

La excepcionalidad de la tempestad de nieve Filomena desde el punto de vista meteorológico y climatológico

Darío CANO ESPADAS, Alejandro LOMAS GONZÁLEZ,
José Antonio LÓPEZ DÍAZ, Ricardo TORRIJO MURCIANO

Agencia Estatal de Meteorología

dcano@aemet.es, alomasg@aemet.es, jlopezd@aemet.es, rtorrijom@aemet.es

Resumen: Se presenta un análisis de la tempestad de nieve Filomena de enero de 2021 desde cuatro puntos de vista con objeto de conseguir una visión en cierto modo completa de este complejo fenómeno, singular desde el punto de vista climático y de su impacto social. En primer lugar se describe con detalle la situación sinóptica que dio origen a este evento extremo que, como suele suceder con este tipo de fenómenos raros, requirió de la concurrencia de varias características de la circulación atmosférica para su aparición. A continuación se sitúa esta nevada en el contexto histórico a partir de los registros observacionales disponibles en Madrid, ciudad más afectada por la misma, explorando incluso las reseñas periodísticas o de otro tipo de fenómenos similares en el siglo XIX en la capital. Se intenta en la siguiente sección una determinación del periodo de retorno, como medida estándar del grado de singularidad de un episodio extremo climático, basándose en las observaciones de nevadas disponibles en el Banco Nacional de Datos de la AEMET en la estación de El Retiro de Madrid. Por último se atiende a la dificultad en la predicción y observación de este tipo de nevadas excepcionales que suponen un reto para los servicios meteorológicos.

Palabras clave: tempestad de nieve, suceso extraordinario, situación sinóptica, periodo de retorno, serie histórica, observación de la nieve, predicción de nevadas.

1. DESCRIPCIÓN SINÓPTICA DE LA SITUACIÓN METEOROLÓGICA (DARÍO CANO ESPADAS)

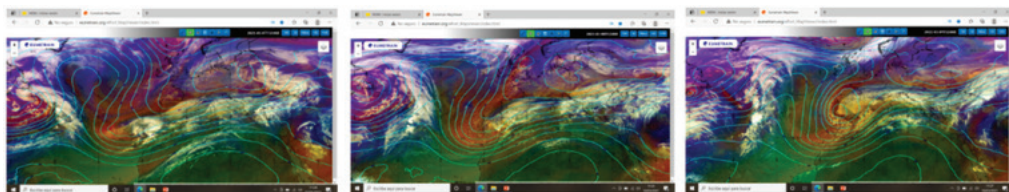
En la meseta meridional de la península ibérica, al margen de los sistemas montañosos, las nevadas importantes obedecen siempre a un esquema de interacción entre tres elementos meteorológicos: una invasión desde el norte de aire polar (pc), siberiano casi siempre; una masa de aire tropical marítima (Tm) que bordea por el sur a la masa polar y que se sitúa por encima de esta; y un vórtice de dimensiones mesoescalares que se desplaza de sur a norte por la frontera de las dos masas de aire.

Las nevadas importantes ocurren en el frente cálido del vórtice mesoescalar, aunque también se producen en el sector cálido del sistema frontal y en el frente ocluido. El caso de Filomena no es una excepción. Se va a analizar el paso de esta borrasca por el interior peninsular, donde produjo copiosas nevadas y una posterior ola de frío que mantuvo la nieve en el suelo por muchos días. Las estimaciones más autorizadas sitúan el espesor de nieve acumulado en la ciudad de Madrid, desde el día 7 a medio día hasta el día 9 a las 16 UTC en 40 cm.

Todo comenzó el día 7 de enero a las 12 UTC: el eje de una vaguada dirige una colada de aire polar hacia el sur por el noroeste de la península ibérica (figuras 1, 2 y 3). Además de la intrusión fría, el segundo elemento meteorológico en importancia es una «pluma del vapor de agua» que ese eleva desde ambientes tropicales hasta el mar Negro pasando por el sur peninsular.

La parte ascendente de la vaguada se aprecia muy perturbada, al menos tres estructuras baroclínicas mesoescalares pueden apreciarse en la figura 1: Filomena, ya desarrollada, al sur; otra sobre la península ibérica y otra más entre Baleares y Cerdeña, estas últimas en estado de hojas

baroclinas. Se aprecia convección tanto en el frente frío de Filomena como en su sector cálido. A estas horas empieza a nevar débilmente en la ciudad de Madrid, la nieve cesó sobre las 16 UTC y dejó una estampa idílica en la capital (3 o 4 cm).



Figuras 1, 2 y 3. Composición RGB, a partir de varios canales de METEOSAT, a las 12 UTC del 7, 8 y 9 de enero de 2021. La paleta de colores pretende señalar las masas de aire; en colores rojizos la masa polar y en colores verdosos la masa tropical. Las isolíneas representan el geopotencial en 500 hPa analizado por el modelo ECMWF H+0.

Para España, esta configuración provocaba que la mitad noroccidental sufriera una intrusión de aire polar, con células convectivas sobre el mar, retenciones en las montañas cantábricas y cielos despejados; mientras que la otra mitad, la suroriental de la Península, se hallaba cubierta bajo una estructura nubosa recortada con forma de hoja baroclina el día 7 (figura 1) de frente cálido el día 8 (figura 2) y de frente ocluido el día 9 (figura 3).

A mediodía del día 8, comienza de nuevo a nevar sobre Madrid, pero esta vez de manera más intensa. A las 12 UTC (figura 4) se exhibe un colosal «champiñón» que ilustra el movimiento relativo de la intrusión hacia el sur de una masa de aire polar. La parte ciclónica del champiñón contiene una zona moteada (convección) donde se aloja la bolsa fría de altura (figura 4) y, corriente arriba, Filomena.

