

Valoración de olas de frío y calor

El impacto de la temperatura en todos los ámbitos de nuestras vidas quedó patente con la ola de calor que sufrimos en agosto de 2003 o la última ola de frío registrada en febrero de 2003.

En este artículo divulgativo se presenta un nuevo modelo de referencia, denominado MORBIL, que permite identificar y cuantificar fácilmente las desviaciones significativas en la temperatura. Este modelo, de corte estadístico, se construye automáticamente a partir de los históricos de temperatura y presenta como principal ventaja el buen compromiso que realiza entre su precisión en el ajuste y su simplicidad, tanto desde el punto de vista conceptual como práctico. Se ha comparado con otros dos modelos, obteniéndose muy buenos resultados. Se presentan ejemplos y aplicaciones concretas del mismo.



María Manso García
Ingeniero del ICAI.
Instituto de Investigación Tecnológica
de la Universidad Pontificia Comillas
de Madrid.
E-mail: María.Manso@iit.upco.es.



Eugenio Fco. Sánchez Úbeda
Doctor Ingeniero del ICAI.
Instituto de Investigación Tecnológica,
donde es coordinador del Área de
Sistemas Inteligentes (ASI), y del Depar-
tamento de Sistemas Informáticos de la
Universidad Pontificia Comillas de
Madrid.
E-mail: Eugenio.Sanchez@iit.upco.es.

Variabilidad de la temperatura ambiente

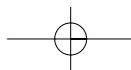
La serie temporal de la temperatura ambiente (mínima o máxima) se puede describir como un proceso aleatorio que fluctúa entorno a una temperatura media. Por ejemplo, en la Figura 1 se muestran las series diarias de las temperaturas máxima y mínima medidas en los aeropuertos de Barcelona y Madrid. Las variaciones respecto al comportamiento "normal" esperado son tan frecuentes y significativas que intentar predecir a un año vista la temperatura puntual futura carece de sentido. Sin embargo, la periodicidad anual de la serie diaria de temperaturas (patente en las estaciones climatológicas) puede permitir obtener estimaciones razonables tanto de la temperatura normal esperada como de la variabilidad típica alrededor de dicha temperatura de referencia.

Además, dependiendo de la posición geográfica de la estación meteorológica el comportamiento de la temperatura puede ser diferente. Por ejemplo, en Barcelona la temperatura es más estable que en Madrid, por razones obvias (Figura 1).

Olas de frío y calor

Lo que se entiende vulgarmente por ola de frío y ola de calor difiere del significado meteorológico de dichos términos. Aunque existen definiciones técnicas más o menos formales, no hay ninguna que sea lo suficientemente útil y flexible como para que, desde el punto de vista conceptual y práctico, pueda considerarse comúnmente aceptada dentro del ámbito meteorológico. De una forma técnica, pero informal, las olas de frío y de calor se pueden definir como fenómenos meteorológicos adversos que duran varios días y que se caracterizan principalmente por temperaturas muy bajas o muy altas, según el caso.

La principal diferencia entre las definiciones meteorológicas formales y la intuición propia de los no expertos en meteorología radica en el término "adverso". Es necesario que las condiciones meteorológicas puedan suponer un peligro potencial para la salud humana o los bienes de los ciudadanos para que pueda considerarse técnicamente como una ola de frío o calor. De hecho, desde 1995, el Instituto Nacional de Meteorología se encarga, a través del "Plan Nacional de Predicción y Vigilancia



de Fenómenos Meteorológicos Adversos”, de avisar a las autoridades pertinentes de posibles olas de frío o de calor para que se tomen las medidas oportunas (ver [1]).

En la gráfica superior de la Figura 2 se puede observar las temperaturas máxima y mínima diarias medidas en el aeropuerto de Barcelona durante agosto de 2003, y en la gráfica inferior de esa misma figura las temperaturas durante la ola de frío de diciembre de 2001. Es difícil determinar con exactitud, por mera inspección visual y sin ayuda de algún tipo de referencia, dónde se produjeron las olas, su duración e importancia.

