

Mejora del procedimiento operativo de AEMET para la estimación de las áreas con rachas máximas de viento

M. Rodrigo^{1,2} y J. A. López²

¹Consorcio de Compensación de Seguros (CCS), Paseo de la Castellana, 32, 28046, Madrid

²Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Calle Leonardo Prieto Castro, 8, 28040, Madrid

Recibido: 16-V-2013 – Aceptado: 23-X-2013 – Versión original

Correspondencia a: ccseguros@aemet.es

Resumen

El CCS (Consorcio de Compensación de Seguros) es el organismo nacional que proporciona seguros contra fenómenos meteorológicos que implican un riesgo extraordinario. Uno de los riesgos extraordinarios cubiertos por el CCS se refiere al viento extraordinario, definido como aquel que da lugar a rachas que superen los 120 km h^{-1} . Desde hace unos 2 años, el procedimiento operativo llevado a cabo en AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) para la estimación de las áreas con rachas máximas de viento utiliza la técnica de interpolación del krigeado universal que se apoya en los datos de observación. Las variables externas que participan en la interpolación son la elevación del terreno, la distancia al mar y la salida del modelo HIRLAM 0,05 del campo de racha máxima. El objetivo del procedimiento es delimitar las zonas con rachas máximas de viento que excedan el límite de 120 km h^{-1} . En el transcurso de investigaciones previas, enfocadas al estudio de la precisión dada por la introducción del modelo HIRLAM para esta técnica de estimación, se llevaron a cabo diferentes análisis de validación. Estas validaciones mostraron un sesgo negativo sistemático para la estimación de valores altos de racha máxima, lo que implica una subestimación de las rachas mediante el procedimiento operativo. En este trabajo se presenta un nuevo procedimiento de interpolación que proporciona una mejora significativa. El sesgo se reduce aproximadamente un 60% para aquellas estaciones que presentan rachas máximas de viento por encima de los 80 km h^{-1} . La nueva metodología combina dos campos de interpolación. El primero se obtiene al aplicar el actual método operativo e incluye todos los datos de observación. El segundo se obtiene de manera similar pero usando sólo los valores de observación de las estaciones meteorológicas que presentan valores altos de racha máxima. La combinación de ambos campos se basa en una ponderación realizada en cada punto de grid y que depende de la densidad total de observaciones según la región.

Palabras clave: racha máxima, tempestad ciclónica atípica, riesgo extraordinario, métodos de interpolación, validación

1 Introducción

Los fenómenos meteorológicos extremos en ocasiones pasan desapercibidos pero con cierta frecuencia se hacen patentes por la envergadura de las circunstancias, originando un impacto en la sociedad con sus correspondientes consecuencias. Además, el carácter catastrófico de un fenómeno no depende exclusivamente del valor extremo que ha tomado el elemento climático, influyen además otras particularidades tales como la distribución de la población o las caracterís-

ticas geomorfológicas, entre otras muchas (García-Legaz y Valero, 2003).

El CCS es el organismo nacional que tiene por objeto, en relación con el Seguro de Riesgos Extraordinarios, indemnizar en la forma establecida por el reglamento correspondiente, y en régimen de compensación, las pérdidas derivadas de acontecimientos extraordinarios acaecidos en España y que afecten a riesgos situados en ella.

A efectos de la cobertura de los riesgos extraordinarios, uno de los puntos expuestos hace referencia a la TCA, Tem-



Tabla 1. Validaciones (sesgos y errores relativos medios) para la estimación de racha máxima (RM) con el procedimiento operativo en AEMET y tomando sólo los valores de observación altos, iguales o superiores a 80 km h^{-1} ($RM^{Obs} \geq 80 \text{ kmh}^{-1}$).

TCA (Tempestad Ciclónica Atípica)	Promedio	
	Sesgo (km h^{-1})	Errores Relativos (%)
20100113a15	-7	16
20100227a28	-4	16
20111023a27	-17	21
20111112a14	-13	19
20111215a17	-8	16
20120105a08	-20	24
20120202a05	-22	24
20120206a08	-13	20
20120415a17	-17	20
20120423a26	-15	19
20121027a28	-13	22
20121124a25	-10	17
20121213a16	-18	19
20130118a20	-7	16
20130123a24	-13	18
	-13 km h^{-1}	19%

pestad Ciclónica Atípica, tiempo atmosférico extremadamente adverso y riguroso por: ciclones violentos de carácter tropical, borrascas frías intensas con advección de aire ártico, tornados y vientos extraordinarios, en la forma que se definen por el Consorcio de Compensación de Seguros (2012). En dicha recopilación legislativa se determinan como vientos extraordinarios aquellos que presenten rachas que superen los 120 km h^{-1} , entendiéndose por racha el mayor valor de la velocidad del viento sostenida durante un intervalo de tres segundos.

El CCS solicita a AEMET informe sobre la posible existencia de TCA, en previsión de que se hubieran dado las circunstancias establecidas en el vigente reglamento, en su modalidad de vientos extraordinarios. La estimación de las zonas afectadas por este riesgo corresponde a AEMET, que viene utilizando una técnica geoestadística, el krigado universal, que se apoya, además de en las observaciones de racha máxima, en variables fisiográficas y en campos del modelo de predicción del tiempo HIRLAM. De este modo y una vez que el CCS disponga del informe definitivo de AEMET, este indemnizará los daños que se hubiesen producido a personas y bienes asegurados, en la forma establecida, en aquellas zonas en las que los vientos presentaron o pudieron presentar, con un alto grado de probabilidad, rachas que superen el umbral de velocidad citado.