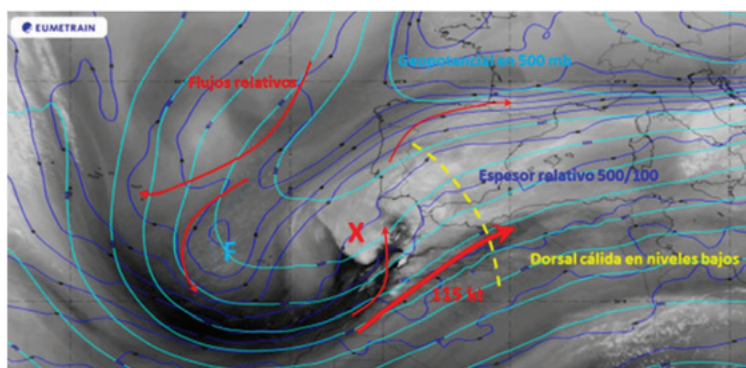


Figura 4. A las 12 UTC del día 8, imagen del canal de vapor de agua, geopotencial en 500 y espesor relativo 500/1000 procedentes del ECMWF. Chorros y flujos relativos en los niveles altos; embolsamiento frío (F) en altura y dorsal cálida en los niveles bajos.

El centro de Filomena está en el golfo de Cádiz (figura 4). El mecanismo de las grandes nevadas en la meseta está en pleno apogeo: el aire polar se coloca en superficie por debajo del sector cálido. Filomena presenta un aspecto de borrasca baroclina, pero son innegables sus peculiaridades tropicales: convección organizada en bandas en torno al frente frío y signo de gradientes de humedad en los niveles bajos, también hay signos de convección en torno al frente cálido. Esto provocaría chubascos intensos de nieve durante la noche de este día 8 (figura 1) y la madrugada del día 9.

Un chorro del sur se dirige al centro de la borrasca aportando aire seco (oscuro, figuras 1 y 4). La dorsal cálida de temperatura equivalente se adentra en la Península, por los niveles bajos, desde Marruecos, aportando una masa tropical con características marítimas y continentales superpuestas. El viento en los niveles bajos es de levante en el interior peninsular.

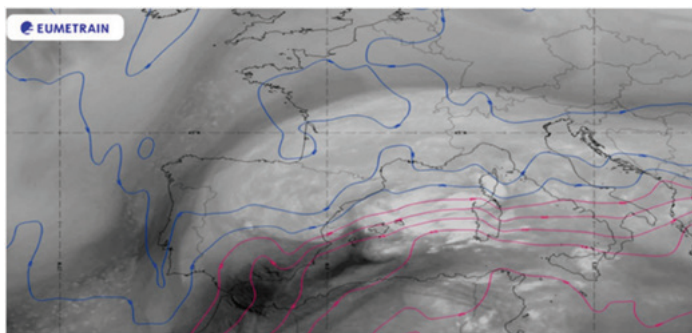


Figura 5. Imagen del canal de vapor de agua (METEOSAT) a las 3 UTC del día 9. Temperatura potencial equivalente en 850 hPa (ECMWF).

A las 3 UTC del día 9 (figura 5), el centro de Filomena está ya sobre Baleares, una larga y uniforme masa nubosa, perfectamente delimitada por una banda de deformación se extiende desde el centro de la Península, por el sur de Francia, hasta el mar Tirreno. Se trata de la nubosidad del frente ocluido. En torno al frente frío, sigue apreciándose convección y entreverados de humedad (inestabilidad potencial). Filomena bordea el Mediterráneo occidental por sus costas europeas. Continúan las nevadas en el interior peninsular y a lo largo del frente ocluido, especialmente intensas son las nevadas en el sur de Francia a estas horas. Y después el hielo, la contaminación. Sobre las 16 UTC del día 9, la nieve cesó en Madrid. Aunque molesta, la ciudad era un despliegue de vian-dantes, niños, trineos, esquiadores, ... como un cuadro de Bruegel. Lo peor estaba por venir.

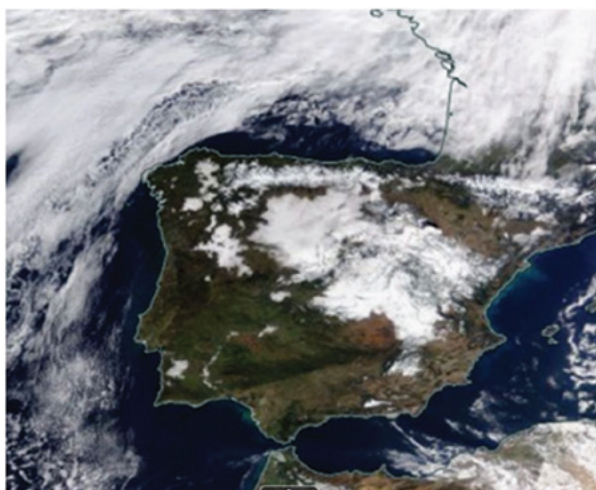


Figura 6. Imagen RGB (color verdadero) procedente de MODIS el día 16 de enero sobre las 10 UTC. La masa de aire polar aborda toda la Península dejando una situación anticiclónica con suelos cubiertos de nieve. La situación persistirá hasta pasado el día de San Sebastián (día 20). Con oscilaciones térmicas diarias en Madrid de hasta 15 °C y sin superar, en ocasiones, los 0 °C de máxima (figura 7), se formaron placas de hielo que colapsaron todo tipo de infraestructuras urbanas y de comunicaciones. Las inversiones térmicas en Madrid estos días se aproximaban a 20 °C/500 m; esto provocó, además, niveles muy altos de contaminantes (NO_x) a pesar de que el tráfico era casi inexistente.

