente ambos grupos, será la observación de los valores típicos de las variables. En la sección 3.2. del documento se podrá ver si dichos valores están correlacionados o no.

Para llevar a cabo dicho análisis, se diferenciarán tres casos. Cada uno de ellos corresponderá a una variable determinada del estudio. Dentro de los resultados proporcionados, estos se dividirán en dos grupos. Por un lado, se ha obtenido el valor medio de la variable sometida a estudio en cada punto de la zona para cada horizonte temporal proporcionado. Para obtener dicho valor, se ha realizado una media aritmética, teniendo en cuenta que para cada punto y cada horizonte temporal se tienen cincuenta valores diferentes que toma una misma variable, los cuales corresponden con cada uno de los cincuenta miembros del EPS, comentados anteriormente.

Además de la media que define cada punto estudiado, en cada representación se ha considerado destacable los puntos en los que se alcanzan los valores máximos y mínimos de la variable; dichos puntos se representarán con una 'x', en rojo en el caso del máximo y en azul en caso del mínimo. De esta forma, se podrá analizar la evolución de dichos valores extremos, así como los valores medios para cada horizonte temporal.

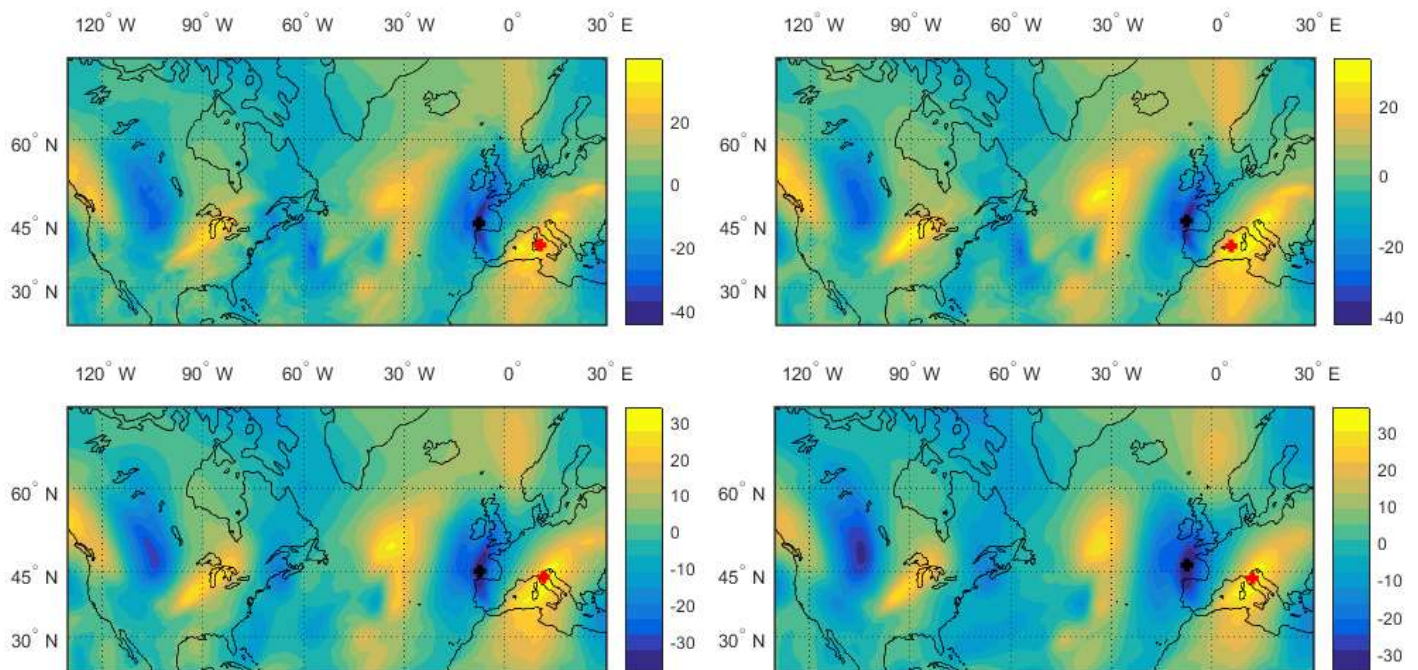
Por otro lado, se han obtenido los valores de dispersión más adversos, característicos de las variables sometidas a estudio en cada punto de la zona para un horizonte temporal dado. Para obtener dicho valor, se ha definido la dispersión como la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo de la variable sometida a estudio en un determinado punto. Para ello, de entre las cincuenta muestras de valores que se tienen para cada punto determinado, se extrae el valor máximo y el mínimo de la variable a estudiar, y a partir de la diferencia entre dichos valores se obtiene la dispersión.

De esta forma, dicha definición de dispersión se aplica a cada una de las localizaciones definidas dentro de la zonta estudiada, para cada horizonte temporal dado. De igual modo que se obtienen en el mapa de valores medios, de nuevo destacarán los puntos que experimenten los valores de dispersión máximos y mínimos, para cada horizonte temporal definido.

Una vez explicada la estructura de la sección, así como la forma de obtención de los resultados, se da paso a la presentación de los mismos. Para ello, cada uno de los tres apartados siguientes (3.1.1, 3.1.2, 3.1.3), se centrará en una variable en particular (viento meridional, viento zonal y temperatura, respectivamente).

### 3.1.1. Viento meridional

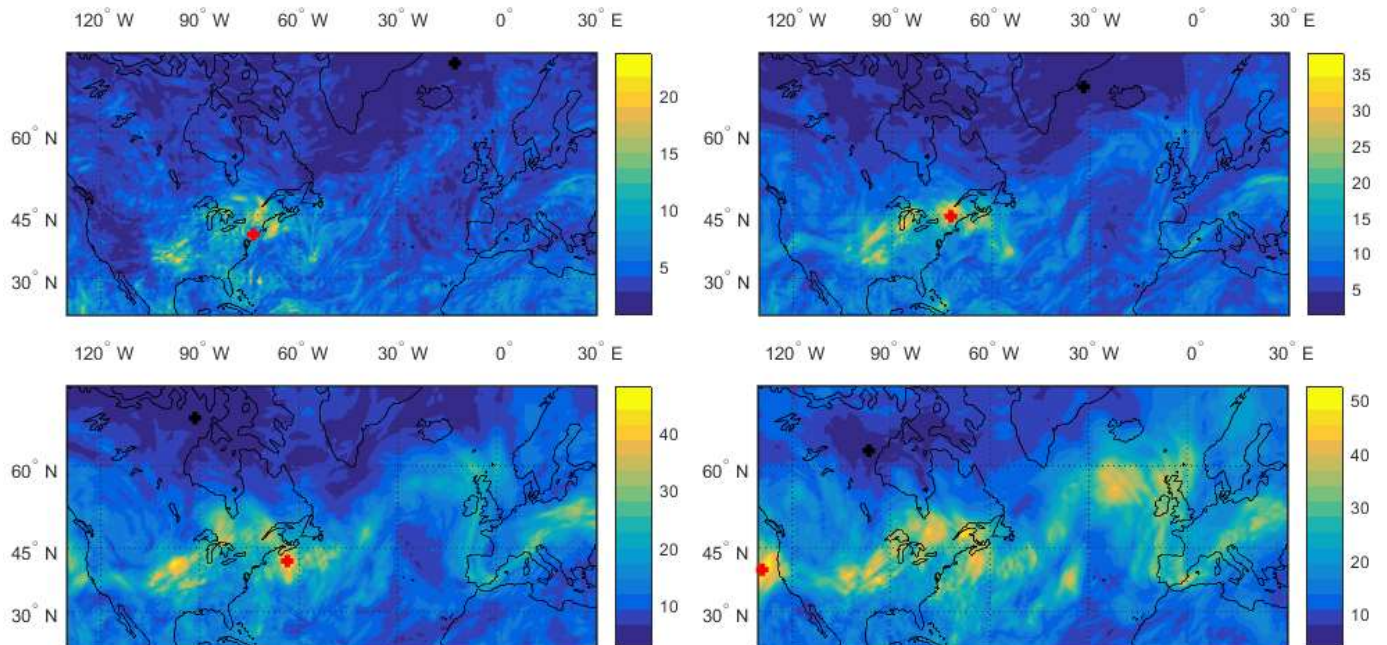
En la figura 1 se representan los valores medios del viento meridional para cuatro horizontes temporales, previamente definidos. Se observa cómo máximos y mínimos (representados a través una 'x', en rojo y azul, respectivamente) siguen un patrón determinado, ya que, a lo largo de la evolución de los horizontes temporales definidos, ambos se definen en la zona este del mapa, sin variaciones notables en su localización.



**Figura 1.** Evolución temporal de los valores medios del viento meridional. De izquierda a derecha y de arriba abajo aparecen los resultados para los horizontes temporales de 0h, 24h, 48h y 72h, respectivamente.

Resulta destacable que el viento meridional se encuentra en un intervalo de valores de  $[-40, 40]$  m/s. Los valores positivos indican que el viento procede del Sur, mientras que los valores negativos dejan constancia de que el viento procede del Norte.

El hecho de que los máximos y mínimos se definan en una localización en torno al área de latitud 45°N a lo largo de la longitud de la zona estudiada puede verse relacionada con la presencia del Jet Stream, fenómeno en el que aparecen vientos de elevada magnitud predominantemente de oeste a este, de modo que en el siguiente apartado (3.1.2.) este fenómeno cobrará mayor relevancia. En este caso, la presencia de vientos de elevada magnitud también puede verse relacionada con dicho fenómeno debido a que sus corrientes de vientos caracolean, de forma que, al margen de su predominancia desde el punto de vista del viento zonal, en algunas zonas el viento meridional también obtiene relevancia.



**Figura 2.** Evolución temporal de la dispersión del viento meridional. De izquierda a derecha y de arriba abajo aparecen los resultados para los horizontes temporales de 0h, 24h, 48h y 72h, respectivamente.

En la figura 2, se representan los valores de la dispersión del viento meridional para cuatro horizontes temporales, previamente definidos. Máximos y mínimos se encuentran representados a través una 'x', en rojo y azul, respectivamente. En esta figura se obtiene que el valor de la dispersión es mayor a medida que el horizonte temporal de la predicción se aleja del momento sobre el cual se obtiene el pronóstico. Tal y como se observa en el grupo de datos expuesto, la dispersión en los horizontes temporales iniciales experimenta valores inferiores a diez metros por segundo (m/s) en la mayoría de las áreas de la zona de estudio. A medida que el horizonte temporal avanza, se aprecia cómo el valor de la dispersión aumenta, hasta experimentar valores en torno a 50 m/s en algunas zonas, haciendo referencia al mayor horizonte temporal estudiado, 72 horas.

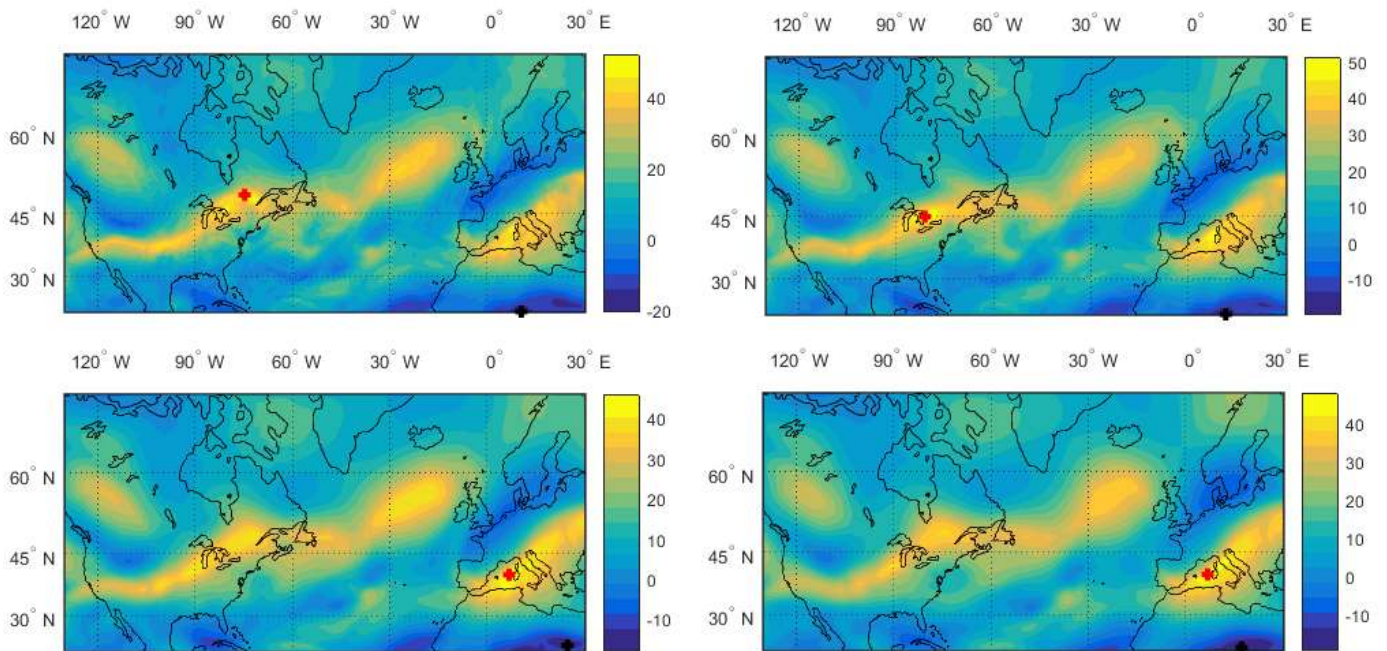
En los resultados destaca la diferenciación de dos zonas. Por un lado, la zona con latitud superior a los 60°N, a lo largo de gran parte de la longitud del área estudiada, aparece una menor dispersión independientemente del horizonte temporal, quedando definido el mínimo absoluto en dicha zona. Por otro lado, el área de máxima dispersión en un primer momento, queda definida en el intervalo de [60°W, 100°W] entorno a la latitud de 45°N. Dicha zona experimenta un incremento de la dispersión frente a la evolución de los horizontes temporales definidos, llegando a evolucionar hacia el Este. De esta forma, para el horizonte temporal más alejado (72 horas), la zona de máxima dispersión queda definida a lo largo de toda la longitud estudiada, además de en un amplio rango de valores de latitud, tal y como se puede apreciar en la figura 2 adjunta.

Comparando las figuras 1 y 2, destaca cómo el mínimo de dispersión coincide para todos los horizontes temporales con las áreas en las que no se definen valores de vientos extremos; aparece en zonas donde la magnitud del viento es pequeña, con independencia de su sentido.

Por lo tanto, zonas de menor dispersión coinciden con zonas de vientos medios pequeños. Asimismo, las zonas de mayor dispersión y sus máximos coinciden con las zonas donde se definen los vientos extremos, es decir, máximos en módulo, con independencia de su sentido.

### 3.1.2. Viento zonal

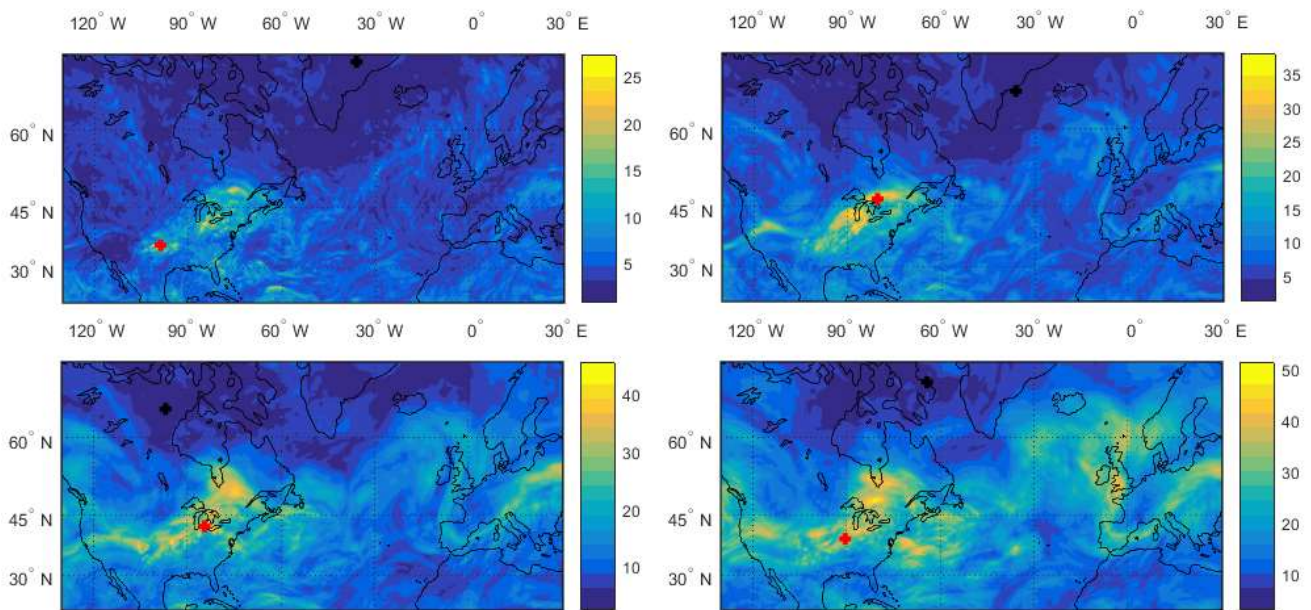
En la figura 3, se representan los valores medios del viento meridional para cuatro horizontes temporales, previamente definidos. De nuevo, los máximos y mínimos están representados a través una 'x', en rojo y azul, respectivamente. En este caso, los resultados tenían que justificar la presencia del fenómeno 'Jet Stream', tal y como se puso de manifiesto en la sección anterior (3.1.1).



**Figura 3.** Evolución temporal de los valores medios del viento zonal. De izquierda a derecha y de arriba abajo aparecen los resultados para los horizontes temporales de 0h, 24h, 48h y 72h, respectivamente.