En el transcurso de investigaciones previas, enfocadas principalmente al estudio de la introducción del modelo HIRLAM en esta técnica estadística, se llevaron a cabo diferentes análisis de validación. Para realizar estas verificaciones se utilizaron los datos disponibles en el Banco de Datos de Climatología de AEMET y de los Servicios Meteorológicos Externos de Cataluña, País Vasco, Navarra, La Rioja y Galicia. También se utilizaron las salidas del HIRLAM $0,05^\circ$,

tomando el valor más alto del período en estudio del campo de racha máxima de las cuatro pasadas diarias de menos alcance. Las variables externas que van a condicionar la interpolación son la elevación del terreno y la distancia a la costa.

Las validaciones se realizan para situaciones concretas de TCA y sobre una serie de estaciones de observación seleccionadas aleatoriamente. Esta selección es fija para cada uno de los casos de TCA escogidos y se utiliza para validar los distintos procedimientos, permitiendo, de este modo, examinar los métodos en estudio y valorar las posibles mejoras introducidas.

El objetivo de este trabajo es mejorar y optimizar el procedimiento actualmente operativo en AEMET para la estimación de los vientos extraordinarios con el propósito de delimitar geográficamente las áreas de afectación de las posibles existencias de TCA por racha máxima de viento. La delimitación precisa de las zonas en que se cumple la condición presenta considerables dificultades en nuestro país dada la escasez de observaciones de viento y la complejidad de la orografía. Además, la situación de nuestro país en la zona de latitudes medias (a excepción de las Canarias), rodeado por un océano al oeste y por el mar Mediterráneo al este, con una orografía de gran complejidad, hace que la descripción de las situaciones susceptibles de producir vientos fuertes sea una labor nada sencilla.

En el trabajo se describe una modificación de la técnica empleada para la estimación de las zonas de racha de viento extrema que mejora significativamente el sesgo.

2 Metodología operativa

Las estimaciones realizadas por AEMET para delimitar las zonas en que se ha superado la racha de viento de

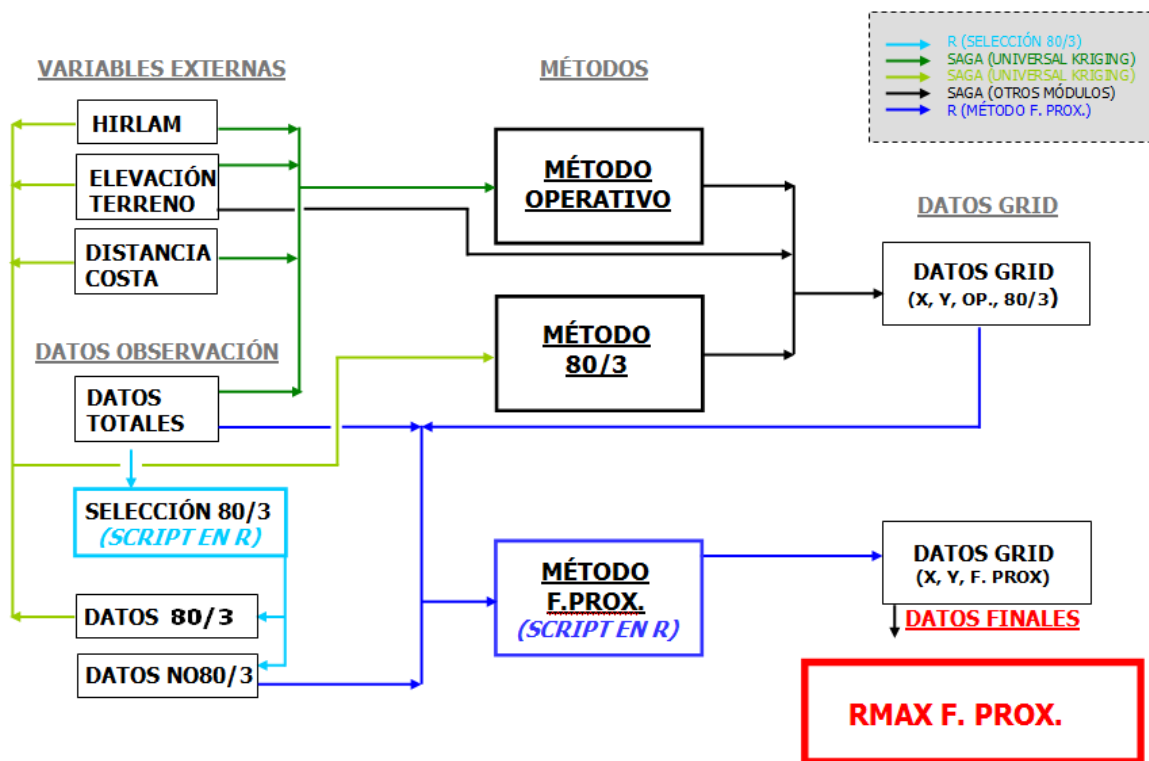


Figura 1. Esquema de la operatividad del nuevo procedimiento combinado mediante función de proximidad.

120 km h⁻¹ utilizan una técnica de interpolación geoestadística, el krigeado, que se basa en considerar las observaciones como una realización de un campo aleatorio teórico y en el que se supone que se cumple la estacionariedad, es decir, la invarianza de los momentos de segundo orden frente a desplazamientos. Esto permite caracterizar la estructura de momentos de segundo orden mediante una función de un solo argumento (espacial), que en el krigeado es el semivariograma, similar a la covarianza sin centrar. El krigeado postula un estimador de campo en un punto cualquiera como una combinación lineal de las observaciones en el resto de los puntos debidamente ponderadas. Para determinar los pesos se busca que el estimador sea insesgado y que su varianza sea mínima (Samper y Carrera, 1990).

Existen varios tipos de krigeado según las hipótesis adicionales que se admitan. El krigeado universal postula un modelo de tendencia lineal, de tal forma que la esperanza matemática del valor del campo aleatorio en un punto cualquiera se expresa como una combinación lineal de los valores que toman varias funciones deterministas auxiliares en ese punto. Esto permite la incorporación de efectos de variación suave en la interpolación geoestadística (Burrough y McDonnell, 1998).