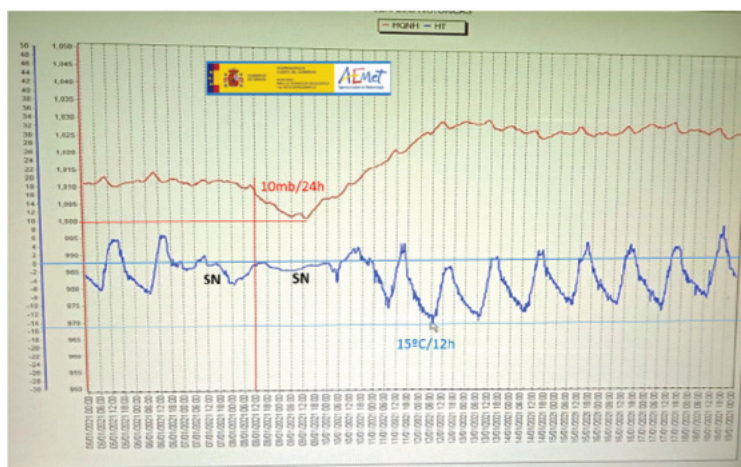


Figura 7. Evolución de la presión y la temperatura en Barajas desde el día 6 hasta el día 18 de enero de 2021. El paso de Filomena queda registrado con la bajada de presión de 10 mb entre el día 8 y el día 9. Se marcan con SN los momentos de las nevadas.

2. LA EXCEPCIONALIDAD DE LA NEVADA FILOMENA EN EL CONTEXTO HISTÓRICO (ALEJANDRO LOMAS GONZÁLEZ)

La posible excepcionalidad del gran espesor de nieve que dejó en la zona centro del país la borrasca Filomena ha marcado mucho el interés no solo del público en general sino también de los expertos, aunque las conclusiones a las que llegan estos no son obvias ni definitivas. Quienes han trabajado en el ámbito de la predicción estas últimas décadas saben la dificultad del pronóstico de nevadas y su repercusión sociológica y mediática, aún para nevadas meteorológicamente muy modestas. La borrasca Filomena empezó siendo excepcional antes de su ocurrencia, ya que los pronósticos eran espectaculares, y estos, por su falta de antecedentes recientes, poco creíbles.

La cantidad recogida en forma de nieve en el observatorio de El Retiro fue de 50,6 mm en unas 24 horas. Como es lógico, medios y redes sociales hervían con imágenes y especulaciones sobre las posibles comparaciones de nevadas de tiempos pasados lo que en realidad, tanto para profesionales como para personas de cierta edad, era de magnitud difícilmente comparable.

Se habló de eventos parecidos en el pasado. Nada más obvio en este caso que bucear en los propios registros climatológicos del observatorio casi bicentenario de El Retiro, en pleno corazón de Madrid. Aunque con algún cambio en la ubicación hay datos desde 1860, al menos de precipitación y de temperatura. También se han investigado los datos registrados en los boletines diarios o en las mismas hemerotecas y, especialmente, la *Gaceta de Madrid*, una especie de boletín oficial de la época mezclado con noticias.

En la base de datos climatológicos hay registros de El Retiro desde 1920, con precipitaciones y temperaturas diarias, y marcadas las precipitaciones con el índice 200 cuando son en forma de nieve, aunque no hay indicación del espesor de la nieve en el suelo. Cruzando el índice 200 con precipitaciones significativas superiores, por ejemplo, a 25 mm seguidos en varios días y, verificando con hemerotecas, se puede deslindar bastante fácilmente los principales eventos nivosos desde 1920. Los que se han producido antes de 1920 y desde 1894 se pueden investigar también por el *Boletín diario*, que se empezó a realizar desde entonces. También hay datos 1860-1919 en el aledaño Observatorio Astronómico de Madrid.

Este artículo se va a limitar de momento a la información más precisa que se tiene desde 1920, 100 años, lapso de tiempo que climatológicamente empieza a ser significativo, incluso desde el punto de vista de la climatología histórica.

Empezando por las fechas más recientes, se habla de la nevada de 2009. El registro de nieve con datos más abultados es el de 1 de febrero, con 16,7 mm de nieve, muy alejado de los datos de la nevada de 2021. Además los espesores registrados a los que se ha tenido acceso daban valores muy inferiores a los del episodio actual. Si se analizan las nevadas registradas entre 1960 y 2010 según el estudio de Jorge González Márquez, de la Delegación de AEMET en Madrid, y de su hermano Manuel, ninguna llegó a los 40 a 50 cm de este episodio, si bien alguna alcanzó valores significativos de este último episodio. De acuerdo al trabajo anterior destacarían diciembre de 1977 con 25 cm y marzo de 1971 y febrero de 1984 con 16 cm.

Otra comentada nevada fue la de finales de 1950. Se registraron, como caídos en forma de nieve, entre los días 4, 5 y 6 de diciembre un total de 52,4, algo mayor que Filomena pero repartida en 3 días y mezclada con lluvia. La clara conclusión es que los espesores de esta nevada fueron inferiores a Filomena. Otra considerable fue la de febrero de 1924 en la que durante 4 días, del 17 al 21, se sumaron 57,9 mm en forma de nieve y lluvia, por lo que cabe suponer una acumulación inferior, al igual que la de enero de 1933.