Debido a que se está simulando el viento zonal, tienen que definirse valores elevados en un área bien diferenciada de la zona sometida a estudio. En efecto, tal y como se puede observar en la presentación de este grupo de datos, aparecen dos zonas bien diferenciadas a lo largo de todos los horizontes temporales estudiados. De este modo, la franja con latitud de 40°N a 60°N abarca los vientos más fuertes, experimentando en algunas partes magnitudes superiores a los 45 m/s. En este caso, los máximos no son independientes de su sentido, ya que resulta destacable cómo las zonas de los vientos procedentes del Oeste alcanzan magnitudes mucho más elevadas que las definidas por este mismo viento en sentido contrario (procedente del Este). Esto refleja la presencia del Jet Stream, con sus vientos predominantes desde el Oeste al Este.

Asimismo, el área que resta hasta completar la zona estudiada define vientos mucho más suaves, con magnitudes no superiores a los 20 m/s, independientemente de su sentido. En el caso del estudio de esta variable, la localización de máximos y mínimos no resulta de especial interés, ya que no aporta resultados relevantes más allá de la confirmación de la presencia del fenómeno 'Jet Stream' en la zona indicada.



**Figura 4.** Evolución temporal de la dispersión del viento zonal. De izquierda a derecha y de arriba abajo aparecen los resultados para los horizontes temporales de 0h, 24h, 48h y 72h, respectivamente.

En la figura 4, se representan los valores de la dispersión del viento zonal para cuatro horizontes temporales, previamente definidos. Máximos y mínimos se encuentran representados a través una 'x', en rojo y azul, respectivamente. De nuevo, tal y como se comentó en el estudio del viento meridional, se aprecia cómo la dispersión aumenta a medida que también aumenta el horizonte temporal, de forma que las dispersiones que en un principio presentan valores reducidos, van aumentando progresivamente junto con el horizonte temporal representado.

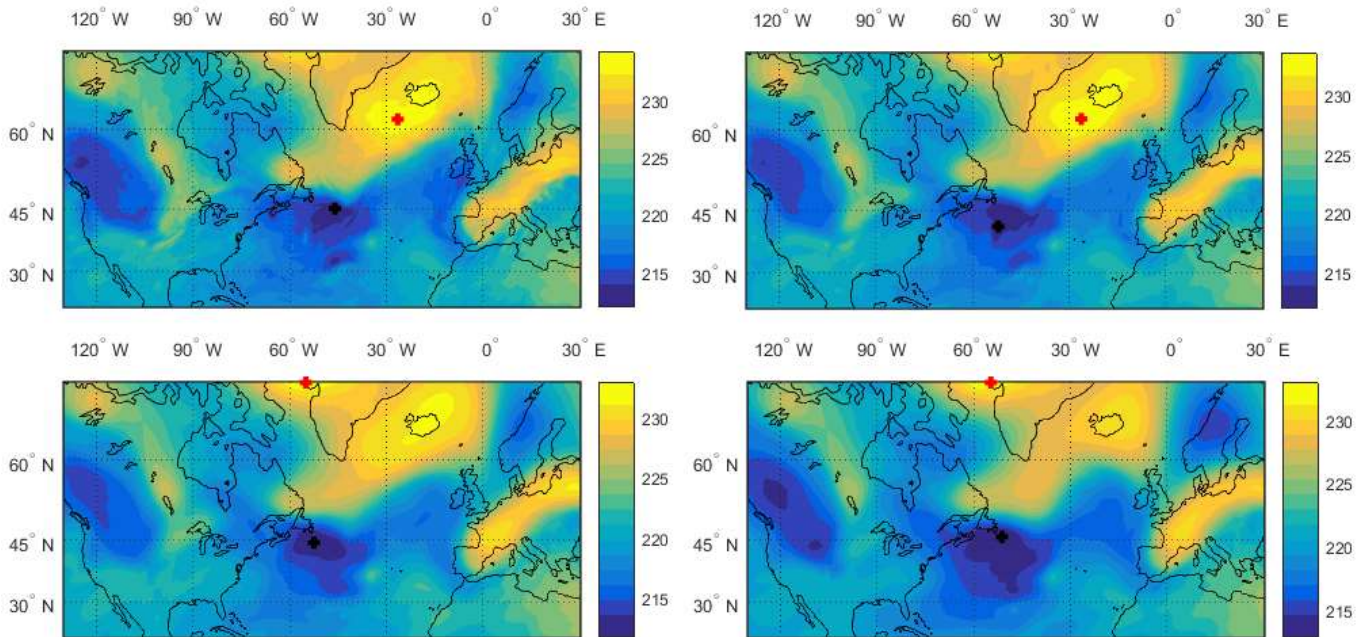
Similarmente a lo acontecido en el apartado anterior, aparecen dos franjas muy diferenciadas. El área cuya latitud es superior a los 60°N experimenta mínimas dispersiones, de forma que solo para los últimos horizontes temporales (desarrollo desde el horizonte temporal de 48h hasta el de 72h) comienzan a obtenerse valores de dispersión dominantes superiores a 10 m/s. En contrapartida, el resto de la zona estudiada presenta un aumento progresivo de la dispersión llegando a alcanzar valores de hasta 50 m/s. La mayor dispersión se define en la zona con una latitud en torno a los 45°N, aumentando su extensión a medida que el horizonte temporal se aleja del instante inicial.

Por lo tanto, la zona que presenta un mayor valor de dispersión estará concentrada en torno a una latitud de 45°N y una longitud entre los 60°W y los 100°W. Asimismo, queda resuelta de esta forma la localización del mínimo, el cual quedará establecido en el área Norte de la zona en estudio; el máximo presenta una definición constante, en la que permanece en torno a la localización de 45°N y 90°W para todos los horizontes temporales analizados sobre la figura 4.

Con los resultados obtenidos para la variable de viento zonal, de nuevo, se aprecia que la dispersión es independiente del sentido que adquieren los vientos. Indiscriminadamente, si proceden del Este o del Oeste, la máxima dispersión se producirá en aquellas zonas en las que aparecen las magnitudes más elevadas. Por lo tanto, se puede apreciar cómo el valor máximo de dispersión coincide con el área de definición de los valores más elevados del viento, en este caso, procedentes del Oeste.

Por otro lado, los resultados en el análisis de la relación entre el valor medio absoluto del viento y la dispersión mínima coinciden con los comentados para la anterior variable. Es decir, los mínimos de dispersión se definen en áreas de vientos medios pequeños.

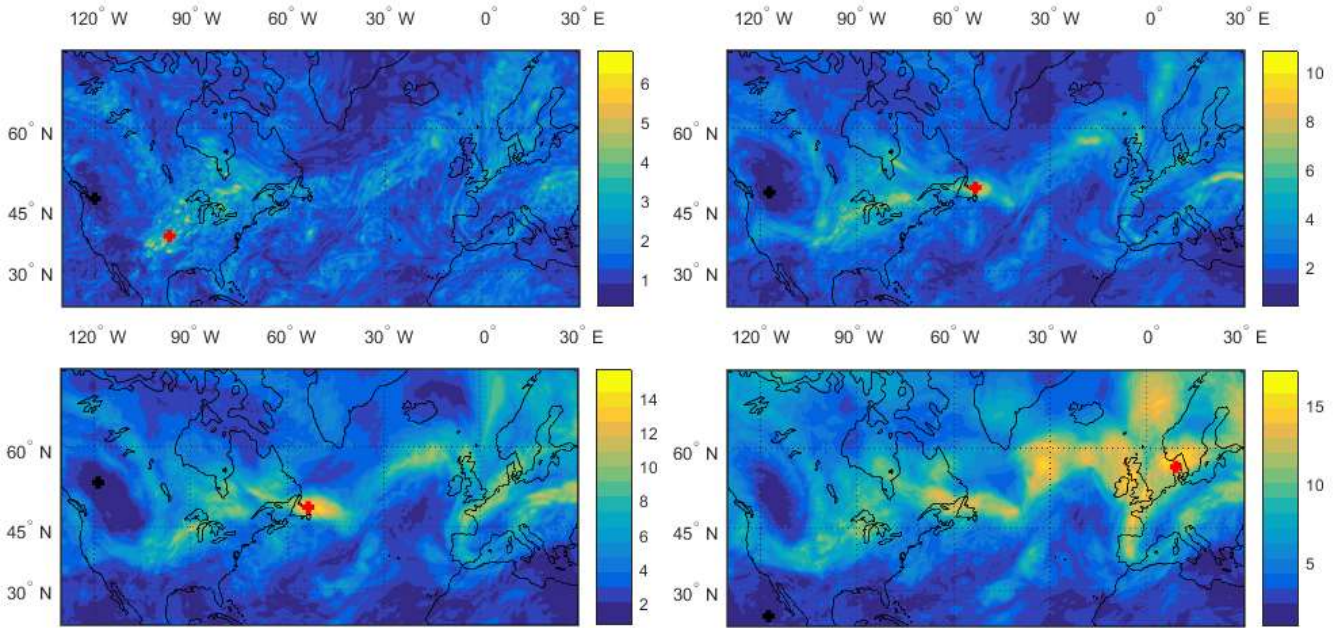
### 3.1.3. Temperatura



**Figura 5.** Evolución temporal de los valores medios de la temperatura. De izquierda a derecha y de arriba abajo aparecen los resultados para los horizontes temporales de 0h, 24h, 48h y 72h, respectivamente.

En la figura 5, se representan los valores medios de la temperatura para los cuatro horizontes temporales previamente definidos (0h, 24h, 48h y 72h). De nuevo máximos y mínimos son representados mediante una 'x', en rojo y azul, respectivamente. A través de las representaciones obtenidas, se aprecia cómo el valor medio de la temperatura, así como máximos y mínimos, permanecen sin cambios notables a lo largo de todos los horizontes temporales definidos.

Se pueden diferenciar dos zonas. Por un lado, aparece un área de mayor temperatura que se encuentra definida en el extremo norte de nuestra zona de estudio, a partir de los  $55^{\circ}\text{N}$ , donde el máximo va oscilando entre los  $60^{\circ}\text{W}$  y los  $35^{\circ}\text{E}$ , dependiendo del horizonte temporal. Frente a dicho área, aparece el resto de la zona con la definición de temperaturas uniformes, que se definen a lo largo del mapa a excepción de una zona de mínimas temperaturas que queda definida en dos zonas muy localizadas. Una correspondiente a la latitud de  $45^{\circ}\text{N}$  en torno a la longitud  $45^{\circ}\text{W}$  (donde quedan definidos los mínimos de esta variable) y una segunda zona situada en el extremo Oeste a una latitud entorno los  $50^{\circ}\text{N}$ . Como aspecto a destacar, la temperatura no presenta grandes variaciones entre sus extremos definidos, ya que el máximo absoluto queda definido en aproximadamente  $232\text{K}$ , frente al mínimo absoluto que queda relevado a unos  $212\text{K}$ , siendo esta una diferencia de  $20\text{K}$ .



**Figura 6.** Evolución temporal de la dispersión de la temperatura. De izquierda a derecha y de arriba abajo aparecen los resultados para los horizontes temporales de 0h, 24h, 48h y 72h, respectivamente.

En la figura 6, se representan los valores de la dispersión de la temperatura para cuatro horizontes temporales, previamente definidos. Máximos y mínimos se encuentran representados a través una 'x', en rojo y azul, respectivamente. En esta figura se obtiene que el valor de la dispersión es mayor a medida que el horizonte temporal de la predicción se aleja del momento sobre el cual se obtiene el pronóstico (aumento del horizonte temporal). Destaca en la figura 6 la acentuación de una zona de mayores dispersiones a horizontes temporales alejados del instante inicial, la cual queda definida al noreste del área estudiada y donde se definen valores de dispersión que alcanzan el valor de 17 K en algunos puntos.

Para poder comparar el efecto de la dispersión en la velocidad de vuelo, tendremos que definir estos valores de temperatura (Kelvin) en unidades de velocidad (m/s). Para ello, se hace uso de la siguiente expresión, a través de la cual se relaciona la velocidad aerodinámica con el número de mach y la velocidad del sonido:

$$V = M \sqrt{\gamma * R_g * (T_0 + \Delta T)} \quad (1)$$

Haciendo uso de la ecuación (1), para un valor de Mach de 0.8, un coeficiente de dilatación adiabática ( $\gamma$ ) de 1.4, constante de gas ideal ( $R_g$ ) de 287 J/(kg\*K) y una temperatura inicial de 272 K, podemos relacionar el valor de la dispersión de la temperatura con el valor de la dispersión de las variables anteriores.

De esta forma, para un incremento de temperatura ( $\Delta T$ ) nulo, se define una dispersión en velocidad de 239 m/s. Del mismo modo, para un  $\Delta T$  de 17 K (valor máximo de la dispersión que se observa en la temperatura, figura 6), se obtiene una velocidad de 248 m/s. Por lo tanto, la dispersión en temperatura se traduce en una dispersión en velocidad de 9 m/s, valor que ahora sí nos permite comparar con las variables anteriores.

En este caso, en líneas generales se observa cómo el mapa de dispersión de esta variable define valores de dispersión muy reducidos en comparación con las simulaciones realizadas sobre el resto de variables, ya que en este caso el valor de la dispersión en ningún caso supera el valor de 9 m/s independientemente del horizonte temporal que se estudie frente a los valores de dispersión de hasta 50 m/s en el caso del viento. Por lo tanto, la dispersión en el viento proporcionada por el EPS es más importante que la dispersión en la temperatura.

### 3.2. Correlación entre valor medio y dispersión

En esta sección, se pretende evaluar si existe correlación entre el valor medio de cada variable y la dispersión en cada ubicación geográfica estudiada, además de cuantificar dicha correlación. Para ello, se ha hecho uso del coeficiente de correlación Pearson ( $p$ ), que permite el establecimiento de la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas.

Para el cálculo de dicho coeficiente, una vez se tienen los valores medios y los valores de dispersión de cada una de las variables para cada una de las localizaciones estudiadas, se aplica la expresión (2). Nótese que en (2),  $N$  hace referencia al número de muestras que se tienen (en nuestro caso 128841 puntos, es decir, la totalidad de las localizaciones estudiadas), de forma que el subíndice  $i$  se definirá desde 1 hasta dicho valor de  $N$ . Por otro lado, los valores medios y de dispersión de cada una de las variables se identifican mediante  $x_i$  e  $y_i$ , respectivamente. Asimismo,  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  hará referencia a la media de todos los valores medios de cada una de las localizaciones definidas y a la media de todos los valores de dispersión obtenidos, respectivamente. Dichos cálculos se particularizarán para cada variable estudiada (WV, WH y TEMP, respectivamente).

$$\begin{aligned} & \bullet \text{ Covarianza: } \sigma_{xy} = \frac{\sum_i^N x_i * y_i}{N} - \bar{x} * \bar{y} \\ & \bullet \text{ Desviación típica marginal de X: } \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_i^N x_i^2}{N} - \bar{x}^2} \\ & \bullet \text{ Desviación típica marginal de Y: } \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_i^N y_i^2}{N} - \bar{y}^2} \\ & \bullet \text{ Coeficiente Pearson: } p = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x * \sigma_y} \end{aligned} \quad (2)$$

Para su interpretación se debe tener en cuenta que un valor de coeficiente igual a la unidad ( $p = 1$ ) indica una correlación positiva perfecta, con una dependencia lineal total entre las dos variables. De igual forma ocurrirá para un valor negativo igual a la unidad (correlación negativa perfecta), solo que, en este caso, al aumentar una variable disminuirá la otra y viceversa. Por lo tanto, dentro de esos límites del coeficiente, existe un amplio rango de valores que indican el grado de relación entre ambas variables. En el caso de que el coeficiente adquiera un valor nulo, esto indicará que no existe ningún tipo de relación lineal entre ambas variables.

Como en el caso del viento existe una variación de signo ligada al sentido del mismo, lo cual resulta sin relevancia en este caso, se ha decidido realizar el análisis de correlación utilizando como valores medios del viento, los propios valores absolutos, con independencia del sentido. De este modo, en la tabla 1 se representa el valor del coeficiente de Pearson para el viento meridional, el viento zonal y la temperatura. Esto permitirá el análisis de la correlación para cada una de las variables y horizontes temporales definidos.

Para la obtención de esta tabla, se ha aplicado la expresión (2). En cada localización estudiada se ha obtenido un valor absoluto de la media y un valor de la dispersión de la variable. De esta forma, para el cálculo del coeficiente de Pearson se han tenido en cuenta todas las localizaciones (puntos estudiados) con sus respectivos valores medios absolutos y dispersiones. Este proceso se ha obtenido para cada horizonte temporal, dando lugar a los datos extraídos en este documento.



Horizonte Temporal	$P_{WV}$	$P_{WH}$	$P_T$
01/07 (0 h)	0.2174	0.3019	-0.1059
30/06 (24 h antes)	0.3484	0.4784	-0.0024
29/06 (48 h antes)	0.4576	0.5799	0.1122
28/06 (72h antes)	0.6126	0.5940	0.2431

**Tabla 1.** Valor del coeficiente de correlación Pearson para las variables de viento meridional ( $P_{WV}$ ), viento zonal ( $P_{WH}$ ) y temperatura ( $P_T$ ).