En concreto en AEMET se usan como funciones deterministas auxiliares en el krigeado universal la elevación del terreno, la distancia al mar y la salida del modelo HIRLAM

Tabla 2. Factor de mezcla. Método F. Proximidad. Valores que toman los parámetros en las validaciones previas realizadas con el nuevo método para su elección.

$-EXP$	constante	-2
		10
	constante	5
		2,5
$F_{esc} (km)$	$F_{escMax} (km)$	100
		$197,5 \times 10^{-3}$
	variable	$141,0 \times 10^{-3}$
	$cc (adim.)$	$84,6 \times 10^{-3}$
	$R (km)$	100

del campo de racha máxima para el período en estudio. La estructura del semivariograma usada se especifica sin “efecto pepita” de tal forma que el estimador del krigeado es exacto, esto es, en los puntos con observación el valor estimado coincide con el observado.

La idea de desarrollar una modificación de la técnica operativa anteriormente descrita surgió como consecuencia de los resultados obtenidos en la realización de estudios de verificación.

Para efectuar las validaciones se distinguen 15 situaciones de TCA que pretenden abarcar fenómenos ocurridos

Tabla 3. Comparación de las validaciones realizadas con el procedimiento operativo y el nuevo procedimiento para los diferentes valores de los parámetros teniendo en cuenta rachas máximas de observación elevadas ($RM^{Obs} \geq 80 \text{ km h}^{-1}$). Valores medios para 5 TCA.

Procedimiento	Operativo	F. Proximidad					
		F_{esc} (cte)			F_{esc} (vble)		
		F_{esc} (km)			$cc(adim.) \times 10^{-3}$		
Sesgos medios (km h^{-1})	-10	10	5	2,5	197,5	141,0	84,6
Errores relativos medios (%)	17	-7	-5	-3	-5	-4	-2
		15	14	14	14	14	13

Tabla 4. Comparación de las validaciones (sesgos medios, km h^{-1}) realizadas con el procedimiento operativo y el nuevo procedimiento de función proximidad, teniendo en cuenta rachas máximas de observación elevadas (izquierda) y todos los valores de las rachas máximas de observación (derecha).

TCA	$(RM^{Obs} \geq 80 \text{ km h}^{-1})$		$(TODAS RM^{Obs})$	
	OP.	PROX.	OP.	PROX.
20100113a15	-7	0	1	11
20100227a28	-4	1	1	10
20111023a27	-17	-6	-1	11
20111112a14	-13	-6	-1	12
20111215a17	-8	0	-1	12
20120105a08	-20	-8	0	11
20120202a05	-22	-11	0	14
20120206a08	-13	-6	-1	11
20120415a17	-17	-7	-1	15
20120423a26	-15	-9	0	7
20121027a28	-13	-6	0	13
20121124a25	-10	-3	0	11
20121213a16	-18	-7	0	11
20130118a20	-7	-1	1	13
20130123a24	-13	-4	2	13
PROMEDIO	-13 km h^{-1}	-5 km h^{-1}	0 km h^{-1}	11 km h^{-1}

recientemente para diferentes áreas geográficas y con extensiones, en cuanto a su repercusión, de diversas dimensiones.

Posteriormente se realiza una selección, aleatoria y sin reemplazo, de las estaciones de observación de las que se dispone para cada una de las TCA. Dichas estaciones son eliminadas antes de realizar la interpolación y, de esta manera, podremos analizar las diferencias existentes entre los valores estimados y los observados. Se escogen un 20% del total de las estaciones de observación, para cada una de las situaciones, de manera que son estos valores los que entran en el estudio. Esta selección aplica el porcentaje por zonas, para asegurar una cobertura espacial en los datos de observación, y por un límite en el valor de racha máxima (se toma de referencia el valor de 80 km h^{-1}), para asegurar un número de estaciones para validar con valores de racha máxima altos, pues son los de nuestro interés principal.

Todas estas condiciones son programadas en R (R Core Team, 2013), lenguaje y entorno de programación para análisis estadístico y gráfico, obteniendo un script en el que se especifican los parámetros fijados: porcentaje del 20% y límite del valor de racha máxima de 80 km h^{-1} (Venables y Ripley, 2005).

Para realizar el análisis de las validaciones de las TCA elegidas calculamos el sesgo medio, que muestra la diferencia entre el valor estimado y el observado (Ecuación 1), y el error relativo medio, teniendo en cuenta la diferencia anterior pero en valor absoluto (Ecuación 2).

$$Sesgo\ medio = RM^{Est} - RM^{Obs} \tag{1}$$

$$Error\ relativo\ medio = \left| \frac{RM^{Est} - RM^{Obs}}{RM^{Obs}} \right| \cdot 100 \tag{2}$$

donde RM es el valor de racha máxima observado (superíndice Obs) o estimado (superíndice Est), ambos en km h^{-1} .

Los estudios de verificación ponen de manifiesto que, en el rango de velocidades de racha de viento máxima con valores altos, que son los de interés a efectos de cobertura del CCS, existe un importante sesgo negativo en la estimación del krigeado universal. Para el caso concreto de velocidades de racha máxima observadas superiores a 80 km h^{-1} , y para un conjunto de 15 situaciones de viento fuerte estudiadas, se obtuvo un valor medio del sesgo en la verificación de -13 km h^{-1} (Tabla 1).

Tabla 5. Comparación de las validaciones (errores relativos medios, %) realizadas con el procedimiento operativo y el nuevo procedimiento de función proximidad, teniendo en cuenta rachas máximas de observación elevadas (izquierda) y todos los valores de las rachas máximas de observación (derecha).