2.1. La famosa nevada de 1904

Buceando en los boletines diarios de noviembre de 1904 se observa que, el día 26, debieron caer unos 17 cm de nieve, pero la lluvia posterior los debió fundir. En el boletín de observaciones del día 30 se indica que el día anterior se registró una precipitación en forma de nieve de 45,3 mm, algo inferior a Filomena. En el boletín del 1 de diciembre se apunta que el día 30 se sumaron otros 8 mm de precipitación en forma de nieve. Es decir, en total cayeron en dos días 53,3 mm de precipitación en forma de nieve. Se habla de un espesor que llegó a los 40 cm, según el cuaderno de observaciones meteorológicas del observatorio de Madrid. Hay que sumar el hecho de que, ese día, el recorrido del viento muestra que fue un día ventoso, de forma que se pudieron formar ventisqueros, ya que algunas informaciones periodísticas hablan de hasta 1 metro de espesor. La lluvia de días posteriores debió menguar mucho la nieve por lo que la persistencia de la nieve en el suelo fue mucho menor.

Además, hay que tener en cuenta que, a diferencia de la actualidad, entonces El Retiro se encontraba en las afueras de la capital (el contiguo barrio de Moratalaz se construyó y urbanizó

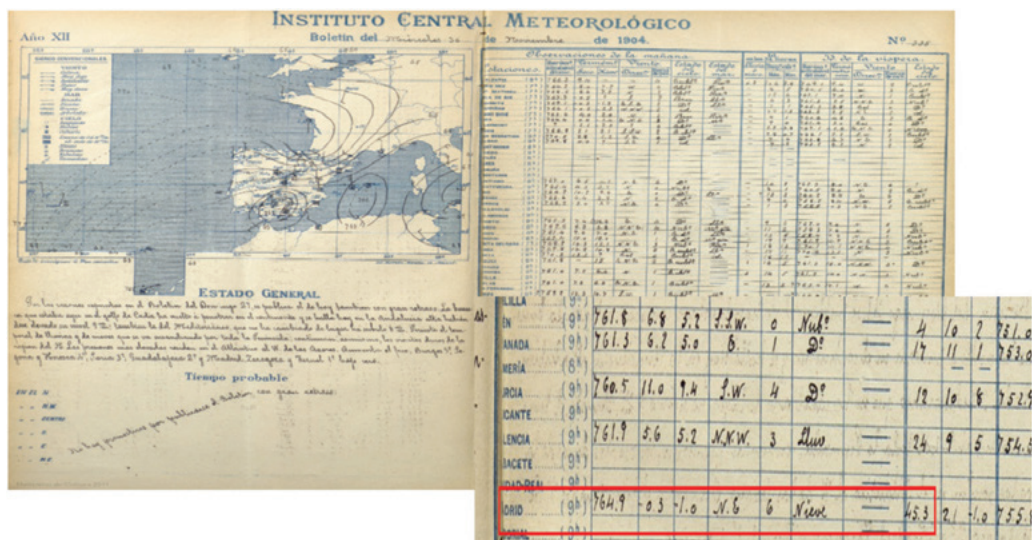


Figura 8. Boletín del Instituto Central Meteorológico del 30 de noviembre de 1904.

a finales de los años 50), por lo que la ausencia de efecto urbano, que aunque entonces debía ser menos acusado, posiblemente favoreciera que cuajara antes la nieve que en la ciudad. No obstante la nieve cayó con bastante intensidad acumulándose en 24 horas y con temperaturas bajo cero por lo que se conservó casi toda. Todo ello induce a pensar, a falta de otras informaciones de espesor en otros puntos de la ciudad de Madrid, que el episodio de noviembre de 1904 fue algo menos significativo que el de comienzos de enero de 2021.

2.2. Eventos durante la última mitad del siglo XIX y conclusiones

Indagando en la información de la *Gaceta de Madrid* y cruzando los datos del entonces ya en funcionamiento observatorio meteorológico instalado en el Astronómico, se encuentran dos nevadas significativas, la del 24 de noviembre de 1862, en la que la *Gaceta* habla de una altura de la capa de nieve de 50 mm, lo que puede ser un error de transcripción. No obstante el registro de precipitación es de tan solo 18,4 mm. En ese mismo número de la *Gaceta* se comenta que: «Desde el año 47 no se había conocido en Madrid una nevada tan grande como la que cayó ayer desde las primeras horas de la mañana». El otro es del 25 de diciembre de 1864 y se habla de 30 a 35 cm.

En conclusión tanto en dimensiones como en duración sobre el terreno de Madrid, la borrasca de nieve Filomena es excepcional en su comparación histórica de los últimos casi dos siglos. Para su valoración con respecto a épocas anteriores sería necesario hacer un estudio de climatología histórica de mayor calado.