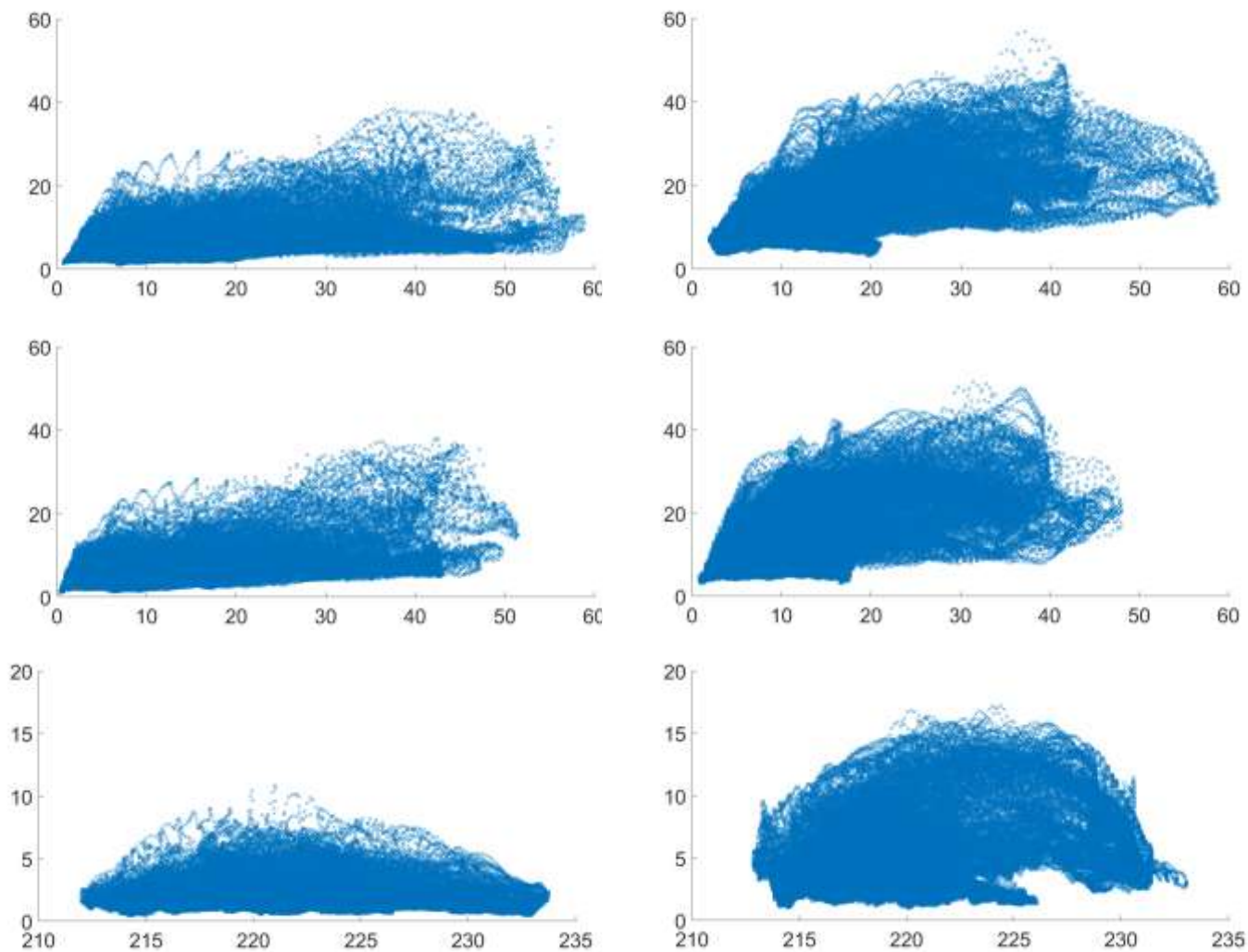
En la tabla 1, se presenta el valor del coeficiente Pearson para cada horizonte temporal y variable estudiada. En cuanto a la relación entre el valor medio y la dispersión para cada una de las variables, destaca el comportamiento irregular de la correlación asociada a la variable de temperatura ( $P_T$ ), ya que aparece inicialmente con una correlación inversa para luego evolucionar hacia una directa, aunque, en todo caso, pequeña.

En líneas generales, se aprecia cómo el valor de la correlación aumenta con el horizonte temporal, es decir, aparece una mayor correlación entre el valor medio absoluto y la dispersión de cada una de las variables a mayores horizontes temporales. Por otro lado, se observa cómo la correlación es notablemente menor en el caso de la variable de temperatura frente a las variables de viento. Asimismo, para los vientos meridional y zonal la correlación estudiada es apreciable, alcanzando valores entorno a 0.60 para el caso del horizonte temporal de 72 horas.

Se ha estimado oportuno la presentación de algunas de las figuras que se pueden obtener de este análisis, las cuales permiten mostrar los valores de correlación obtenidos de un modo más visual y representativo. Por otro lado, las figuras aparte de mostrar las correlaciones, también permiten dar una idea del crecimiento que sufre la dispersión con el horizonte temporal, lo cual se verá en la posterior sección 3.3.

En la figura 7, se han representado los valores del coeficiente de correlación Pearson de todos los puntos estudiados para cada una de las variables (viento meridional, viento zonal y temperatura, de arriba abajo, respectivamente), en función de dos horizontes temporales determinados (24h y 72h, de izquierda a derecha respectivamente). En los dos primeros casos, correspondientes con las variables de viento meridional y zonal, se aprecia una gran evolución en la correlación, de forma que para horizontes temporales próximos a los iniciales las formas que aparecen no presentan ningún parecido razonable (debido a la baja correlación obtenida), pero a través de la evolución con respecto el horizonte temporal, la disposición de las correlaciones se desarrolla a través de formas más características, equiparables con mayores correlaciones. En el caso de la temperatura, las figuras tienen una evolución irregular y cambiante, tal y como se podría esperar de los valores de correlación tan pequeños que se han obtenido.

Por otro lado, cabe destacar que, con independencia del caso analizado, debido a que los valores de correlación no son próximos en gran medida al valor unidad, aparecen en las figuras gran cantidad de puntos dispersos, que no siguen la tendencia general.



**Figura 7.** Coeficiente de correlación Pearson para las variables variables estudiadas (de arriba abajo, corresponden con WV, WH y Temp respectivamente). Se definen de izquierda a derecha los horizontes temporales de 24 y 72 horas.

En este aspecto, llama la atención cómo para las representaciones correspondientes con horizontes temporales más pequeños (parte izquierda de la figura 7, horizonte temporal de 24 horas) aparecen una serie de crestas de puntos, debido a una correlación pequeña. De esta forma, para un horizonte temporal más elevado (72 horas, parte derecha de la figura 7), las crestas desaparecen en gran medida, debido al aumento de la correlación.

### 3.3. Evolución temporal del valor mínimo, medio y máximo de la dispersión

En este aspecto del análisis, se ha perseguido la representación de la dispersión para cada una de las variables estudiadas frente a los respectivos horizontes temporales dados, es decir, de 0 hasta 72 horas, a intervalos de 24 horas. El objetivo de dicha presentación de datos radica en el análisis de la evolución de la dispersión, así como la posible aparición de tendencias comunes entre variables.

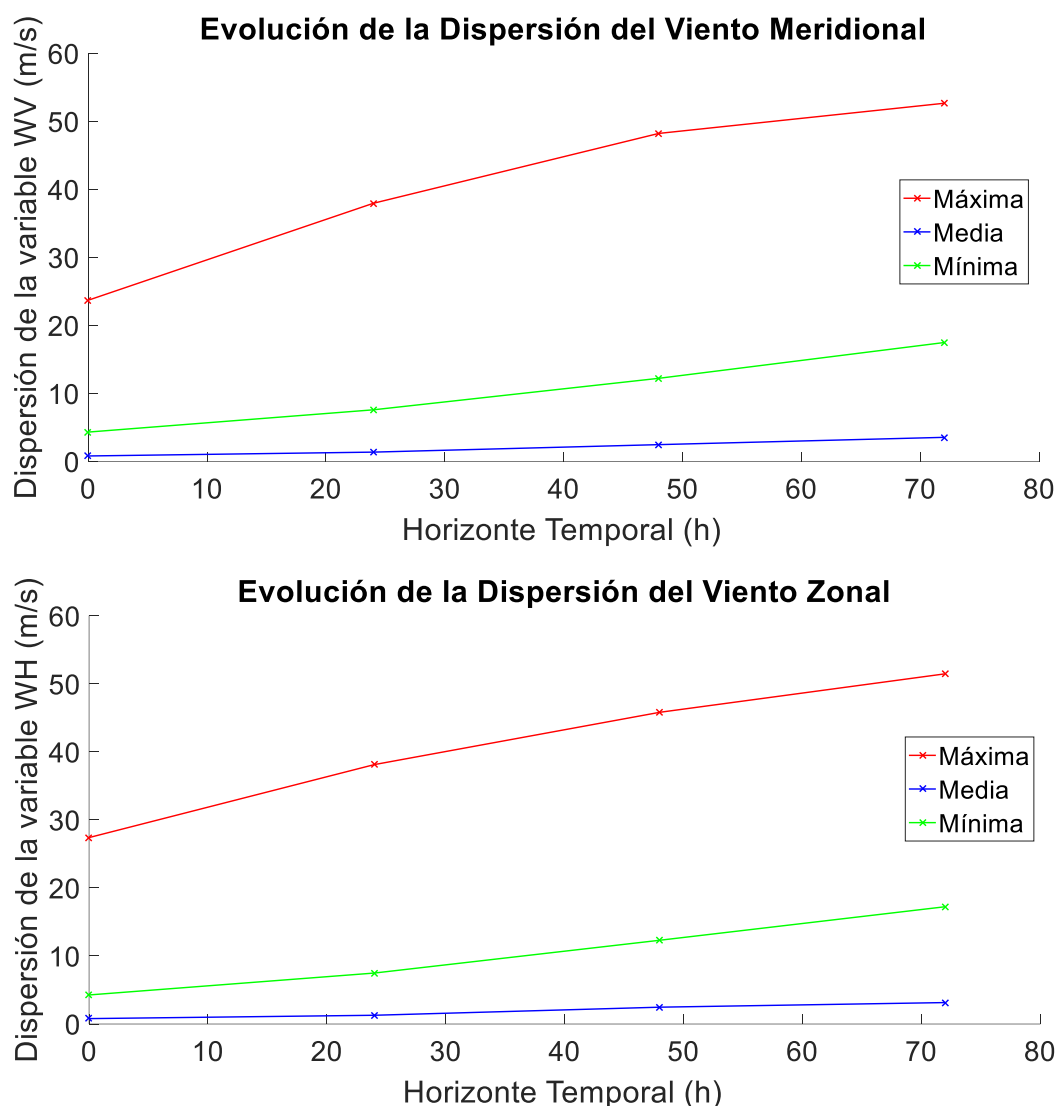
Para ello, se ha optado por el establecimiento de los valores de dispersión máxima, media y mínima para cada uno de los horizontes temporales estudiados. Para definir dichos valores de dispersión, se calculan los valores de dispersión como la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo que experimenta cada una de las variables, en cada uno de los puntos analizados.

De esta forma se obtienen 128841 valores de dispersión diferentes (tantos como puntos analizados) para cada horizonte temporal y cada variable determinada. Partiendo de dichos valores, se obtiene tanto el máximo como el mínimo de dispersión, del mismo modo que se realiza la media de las dispersiones obtenidas para cada uno de los horizontes y variables estudiadas.

De este modo, se podrán extraer resultados de los valores característicos de la dispersión en cada caso, lo cual puede ser de especial interés en algunos casos para destacar alguna característica en concreto. Por otro lado, los dos apartados siguientes (3.3.1 y 3.3.2) permitirán observar si existe algún tipo de tendencia en los valores de dispersión que se definen en cada horizonte temporal para cada una de las variables.

### 3.3.1. Viento meridional y viento zonal

Debido a la gran similitud entre los resultados de dispersión obtenidos para las dos variables relacionadas con el viento (WV y WH), se considera conveniente la realización de una única sección que englobe a ambas variables, ya que resulta apropiado el análisis de ambas variables de forma conjunta.



**Figura 8.** Dispersión máxima, media y mínima de las variables de viento respecto al tiempo. Los valores de dispersión correspondientes al viento meridional aparecen en la parte superior, y los de viento zonal, en la parte inferior de la figura.

En la figura 8 se han representado los valores característicos de dispersión para cada uno de los horizontes temporales estudiados (0h, 24, 48h y 72h, respectivamente) para el caso de las variables relacionadas con el viento. Como se puso de manifiesto en la introducción a esta sección, a destacar serán los máximos, mínimos y media de la dispersión, parámetros calculados del modo descrito anteriormente.

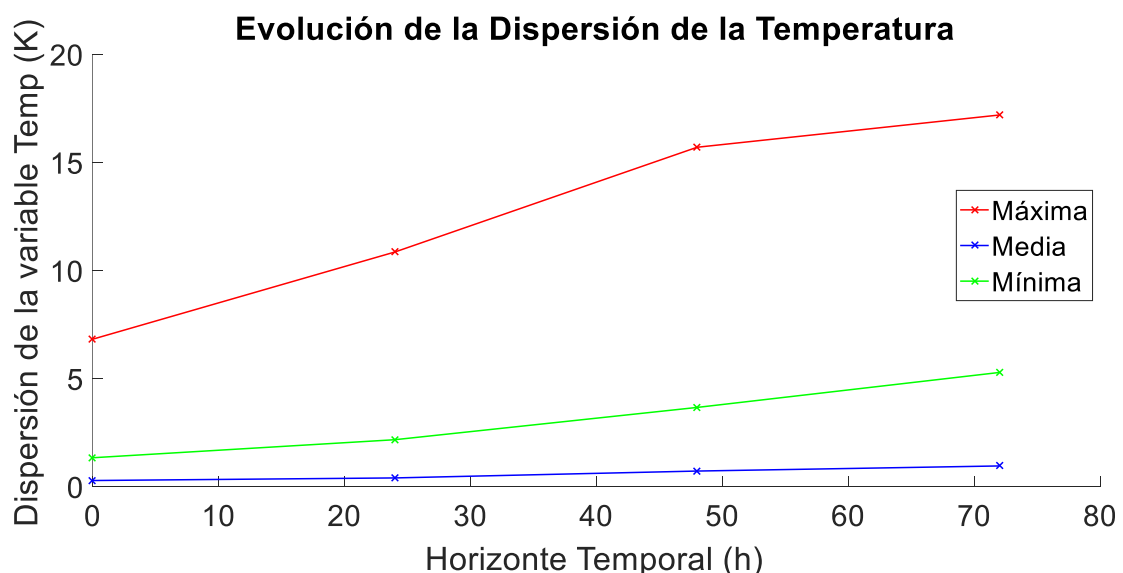
Existen varios aspectos a destacar en la presentación de los valores de dispersión de estas variables. En primer lugar, se observa un crecimiento monótono en todas las curvas obtenidas, las cuales han sido definidas en la figura 8, tanto las asociadas con la variable de viento meridional como para el caso de viento zonal. Por otro lado, se observa cómo los valores de dispersión media tienden a situarse mucho más próximos a los valores mínimos absolutos que se definen para cada horizonte temporal, alejándose notablemente de los máximos absolutos. Esto implica que los puntos con dispersión grande son menos frecuentes.

Por lo tanto, en la representación realizada se observa cómo la tendencia media de la dispersión es la definición de un aumento de esta respecto el horizonte temporal que se defina. Cuantitativamente, cabe destacar cómo los valores medios de dispersión para la variable de viento meridional se encuentra en el intervalo entre 4.32 m/s y 17.49 m/s, incluyendo la totalidad de los horizontes temporales estudiados. En el caso del viento zonal, los valores medios de dispersión se definen entre 4.27 m/s y 17.24 m/s. Resulta de interés observar cómo los rangos entre los que se definen los valores medios de dispersión de ambas variables del viento presentan una gran similitud.

En base a ambas variables y en función de los resultados, destaca la tasa de crecimiento que experimenta la dispersión. Centrándonos en los valores de dispersión media, se define un crecimiento de aproximadamente 4 m/s por día. Asimismo, se observa cómo la dispersión a 24 horas vista es aproximadamente el doble que la dispersión a 0h. Del mismo modo, la dispersión a 48 horas vista se define aproximadamente como el triple de la dispersión a 0 horas, y en el caso del horizonte temporal de 72 horas la dispersión tendrá un valor cuatro veces mayor que la dispersión a 0 horas.

### 3.3.2. Temperatura

De nuevo, la visualización general de esta representación nos permite extraer las mismas conclusiones anteriormente comentadas respecto a la localización de los valores medios de dispersión, más próximos a los valores extremos inferiores de la dispersión.



**Figura 9.** Dispersión máxima, media y mínima de la temperatura respecto del tiempo.

En la figura 9 se han representado los valores característicos de dispersión para cada uno de los horizontes temporales estudiados (0h, 24, 48h y 72h, respectivamente) para el caso de la variable relacionada con la temperatura. Tal y como se ha comentado anteriormente, para el caso de esta variable también se define un crecimiento monótono en las tres curvas de dispersión definidas.

Respecto a los máximos de dispersión definidos para esta variable, vemos cómo aparece una tendencia lineal de aumento de los máximos, del mismo modo que ocurre para el caso de los mínimos de dispersión. Fijándonos ya en términos de valores medios, para la temperatura los valores medios de dispersión quedan definidos entre 1.34 K y 5.29 K.

De nuevo se cumple la tasa de crecimiento anteriormente comentada, apareciendo el doble de dispersión para el horizonte temporal de 24 horas vista sobre la dispersión que se define en 0 horas (de igual forma ocurre para los horizontes temporales de 48 y 72 horas, siendo la dispersión el triple y el cuádruple de la obtenida para 0 horas, respectivamente). De esta forma, en términos de crecimiento de la dispersión, la variable de temperatura presenta las mismas características que las definidas para el caso de las variables de viento, debido a su crecimiento monótono, además de su tasa de crecimiento.