TCA	$(RM^{Obs} \geq 80 \text{ km h}^{-1})$		$(TODAS RM^{Obs})$	
	OP.	PROX.	OP.	PROX.
20100113a15	16	13	23	31
20100227a28	16	15	18	26
20111023a27	21	16	18	30
20111112a14	19	14	18	41
20111215a17	16	12	18	27
20120105a08	24	13	23	37
20120202a05	24	15	23	38
20120206a08	20	14	20	30
20120415a17	20	11	17	37
20120423a26	19	16	16	22
20121027a28	22	14	20	34
20121124a25	17	11	23	43
20121213a16	19	13	20	32
20130118a20	16	12	19	32
20130123a24	18	11	18	31
PROMEDIO	19%	13%	20%	33%

Tabla 6. Tratamiento estadístico realizado sobre las 15 TCA en estudio que representa las diferencias relativas existentes entre ambos métodos teniendo en cuenta: áreas con rachas máximas mayores o iguales a 120 km h^{-1} , su extensión a municipios y la población total de estos municipios.

	Respecto	Área	Municipios	Municipios
		(por número)	(por población)	
<i>PROX.</i>	OP.	16%	-2%	-11%
<i>PROX. + OP.</i>	OP.	43%	27%	18%
<i>PROX. + OP.</i>	PROX.	23%	30%	32%

Los resultados de las validaciones presentan un sesgo sistemático negativo, para todos los casos de TCA, lo que significa que el método utilizado tiende a subestimar dichos valores extremos.

3 Metodología propuesta

El sesgo negativo, obtenido para valores altos de observación al utilizar el método operativo, se explica por el hecho de que el krigeado produce un estimador insesgado globalmente, pero al aplicarse sobre un rango particular de observaciones, como toda técnica de familia de las regresiones, acerca el estimador a la media. En nuestro caso se seleccionó un rango con valores de observación más alto que la media y por tanto cabe esperar dicho signo negativo.

De esta manera, se prueba a utilizar la misma técnica del krigeado universal pero usando sólo las observaciones de rango alto, las mayores o iguales a 80 km h^{-1} . Además, para asegurar una buena cobertura espacial, en las provincias (o zonas territoriales previamente fijadas) en que esta condición no garantice al menos 3 estaciones, se completa con los valo-

res de observación de mayor racha hasta que en cada provincia haya como mínimo 3 estaciones que participen en la interpolación.

Esta práctica (método 80/3), como cabe esperar, muestra una mejora sustancial en las mismas verificaciones y sobre el rango alto de velocidades. El sesgo se reduce y se presentan valores entorno a 2 km h^{-1} de media en cada situación.

El problema que presenta este método es que el campo interpolado sobreestima mucho en el resto del rango de observaciones y las zonas delimitadas de interés, rachas máximas iguales o superiores a 120 km h^{-1} , podrían extenderse al realizar las estimaciones. Esto es consecuencia de ignorar la información dada por las estaciones de observación que presenten rachas máximas con valores bajos cuya información, por otro lado, es esencial para realizar las estimaciones.

Procedemos a implementar todos los datos de observación combinando los dos campos de interpolación vistos hasta el momento, por un lado el utilizado actualmente, operativo, y por otro lado el que utiliza las observaciones de rango alto. Estas dos interpolaciones utilizan la misma

