

# MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LA RACHA MÁXIMA MEDIANTE MODELOS DE ALTA RESOLUCIÓN

José Antonio LÓPEZ DÍAZ, María José MARTÍN GARCÍA  
Agencia Estatal de Meteorología AEMET  
[jlopezd@aemet.es](mailto:jlopezd@aemet.es), [mjmarting@inm.es](mailto:mjmarting@inm.es)

## RESUMEN

La delimitación precisa de zonas en las que se ha producido una Tempestad Ciclónica Atípica presenta considerables dificultades en nuestro país, debido a la escasez de observaciones de viento y a la complejidad de la orografía. Tal y como está reglamentado, uno de los fenómenos que definen dichas zonas es la aparición de rachas que superen el umbral de los 135 km/h.

Con el propósito de conseguir una estimación rápida de la racha máxima en tres segundos, intentado abarcar el mayor número de situaciones de viento extremo, se han desarrollado tres métodos basados en los cálculos obtenidos a través del modelo de flujo lineal LINCOM y de técnicas estadísticas que dan como resultado una estimación de campos de viento extremos y valores puntuales de racha máxima.

Esta modelización se incluye dentro de un conocido software llamado WASP Engineering, cuyo principal ámbito de aplicación se encuentra dentro del sector de la energía eólica.

El primero de los métodos calcula directamente el valor de la racha máxima a lo largo de un dominio de unas decenas de kilómetros, utilizando como entrada los valores de racha máxima registrados en las estaciones incluidas en dicho dominio. Los otros dos métodos utilizan unas climatologías basadas en distribuciones de Gumbel calculadas a partir de un registro largo, como mínimo siete años, de valores de racha máxima.

Para comprobar la efectividad de los tres métodos se ha realizado una serie de validaciones, utilizando los datos disponibles en el Banco de Datos de Climatología de la AEMet, y seleccionado situaciones de viento extremo registradas en diferentes ámbitos del territorio peninsular.

## ABSTRACT

The precise delimitation of areas where there has been an Atypical Cyclonic Storms (TCA) is a considerably difficult in our country due to the deficiency of wind observations and the complexity of the terrain. According to the Extraordinary Risk Regulation, one of the phenomena that define these areas is the occurrence of gusts exceeding the threshold of 135 km/h.

In order to get a quick estimate of the maximum gust in three seconds, cover as many situations of extreme wind, three methods have been developed based on calculations obtained from the linear flow model LINCOM and statistical techniques, obtaining as results an estimation of wind fields and extreme point of maximum gust values.

This modelling is included in well known software called WASP Engineering, whose main application is the wind energy sector.

The first of those methods calculates the value of the maximum gust over a domain of a few tens of kilometres, using as input the values of maximum gust recorded at the stations included in that domain. The other two methods use some Climates based on Gumbel distributions calculated from a long record, at least seven years, of maximum gust values.

It'll show some examples of the application of these techniques and its verification against observed data.

## 1. INTRODUCCIÓN

Una de las causas de Tempestad Ciclónica atípica contempladas en el Reglamento del Seguro de Riesgos Extraordinarios es que la racha máxima de viento supere el umbral de 135 km/h. La delimitación precisa de las zonas en que se cumple esta condición presenta considerables dificultades en nuestro país dada la escasez de observaciones de viento y la complejidad de la orografía. Estas dificultades se acentúan en algunas regiones, como por ejemplo la cornisa cantábrica, en que muchas observaciones están en cabos o prominencias de la costa en las que efectos locales producen valores en general muy altos del viento, y el tránsito entre los parajes costeros y los altos relieves de la Cordillera Cantábrica se produce en una distancia muy corta. Y es en estas zonas donde se presenta la mayor parte de situaciones de viento fuerte susceptibles de ser tipificadas como Tempestad Ciclónica Atípica.

Al objeto de mejorar las capacidades de AEMET en este problema se ha desarrollado un proyecto basado en la herramienta WASp del que se presentan en este trabajo algunos resultados y la descripción de los procedimientos desarrollados para la estimación de racha de viento máxima.