### **3.4. Histogramas para los diferentes horizontes temporales**

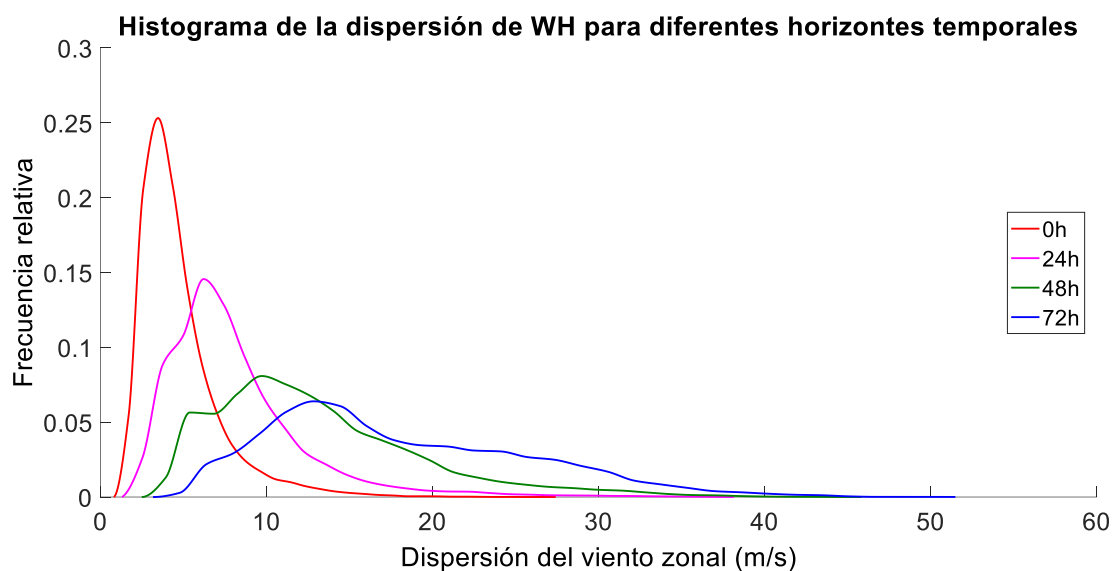
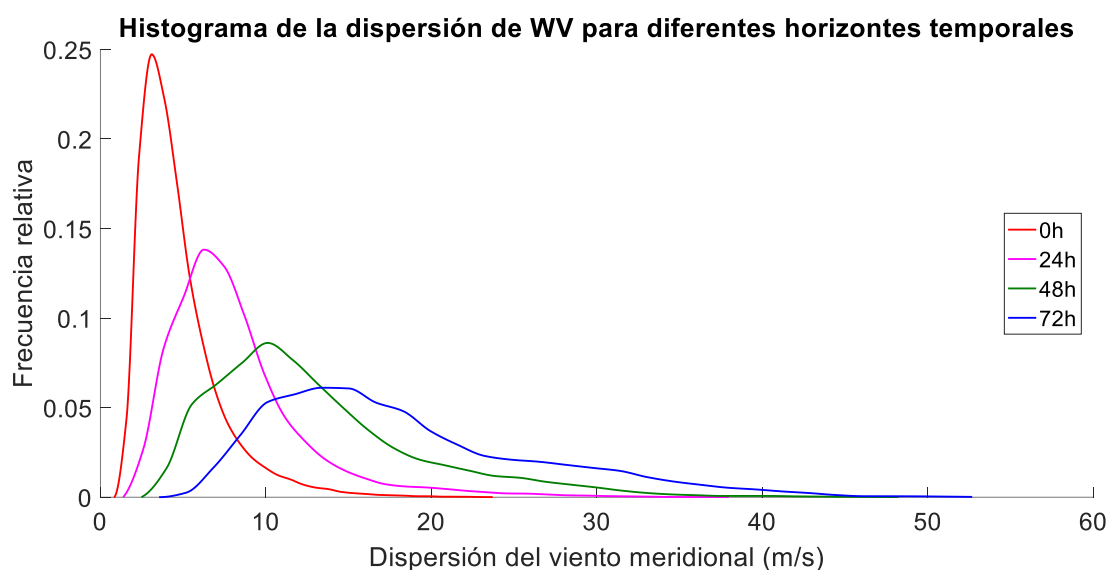
A partir de los datos extraídos de las matrices proporcionadas por el ECMWF, se representan los histogramas de la dispersión de cada una de las variables estudiadas, en función de unos horizontes temporales determinados (0h, 24h, 48h y 72h). Estos histogramas de la dispersión serán de gran utilidad para saber con cuánta frecuencia se podrá encontrar cada uno de los valores de dispersión definidos.

En nuestro caso, se ha llevado a cabo la representación de los datos de tal forma que queden reflejadas las frecuencias de que se definan cada uno de los valores de dispersión de las variables estudiadas, en función de cada horizonte temporal. Son los resultados que se obtendrían si se realizase un corte vertical sobre las figuras 7 y 8 anteriormente definidas, de modo que, para un determinado horizonte temporal, se obtiene la frecuencia de que aparezcan cada uno de los valores de dispersión.

Por lo tanto, se tendrá para cada una de las variables la definición de cuatro histogramas, cada uno de ellos relacionados con un determinado horizonte temporal. Dicha evolución de los histogramas será analizada a continuación. Tras un análisis cualitativo de las figuras que representarán los histogramas de dispersión, se proporcionarán valores que caracterizan a dichos histogramas, de forma que permitan realizar un análisis más cuantitativo de los valores característicos de dispersión y su frecuencia de aparición.

#### **3.4.1. Viento meridional y viento zonal**

Al igual que ocurrió en el apartado 3.3., la similitud entre las variables relacionadas con el viento (WV y WH) permite un análisis conjunto de los valores de dispersión que definen las mismas, lo que permite extraer conclusiones comunes para ambas variables estudiadas.



**Figura 10.** Histogramas de la dispersión, obtenidos para las variables de viento meridional (parte superior) y viento zonal (parte inferior), en función de cada uno de los horizontes temporales estudiados (0h, 24h 48h y 72h, respectivamente).

En la figura 10 se presentan los histogramas de dispersión asociados a las variables WV y WH, respectivamente. En ambos casos, los valores de dispersión y la frecuencia de aparición de los mismos presentan grandes similitudes. En cuanto a la forma, se puede apreciar cómo la forma inicial del histograma para el horizonte temporal de 0 horas (las cuales para ambas variables son las que se definen más a la izquierda de la figura 10) se pierde conforme avanza el horizonte temporal estudiado, definiéndose una forma más achatada del histograma, perdiendo identidad el extremo superior de mayor frecuencia para un valor de dispersión concreto. En la evolución de los histogramas para los siguientes horizontes temporales, la degradación de la forma del histograma hace referencia a cómo se produce una pérdida de la forma del histograma de dispersión para el horizonte temporal de 0 horas, perdiéndose progresivamente la definición de un pico destacable con un valor de dispersión de mayor frecuencia de aparición frente al resto.

El desarrollo de los histogramas respecto al horizonte temporal provoca un aumento de la frecuencia de definición de mayores valores de dispersión. Esto ocurre para ambas variables estudiadas en este apartado. A continuación, se presentan dos tablas que permitirán un análisis cuantitativo sobre las variables sometidas a estudio, destacando así los valores que pretenden ser de mayor interés en el análisis.

<b>Horizonte Temporal</b>	<b>Máxima Frecuencia</b>	<b>Moda (m/s)</b>	<b>Valor Mínimo (m/s)</b>	<b>Valor Máximo (m/s)</b>
<b>0 horas</b>	24.72 %	3.11	0.81	23.71
<b>24 horas</b>	13.82 %	6.26	1.38	37.97
<b>48 horas</b>	8.61 %	10.09	2.48	48.23
<b>72 horas</b>	6.11 %	13.51	3.55	52.67

**Tabla 2.** Parámetros significativos de los histogramas obtenidos a partir de los valores de viento meridional (variable WV).

<b>Horizonte Temporal</b>	<b>Máxima Frecuencia</b>	<b>Moda (m/s)</b>	<b>Valor Mínimo (m/s)</b>	<b>Valor Máximo (m/s)</b>
<b>0 horas</b>	25.31 %	3.46	0.79	27.41
<b>24 horas</b>	14.56 %	6.19	1.28	38.14
<b>48 horas</b>	8.08 %	9.71	2.47	45.82
<b>72 horas</b>	6.39 %	12.82	3.15	51.48

**Tabla 3.** Parámetros significativos de los histogramas obtenidos a partir de los valores de viento zonal (variable WH).

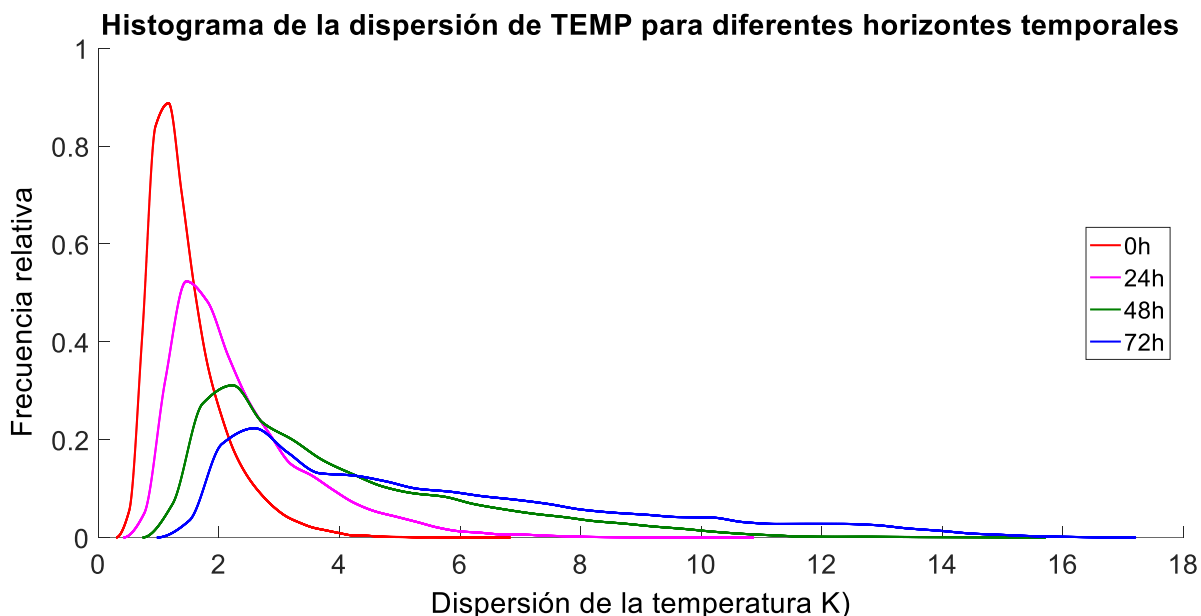
Tanto la tabla 2 para el caso de viento meridional, como la tabla 3 para el caso de viento zonal, reafirman los comentarios realizados a partir de la figura 10. De esta forma, se observa un aumento de los valores de dispersión conforme aumenta el horizonte temporal. Esto ocurre en el caso de la moda de la dispersión, y de igual forma para los valores mínimos y máximos. A partir de estas tablas, también se pone de nuevo de manifiesto que los valores de dispersión de las variables relacionadas con el viento son muy similares, lo cual permite un análisis conjunto del viento meridional y viento zonal en términos de dispersión.

Por otro lado, resulta notable destacar cómo la máxima frecuencia de que aparezca un valor determinado de dispersión de cada una de los histogramas obtenidos para cada variable va reduciéndose, debido a dicha degradación de la forma del histograma, lo cual provoca que a mayores horizontes temporales aparezca un mayor grupo de valores de dispersión que tengan frecuencias de aparición similares entre sí, para un horizonte temporal y una variable determinada.

En consecuencia, tal y como se comentó al inicio del apartado, las variables de viento (meridional y zonal) presentan gran similitud en los resultados obtenidos referentes a los valores de dispersión. Por otro lado, destacar el aumento del valor de dispersión a mayor horizonte temporal estudiado.

### 3.4.2. Temperatura

En este caso, se pretende realizar el análisis de los valores característicos de dispersión asociados a la variable de temperatura, en función de los diferentes horizontes temporales estudiados. De esta forma, en la figura 11 se presenta el histograma de los valores de dispersión asociados a dicha variable.



**Figura 11.** Histograma de la dispersión, obtenido para la variable de temperatura, en función de cada uno de los horizontes temporales estudiados (0h, 24h 48h y 72h, respectivamente).

En el estudio de esta variable sí se han podido observar cambios significativos frente a las demás. En primer lugar, en este caso aparece una menor tendencia al desplazamiento hacia la derecha de los histogramas. Es decir, la dispersión aumenta con el horizonte temporal, pero no de forma tan significativa como en el caso de las variables relacionadas con el viento (tal y como se aprecia en el apartado 3.4.1.). La forma de dicho histograma evoluciona del mismo modo que se comentó anteriormente, de modo que, para horizontes temporales mayores al correspondiente a 0 horas, se pierde dicha forma inicial, aumentando la frecuencia de aparición de mayores valores de dispersión.

Horizonte Temporal	Máxima Frecuencia	Moda (K)	Valor Mínimo (K)	Valor Máximo (K)
0 horas	88.76 %	1.16	0.29	6.83
24 horas	52.35 %	1.46	0.41	10.86
48 horas	31.11 %	2.23	0.73	15.71
72 horas	22.34 %	2.59	0.96	17.2

**Tabla 4.** Parámetros significativos de los histogramas obtenidos a partir de los valores de temperatura.

La tabla 4 define los valores de dispersión del histograma más relevantes para el caso de la variable de temperatura. De esta forma, se observa cómo la frecuencia de aparición de la moda de la dispersión es mayor que las frecuencias definidas para este mismo caso en las variables anteriores. Se reafirman de nuevo los comentarios obtenidos para las variables analizadas anteriormente, debido al aumento de los valores de dispersión con el horizonte temporal analizado.



## 4. ANÁLISIS DE VARIOS DÍAS A LO LARGO DEL AÑO

---

Una vez analizados los valores de dispersión que caracterizan cada una de las variables estudiadas para un día concreto del año (sección 3), en esta sección se pretenden analizar los valores de dispersión para la totalidad de días estudiados. Por lo tanto, se comentarán los resultados de los valores de dispersión obtenidos para los días uno y quince de cada mes del año 2017. El objetivo de esta sección será concluir si se puede realizar una generalización de los resultados obtenidos en la sección 3 (análisis de un día determinado) para todos los días del periodo estudiado.

Esta sección se dividirá en dos apartados. Por un lado, el apartado 4.1. pretende mostrar los valores de dispersión típicos para cada uno de los días del año estudiados, para así poder observar si aparece algún tipo de tendencia en los valores de dispersión obtenidos para cada día del año y para cada variable estudiada. Este apartado proporcionará una continuación del apartado 3.3 de la sección anterior, extendiendo el estudio para todos los días del año analizados.

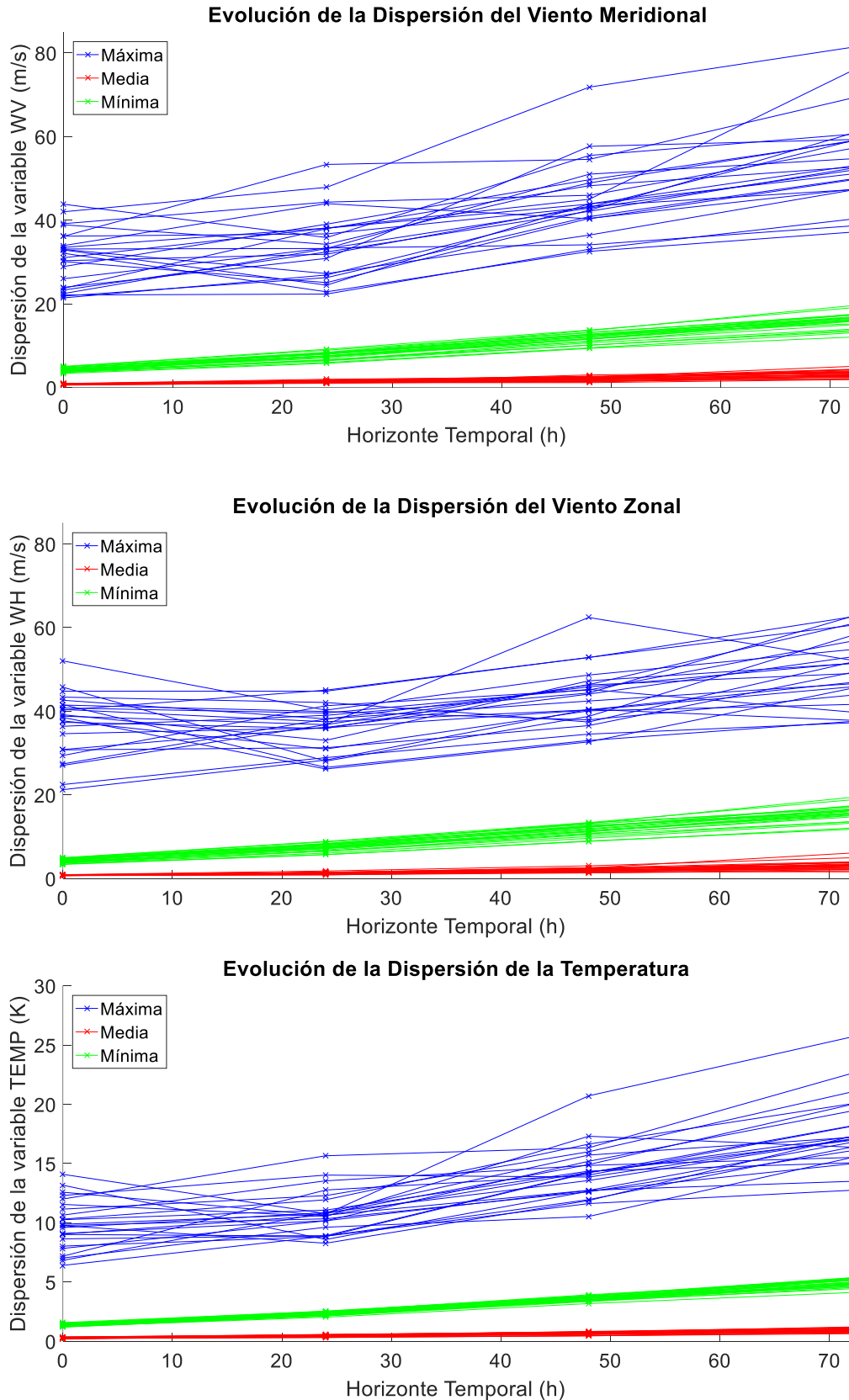
Por otro lado, el apartado 4.2. continuará el estudio de los histogramas de la dispersión que comenzó en el apartado 3.4. para un día concreto. En este caso, se proporcionarán los resultados para la totalidad de días estudiados, lo que permitirá analizar si existe algún tipo de tendencia con respecto a los días u horizontes temporales estudiados.

### 4.1. Evolución temporal del valor mínimo, medio y máximo de la dispersión

Tal y como se ha comentado en la introducción a esta sección, este apartado pretende representar los valores característicos de la dispersión para cada una de las variables y horizontes temporales estudiados, generalizando las figuras 8 y 9 (apartado 3.3.) para la totalidad de días estudiados.

Para ello, de nuevo se realizará el cálculo de la dispersión para cada uno de los puntos estudiados (localizaciones dentro del área de estudio) del mismo modo que se realizó anteriormente. A partir de ahí, para cada horizonte temporal y variable analizada, se extraerán los valores de máxima, media y mínima dispersión, en este caso para cada uno de los días estudiados. De forma análoga al cálculo realizado anteriormente, los valores de dispersión se establecerán en función de la máxima y mínima dispersión de entre todas las localizaciones estudiadas. La media de la dispersión se establecerá definiendo una media aritmética entre todos los valores de dispersión obtenidos (un valor por cada punto estudiado).