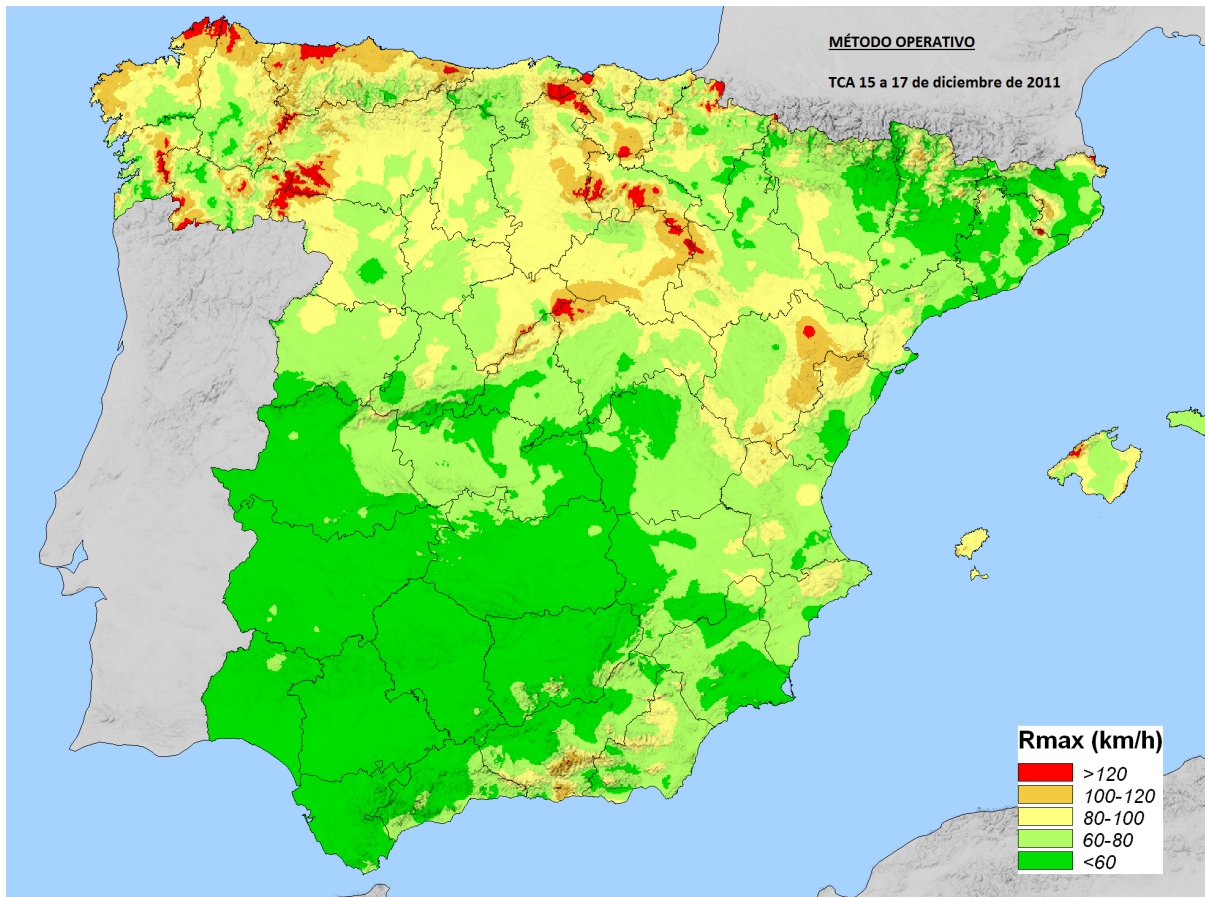


Figura 2. Estimaciones de racha máxima para la situación de TCA del 15 al 17 de diciembre de 2011 mediante el método operativo.

técnica geoestadística, el krigado universal, mientras que la combinación de ambas se realiza mediante la asignación de diferentes pesos a uno u otro campo para cada punto donde se estima el valor de racha máxima. Además, debido a la diferencia espacial existente entre el número de estaciones meteorológicas, se introduce un factor que tiene en cuenta la densidad total de observaciones utilizadas según las regiones.

Esta es la base del nuevo procedimiento, denominado “Función Proximidad”, que desarrollaremos a continuación.

3.1 Formulación F. Proximidad

Realizamos la combinación de las dos interpolaciones, la operativa y la restringida a más de 80 km h⁻¹ (Ecuación 3), asignando diferentes pesos en cada uno de los puntos de rejilla que forman el área total. Designamos por *F.PROX* el nuevo método combinado, por *OP* el krigado operativo sobre todas las observaciones y por *80/3* la interpolación con observaciones de más de 80 km h⁻¹ básicamente.

$$F.PROX(\vec{p}) = F_m(\vec{p}) \cdot OP(\vec{p}) + (1 - F_m(\vec{p})) \cdot 80/3(\vec{p}) \quad (3)$$

donde \vec{p} designa un punto arbitrario y F_m es un factor de mezcla entre 0 y 1. Este se obtuvo a partir de otro F'_m posi-

tivo según la transformación monótona (Ecuación 4):

$$0 \leq F_m(\vec{p}) = \frac{F'_m(\vec{p})}{1 + F'_m(\vec{p})} \leq 1 \quad (4)$$

Para determinar F'_m se tuvo en cuenta que la asignación de los pesos se realiza tomando las distancias entre cada uno de los puntos problema \vec{p} y los puntos \vec{s} que son las estaciones no utilizadas en el método 80/3, de manera que cuanto más próximos sean, mayor peso tendrá el método operativo y mayor valor presentará el factor de mezcla, y viceversa.

Además, dadas las diferencias en la densidad total de observaciones utilizadas según las regiones, se pensó que habría que incluir un factor de escala que tuviera en cuenta esa densidad local de observaciones (Ecuación 5).

$$F'_m(\vec{p}) = \sum_{\vec{s} \in NO80/3} \left(\frac{dist(\vec{p}, \vec{s})}{F_{esc}(\vec{p})} \right)^{-EXP} \quad (5)$$

donde el sumatorio se extiende a las estaciones \vec{s} no utilizadas en el método 80/3, el exponente $-EXP$ se tomó igual a -2 y el factor de escala F_{esc} tiene dimensiones de km para dar un factor de mezcla adimensional (Ecuación 6).

$$F_{esc}(\vec{p}) = \min \left[F_{escMax}, \frac{cc}{\sqrt{\rho_{local}(\vec{p})}} \right] \quad (6)$$