El WASP Engineering 0.2 (WEng) es un programa que permite estimar las velocidades extremas de viento medio en una determinada región geográfica por dos procedimientos.

El primero utiliza un único valor de *viento máximo medio en diez minutos*,  $VM_{10min}$ , registrado en una estación. A partir de este dato se puede obtener, entre otras cosas, la  $VM_{10min}$  y la dirección del viento en un punto cercano a dicha estación. Esta información se puede obtener a través de una tabla resumen o por medio de un mapa grid.

El segundo procedimiento intenta aprovechar la información climatológica disponible. Implica utilizar registros temporales largos de racha máxima en 3 segundos diaria,  $RM_{3s}$ , disponibles en el Banco de Datos de Climatología de AEMET. A partir de ese conjunto de datos se genera con el WEng una climatología asociada a una estación dada. Con esta

climatología y utilizando el valor de racha máxima registrado un día en la estación, se puede determinar la racha máxima en un punto cercano.

Estas dos vías dan lugar a tres métodos que permiten estimar la  $RM_{3s}$  en una localización donde no se tiene ningún registro, pero que está próxima a una estación meteorológica.

El Método Directo surge a partir de la primera vía de cálculo y los resultados que se obtienen son los Mapas de Viento y la  $RM_{3s}$  en una localización concreta. Por otro lado, los Métodos basados en Climatologías son dos: el de la Velocidad Ponderada sobre los Percentiles Observados y el del Percentil Ponderado sobre la Distribución Ponderada, y con ellos se obtiene una estimación de la  $RM_{3s}$  en una localización concreta.

## 2. CLIMATOLOGÍAS DE VIENTO EXTREMO

El WEng y el WASP Climate Analyst (WCA) son programas que pueden trabajar con series largas de valores de viento extremo. Para el ajuste a la distribución de estas series los dos programas utilizan una aproximación a la distribución de Gumbel consistente en una relación lineal entre las velocidades medias máximas y el logaritmo del tiempo de retorno. Esta información es lo que llamamos Climatología de Viento Extremo.

### 2.1 Climatologías de Viento Extremos Observadas

El WCA calcula las Climatologías de Viento Extremo Observadas, que son las climatologías asociadas a una estación utilizando las series de datos medidos. Además el WCA muestra la bondad del ajuste de esta distribución de Gumbel a la serie de velocidades máximas, ofreciendo una estimación de la incertidumbre en los cálculos.

De acuerdo con la ley de distribución de Gumbel, la relación entre las velocidades máximas de viento y las probabilidades empíricas acumuladas es aproximadamente lineal de acuerdo a la siguiente ecuación

$$U_i^{\max} = \beta_0 + \alpha \left[ -\ln \left( -\ln \frac{i - \frac{1}{2}}{N} \right) \right] \quad (1)$$

La relación entre la velocidad máxima de viento y el periodo de retorno es aproximada por el WCA por medio de

$$U^{\max}(T) = \beta_0 + \alpha \ln \frac{T}{T_0} \quad (2)$$

donde  $\alpha$  y  $\beta_0$  pueden determinarse mediante unas expresiones sencillas en las que intervienen los valores de velocidad máxima del viento;  $N$  es el número de valores en la secuencia y  $T_0$  es el período de tiempo elemental.

La expresión para calcular  $U$  en distintos periodos sería:  $U(T) = U(T_0) + \alpha \ln \frac{T}{T_0}$  (3)

El cálculo de la incertidumbre en la predicción del viento extremo para un determinado tiempo de retorno es estándar. El rango de incertidumbre puede representarse como dos curvas añadidas, tal y como se puede ver en la pantalla de vientos extremos:

$$U = U^{\max}(T) - \sigma(U^{\max}), \quad U = U^{\max}(T) + \sigma(U^{\max})$$

La incertidumbre se obtiene a partir de las siguientes expresiones:

$$\sigma(U) = \pi \sqrt{\frac{1 + 1.14k_T + 1.10kj_T^2}{6n}}, \quad (6)$$

siendo  $k_T = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \left[ -\ln \ln \left( \frac{T/T_0}{T/T_0 - 1} \right) + \gamma \right] \approx \frac{\sqrt{6}}{\pi} \left[ \ln \frac{T}{T_0} + \gamma \right]$ , ya que normalmente  $\frac{T}{T_0}$  es un valor alto.