A través de dicha representación de los resultados de los valores de dispersión, al establecerse todos los días analizados en una misma figura, se podrá observar si existe algún tipo de tendencia de los valores de dispersión para cada una de las variables estudiadas, en función de los horizontes temporales.



**Figura 12.** Dispersión máxima, media y mínima de cada uno de los días analizados, respecto los diferentes horizontes temporales estudiados (0h, 24h, 48h y 72h, respectivamente). De arriba hacia abajo, aparecen representados dichos valores de dispersión correspondientes con el viento meridional (WV), viento zonal (WH) y temperatura (TEMP), respectivamente.

En la figura 12 se han representado los valores de dispersión máxima, media y mínima de cada uno de los días analizados (un total de 24 días, dos de cada mes del año). Estos valores de dispersión se han representado en función de cada una de las variables estudiadas (de arriba a abajo corresponde con WV, WH y TEMP, respectivamente) y respecto los horizontes temporales estudiados. Los valores de dispersión de cada uno de los horizontes temporales para cada día concreto, se han marcado a través de una 'x'.

De esta forma, destaca cómo en la figura 12 aparece una tendencia análoga a la que fue comentada en el apartado 3.3. para un día determinado. Se observa un crecimiento monótono en todas las curvas, con resultados similares para la totalidad de días estudiados.

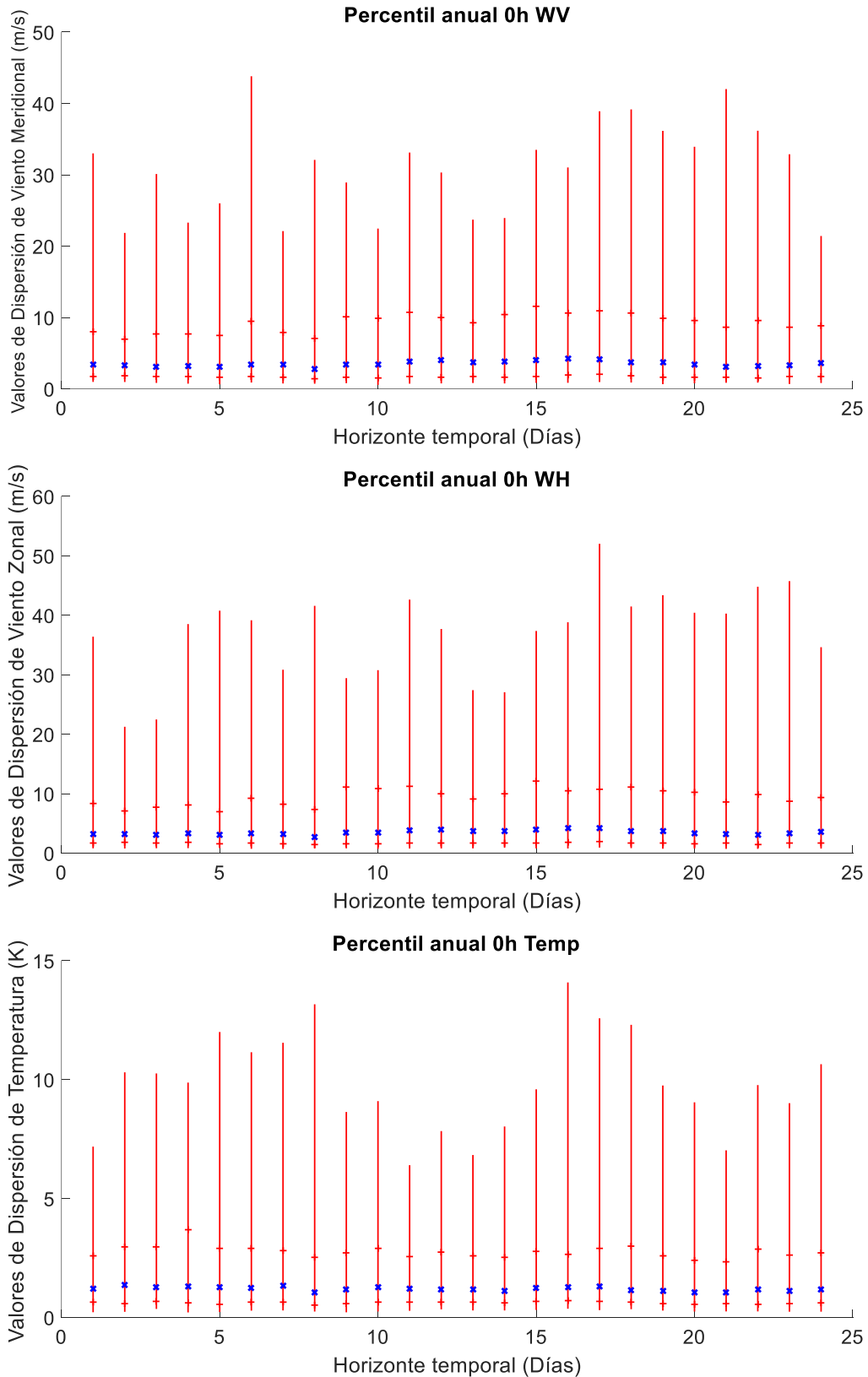
De nuevo, si nos centramos en los valores de dispersión media obtenidos para cada una de las variables, se observa una tasa de crecimiento que resulta ser muy similar para todos los días estudiados. Por lo tanto, de nuevo se repite que la dispersión para el horizonte temporal de 24 horas vista es aproximadamente el doble que para el horizonte temporal de 0 horas. De igual forma, ocurrirá para el horizonte temporal de 48 horas vista, con un valor de dispersión aproximadamente el triple que para el horizonte de 0 horas (de forma similar ocurre a 72 horas vista, con un valor de dispersión aproximadamente cuatro veces mayor que el correspondiente para el horizonte temporal de 0 horas).

Consecuentemente, en base a los resultados aportados, en este caso sí que aparece una tendencia muy parecida entre todos los días estudiados, para cada una de las variables analizadas. Así, el crecimiento monótono resulta coincidente para cada uno de los días que se han analizado.

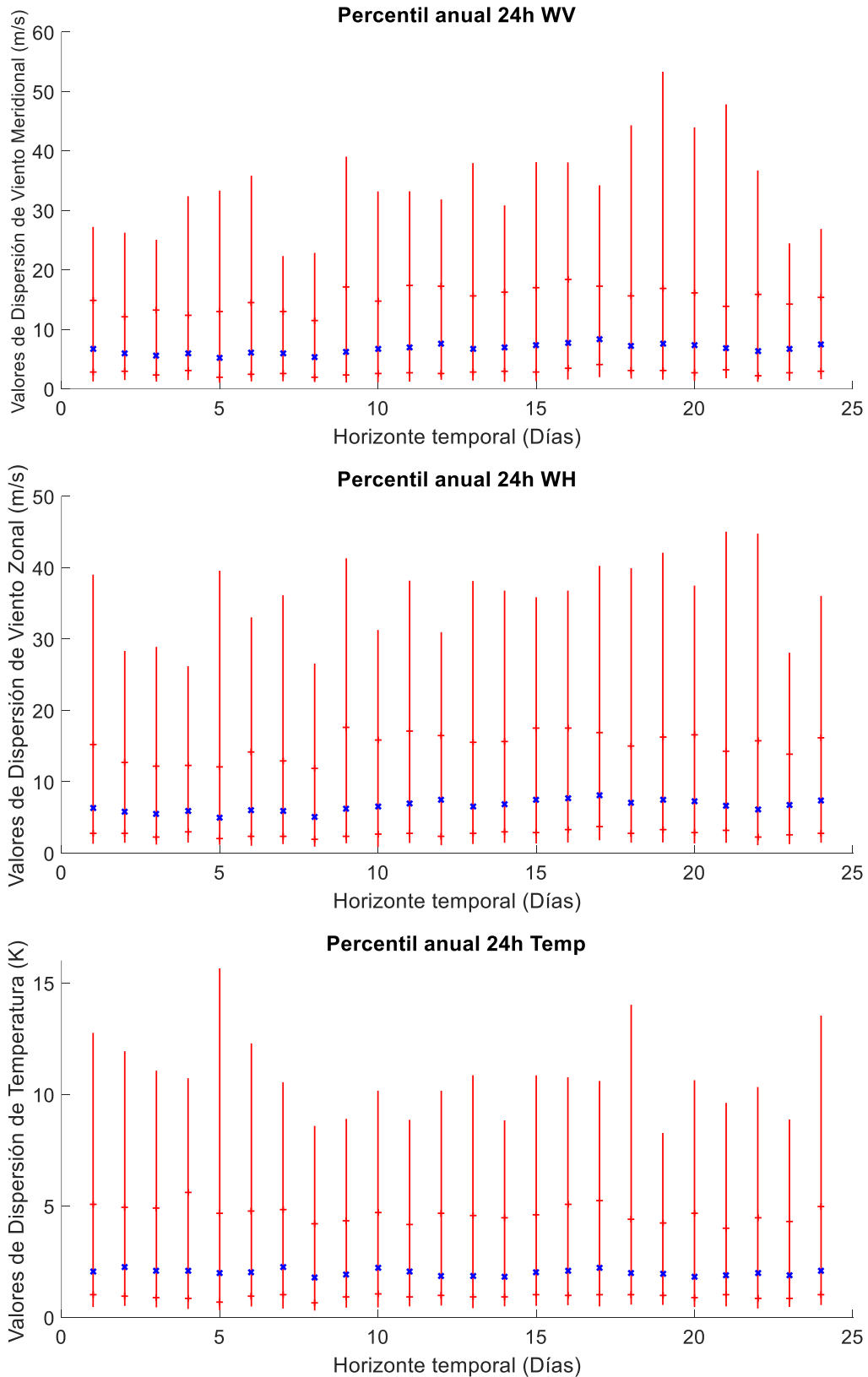
Por otro lado, una vez obtenidas dichas conclusiones, se considera de interés la representación de los valores de dispersión característicos en forma de gráficas que representen sus percentiles. Es decir, para cada uno de los días y horizonte temporales estudiados, se pretende representar, a través de líneas verticales (una por cada día analizado), además de los valores de dispersión máxima y mínima anteriormente comentados, los valores de sus percentiles de 95% y 5%, además del valor de la mediana (percentil del 50%).

La representación de los valores de dispersión que corresponden a los percentiles del 95% y 5% tiene por objetivo la observación de las largas colas de dispersión que se producen para cada día estudiado, respecto las variables y horizontes temporales analizados. Dichas colas de dispersión aparecieron en el apartado 3.4., de forma que se pretende observar si dichas colas de dispersión aparecen con independencia del caso estudiado o siguen algún tipo de tendencia.

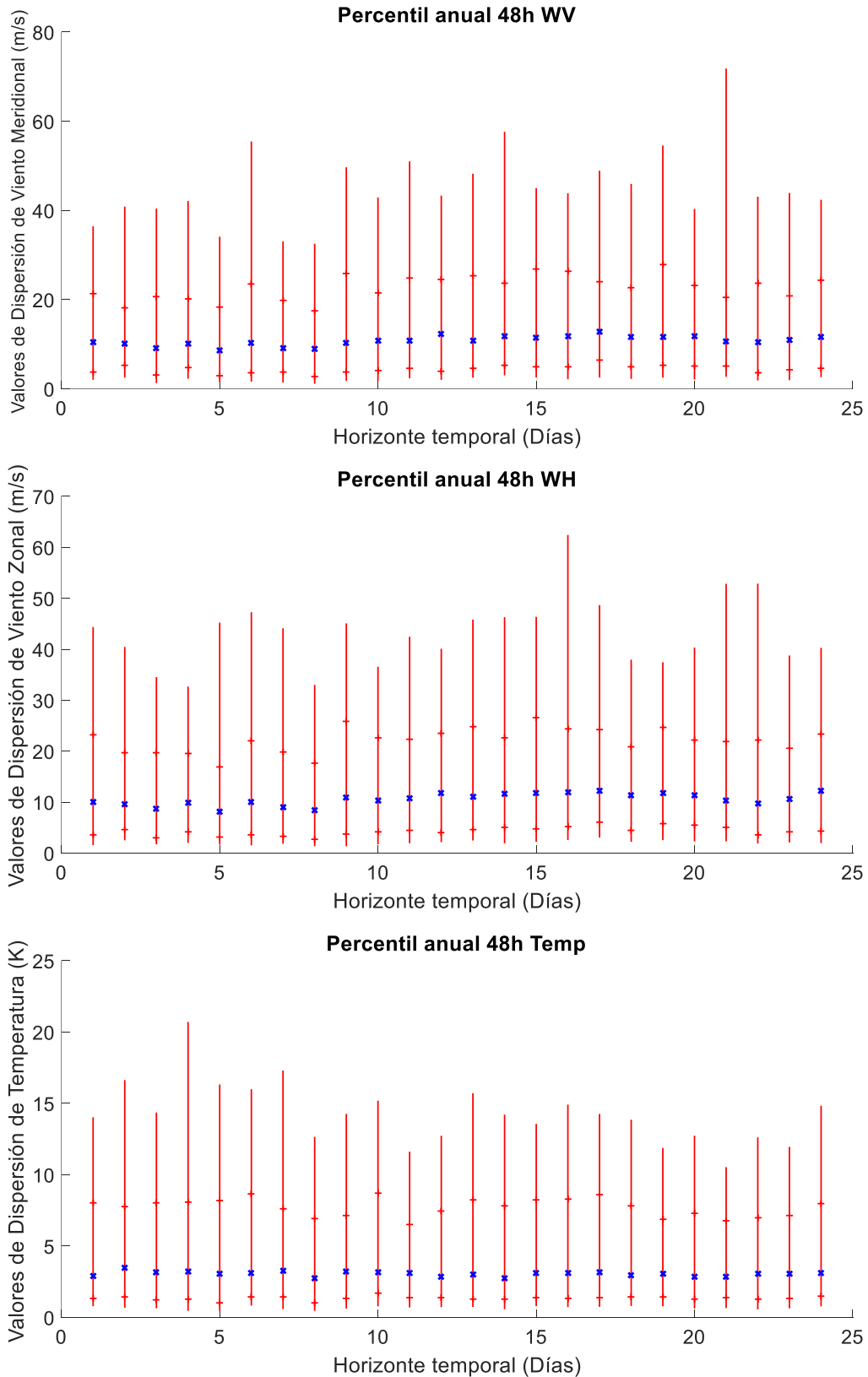
Para el cálculo de dichos valores de dispersión, se calcula la dispersión de cada uno de los puntos estudiados como la diferencia entre los valores máximos y mínimos que definen cada una de las variables estudiadas en cada una de las localizaciones. De esta forma, para una variable, horizonte temporal y día determinado, se pueden calcular los valores de percentiles que son de interés a través de todos los valores de dispersión obtenidos. Así, dicho cálculo se generalizará para cada uno de los días estudiados, permitiendo así la obtención de las siguientes figuras.



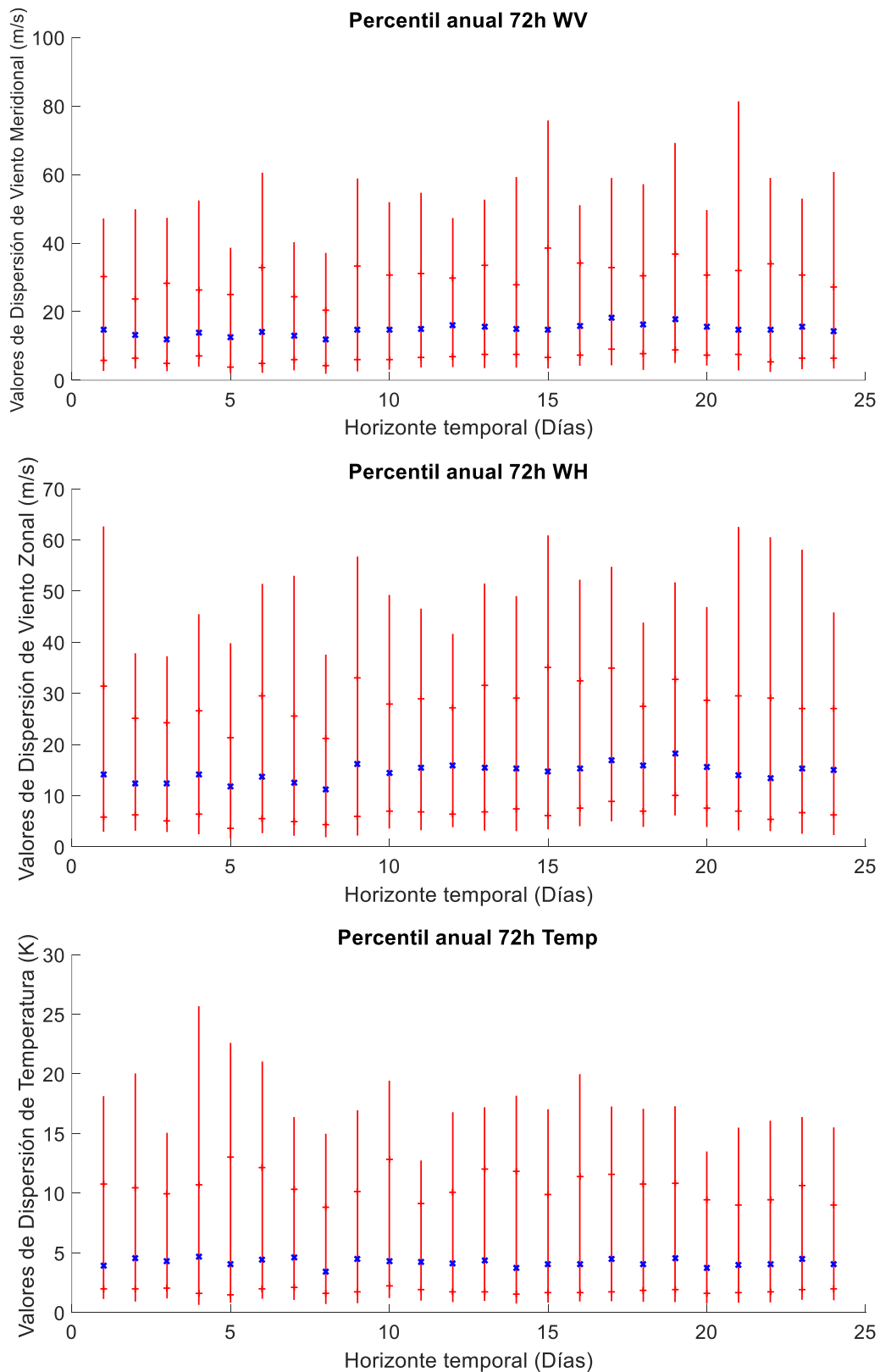
**Figura 13.** Representación de los valores de dispersión máximos y mínimos para cada uno de los días analizados (valores extremos de las líneas verticales). Con un ‘-’ se han marcado los percentiles del 95% y del 5%. La mediana de los valores (percentil del 50%) se destaca a través de una ‘x’. Dichos valores de dispersión se han representado de arriba abajo, para las variables de viento meridional, viento zonal y temperatura, respectivamente, para el horizonte temporal de 0 horas.