El modelo propuesto en este artículo permite identificar y cuantificar fácilmente las desviaciones significativas en la temperatura, con independencia de si dicha desviación se puede considerar que sea una ola o no, atendiendo a una u otra definición. Es más, este modelo permite nuevas definiciones prácticas de ola de frío y calor; lo suficientemente objetivas como para que finalmente sean aceptadas de forma consensuada por la comunidad científica.

Modelos de referencia

Como su nombre indica, un modelo de referencia de una serie diaria de temperatura no es más que un esquema teórico, expresado en forma matemática, que facilita la comprensión y el estudio de su comportamiento. Dependiendo del objetivo perseguido se pueden modelar diferentes aspectos de las series de temperatura. Además el mismo aspecto de la serie se puede modelar de distintas maneras o, lo que es lo mismo, utilizando diferentes modelos.

En el caso particular que aquí nos ocupa, para decidir si la temperatura de un determinado día se puede considerar “normal” o, por el contrario, es “más baja” o “más alta” de lo normal, se utilizan diferentes modelos de referencia que habitualmente obedecen a un esquema general similar. Dada la periodicidad anual de la serie diaria de temperatura, estos modelos constan de dos componentes, una determinista y otra estocástica. Para cada día del año la componente determinista indica la temperatura normal o valor típico esperable, mientras que la componente estocástica recoge la variabilidad o dispersión entorno a dicho valor normal. Combinando ambas componentes se puede construir una banda de confianza que permita identificar y cuantificar desviaciones significativas en la temperatura.

Figura 1. Temperaturas máxima y mínima diarias medidas en el aeropuerto de Barcelona y Madrid