## 2.2 Climatologías de Viento Extremos Locales

El WEng calcula Climatologías de Viento Extremo Locales, es decir, aquellas asociadas a puntos del espacio en los que no se dispone de registro de medidas de viento, a partir de una Climatología de Viento Extremo Observada de una estación.

El procedimiento que utiliza el WEng para determinar las Climatologías de Viento Extremos Locales se basa en el Método del Máximo Anual o Annual Maximum Method (AMM).

Si se tienen  $N$  máximos anuales del lugar de medida (velocidades medias de viento) clasificados en orden ascendente  $U_1, U_2, \dots, U_N$ , sobre un terreno llano de rugosidad  $z_{0,1}$  a la altura  $z_1$ , el objetivo será determinar qué viento existirá sobre un terreno llano de rugosidad  $z_{0,2}$  a la altura  $z_2$  suponiendo que el lugar 2 está en la misma región climática que el 1.

Para cada máximo  $U_i$  se procede de la siguiente forma:

- 1) Se busca el vector fricción  $u_1^*$  a través del perfil logarítmico del viento en la *localización 1*, ec. (7).
- 2) Con la velocidad de fricción se puede obtener el valor de viento geostrófico  $u_g$  utilizando la ley de arrastre, ec. (8).
- 3) Se realiza el paso anterior pero a la inversa para determinar la velocidad de arrastre en la *localización 2*  $u_2^*$ .
- 4) Finalmente, con el perfil logarítmico, se determina el vector viento con la en la *localización 2*.

$$U(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left( \frac{z}{z_0} - \psi \right) \quad (4)$$

$$u_g = \frac{u^*}{\kappa} \sqrt{\left( \ln\left( \frac{u^*}{f \cdot z_0} \right) - A \right)^2 + B^2} \quad \sin \alpha = -\frac{B \cdot u^*}{\kappa \cdot u_g} \quad (5)$$

donde:  $u_g$  es el módulo del viento geostrófico,  
 $u^*$  es la velocidad de fricción,  
 $\kappa$  es la constante de Von Karman,  
 $z_0$  es la longitud de rugosidad,  
 $\psi$  es una función que depende de la estabilidad,  
 $f$  es el parámetro de Coriolis,  
 $A$  y  $B$  son unas constantes empíricas, que para condiciones neutras,  $A = 1.8$  y  $B = 4.5$ , y  
 $\alpha$  es la dirección del viento geostrófico.

Como ya se ha dicho, el WEng aplica el AMM partiendo de la base de que tanto el punto 1 (el de la estación) como el 2 (la localización de interés), se encuentran en la misma región climática.

### 3. PROCEDIMIENTOS DE ESTIMACIÓN DE RACHA MÁXIMA

#### 3.1 Método Directo

Estos valores se calculan a partir de los resultados de  $VM_{10\min}$  obtenidos directamente con el WEng en una localización concreta, y utilizando los vientos registrados en las estaciones meteorológicas.

Comprende los siguientes pasos:

- Transformar la  $RM_{3s}$  medida en cada estación en  $VM_{10\min}$  en m/s a través de un factor de rafagosidad que depende de la longitud de rugosidad.
- Después se utiliza el WEng para calcular el valor de la  $VM_{10\min}$  en el punto problema.
- Se combinan distintas estimaciones de  $VM_{10\min}$  en el punto problema (a partir de distintos puntos base con datos) promediando utilizando el inverso de la distancia.
- Por último, con ese valor de  $VM_{10\min}$  promedio, se hace de nuevo la transformación a  $RM_{3s}$  en km/h por medio del factor de rafagosidad, utilizando la longitud de rugosidad del terreno en el que está situada la localización.