**Figura 14.** Representación de los valores de dispersión máximos y mínimos para cada uno de los días analizados (valores extremos de las líneas verticales). Con un ‘-’ se han marcado los percentiles del 95% y del 5%. La mediana de los valores (percentil del 50%) se destaca a través de una ‘x’. Dichos valores de dispersión se han representado de arriba abajo, para las variables de viento meridional, viento zonal y temperatura, respectivamente, para el horizonte temporal de 24 horas.



**Figura 15.** Representación de los valores de dispersión máximos y mínimos para cada uno de los días analizados (valores extremos de las líneas verticales). Con un ‘-’ se han marcado los percentiles del 95% y del 5%. La mediana de los valores (percentil del 50%) se destaca a través de una ‘x’. Dichos valores de dispersión se han representado de arriba abajo, para las variables de viento meridional, viento zonal y temperatura, respectivamente, para el horizonte temporal de 48 horas.



**Figura 16.** Representación de los valores de dispersión máximos y mínimos para cada uno de los días analizados (valores extremos de las líneas verticales). Con un ‘-’ se han marcado los percentiles del 95% y del 5%. La mediana de los valores (percentil del 50%) se destaca a través de una ‘x’. Dichos valores de dispersión se han representado de arriba abajo, para las variables de viento meridional, viento zonal y temperatura, respectivamente, para el horizonte temporal de 72 horas.

En las figuras 13, 14, 15 y 16 se han proporcionado los valores de dispersión característicos de cada uno de los días analizados, en función del horizonte temporal y la variable estudiada. De esta forma, en la figura 13 se han representado los valores de dispersión característicos para el horizonte temporal de 0 horas, siendo de arriba a abajo los correspondientes a las variables WV, WH y TEMP, respectivamente. Análogamente, la representación de los horizontes temporales de 24h, 48h y 72h se realiza en las figuras 14, 15 y 16, respectivamente.

En dichas figuras, se pueden observar las largas colas de dispersión que se definen para cada una de las variables estudiadas, ya que el valor de dispersión máximo que se obtiene resulta notablemente mayor que el valor de dispersión que define el percentil del 95%. Por otro lado, también se aprecia cómo el valor de la mediana de la dispersión se sitúa mucho más próximo al percentil del 5% que al valor de dispersión que define el percentil del 95%. A partir de los resultados obtenidos respecto los valores de dispersión, se observa que no aparece tendencia destacable, ya sea en función de la variable analizada o el horizonte temporal definido.

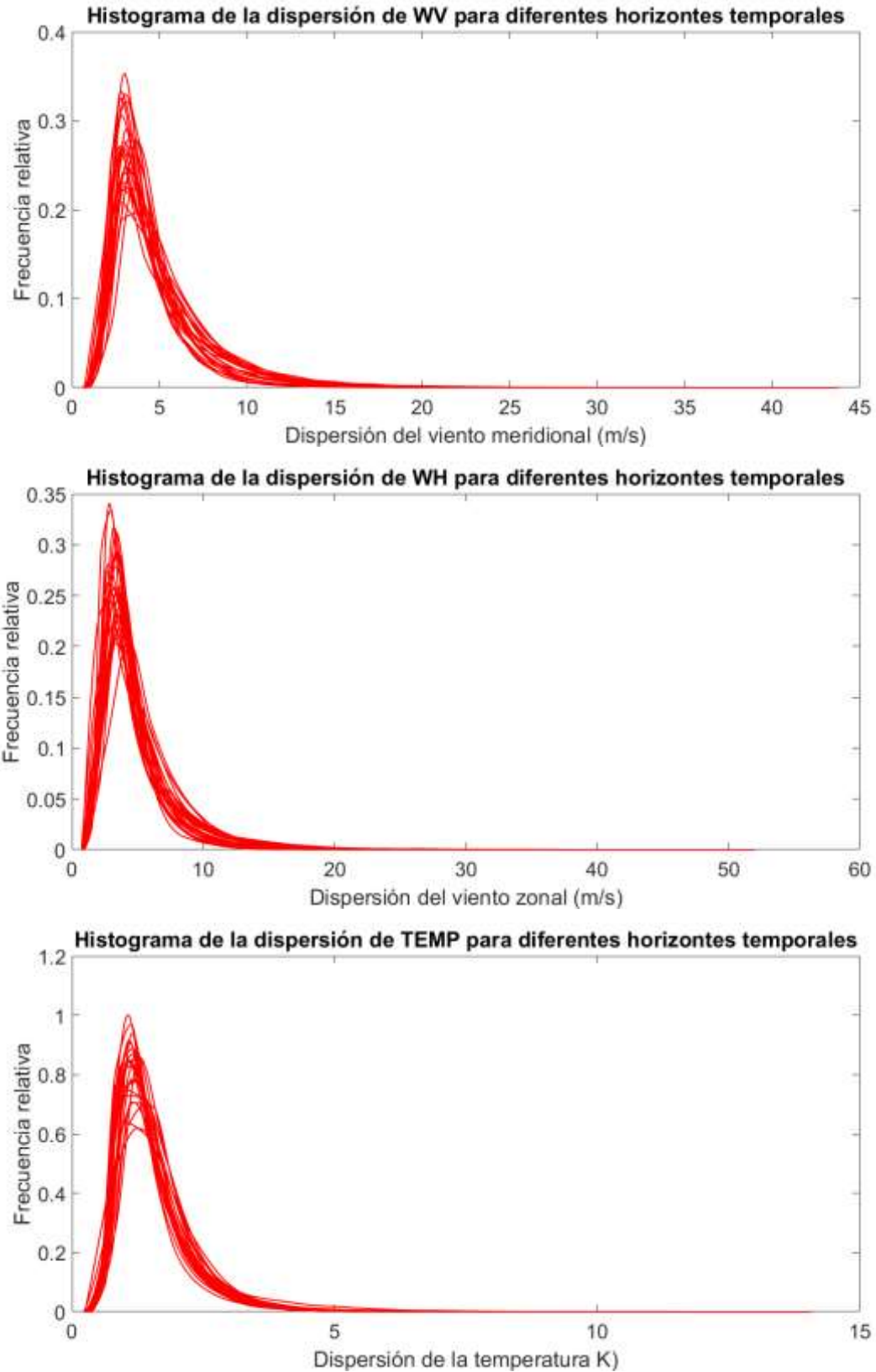
## 4.2. Histogramas

Para completar el estudio de los valores de dispersión asociados a cada uno de los días analizados, en este caso se pretende realizar una extensión del último apartado de la sección anterior. Para ello, se extenderá el análisis sobre el histograma de dispersión para cada uno de los días analizados.

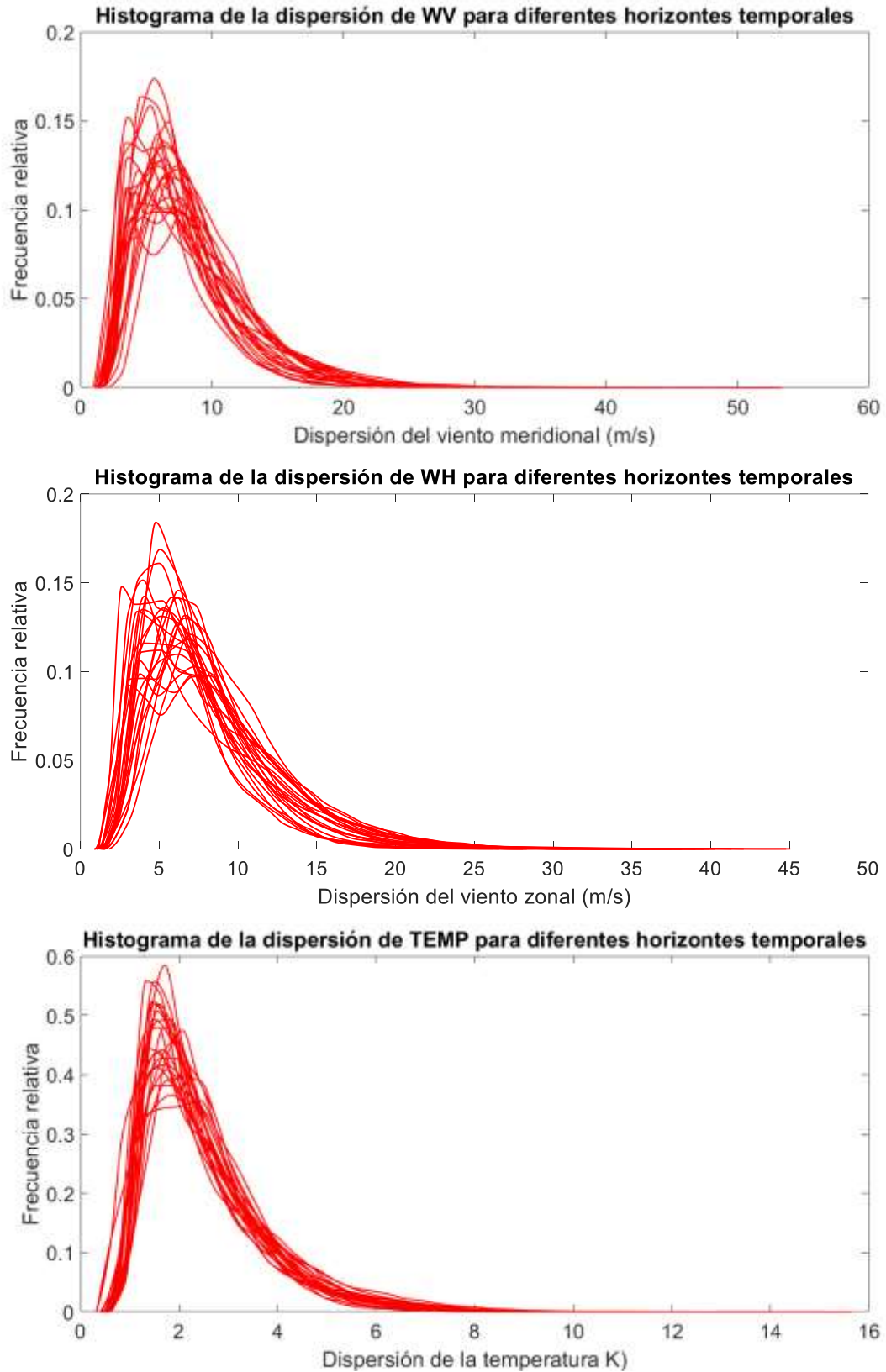
De esta forma, superponiendo los histogramas de cada uno de los 24 días estudiados, en función de cada una de las variables y horizontes temporales estudiados, se podrá observar si los resultados que fueron obtenidos anteriormente (apartado 3.4.) se pueden extender a todo el periodo estudiado. Es decir, a partir de la representación de los resultados se podrá observar si existe algún tipo de tendencia que cumplan los valores de dispersión.

Para obtener dichos resultados, se procederá a través del cálculo de los histogramas de la dispersión del mismo modo que se realizó anteriormente. Es decir, este histograma sería el resultado de trazar un corte vertical sobre la figura 12, para cada una de las variables estudiadas. Así, histograma, particularizado para un día, variable, y horizonte temporal determinado, define los valores de máxima y mínima dispersión, así como la frecuencia con la que un determinado valor de dispersión aparezca (tal y como se definió en el apartado 3.4, particularizado para el día 7 de julio de 2017).

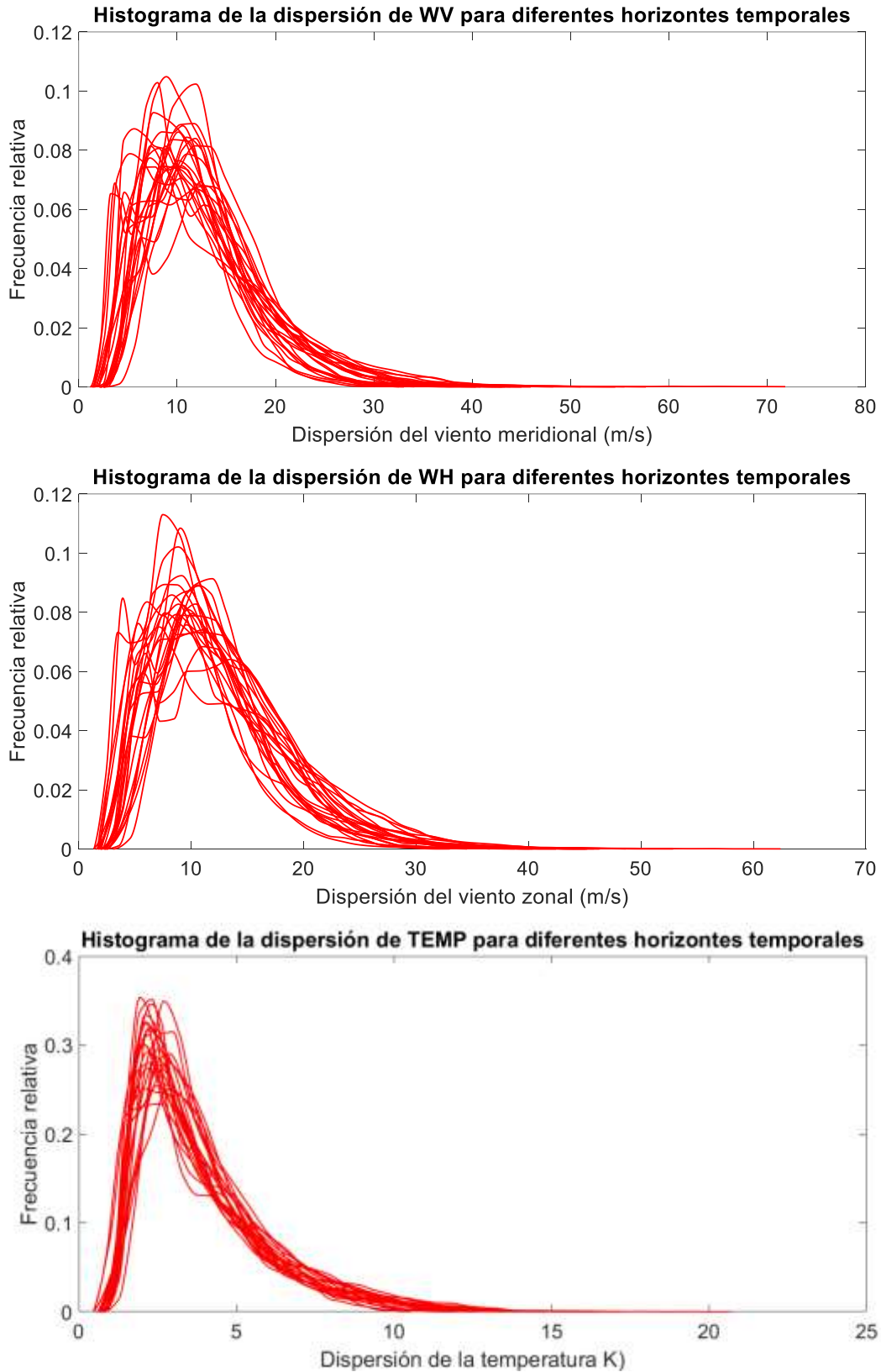




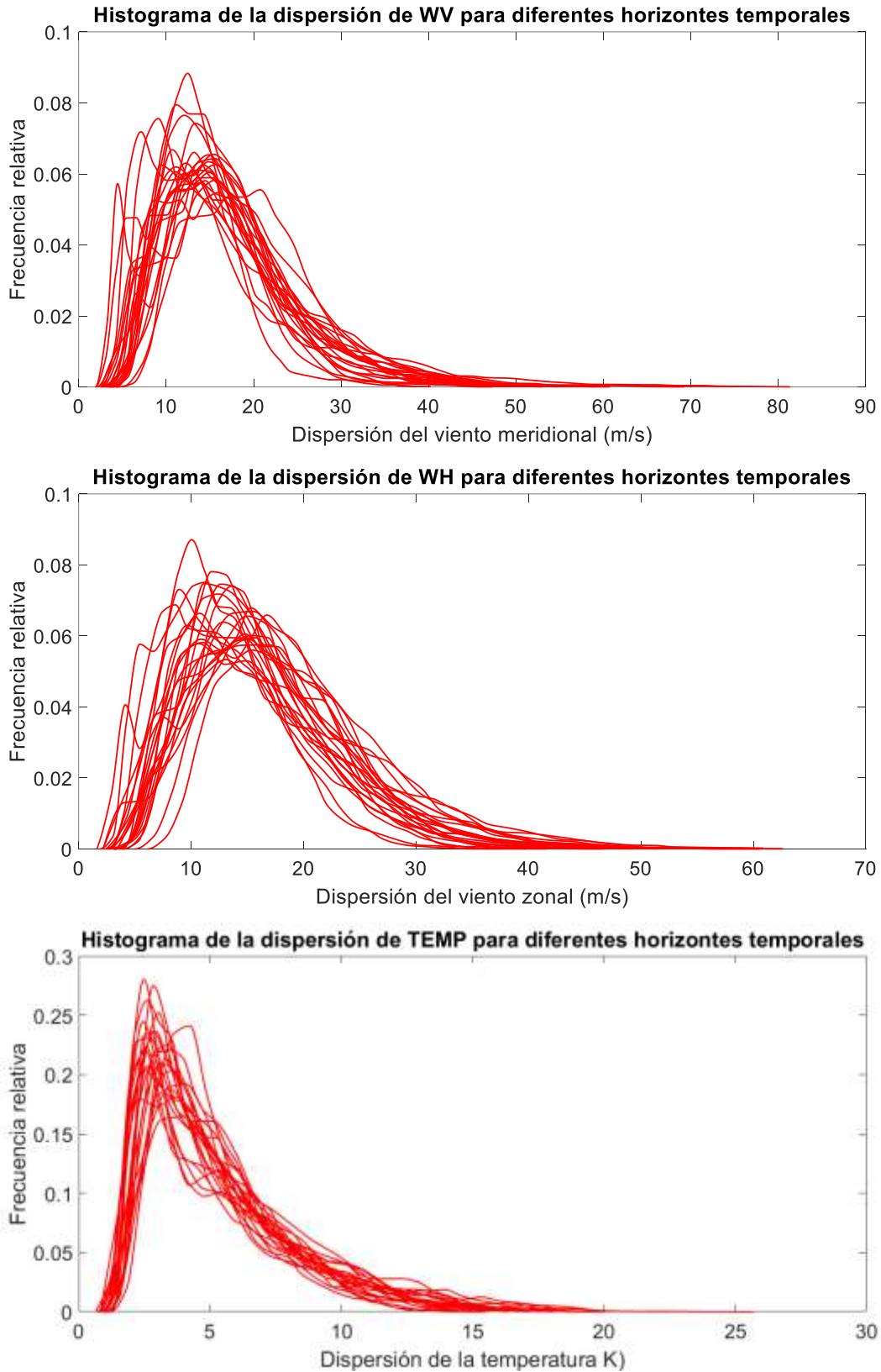
**Figura 17.** Histograma de la dispersión para cada uno de los días estudiados (cada línea corresponde a uno de los 24 días analizados), respecto el horizonte temporal de 0 horas. De arriba abajo aparecen los valores de dispersión asociados a la variable de viento meridional, viento zonal y temperatura, respectivamente.