3. ESTIMACIÓN DEL PERIODO DE RETORNO DE LA NEVADA EN LA ESTACIÓN DE EL RETIRO (MADRID) (JOSÉ ANTONIO LÓPEZ DÍAZ)

3.1. El contexto espacial

INDICATIVO	NOMBRE	#AÑOS	RANGO	RR
3195	MADRID, RETIRO	101	1,0	52,9
8178D	ALBACETE, OBS.	39	1,0	41,1
9898	HUESCA/PIRINEOS	71	1,0	40,4
3200	MADRID/GETAFE	71	1,0	39,8
3129	MADRID/BARAJAS	71	1,0	34,4
3168D	GUADALAJARA	11	1,0	34,4
3196	MADRID/CUATRO VIENTOS	77	1,0	32,7
8368U	TERUEL	36	1,0	25,4
8175	ALBACETE/LOS LLANOS	83	2,0	29,6
3175	MADRID/TORREJÓN	57	2,0	20,0
9434	ZARAGOZA/AEROPUERTO	81	4,5	17,4
2444	ÁVILA	39	5,0	18,8
3191E	COLMENAR VIEJO/FAMET	43	7,0	19,1
3013	MOLINA DE ARAGÓN	72	10,0	17,6
9390	DAROCA I	101	11,0	28,2
2422	VALLADOLID	49	12,0	3,8
2867	SALAMANCA/MATACAN	77	19,5	6,8
8096	CUENCA	71	22,0	11,1
2465	SEGOVIA	34	26,0	2,0
2030	SORIA	72	32,0	12,4
4121	CIUDAD REAL	52	36,5	0,0
2614	ZAMORA	101	43,0	2,0
2539	VALLADOLID/VILLANUBLA	86	58,0	1,7
2462	NAVACERRADA, PUERTO	76	73,0	32,8
2331	BURGOS/VILLAFRÍA	78	73,0	1,2
2661	LEÓN/VIRGEN DEL CAMINO	84	82,0	0,1

Tabla 1. Datos de acumulación de nieve máxima anual en tres días consecutivos para observatorios de las dos Castillas, Madrid y Aragón. (Fuente Banco Nacional de Datos de AEMET).

El objetivo principal de este estudio es estimar el periodo de retorno del evento extremo Filomena al objeto de cuantificar su excepcionalidad en la dimensión temporal. No obstante, se muestran a continuación de forma sintética datos observacionales del mismo periodo temporal que la tempestad Filomena en otros observatorios españoles para situar su excepcionalidad en el contexto espacial.

Para cada uno de los observatorios mostrados en la tabla 1 se ha calculado en cada año el máximo de cantidad acumulada de nieve en tres días, dado que la nevada en El Retiro de la Filomena se extendió a tres días. En la tabla se muestran los observatorios de la Base Nacional de Datos de AEMET de las dos Castillas, Madrid y Aragón, ordenados por la posición en la serie de datos del dato de 2021, indicada en la penúltima columna RANGO. Así mismo se muestran el indicativo climatológico y el

nombre del observatorio, el número de años de la serie y, en la última columna, la cantidad de precipitación recogida en mm (la nieve en forma de agua).

Se observa que fue en las provincias de Madrid, Albacete, Guadalajara y Zaragoza (y en una estación de montaña de Huesca) donde el registro de la Filomena fue más destacado en el conjunto de las series.

3.2. El periodo de retorno

Para la valoración del grado en que un valor extremo se aparta de lo habitual climatológicamente hablando, una de las medidas más utilizadas, especialmente en las aplicaciones de ingeniería, construcción, seguros y otras, es el periodo de retorno. Este se define como el tiempo (en años si la serie de extremos de partida es anual, como es el caso) que hay que esperar, en promedio, hasta que vuelva a aparecer otro valor más extremo que el considerado (en este caso más extremo significa mayor). Se hace la hipótesis de que la serie considerada mantiene en el futuro sus propiedades estadísticas, lo que excluye la consideración de cambios climáticos no representados en la serie, por ejemplo. Se puede demostrar que el periodo de retorno es también el número de valores más extremos que el considerado que aparecerán en promedio en un nuevo periodo de años igual al de la serie, con las mismas restricciones respecto a las propiedades estadísticas. Si la probabilidad de obtener un valor más extremo que el considerado en la serie vale E , se tiene que $T = 1/E$, siendo T el periodo de retorno. Así, si la probabilidad de excedencia del valor de nieve recogida en El Retiro en la Filomena fuera 1 % eso implicaría un periodo de retorno $T = 100$ años.

3.3. Estimación por ajuste a la distribución de Gumbel

Para series de precipitación diaria máxima anual y racha máxima de viento anual, entre otras, un procedimiento habitual es estimar el periodo de retorno de interés por ajuste a la distribución de extremos Gumbel. Esta es una distribución doblemente exponencial, y el grado de ajuste de los datos de la serie a esta distribución se valora con facilidad por medio de una gráfica denominada de Gumbel. Con esta gráfica, si el ajuste de los datos es bueno, estos deben alinearse según una recta aproximadamente.

En la gráfica de la figura 9 de la serie de nevadas máximas anuales en tres días en El Retiro se representa en ordenadas el valor de la cantidad de nieve transformada en agua en décimas de mm. Despreciando los valores inferiores a 50 décimas de mm, el resto no muestran un ajuste bueno a una recta. Esta primera impresión se confirma efectuando una estimación del periodo de retorno previo ajuste a la Gumbel. Si se utiliza el ajuste a la recta de mínimos cua-

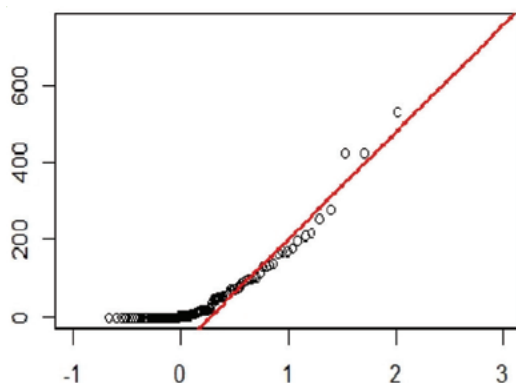


Figura 9. Gráfico de Gumbel para la máxima acumulación de nieve en tres días en la estación de El Retiro.

drados a los datos, que es la recta roja que se muestra en la figura 9, se puede estimar un periodo de retorno del valor mayor de la serie, que es el de la Filomena, y se obtiene $T = 155$ años. En cambio empleando una técnica estándar en estadística, el ajuste por máxima verosimilitud, se

obtiene un T del orden de 2000 años. Esta enorme variación entre las dos técnicas confirma que el ajuste a la Gumbel de estos datos no se puede considerar aceptable.