#### 3.2 Métodos basados en las Climatologías

Los Métodos basados en las Climatologías utilizan una serie larga (mínimo siete años) de medidas de  $RM_{3s}$  registradas en una estación. Con esta serie se puede calcular la Climatología Observada de Viento Extremo (OEWEC), utilizando el programa WASP Climate Analyst (WCA).

En una primera fase se deberá transformar la serie de  $RM_{3s}$  en km/h en una serie de  $VM_{10\min}$  en m/s, utilizando para ello el factor de rafagosidad, ya que el WCA necesita como entrada ese tipo de magnitud y con esas unidades.

Como ya se ha explicado en el apartado anterior, una OEWC es un resumen estadístico de la  $VM_{10min}$  máxima asociado a una estación meteorológica. Este resumen consiste en unas expresiones que relacionan de manera lineal la velocidad media máxima y el logaritmo del tiempo de retorno.

La relación de linealidad no es otra cosa que una aproximación de la distribución de Gumbel (1) para tiempo de retornos largos (2).

$$F(v) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{v-\xi}{\alpha}\right)\right] \quad (1) \quad T(v) = \frac{1}{1-F(v)} \quad (2)$$

de manera que despejando  $v$  y poniéndolo en función de  $T$  se obtiene la siguiente aproximación:

$$v = \beta - \alpha \cdot \ln(0.1) + \alpha \cdot \ln(T) \quad (3) \text{ siendo } \beta \text{ el valor de } v \text{ para } T = 0.1.$$

El motivo por el que se ha escogido ese valor del  $T$  es porque la información que se incluye en las OEWC viene representada en una gráfica como la que se presenta en la Figura 2., en el que el eje de ordenadas se sitúa en la abscisa  $T = 0.1$ . Según este ejemplo, el valor de  $\beta = 18,9$  y el de  $\alpha = 2,74$ .

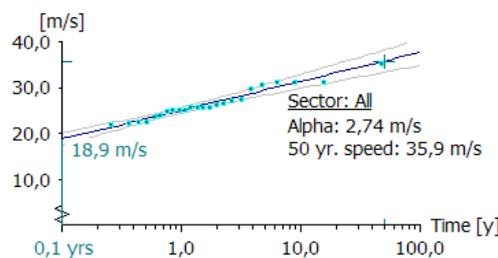


Fig.1. Relación lineal entre la velocidad media y el tiempo de retorno.

Hay que señalar que estos parámetros están asociados a todos los valores de  $VM_{10min}$  registrados en la estación, pero el WCA también realiza estos cálculos para cada sector de dirección, de forma que al final se dispone de trece relaciones: una para todos los datos y doce para cada sector en el que se divide la rosa de los vientos.

La descripción hecha para la OEWC sirve lo mismo para los otros tipos de Climatologías, es decir, para las Climatologías Regionales (REWC) y Locales (LEWC).

El siguiente paso es el transformar una OEWC en una REWC, que no es mas que un tipo de Climatología asociada a esa estación pero particularizada a unas determinadas condiciones, que son las de una altura de 10 m por encima de un terreno llano y con una longitud de rugosidad de 0.5 m. Esta transformación la realiza el WEng.

La REWC se calcula en el WEng como un paso intermedio al cálculo de las LEWC. Este paso se realiza porque en el caso de no disponer de una OEWC, bien porque no exista una estación meteorológica, bien porque aunque exista, su registro de medidas no

es lo suficientemente largo, los Atlas de Viento ofrecen la información del viento referida a las condiciones particulares de las RECW.

Por lo tanto, a partir de una OEWC asociada a una estación, se pueden obtener tantas LEWC como localizaciones y alturas sobre el nivel del suelo se quiera. La relación que se defina entre ellas y los valores medidos en una situación de viento fuerte, será la que determine el método de estimación.