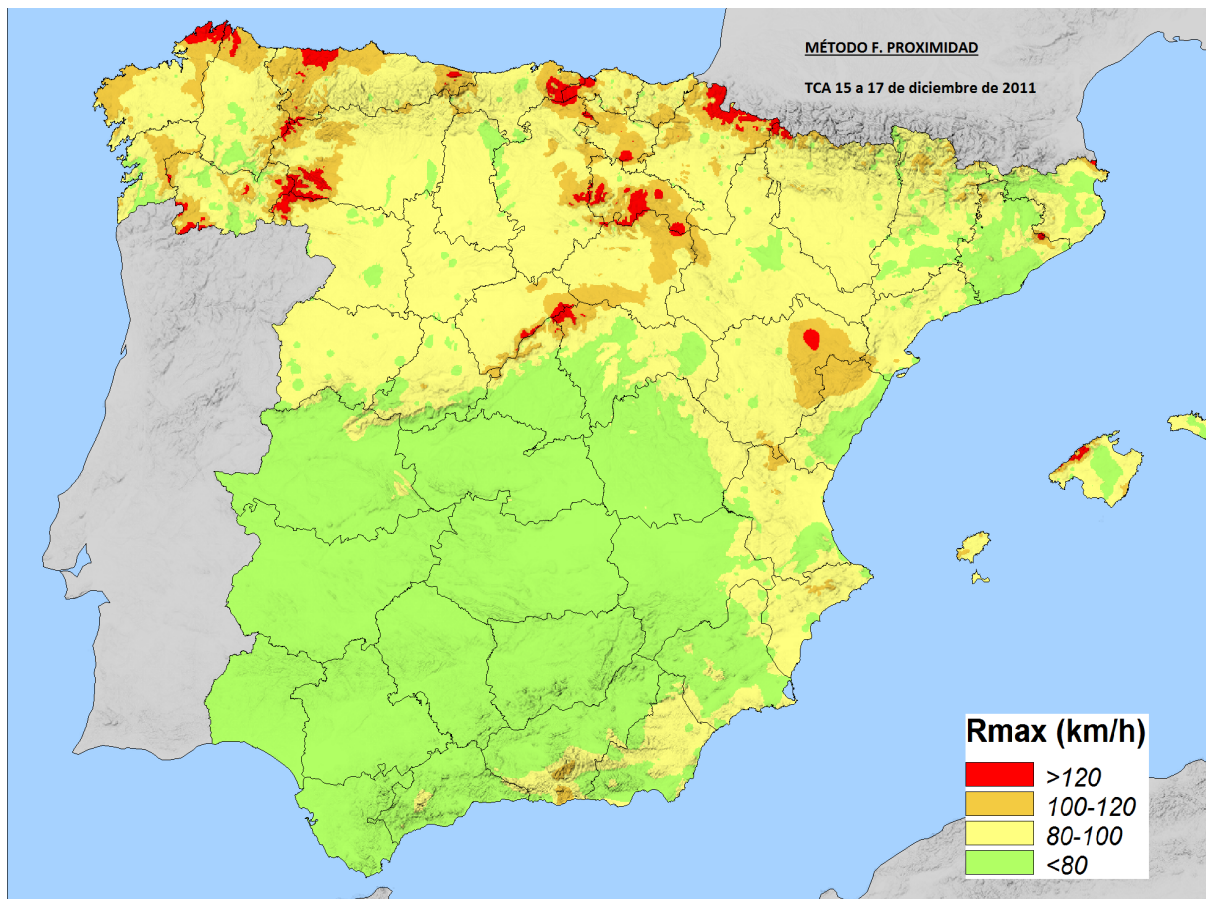


Figura 3. Estimaciones de racha máxima para la situación de TCA del 15 al 17 de diciembre de 2011 mediante el método combinado con función de proximidad.

El valor máximo del factor de escala tiene un límite predefinido, con cc una constante a fijar, y la densidad local de estaciones ρ_{local} que se determina localmente. La búsqueda de estaciones se realiza en un círculo $C(\vec{p}, R)$ alrededor del punto \vec{p} de radio R de 100 km (Ecuación 7).

$$\rho_{local}(\vec{p}) = \frac{n_{est} \in C(\vec{p}, R)}{\pi \cdot R^2} \quad (7)$$

De esta forma, en la hipótesis de densidad uniforme de estaciones alrededor de un punto \vec{p} cualquiera, una homotecia alrededor de \vec{p} de factor arbitrario r deja invariante F'_m (si no alcanza el límite F_{escMax}), pues las distancias se multiplican por r y la densidad local por r^{-2} .

Se realizan validaciones con diferentes valores de los parámetros mencionados para poder seleccionar los más adecuados (Tabla 2). La elección de estos valores concretos se ha acordado según el desarrollo de las diversas pruebas empíricas que ponen de manifiesto un buen comportamiento de la función teniendo presente, a su vez, un significado coherente y lógico para su aplicación.

Finalmente, la elección fue tomar el valor de la constante adimensional $cc = 84.6 \times 10^{-3}$ que se determinó por la

condición de que F_{esc} valga 1,5 km cuando en un círculo de radio 100 km existan 100 estaciones.

3.2 Operatividad F. Proximidad

Para obtener la estimación final mediante el nuevo método, con el objetivo de delimitar las zonas de racha máxima que superan los 120 km h^{-1} , se combinan dos interpolaciones diferentes, la operativa y la 80/3 (Figura 1). Estas utilizan una técnica geoestadística, el krigado universal, que se apoya en los datos de observación y toma otras variables externas. Posteriormente, se realizan las estimaciones mediante el método “función de proximidad” según la formulación dada en el apartado anterior.

Estas fórmulas son programadas en R (Venables y Smith, 2012) dando como resultado un único script que se ejecuta para obtener un fichero con la información final, las estimaciones de racha máxima mediante el nuevo método. Para ello es necesario disponer, por un lado, de los ficheros de entrada que contienen básicamente la información dada por los datos de observación y por otro lado, fijar los valores de los parámetros indicados anteriormente (Elosua, 2011).

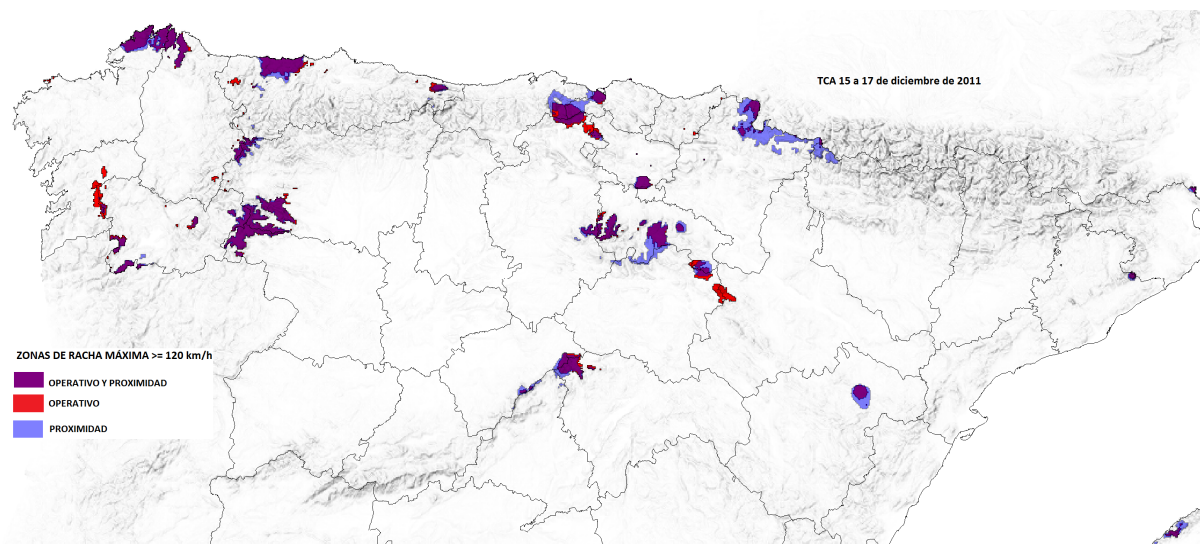


Figura 4. Para la situación de TCA del 15 al 17 de diciembre de 2011, delimitación de las rachas máximas de viento estimadas iguales o superiores a 120 km h^{-1} comparando ambos métodos, operativo y proximidad. Corte para la zona norte-centro de la península.