**Figura 18.** Histograma de la dispersión para cada uno de los días estudiados (cada línea corresponde a uno de los 24 días analizados), respecto el horizonte temporal de 24 horas. De arriba abajo aparecen los valores de dispersión asociados a la variable de viento meridional, viento zonal y temperatura, respectivamente.



**Figura 19.** Histograma de la dispersión para cada uno de los días estudiados (cada línea corresponde a uno de los 24 días analizados), respecto el horizonte temporal de 48 horas. De arriba abajo aparecen los valores de dispersión asociados a la variable de viento meridional, viento zonal y temperatura, respectivamente.



**Figura 20.** Histograma de la dispersión para cada uno de los días estudiados (cada línea corresponde a uno de los 24 días analizados), respecto el horizonte temporal de 72 horas. De arriba abajo aparecen los valores de dispersión asociados a la variable de viento meridional, viento zonal y temperatura, respectivamente.

En las figuras 17, 18, 19 y 20 se han representado los histogramas de dispersión para todos los días analizados, en función de los horizontes temporales de 0h, 24h 48h y 72h, respectivamente. En cada una de estas figuras, se han representado, de arriba abajo, los histogramas correspondientes a las variables de viento meridional, viento zonal y temperatura, respectivamente.

En cada una de las figuras se observa cómo los valores de dispersión son muy parecidos para la totalidad de días estudiados (en función de cada variable y horizonte temporal determinado). Por lo tanto, las conclusiones obtenidas en el apartado 3.4 del documento, correspondientes a un día concreto (1 de julio de 2017) se pueden extender a este apartado, ya que no aparecen excepciones o casos particulares que no cumplan con la tendencia definida para los histogramas obtenidos en el caso concreto estudiado anteriormente.

Para cuantificar los resultados proporcionados, se establece la tabla 5, la cual refleja los valores característicos de dispersión que se definen para la totalidad de los días estudiados. Así, la información proporcionada será la análoga mostrada en las tablas 2, 3 y 4 correspondientes a las variables WV, WH y TEMP, proporcionadas en el apartado 3.4., solo que, en este caso, se han calculado los valores de dispersión correspondientes a cada día estudiado y, posteriormente, se ha realizado una media aritmética de los mismos.

<b>Horizonte Temporal</b>	<b>0 horas</b>			<b>72 horas</b>		
	<b>WV (m/s)</b>	<b>WH (m/s)</b>	<b>TEMP (K)</b>	<b>WV (m/s)</b>	<b>WH (m/s)</b>	<b>TEMP (K)</b>
<b>Mínima</b>	0.58	0.69	0.21	1.97	1.86	0.72
<b>Máxima</b>	43.81	52.03	14.08	81.34	62.55	25.67
<b>Moda</b>	3.25	3.18	1.10	13.28	12.89	2.95
<b>Frecuencia</b>	(28.05%)	(27.32%)	(80.24%)	(5.82%)	(6.23%)	(21.37%)
<b>Mediana</b>	3.50	3.47	1.19	14.35	14.52	4.15
<b>Percentil 5%</b>	1.68	1.70	0.61	6.64	6.38	1.80
<b>Percentil 95%</b>	9.28	9.14	2.80	29.74	27.93	10.92

**Tabla 5.** Valores de dispersión característicos de los días estudiados (en promedio), correspondientes a los horizontes temporales de 0 y 72 horas.

La tabla 5 proporciona los valores de dispersión característicos de la totalidad de los días estudiados, en función de las variables de viento meridional, viento zonal y temperatura. Asimismo, se ha considerado de interés la definición de los valores de dispersión únicamente correspondientes a los horizontes temporales de 0 y 72 horas.

A partir de esta tabla, se puede observar cómo los valores de dispersión evolucionan respecto el horizonte temporal analizado. De esta forma, se obtienen conclusiones similares a las obtenidas a partir de las tablas 2, 3 y 4, donde destacaba el aumento de la dispersión con respecto el horizonte temporal, así como una pérdida de la forma del histograma inicial (horizonte temporal de 0 horas) a medida que el horizonte aumenta. Por lo tanto, en función de los resultados obtenidos, se observa que tanto cualitativa como cuantitativamente se pueden extender las conclusiones determinadas sobre un día concreto para la totalidad de los días estudiados.

# 5. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA PREDICCIÓN Y AJUSTE CON LA REALIDAD

---

Según lo visto hasta el momento, se ha observado cómo a horizontes temporales más alejados del instante predicho, los valores de dispersión que definen las variables estudiadas aumentan. Por lo tanto, resulta coherente pensar que, en la evolución de los horizontes temporales estudiados, los valores de una determinada variable para un horizonte determinado, quedarán contenidos dentro del rango de valores definidos para dicha variable en un horizonte temporal mayor. Si no ocurriese de tal modo, la información proporcionada por el análisis de los valores de dispersión sería pobre, ya que los intervalos de valores en los que se define una determinada variable en un horizonte temporal concreto serían impredecibles, de forma que no se podría esperar que los valores en los que se define una variable para un horizonte temporal menor quedasen acotados dentro de los valores definidos para un horizonte mayor.

Por lo tanto, en esta sección se va a evaluar si la predicción de los valores de una determinada variable de un horizonte temporal mayor contiene a una predicción de valores de un horizonte temporal menor. Asimismo, también se pretende comprobar si además de contener a dichos valores, también contiene a la realidad, o lo que se tiene más cercano a ella, que en este caso será un reanálisis del pronóstico, proporcionado también por ECMWF.

Para poder evaluar si los valores que experimenta una determinada variable quedan acotados dentro del intervalo de valores de definido para un horizonte temporal mayor, se ha optado por la definición de un coeficiente  $\alpha$ , el cual tomará un valor igual a la unidad en caso de que el horizonte temporal estudiado esté definido completamente dentro del intervalo de valores establecido por el correspondiente horizonte temporal anterior (es decir, con un horizonte temporal mayor). Dicho coeficiente  $\alpha$  se aplica a cada ubicación de la zona sometida a estudio.

De la misma forma,  $\alpha$  será nulo cuando ambos intervalos no coincidan en ninguno de sus puntos. En el caso de que parte del intervalo de valores del horizonte temporal estudiado quede dentro del definido por el horizonte temporal previo al estudiado (horizonte temporal mayor), a través de dicho coeficiente se obtendrá el porcentaje del intervalo de valores de la variable que sí se encuentran acotados dentro del intervalo definido por el horizonte temporal mayor.

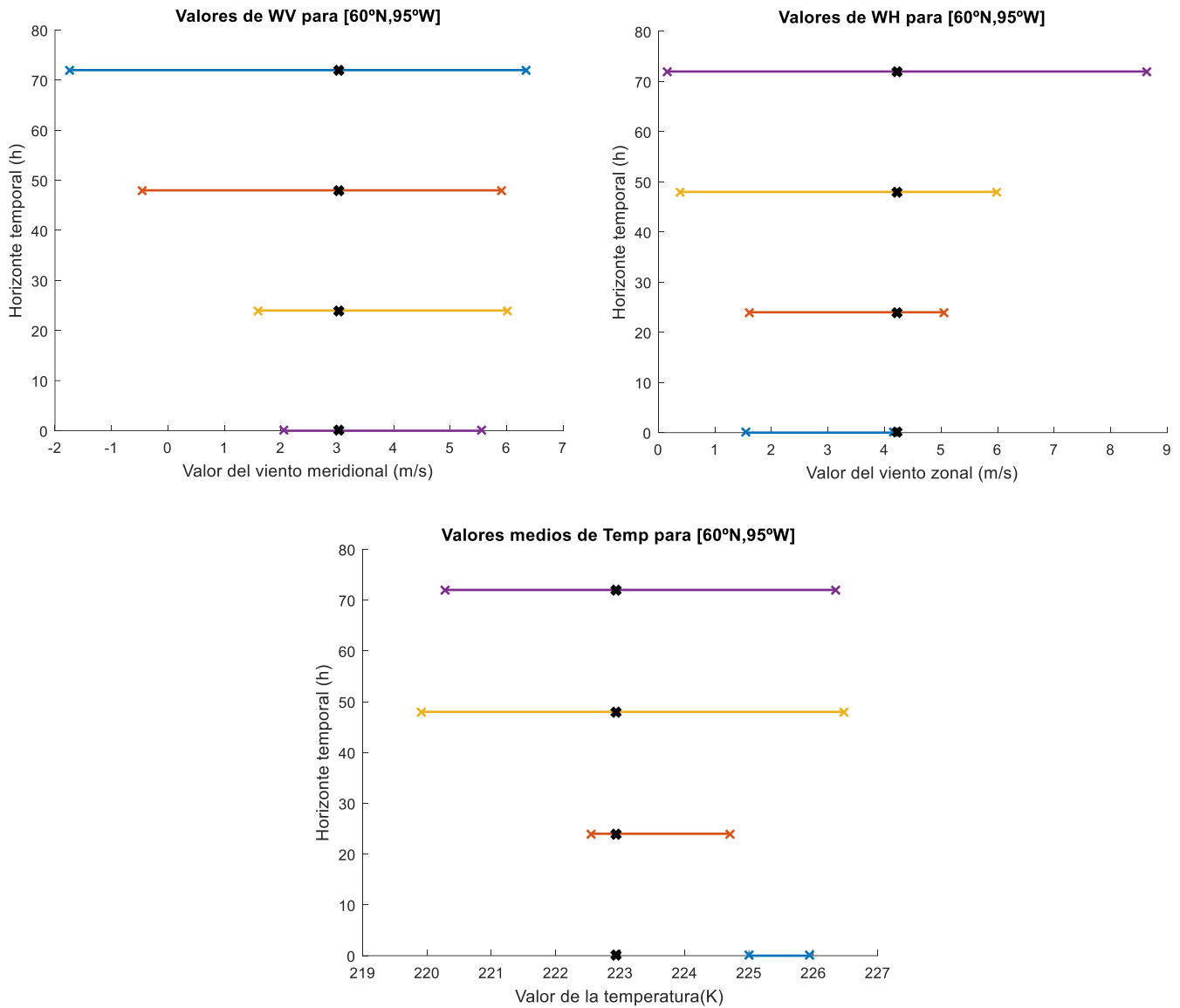
Por lo tanto, el valor del coeficiente  $\alpha$  se obtendrá a partir de la aplicación de las expresiones definidas a continuación. Para su correcta aplicación, se definirá el valor mínimo y el valor máximo que toma la variable determinada en el horizonte temporal analizado como 'mín' y 'máx', respectivamente. Para el caso del horizonte temporal mayor al estudiado, a partir del cual se pretende evaluar si los valores de la variable definidos anteriormente están dentro de este, se define el valor máximo y el mínimo de esta como 'mínMayor' y 'máxMayor', respectivamente. A partir de esta notación, la definición del valor del coeficiente  $\alpha$  sería la siguiente:

- Si  $mín > máxMayor$  →  $\alpha = 0$
- Si  $máx < mínMayor$  →  $\alpha = 0$
- Si  $mín < mínMayor$  y  $máx < máxMayor$  →  $\alpha = \frac{máx - mínMayor}{máx - mín}$  (3)
- Si  $mín > mínMayor$  y  $máx > máxMayor$  →  $\alpha = \frac{máxMayor - mín}{máx - mín}$
- Si  $mín > mínMayor$  y  $máx < máxMayor$  →  $\alpha = 1$

Las expresiones del coeficiente  $\alpha$  definidas en (3), también pueden ser de utilidad para evaluar si los valores de una determinada variable obtenidos en el reanálisis se encuentran acotados en el horizonte temporal de 0 horas. Para ello, únicamente habrá que considerar que, en ese caso, el intervalo de valores del horizonte temporal analizado, se refiere al valor que toma la variable, valor obtenido en el reanálisis, reduciéndose el intervalo que se pretende estudiar a un punto en concreto.

Por lo tanto, en el caso del reanálisis, se evaluará si el valor proporcionado por este se encuentra contenido dentro del intervalo de valores que toma la variable sometida a estudio y que se definen para un horizonte temporal determinado. Al tratarse de un único punto, en este caso el coeficiente  $\alpha$  únicamente valdrá 1 ó 0, en función de si el valor que toma la variable en el reanálisis (un punto en nuestra representación) queda contenido o no, respectivamente, en el intervalo de valores de dicha variable proporcionado por el horizonte temporal en el que se pretenda evaluar el valor del coeficiente.

Para cuantificar y dar sentido a la definición del coeficiente  $\alpha$  y la evaluación de los valores que toma una determinada variable en función del horizonte temporal estudiado, se presentará el análisis de un día concreto (1 de julio de 2017). En este caso, los valores del coeficiente  $\alpha$  que se van a obtener serán los correspondientes al punto cuya localización es [60°N, 95°W]. Así, en este caso, se han aplicado las expresiones proporcionadas en (3) sobre los valores que toman cada una de las variables estudiadas en dicha ubicación concreta, cogiendo los máximos y mínimos pertinentes (para la correcta aplicación de (3)) de entre todos los valores que se tiene para esa ubicación concreta (cincuenta valores para cada una de las variables estudiadas, tal y como se ha puesto de manifiesto a lo largo del documento).



**Figura 21.** Intervalo de valores que define cada una de las variables estudiadas (de izquierda a derecha y de arriba abajo, WV, WH y TEMP, respectivamente), en cada uno de los horizontes temporales estudiados (líneas horizontales cuyo valor de horizonte temporal queda definido a través del eje de ordenadas).

En la siguiente tabla (tabla 6) se proporcionan los valores obtenidos para el coeficiente  $\alpha$ , en función de cada variable estudiada (WV, WH y TEMP, respectivamente, de izquierda a derecha) y en función de cada horizonte temporal estudiado. De esta forma, se han realizado todas las combinaciones posibles entre los cuatro horizontes temporales estudiados, siempre evaluando si los valores de una determinada variable respecto un horizonte temporal menor están contenidos en el horizonte temporal mayor. Se han añadido subíndices al coeficiente  $\alpha$  para diferenciar entre las tres variables sobre las que se está basando el estudio ( $\alpha_{WV}$ ,  $\alpha_{WH}$  y  $\alpha_T$ , referentes a la variable de viento meridional, viento zonal y temperatura, respectivamente).



Horizontes Temporales	$\alpha_{WV}$	$\alpha_{WH}$	$\alpha_T$
0 – 24 horas	1	0.9769	0
0 – 48 horas	1	1	1
0 – 72 horas	1	1	1
24 – 48 horas	0.9786	1	1
24 – 72 horas	1	1	1
48 – 72 horas	1	1	0.9247

**Tabla 6.** Valores del coeficiente  $\alpha$  obtenidos a través de la evaluación de los valores que adquieren cada una de las variables (WV, WH y TEMP, respectivamente) en cada uno de los horizontes temporales analizados, evaluando que el horizonte temporal mayor contenga los valores del horizonte menor. Los resultados han sido particularizados para una ubicación concreta, [60°N, 95°W].

Para una correcta comprensión de la tabla 6, se proporciona de manera conjunta a esta tabla, la figura 21 (mostrada a continuación), que proporciona una representación gráfica de los resultados obtenidos. De esta forma, la figura 21 proporciona cada uno de los horizontes temporales estudiados (representados a través de líneas horizontales, cuyo valor en el eje de ordenadas es el propio valor del horizonte temporal), definidos a través de los valores extremos que toma la variable para cada uno de los horizontes temporales (el máximo y el mínimo de cada variable determinan los límites de las líneas horizontales). Además, como información adicional, se ha identificado el valor que toma cada una de las variables en el reanálisis a través de una ‘x’ de mayor grosor, de modo que gráficamente se puede detectar si el coeficiente  $\alpha$  en el caso de la evaluación del reanálisis adquiere el valor 1 ó 0, en función de si dicho valor se encuentra contenido dentro del intervalo de valores en los que se define cada variable determinada en el horizonte temporal que se realice la evaluación.

Por lo tanto, cada valor unidad del coeficiente  $\alpha$  que aparece en la tabla 6, referente a la evaluación de una determinada variable y los valores que toma en un horizonte temporal, corresponde en la figura 21 con la definición de un rango de valores de dicho horizonte temporal acotados dentro del intervalo de valores del horizonte temporal mayor con el que se realiza la evaluación. Asimismo, si en la tabla aparece un valor de  $\alpha$  nulo, lo cual ocurre para el caso de la temperatura en la evaluación del horizonte temporal de 0h respecto al horizonte de 24h, se identifica rápidamente en la figura 21, donde los valores de la variable temperatura para el horizonte temporal de 0 horas no se encuentran acotados dentro del intervalo de valores definido para esta misma variable en el horizonte temporal de 24 horas.