Como se dijo antes se han desarrollado dos métodos para estimar rachas de viento máximas que utilizan esta capacidad del WEng de generar climatologías locales.

### 3.2.1 Método la Velocidad Ponderada sobre los Percentiles Observados

Este método consiste en hacer directamente un promedio con el inverso de la distancia de las velocidades que resultan de aplicar el percentil de cada estación, obtenido al sustituir en su OEWC un valor medido de  $VM_{10min}$ , en la LEWC correspondiente.

En el siguiente esquema (Figura 3.) se explica el Método de la Velocidad Ponderada en tres pasos considerando dos estaciones con datos, **A** y **B**, y un punto problema o localización **X**:

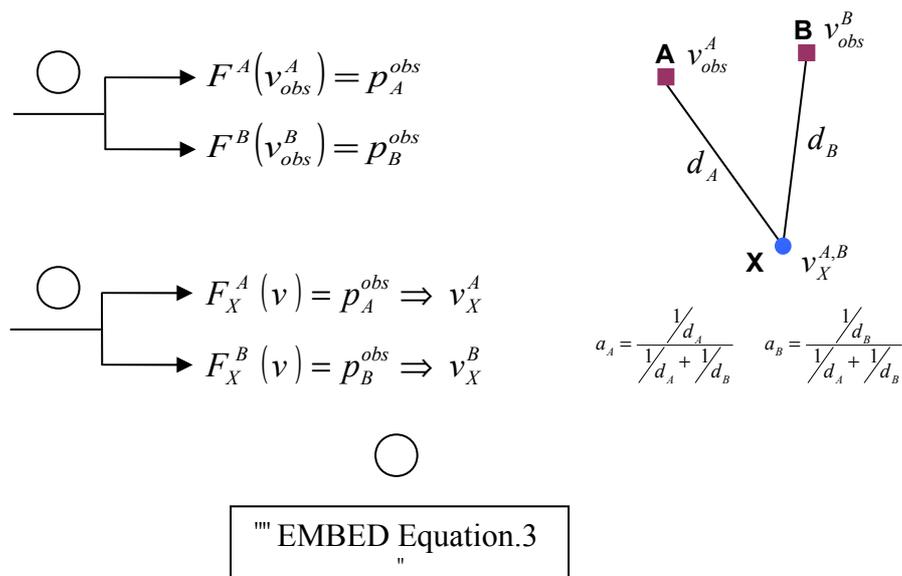


Figura 2. Método de la Velocidad Ponderada sobre los Percentiles Ponderados

Por un lado, se tienen las OEWC asociadas a cada estación meteorológica. Por otro, cuando se ha producido una situación de viento fuerte, se tiene un valor de  $RM_{3s}$  en cada estación, que a través del factor de rafagiosidad se transforma en  $VM_{10min}$ .

Utilizando la expresión de la OEWC asociada al sector de dirección en el que se ha medido la  $RM_{3s}$ , se puede obtener la probabilidad acumulada correspondiente a dicha velocidad. Si esto se realiza con todas las estaciones del dominio (cada una con su OEWC), se obtiene un conjunto de probabilidades acumuladas, tantas como estaciones meteorológicas con dato (paso  $\odot$ ).

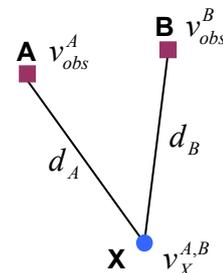
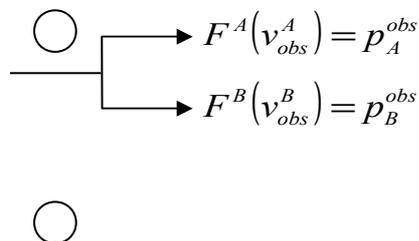
La probabilidad acumulada de cada estación se utilizará para determinar la  $VM_{10min}$  en una localización, utilizando para ello la LEWC que se ha deducido a partir de la OEWC de dicha estación, es decir, con la probabilidad acumulada se halla el percentil correspondiente de la LEWC (paso ○). Hay que tener en cuenta que la dirección en que se aplica la LEWC corresponderá a la dirección estimada por el Método Directo según esa estación en la localización.