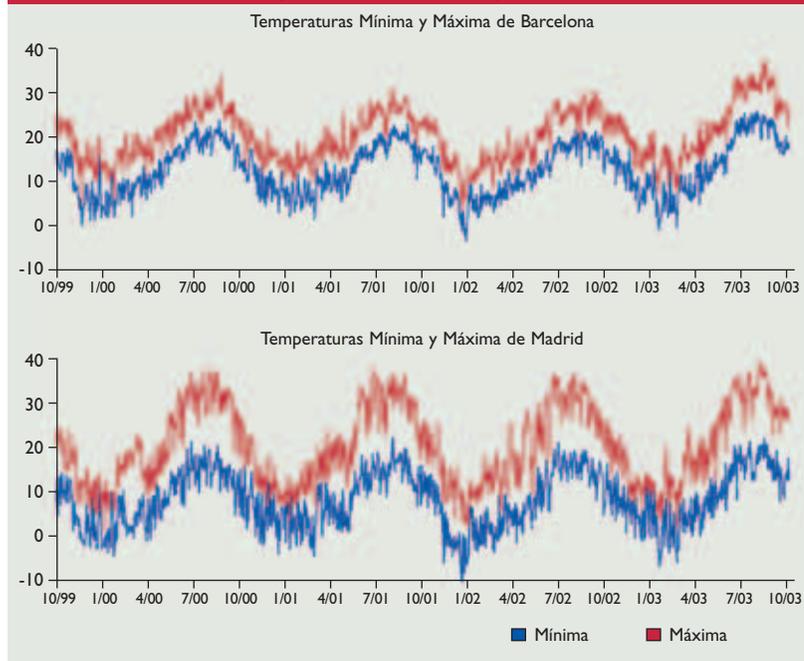
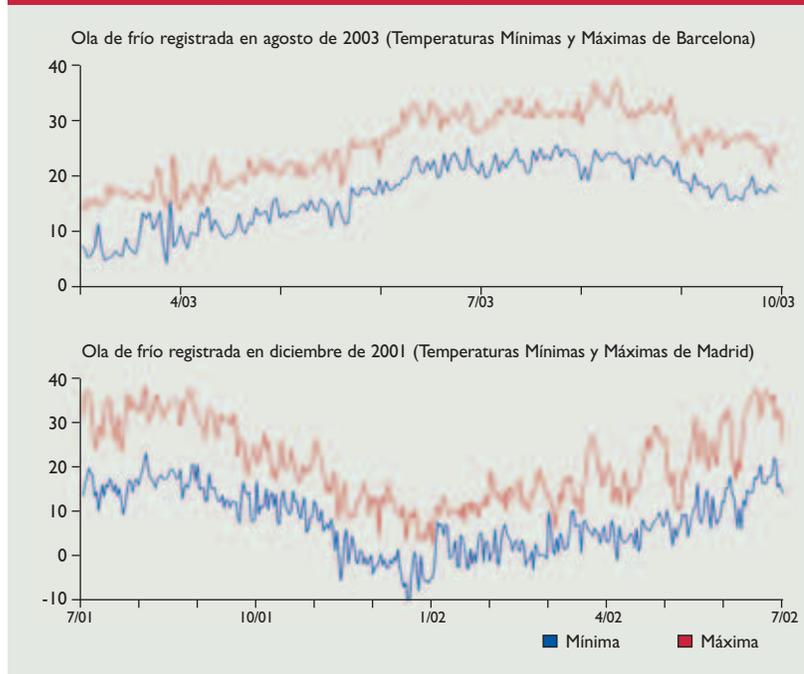
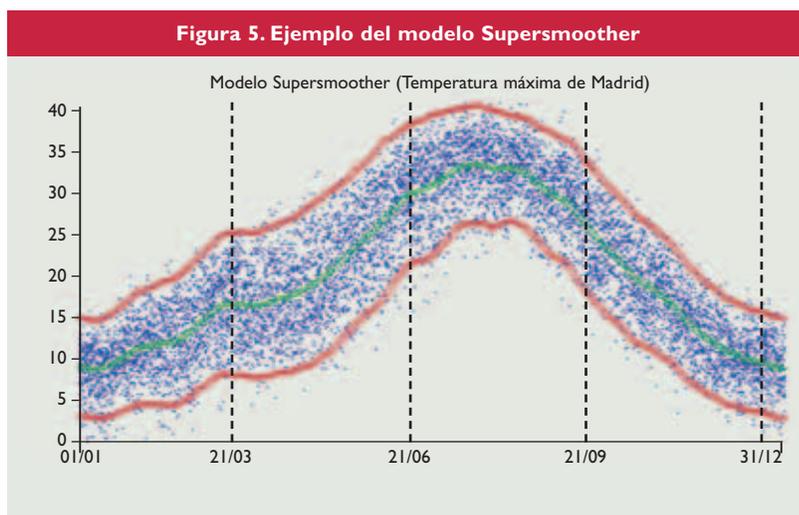
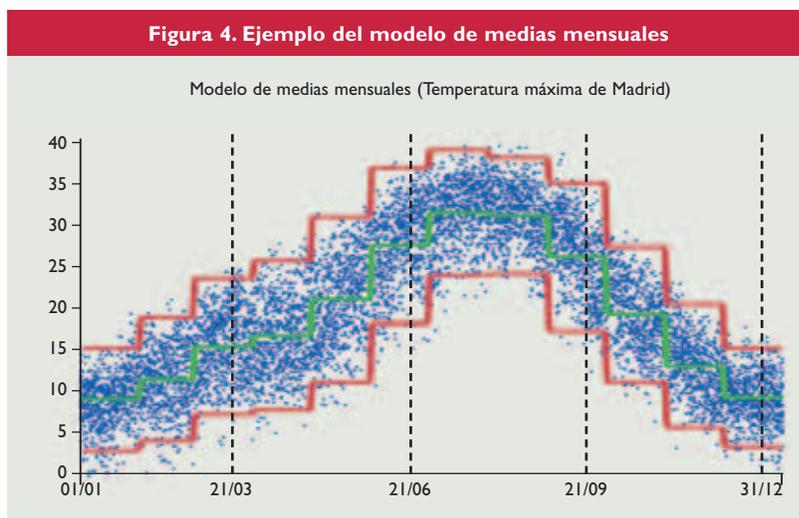
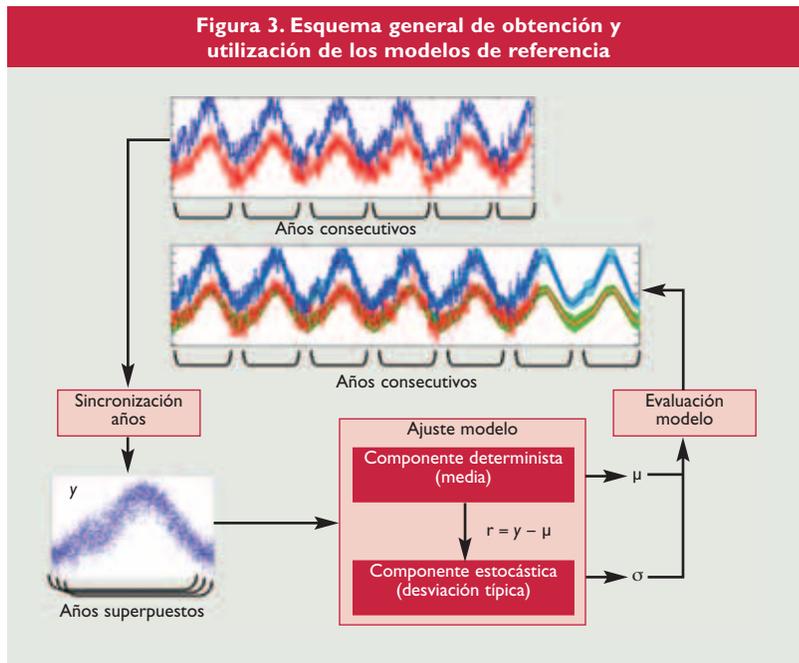
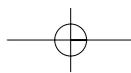