3.4. Estimación por ajuste a la función general de valores extremos

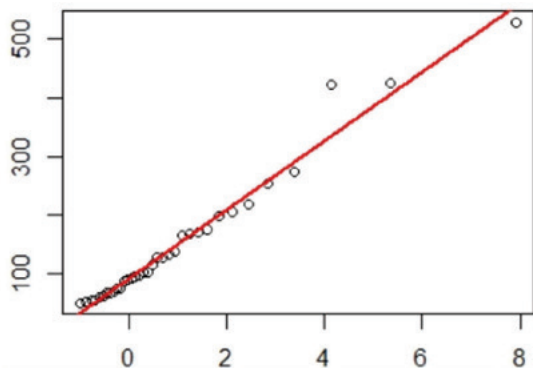


Figura 10. Gráfico de ajuste a la función general de valores extremos para la máxima acumulación de nieve en tres días en la estación de El Retiro.

La función general de valores extremos ofrece una alternativa cuando el ajuste a la Gumbel no es satisfactorio, ya que generaliza esta al contener un parámetro más, tres en lugar de dos, del que se dispone para mejorar el ajuste. A cambio aumenta la incertidumbre en la estimación. En el caso de Filomena, en la figura 10 se muestra una gráfica similar en intención a la de Gumbel del párrafo anterior, de tal forma que el grado de ajuste de los puntos de la serie a una recta informa sobre la bondad del ajuste.

Cabe apreciar una mejora considerable respecto de la Gumbel. La estimación del periodo de retorno para el dato de la Filomena a partir de la recta arroja un

valor de $T = 92$ años, con un parámetro de forma de esta distribución (para la Gumbel vale cero) de $-0,40$, lo que es indicativo de una mayor tendencia, por así decir, a los valores altos para periodos de retorno altos. Si se prueba con un ajuste por máxima verosimilitud se obtiene $T = 68$ años, lo que no es muy diferente de lo anterior dadas las incertidumbres en la estimación, como se ilustra más adelante. Pero el parámetro de forma, $-0,67$, está demasiado alejado de cero, lo que puede indicar un sobreajuste, por lo que parece razonable el valor $T = 92$ años.

Como curiosidad, cabe observar que en la figura se aprecia que no es el dato de Filomena el que desentona del resto, más bien se sitúa bien en la recta, sino el tercer valor más alto, que es casi igual al segundo más alto y por ello se sale de la tendencia lineal. Sin duda esta circunstancia complica el análisis estadístico de esta serie y explica las considerables incertidumbres. En la tabla 2 se muestran los resultados de un análisis estadístico de la incertidumbre en la estimación de T , realizado por una técnica estadística denominada *bootstrapping*. La mediana de las simulaciones es $T = 67$ años, y un intervalo de confianza con un 80 % de probabilidad para T iría desde 33 a 295 años, lo que es suficientemente elocuente, por su gran amplitud, de las incertidumbres.

Prob.	10 %	20 %	50 %	80 %	90 %
T (años)	33	40	67	158	295

Tabla 2. Cuantiles de la distribución del periodo de retorno de acumulación de nieve en tres días consecutivos en El Retiro.

Para interpretar correctamente el periodo de retorno, es importante tener en cuenta que el periodo de retorno es la esperanza matemática de una variable aleatoria, el tiempo de espera hasta la próxima excedencia del valor, que no tiene una distribución simétrica. Se puede deducir de la distribución probabilística de T que la mediana de los tiempos de espera sería de 64 años, es decir, habría un 50 % de probabilidad de que la próxima gran nevada con una acumulación en tres días superior a lo recogido en la Filomena ocurra antes de 64 años. Existiría, incluso, un

25 % de probabilidad de que esto suceda antes de 26 años. Estas consideraciones tienen sin duda interés de cara a adoptar medidas para mejorar la respuesta futura a este tipo de eventos, de gran potencial perturbador, en una gran capital como Madrid.

4. ALGUNOS COMENTARIOS SOBRE LA DIFICULTAD DE LA PREVISIÓN DE EPISODIOS DE NEVADAS EXTREMAS APLICADOS AL EPISODIO PROVOCADO POR FILOMENA (RICARDO TORRIJO MURCIANO)

Las nevadas, sobre todo las copiosas, son un fenómeno poco frecuente en muchas regiones de España. Además, la nieve es un meteoro que presenta diversas dificultades en su observación^{1,2}. Todo ello hace que, excepto en algunas comunidades y zonas más acostumbradas a las nevadas, haya una falta de experiencia y datos sobre este tipo de fenómeno, lo que supone una mayor dificultad para su observación y predicción precisa cuando se produce.

Si la predicción de fenómenos extremos es siempre compleja y la dificultad es mucho mayor que la del resto de fenómenos meteorológicos, en el caso de los avisos de nieve dichas dificultades crecen. A las complicaciones de una predicción exacta de la cantidad de precipitación que va a caer, en el caso de la nieve se suman otras incertidumbres como son la cota, si está cuajará o no y cuándo, la densidad del manto nivoso y su evolución.