Por lo tanto, se tendrá un conjunto de  $VM_{10min}$  que coincide en número con la cantidad de estaciones meteorológicas con dato, de forma que la  $VM_{10min}$  final será el promedio de todas ellas utilizando el inverso de la distancia (paso ○). Por último, con el factor de rafagosidad propio de la zona del punto problema, se obtiene la  $RM_{3s}$  estimada en la localización.

### 3.2.2 Método del Percentil Ponderado sobre la Distribución Ponderada

Con este Método se trabaja directamente con las distribuciones de cada estación, definiéndose una *distribución ponderada* en cada punto problema o localización promediando las distribuciones obtenidas a partir de cada estación con dato con el inverso de la distancia.

Al igual que con el anterior método, se muestra un esquema del procedimiento a seguir con este método para el caso de dos estaciones **A** y **B** y un punto problema **X**:



$$a_A = \frac{1/d_A}{1/d_A + 1/d_B} \quad a_B = \frac{1/d_B}{1/d_A + 1/d_B}$$

$$p_X^{A,B} = a_A \cdot p_A^{obs} + a_B \cdot p_B^{obs}$$

" EMBED Equation.3 "

Fig. 3: Método del Percentil Ponderada sobre la Distribución Ponderada

El paso (1) es idéntico al del anterior método. En el paso (2) se promedian las probabilidades acumuladas obtenidas en el paso (1) con el inverso de la distancia.

El siguiente paso consiste en definir una *Distribución Ponderada* en el punto problema promediando las LEWC con el inverso de la distancia (paso (2)). El resultado que se obtiene con una distribución así definida cuando se sustituye un valor de  $VM_{10min}$ , es el de una probabilidad acumulada promedio asociada a dicha velocidad utilizando para ello las Climatologías Locales.

El último paso (paso (3)) consiste en hallar el percentil de la *Distribución Ponderada* que corresponde a la probabilidad acumulada del paso (2). Este paso se realiza probando con varios valores de la velocidad en la *Distribución Ponderada* hasta que se encuentra la probabilidad buscada. Una vez que se ha dado con la  $v_X^{A,B}$ , se obtiene el valor de la  $RM_{3s}$  estimada.

#### 4. EJEMPLO DE VERIFICACIÓN

A continuación se muestra como ejemplo de validación el realizado para la situación del 03 Octubre 2006 en las estaciones Santander (Sa), Parayas (Pa), San Vicente (SV) y Ontón (On). En ese día se obtuvieron rachas máximas superiores a los 110 km/h en el oeste de la costa cantábrica, registrándose los valores más altos en las estaciones de Santander C. y Machichaco – Faro, donde se alcanzaron los 161 y 124 km/h respectivamente.

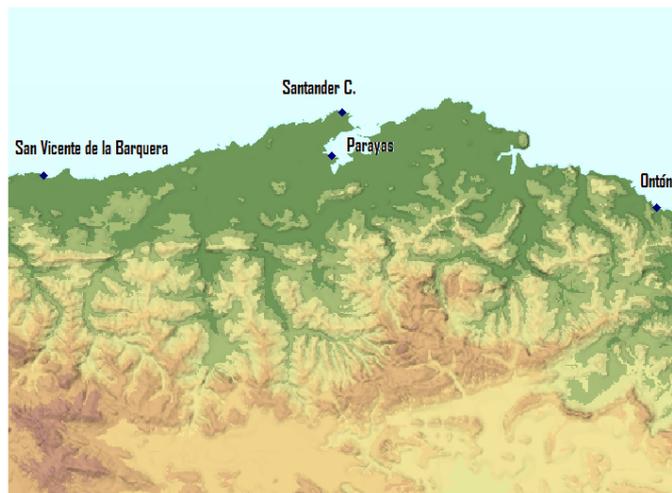


Fig. 4: Ubicación de las Estaciones Meteorológicas utilizadas en la verificación.