Por último, cabe señalar que los cálculos que efectúa el script se realizan matricialmente a través de una subrejilla perteneciente al grid total de resolución 1 km. Dicha subrejilla es tomada cada 5 puntos, tanto en dirección X como en dirección Y, permitiendo así una optimización en el tiempo de ejecución del programa. La asignación de valores, finalmente, para la rejilla original se realiza utilizando la técnica del vecino más próximo.

4 Resultados

El método propuesto, combinado con función de proximidad, introduce mejoras significativas para el objetivo fijado, la delimitación de las zonas con rachas máximas elevadas.

Las validaciones iniciales, para los diferentes valores de los parámetros, se realizan para 5 TCA (Tabla 3).

La elección final fue tomar el valor de la constante adimensional $cc = 84.6 \times 10^{-3}$, tal y como habíamos señalado anteriormente. Se aprecia que el sesgo medio para el método combinado sobre las 15 situaciones de viento fuerte analizadas y verificando con observaciones superiores a 80 km h^{-1} ha descendido al valor de -5 km h^{-1} , frente al -13 km h^{-1} del método operativo, una reducción entorno al 60% (Tabla 4).

Por otra parte, el resultado de las validaciones sobre todo el rango de observaciones muestra que la técnica operativa, que es insesgada teóricamente sobre este rango, da sesgos muy pequeños.

Los resultados de los errores relativos derivados de las validaciones (Tabla 5), calculados en valor absoluto (sin tener en cuenta el signo), también mejoran. Aunque esta mejora no sea tan significativa, los errores con el

nuevo método presentan resultados análogos para cualquiera que sea la situación, es decir, con el método combinado con función de proximidad obtenemos una dispersión algo menor, $s_{PROX.} = 2\%$ del nuevo método frente a $s_{OP.} = 3\%$ del método operativo.

Además, comparando los resultados obtenidos tomando sólo aquellas estaciones de racha máxima observada $\geq 80 \text{ km h}^{-1}$ con los resultados teniendo en cuenta el conjunto de todas las estaciones, sea cual sea su velocidad de racha máxima, observamos que frente a la mejora significativa que presenta el estudio de las validaciones para el primer caso, se produce un empeoramiento para el segundo. Por tanto, la mejora conseguida por el nuevo método que se centra en valores elevados de racha máxima es contrarrestada, como es lógico, con peores resultados en los sesgos y errores relativos cuando se tienen en cuenta también las velocidades bajas.

El análisis se completa con un tratamiento estadístico que engloba todas las TCA en estudio y que consiste en comparar las diferencias relativas que existen entre ambos métodos. Las variables que se tratan y que permiten cuantificar estas diferencias se refieren a la extensión del área que presenta rachas máximas $\geq 120 \text{ km h}^{-1}$, al número de municipios afectados según la condición anterior y por último al número de habitantes de los municipios resultantes (Tabla 6).

Al comparar el método combinado con función de proximidad respecto al método operativo se aprecia que el primero presenta una mayor cobertura en cuanto al área que delimita las rachas máximas mayores o iguales a 120 km h^{-1} . Por el contrario, al extender estas zonas a municipios, aplicación que suele efectuar el CCS para cubrir los daños ocasionados según su reglamento, se produce un descenso del 2%. Para intentar realizar un análisis

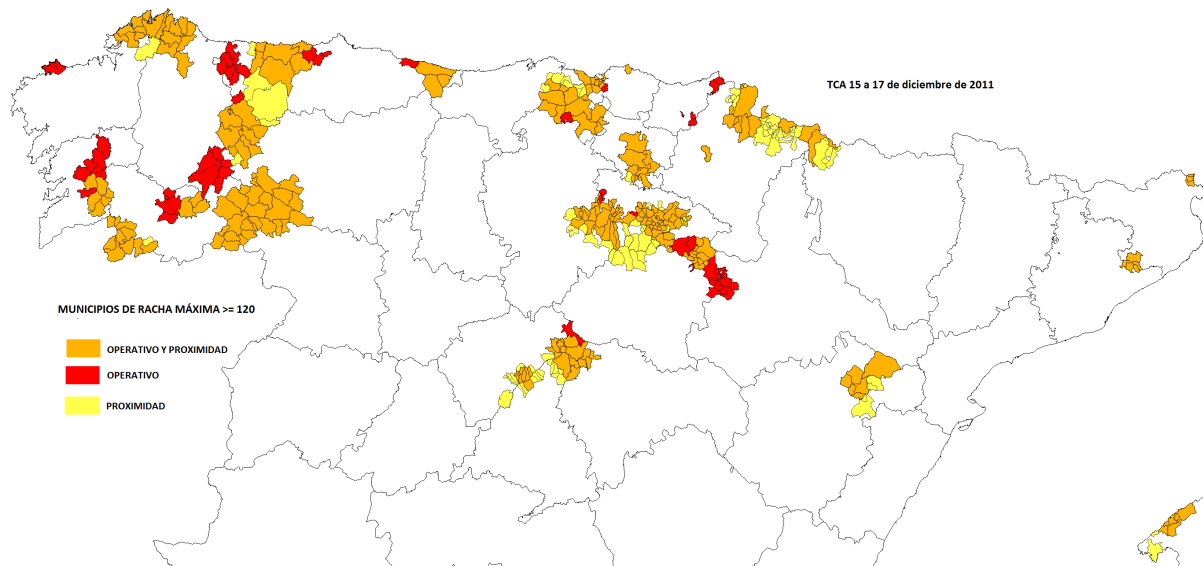


Figura 5. Para la situación de TCA del 15 al 17 de diciembre de 2011, aplicación de las áreas anteriores a municipios. Corte para la zona norte-centro peninsular.

más representativo de los costes que podría ocasionar una situación de TCA recurrimos a la población en la que hemos obtenido un descenso de un 11% del nuevo método respecto al operativo.