Para la cota de nieve, una pequeña variación de temperatura puede suponer que la nevada afecte o no a una importante ciudad³ o que cuando empiece a cuajar los espesores alcancen o no valores significativos. Por otro lado, la densidad de la nieve puede



Figura 11. Imágenes de pluviómetro y pluviógrafo de la estación de Orgaz (Toledo), cortesía de David Resuela Sánchez, colaborador de AEMET en la localidad. Se observa como ambos quedaron bastante taponados por la nieve, incluso en el caso del pluviógrafo que estaba calefactado.

¹ Estas dificultades se agrandan cuando la paralización de algunas localidades, como en el caso de Filomena, impidió que muchos profesionales y colaboradores de las diversas estaciones de AEMET, pudieran ir a sus destinos a verificar de forma continua la calidad de las observaciones. Observaciones que, en ciertos casos, solo se tomaron de forma automática o de forma manual pasados unos días. Por otra parte, en las estaciones automáticas, según informan los profesionales con experiencia en este tipo de observaciones, cabe la duda de la precisión de la medida de los pluviómetros de balancín a la hora de medir la intensidad de la nevada. En el caso de observaciones manuales, cuando la nevada es muy intensa, si los pluviómetros no están revisados de forma periódica mientras nieva, se puede producir cierta obturación, incluso aunque estén calefactados. Este efecto se agrava con el viento, que aumenta el enfriamiento del pluviómetro.

² Además de lo comentado en la nota anterior, si se carece de los parapetos adecuados, como los que cuentan unos pocos observatorios de montaña, incluso con vientos moderados, la infraestimación de medición de nieve, tal y como demuestran diversos estudios, puede ser importante (BUISÁN, 2017), ya que buena parte de la precipitación no cae en el pluviómetro.

³ En el caso de las grandes ciudades el aumento de temperatura, por los diversos factores que origina la isla de calor urbana, puede aumentar la cota de nieve. Este efecto se amplifica en las zonas más céntricas, que además tienen una gran densidad de coches circulando y de grandes edificios calefactados que actúan a modo de radiadores infrarrojos aumentando, de forma más marcada si no hay apenas viento, la temperatura del aire en capas bajas y la del suelo. Todo ello hace que no cuaje igual la nieve en el centro que en las afueras. Durante la nevada asociada a Filomena, la nieve tardó mucho más en cuajar en las zonas más céntricas de Madrid que en las afueras, dando lugar a diferencias en los espesores alcanzados.

ser muy variable⁴, lo que puede dar lugar a espesores muy diferentes con la misma cantidad de precipitación⁵.

Ahora bien, la cota de nieve, la densidad de la nieve y que esta cuaje o no, o cuándo lo haga, puede depender de diversos factores. Entre ellos se puede citar la altura desde que cae el copo, su velocidad de caída, su tipo y tamaño, los estratos de temperatura y humedad que atraviesa en su caída y el contenido de hielo y gotas de agua de estos, las corrientes ascendentes dentro de la nube, la intensidad de la nevada, la temperatura del suelo y el tipo de superficie.

Los factores anteriores, que pueden influir y verse influidos entre sí, suelen evolucionar con el tiempo durante las nevadas y son difíciles de predecir con precisión por los modelos numéricos. Por ello, la ponderación de la situación meteorológica y su seguimiento por un predictor experimentado permite mejorar las salidas de los modelos.

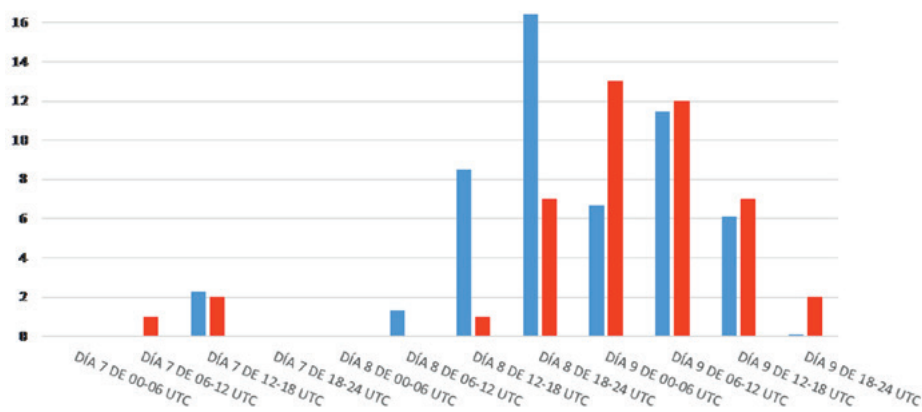


Figura 12. Previsión de precipitación en forma nieve del CE, en la pasada del día 7 a las 00 (en rojo), versus la observación de precipitación en El Retiro (en azul).

En el caso de Filomena, la predicción de cantidades de nieve caídas en las pasadas lejanas a la nevada del modelo operativo del CE fue pasando de infraestimar acusadamente las cantidades caídas a sobrestimarlas de forma muy marcada, para luego ir ajustándose en las pasadas más próximas al episodio. A su vez, la frontera de la nieve fue extendiéndose hacia el sur a medida que las pasadas se acercaban a la fecha de la nevada.