Por otro lado, son varios los casos en los que solo una parte del intervalo de valores del horizonte temporal estudiado queda contenido en el horizonte temporal mayor respecto del cual se realiza la evaluación. Esto se aprecia en la figura 21 por ejemplo para el caso del viento meridional, comparando el intervalo de valores definido para el horizonte temporal de 24 horas, que no se encuentran en su totalidad incluidos dentro de los valores definidos en el horizonte de 48 horas (queda contenido un 97.86% de la totalidad de los valores definidos para el horizonte de 24 horas).

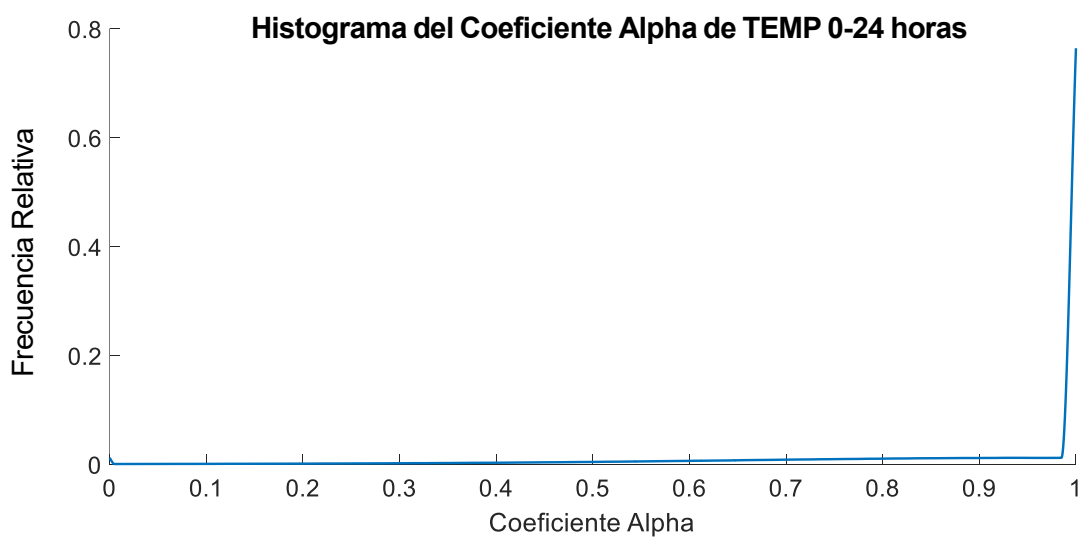
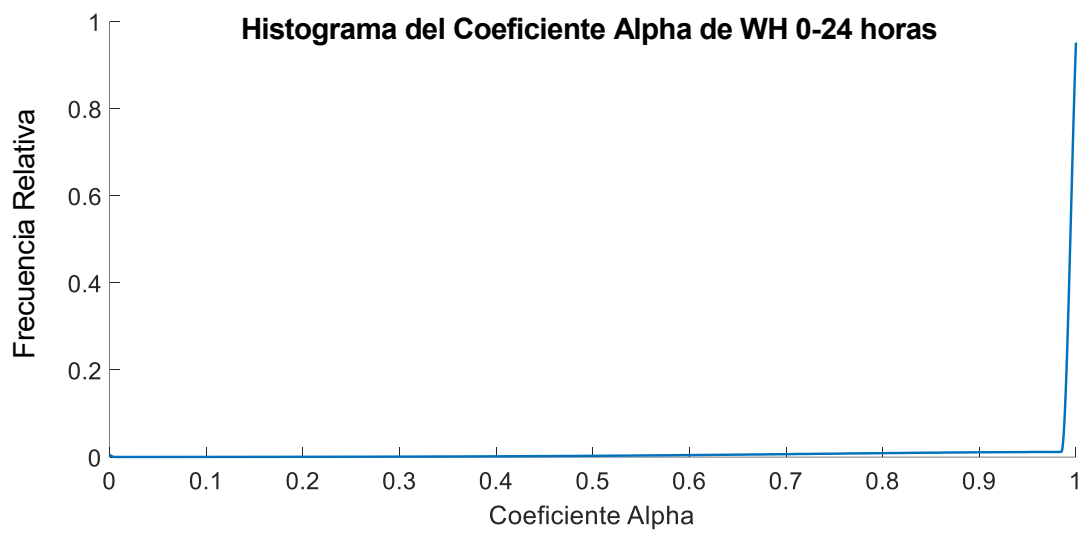
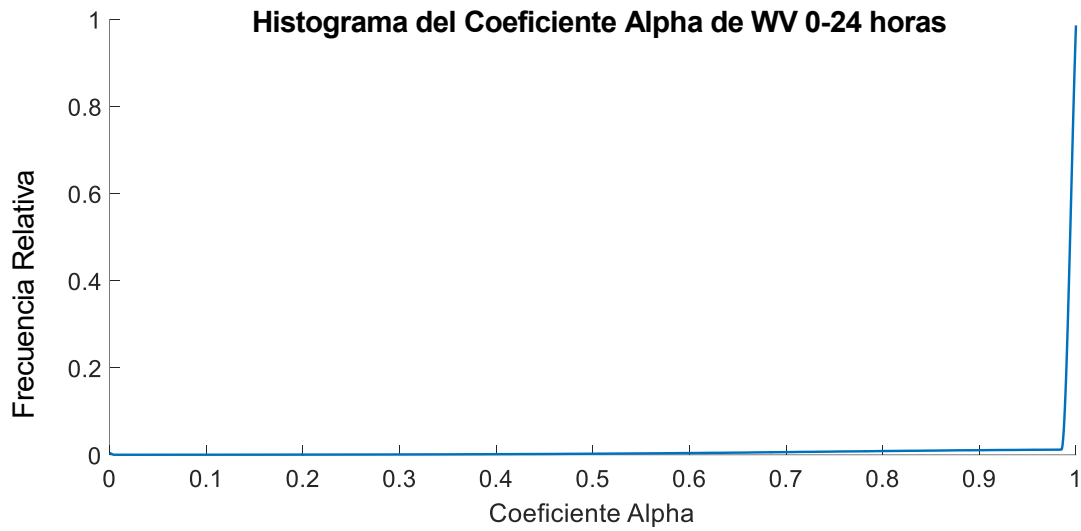
Además de los comentarios plasmados anteriormente, a través de la figura 21 se puede analizar qué valor adquiere el coeficiente  $\alpha$  en la evaluación del valor proporcionado por el reanálisis para cada una de las variables estudiadas. De esta forma, se observa cómo en el caso del viento meridional, el valor de la variable obtenido en el reanálisis está perfectamente contenido dentro del intervalo de valores definido para el horizonte temporal de 0 horas ( $\alpha_{wV}$  con valor unidad). Por otro lado, en el caso de las variables de viento zonal y temperatura, dicho valor de reanálisis no se encuentra contenido dentro del intervalo de valores del horizonte de 0 horas ( $\alpha_{wH}$  y  $\alpha_T$  nulos). Tal y como se aprecia en la figura 21, en el caso de la variable WH este valor nulo de  $\alpha$  se produce por una diferencia de décimas entre el valor máximo que toma la variable de viento zonal para el horizonte temporal de 0 horas y el establecido a través del reanálisis.

Respecto al resto de horizontes temporales estudiados, si se realiza la evaluación de estos con el valor de reanálisis definido para cada una de las variables, el coeficiente  $\alpha$  adquiere valor unidad en los casos representados (para la ubicación y variables estudiadas en este caso). Dichos horizontes temporales definen unos intervalos de valores mayores, de modo que, ante horizontes temporales menores, donde los intervalos de valores que toma la variable se van acotando, resulta ser dónde se definen las irregularidades identificadas con un valor del coeficiente  $\alpha$  menor a la unidad.

En líneas generales, se observa cómo los horizontes temporales mayores establecen que las variables estudiadas se definen en un intervalo de valores mayor que en el caso de horizontes temporales menores. Así, se observa cómo los pronósticos que se realizan en un horizonte más cercano al instante sobre el que se elabora la predicción definen un intervalo más acotado de valores que toma la variable.

En base a los resultados obtenidos, se observa cómo aparece una tendencia en la que, en base al caso estudiado, y teniendo en cuenta su validez para gran parte de los casos estudiados, resulta que los horizontes temporales más pequeños definen un intervalo de valores que puede tomar la variable, y dicho intervalo se encuentra contenido dentro del intervalo de valores que define un horizonte temporal mayor.

Una vez proporcionados los resultados correspondientes a una ubicación y día concretos, será de gran interés conocer los valores del coeficiente  $\alpha$  que se definen para cada una de las variables teniendo en cuenta todas las ubicaciones y días estudiados. Para ello, se ha definido un histograma a través de la cual se obtendrá la frecuencia con la que un determinado valor de  $\alpha$  aparece, en base a todas las ubicaciones y días estudiados, en función de cada variable.



**Figura 22.** Histograma del coeficiente  $\alpha$  comparando los horizontes temporales de 0 y 24 horas. De arriba abajo, aparecen dichos histogramas para las variables WV, WH y TEMP, respectivamente.

En la figura 22 aparecen representadas los histogramas del coeficiente  $\alpha$  teniendo en cuenta todas las ubicaciones y días estudiados. Por simplificación de resultados, ya que el resto de casos resultan análogos y no arrojan conclusiones más interesantes de las que se extraerán a continuación, se ha decidido representar los histogramas mencionados teniendo en cuenta los horizontes temporales de 0 y 24 horas.

A partir de esta figura, se pueden aplicar las conclusiones comentadas anteriormente para el caso particular estudiado (tabla 6 y figura 21) ya que, de nuevo, se observa que en la mayor parte de los casos se obtiene un valor del coeficiente igual a la unidad. Por lo tanto, se observa que la frecuencia de que aparezca un valor del coeficiente distinto a la unidad resulta ser notablemente menor que la frecuencia de que dicho coeficiente adquiera el valor unidad. Por lo tanto, la afirmación de que los intervalos de valores que define un horizonte temporal determinado para una variable en concreto, quedan acotados dentro del intervalo de valores definido por un horizonte temporal mayor resulta ser extensible a todos los días estudiados.

Por último, la generalización que se ha realizado anteriormente para la obtención de los histogramas del coeficiente  $\alpha$  (figura 22), se definirá de nuevo, comparando en este caso el valor proporcionado por el reanálisis en cada caso, con los horizontes temporales estudiados (0h, 24, 48h y 72 horas, respectivamente). Es decir, para cada una de las variables estudiadas, teniendo en cuenta todas las ubicaciones y días estudiados, se obtendrá el valor del coeficiente  $\alpha$  para cada caso concreto. A partir de todos los valores del coeficiente obtenidos, se establecerá el porcentaje de los casos en los que el coeficiente alcanza el valor unidad.

<b>Horizonte Temporal</b>	<b>WV</b>	<b>WH</b>	<b>Temp</b>
<b>0 horas</b>	91.08 %	90.49 %	86.31 %
<b>24 horas</b>	93.44 %	92.41 %	88.47 %
<b>48 horas</b>	95.02 %	94.68 %	90.20 %
<b>72 horas</b>	95.04 %	95.33 %	91.04 %

**Tabla 7.** Porcentaje de ajuste de la predicción frente a lo acontecido en la realidad.

En la tabla 7 se ha representado el porcentaje de casos en los que el coeficiente  $\alpha$  alcanza el valor unidad. Para ello, se han tenido en cuenta todas las ubicaciones y días estudiados, evaluando si el valor de cada una de las variables proporcionado por el reanálisis se encuentra contenido dentro del intervalo de valores definido para cada variable en cada uno de los horizontes temporales estudiados. Si dicho valor está contenido dentro del horizonte analizado, el coeficiente  $\alpha$  adquiere el valor unidad.

Tal y como se observa en la tabla 7, en la mayoría de los casos el coeficiente adquiere el valor unidad, por lo que el valor de cada variable proporcionado en el reanálisis sí se ajusta al intervalo de valores definido en los horizontes temporales. En base a las variables estudiadas, se observa que los porcentajes de las variables relacionadas con el viento son similares entre sí. La variable de temperatura proporciona unos porcentajes menores a los definidos por las variables de viento, por lo que, para esta variable, el valor del reanálisis se ajusta a los intervalos definidos por los horizontes en un número menor de casos.

En líneas generales, se observa cómo el ajuste del valor proporcionado por el reanálisis es mayor cuando mayor es el horizonte temporal estudiado. En el caso de horizontes temporales menores, los cuales definen un intervalo más acotado de valores que puede tomar la variable, el ajuste tiende a ser menor que en el caso de horizontes temporales mayores, los cuales definen unos intervalos de valores mayores.

## 6. CONCLUSIONES

---

En este trabajo se ha analizado la dispersión presente en la predicción meteorológica proporcionada por ECMWF, a través de los sistemas de predicción por conjuntos. A partir de los casos estudiados se han encontrado varios aspectos a destacar.

La dispersión en el viento tiene un efecto mayor en las aeronaves que la dispersión en la temperatura del aire. Se ha visto cómo las zonas en la que se definen mayores valores de dispersión coinciden con aquellas zonas en las que las variables adquieren mayores valores medios. Frente a ello, las zonas de menor dispersión coinciden con las zonas en las que las variables definen valores medios pequeños. Esto resulta válido para todas las variables estudiadas.

Existe una cierta correlación entre el valor de la dispersión y el valor medio de la variable, especialmente en el caso del viento, esperándose mayores dispersiones allá donde los vientos son mayores. Además, se ha observado un aumento de correlación entre el valor de la dispersión y el valor medio de la variable conforme aumenta el horizonte temporal analizado.

La dispersión crece con el horizonte de predicción. Se ha obtenido un crecimiento monótono de la dispersión para las variables estudiadas. En el caso de la dispersión media, se ha obtenido una tasa de crecimiento en la que aparece un valor de dispersión a 24 horas vista como el doble con respecto al que se tiene a 0 horas. De igual forma ocurre para los horizontes temporales de 48 y 72 horas vista, obteniéndose un valor de dispersión del triple y el cuádruple, respectivamente, respecto el valor de dispersión definido en el horizonte de 0 horas. Estos resultados son válidos con independencia de la variable estudiada.

Los comentarios anteriores son extensibles a todo el año, no apreciándose efectos estacionales destacables. A través de la realización del análisis sobre varios días a lo largo del año, no se aprecia ningún tipo de tendencia de los valores de dispersión que permita la apreciación de efectos relacionados con la época del año que se estudie.

Las predicciones hechas con anterioridad comprenden en un alto grado a las predicciones posteriores. Es decir, el intervalo de valores definido por la predicción para una variable y horizonte temporal concretos, normalmente queda contenido dentro del intervalo definido por un horizonte temporal mayor.

Las predicciones suelen contener a la realidad, que en nuestro caso se identifica con el reanálisis del pronóstico. Esto ocurre en mayor grado para el viento que para la temperatura, y para horizontes temporales mayores. Por lo tanto, para la temperatura sí parece que hace falta realizar una calibración para todos los horizontes temporales, mientras que para el viento solo sería conveniente para los horizontes temporales de 0 y 24 horas.

# REFERENCIAS

---

- [1] Rivas Rivas, Damián, Franco Espín, Antonio, Valenzuela Romero, Alfonso. Analysis of aircraft trajectory uncertainty using Ensemble Weather Forecasts. 7th European Conference for Aeronautics and Space Sciences. Milán, Italia. 2017
- [2] Vazquez, Rafael, Rivas Rivas, Damián, Franco Espín, Antonio. Stochastic analysis of fuel consumption in aircraft cruise subject to along-track wind uncertainty. Aerospace Science and Technology. 2017. Vol. 66. Pag. 304-314. 10.1016/j.ast.2017.03.027
- [3] Hernández, Eulalia, Valenzuela Romero, Alfonso, Rivas Rivas, Damián. Probabilistic Aircraft Conflict Detection and Resolution Considering Wind Uncertainty. 7th SESAR Innovation Days 2017. Belgrado, Serbia. 2017
- [4] Valenzuela Romero, Alfonso, Franco Espín, Antonio, Rivas Rivas, Damián. Sector Demand Analysis under Meteorological Uncertainty. Comunicación en congreso. 7th European Conference for Aeronautics and Space Sciences. Milán, Italia. 2017
- [5] <https://www.ecmwf.int>
- [6] Barkmaijer, J, Buizza, R., Kallen, E, Molteni, F, Mureau, R, Palmer, T N, Tibaldi, S, & Tribbia, 2012: 20 years of ensemble prediction at ECMWF. Newsletter n. 134, ECMWF, Shinfield Park, Reading RG2-9AX, UK, pg 16-30.
- [7] Hagedorn, R. (2008). Using the ECMWF reforecast data set to calibrate EPS forecasts. ECMWF Newsletter, 117, 8–13.
- [8] Molteni, F., Buizza, R., Palmer, T. N., & Petroliagis, T., 1996: The new ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 122, 73-119.
- [9] Tilmann Gneiting, 2014: Calibration of Medium-Range Weather Forecasts. Meteorology section of ECMWF Newsletter No. 142, pp. 12–16
- [10] Baran, S., & Lerch, S., 2015: Log-normal distribution based EMOS models for probabilistic wind speed forecasting. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 141, Issue 691, pg 2289-2299
- [11] Palmer, T., Buizza, R., Hagedorn, R., Lawrence, A., Leutbecher, M., & Smith, L., 2006: Ensemble prediction: a pedagogical perspective. Newsletter n. 106, ECMWF, Shinfield Park, Reading RG2-9AX, UK, pg 10-17.
- [12] Buizza, R., Miller, M., & Palmer, T. N., 1999: Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF Ensemble Prediction System. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 125, 2887–2908.

# GLOSARIO

---

EPS	Ensemble Prediction Systems
NWP	Numerical Weather Prediction
PDF	Probability Distribution Function
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EPSgram	Meteograma de Conjunto
WV	Viento meridional
WH	Viento zonal
Temp	Temperatura del aire