La relación entre la  $VM_{10min}$  y  $RM_{3s}$  es parecida en todas las estaciones, pero hay que destacar que los datos registrados en Ontón, que es la estación más alejada) son muy diferentes al resto de estaciones, no sólo en magnitud (64 km/h frente a los 147 km/h de Santander), sino también en la dirección ( $300^\circ$  frente a los  $270^\circ$  del resto de estaciones).

También existe una diferencia aproximada de una hora en el momento de registro de la  $RM_{3s}$  en Ontón y resto de estaciones (para la  $VM_{10min}$  esa diferencia es de tres horas).

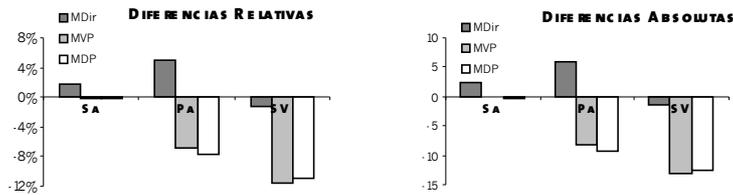


Fig. 5: Gráficos con las diferencias absolutas y relativas.

Lo más importante que hay que destacar de los tres métodos son las grandes diferencias (tanto relativas como absolutas) que se han obtenido para la estación de Ontón. Debido a las características tan diferentes registradas en la estación de Ontón dentro de la misma situación de viento fuerte y a la vista de los resultados obtenidos en la verificación, se ha realizado una nueva verificación de los tres métodos utilizando únicamente las estaciones de Santander, Parayas y San Vicente.

## 5. CONCLUSIONES

Los métodos descritos han demostrado ser útiles para conseguir una estimación a alta resolución en dominios del orden de unas pocas decenas de kilómetros de la racha máxima de viento en situaciones de viento muy fuerte. La simplicidad de los modelos subyacentes hace que sean además de fácil y rápida aplicación.

Los resultados provisionales de verificación indican que el comportamiento del MD y el del MPP es similar, mientras que el MVP es algo inferior.

Los peores resultados en las validaciones corresponden a los casos en los que la hora de registro de la  $RM_{3s}$  es muy diferente en las distintas estaciones. Esto también sucede si existe mucha diferencia temporal entre la  $RM_{3s}$  y la  $VM_{10min}$  registradas en una misma estación.

También en zonas de orografía especialmente compleja, como en los Pirineos o Picos de Europa, se ha constatado que los métodos descritos tienen un comportamiento peor.

## 6. REFERENCIAS

- POUL ASTRUP, NIELS OTTO JENSEN, TORBEN MIKKELSEN). Risø National Laboratory (1996). Surface Roughness Model for LINCON.
- ERIK L. PETERSEN, NIELS G. MORTENSEN, LARS LANDBERG, JØRGEN HØJSTRUP AND HELMUT P. FRANK. (1997). Wind Power Meteorology.
- POUL ASTRUP, SØREN E. LARSEN). Risø National Laboratory, (1999). WAsP Engineering Flow Model for Wind over Land and Sea.
- JAKOB MANN, POUL ASTRUP, LEIF KRISTENSEN, OLE RATHMANN, PETER HAUGE MADSEN & DUNCAN HEATHFIELD. (2002). WAsP Engineering DK.

JAKOB MANN, SØREN OTT, BO HOFFMANN JØRGENSEN & HELMUTH P. FRANK. Risø National Laboratory (2002). WAsP Engineering 2000.  
NIELS G. MORTENSEN, LARS LANDBERG, IB TROEN, ERIK L. PETERSEN, OLE RATHMANN AND MORTEN NIELSEN. (2004). WAsP Utility Programs.