Centrándose en Madrid, si se compara con lo ocurrido en el observatorio de El Retiro, las cantidades caídas de precipitación fueron algo menos del 20 % superiores a las previstas por la pasada del modelo del CE de 7 a las 00 UTC, mientras que los espesores calculados por esa pasada del modelo fueron casi un 50 % inferiores a la realidad. De todo ello se deduce que la

⁴ Para ilustrar más las dificultades en el cálculo del espesor de la nieve que cae, comentar que observaciones sistemáticas en EE. UU. muestran que, aunque en la mitad de los casos las densidades de la nieve se agrupaban entre 60 kg/m³ y 120 kg/m³, en casos extremos puede tener densidades excepcionales extremas. Desde más de 500 kg/m³, hasta valores inferiores a 30 kg/m³ (BAXTER y otros, 2005). Además, una vez caída, la nieve se va compactando y perdiendo espesor. En el caso de Filomena la persistencia de la nevada durante más de un día y el peso de la nieve nueva debió propiciar una mayor compactación de la nieve más antigua, respecto a la recién caída, incluso antes de terminar el episodio de nevada. En cualquier caso, en la compleja evolución del manto nivoso también influyen otros factores.

⁵ Ejemplo de la dificultad de predicción de la cota y espesor, en esta última gran nevada, es el caso de la ciudad de Toledo. La diferencia de altitud, de unos 70 m, entre el centro histórico y las afueras, propició significativas diferencias de espesor de nieve en diversas partes de la ciudad, ya que esta tardó más en cuajar en la parte nueva ubicada a menor altitud. En el caso del tipo de nevada, como el de Filomena, la existencia de una capa fría y seca en niveles bajos, junto con una intensa nevada, suele producir un descenso de la cota por enfriamiento de los niveles inferiores, cuya altitud mínima puede ser difícil de calcular.

densidad de la nieve caída se sobrestimó significativamente. Por otro lado, esta salida del modelo no calculó bien la disminución que experimentó con el tiempo la nieve⁶.

Además de todo ello, la paralización completa de la ciudad impidió que los trabajadores de las oficinas meteorológicas pudieran llegar a sus puestos de trabajo para realizar observaciones oficiales de espesor de nieve, algo que dificultó la asimilación de datos por los modelos numéricos: en el meteograma del CE del día 9 a las 00, cuando ya había en la ciudad de Madrid unos 40 cm de nieve en el suelo, el modelo en su análisis apenas mostraba 20 cm.

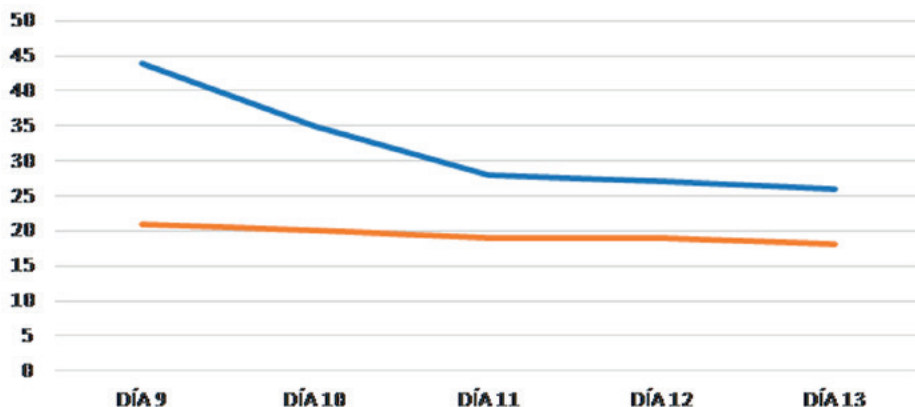


Figura 13. Espesor de nieve previsto por el CE, pasada del 9 a las 00 UTC (en rojo) y observada en el barrio de Aluche (Madrid) (en azul). El modelo no pudo asimilar los datos reales de espesor de nieve ni tampoco predijo la evolución del manto nivoso con precisión⁷.

Como suele ser habitual en otras situaciones, por otra parte, los modelos numéricos no calcularon bien la evolución de la temperatura de los días posteriores al paso de Filomena, al subestimar el enfriamiento nocturno del terreno nevado y la fuerte inversión de niveles bajos. Hubo una clara infrapredicción de las heladas ocurridas y de los diversos récords térmicos de bajas que se produjeron.

REFERENCIAS

- BUISÁN, S. T., EARLE, M. E., COLLADO, J. L., KOCHENDORFER, J., ALASTRUÉ, J., WOLFF, M., SMITH, C. D. y LÓPEZ-MORENO, J. I. (2017). Assessment of snowfall accumulation underestimation by tipping bucket gauges in the Spanish operational network. *Atmos. Meas. Tech.*, 10, 1079-1091, <https://doi.org/10.5194/amt-10-1079-2017>.
- BAXTER, M. A., GRAVES, C. E. y MOORE, J. T. (2005). A Climatology of Snow-to-Liquid Ratio for the Contiguous United States. *Weather and Forecasting*, 20(5), 729-744. Consultado el 12 de marzo de 2021: https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/20/5/waf856_1.xml
- COLES, S. (2001): An Introduction to Statistical Modelling of Extreme Values. Springer Series in Statistics, ISBN : 978-1-84996-874-4.
- What makes forecast snow so difficult? Barnwell (sin fecha), <https://www.weather.gov/media/ohx/PDF/Weather101Snow.pdf>, web consultada el 16 de marzo de 2021.

⁶ Esta hipótesis se hace suponiendo que las cantidades de precipitación medidas fueron aproximadamente correctas.

⁷ En otros observatorios madrileños, con reportes de espesor observados similares, los espesores medidos de precipitación registrados fueron significativamente inferiores. Cabe la hipótesis de que la protección de la vegetación y arbolado del parque pudo hacer de parapeto frente al viento que puede causar infraobservación de la medición de nieve.