Además se aplican estos mismos cálculos para la cobertura conjunta de ambos métodos, es decir, tomando las áreas de racha máxima superiores a 120 km h^{-1} que estimen cualquiera de los procedimientos y esto se compara con cada uno de los métodos por separado, aunque nuestro interés especial se centre en la diferencia resultante respecto al operativo. Se procede de la misma manera para el número de municipios y población.

En este caso vemos que se produce un aumento considerablemente alto de las zonas que se cubren al aplicar el método conjunto frente al que cubre el método operativo, 43%, aunque de manera práctica es más representativo tener en cuenta la población, 18%, que ya no representa un valor tan elevado. En la interpretación de estos resultados es importante tener en cuenta que las TCA englobadas son muy diversas, con extensiones muy diferentes.

Las situaciones de TCA estudiadas se refieren al área de península y Baleares, aunque el procedimiento está activo también para las Islas Canarias. Se muestra un ejemplo concreto, del 15 al 17 de diciembre de 2011, en donde las zonas de interés (velocidad de racha máxima igual o superior a 120 km h^{-1}) están marcadas en rojo, (Figura 2 y Figura 3).

Ambos casos, método operativo y función de proximidad, tienen una extensión similar aunque es ligeramente superior para el nuevo método, tal y como habíamos visto en el tratamiento estadístico. Simplemente se presentan pequeñas modificaciones en la situación que ocupan aunque globalmente no incorporan ni eliminan grandes áreas que

podrían modificar la importancia de una misma situación de TCA.

En cambio se observan variaciones para los valores de racha máxima bajos, pues una precisión mayor en la estimación de valores altos conlleva el aumento de errores para el resto de velocidades. Como nuestro interés se centra en las zonas en que se produzcan rachas superiores a 120 km h^{-1} mostramos una comparación de dichas áreas (Figura 4) así como de su extensión a municipios (Figura 5), cobertura de aplicación del CCS.

5 Conclusiones

El nuevo procedimiento presentado, combinado con función de proximidad, introduce mejoras significativas respecto al procedimiento operativo en la estimación de rachas máximas elevadas, que son las que nos interesan pues el actual reglamento del CCS especifica el límite de 120 km h^{-1} a efectos de cobertura de riesgos extraordinarios. La principal es que reduce considerablemente, en un 60%, el sesgo negativo en la estimación de la racha máxima. También disminuye el error relativo y tiene menor dispersión.

Por otro lado, al igual que ocurría con el procedimiento operativo, el nuevo método es un estimador exacto, esto es, en los puntos con observación el valor estimado coincide con el valor observado, se conserva el valor real dado por la estación. Esto es consecuencia de que se basa en combinar el método operativo y el 80/3 descrito arriba, que siguen utilizando la técnica del krigeado universal sin “efecto pepita”. La estimación dada por el nuevo método en estos puntos es una mezcla de estos dos valores exactos

y, por tanto, su resultado también lo será. Este carácter de interpolador exacto es importante pues para el Consorcio es necesario respetar al máximo los valores observados ya que son los que tienen mayor fuerza legal.

El análisis estadístico que engloba todas las TCA muestra que las áreas delimitadas por la racha máxima $\geq 120 \text{ km h}^{-1}$ aumentan un 16% con el nuevo método frente al operativo, mientras que el número de municipios afectados por rachas $\geq 120 \text{ km h}^{-1}$ es prácticamente el mismo y la población que suman esos municipios disminuye un 11%.

Otra característica a tener en cuenta en el método propuesto se refiere a la operatividad de este. Se presenta de manera muy similar a la empleada hasta el momento utilizando, básicamente, la misma técnica estadística con las mismas herramientas, simplemente introduce la ejecución de ciertos scripts que son de fácil manejo. Además, la preparación de la información es idéntica y las estimaciones, con el nuevo método, se realizan sólo en un tiempo ligeramente superior al empleado para la evaluación con el método operativo.

Agradecimientos. Este trabajo surge gracias a la colaboración entre la Agencia Estatal de Meteorología y el Consorcio de Compensación de Seguros los cuales, junto a AT Sistemas, patrocinan el proyecto. Los autores desean agradecer el apoyo de muchas personas que pertenecen a estas organizaciones y que hacen posible estas investigaciones.

Referencias

- Burrough, P. A. y McDonnell, R. A., 1998: Principles of Geographical Information Systems, Oxford University Press, 333, ISBN-13 978-0-19-823365-7, ISBN-10 0-19-823365-5.
- Consorcio de Compensación de Seguros, 2012: Recopilación Legislativa, Edición de febrero de 2012, 202.
- Elosua, P., 2011: Introducción al entorno R, Universidad del País Vasco, 102, ISBN: 978-84-9860-497-9.
- García-Legaz, C. y Valero, F., 2003: Riesgos Climáticos e Impacto Ambiental, Ed. Complutense de Madrid, 356, ISBN: 84-7491-711-5.
- R Core Team, 2013: R: A language and environment for statistical computing, Technical report, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, <http://www.R-project.org>.
- Samper, F. J. y Carrera, J., 1990: Geoestadística. Aplicaciones a la hidrología subterránea, Ed. Complutense de Madrid, 484, ISBN: 84-404-6045-7.
- Venables, W. N. y Ripley, B. D., 2005: Modern Applied Statistics with R, Springer-Verlag, 106, ISBN: 3900051-127.
- Venables, W. N. y Smith, D. M., 2012: An Introduction to R, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 95, ISBN: 3-900051-12-7.