Figura 2. Olas de frío y calor registradas en agosto de 2003 y diciembre de 2001, respectivamente



Las componentes determinista y estocástica de estos modelos de referencia se obtienen a partir de la información histórica de la serie de temperatura utilizando algoritmos de ajuste específicos para cada modelo. Sin embargo, el proceso de ajuste global es genérico para todos ellos y consta de tres fases claramente diferenciadas (Figura 3):



- Sincronización de los datos mediante superposición de los años de ajuste, eliminando el 29 de febrero de los años bisiestos. Como resultado de este proceso se obtiene una nube de puntos (x, y) en donde la estacionalidad anual queda patente y lista para ser modelada. Esta nube de puntos consta, para cada uno de los 365 días del año, de tantos puntos como años de histórico se hayan utilizado en el ajuste.
- Ajuste de la componente determinista μ del modelo de referencia. A partir de la nube de puntos anterior, se determinan unos coeficientes concretos para la temperatura normal o valor típico esperable.
- Ajuste de la componente estocástica σ del modelo de referencia. A partir de la nube de puntos construida inicialmente y del componente determinista obtenido, se construye una segunda nube de puntos como el cuadrado de la diferencia entre el valor real y el valor del componente determinista. Esta nueva nube de puntos se utiliza para obtener los coeficientes que indican para cada uno de los 365 días del año la dispersión entorno al valor de la componente determinista.

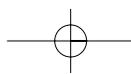
Una vez obtenido el modelo de referencia, la utilización del mismo es muy sencilla. Mediante la evaluación del modelo se pueden obtener los valores de referencia tanto para fechas pasadas como para fechas futuras, indicando una "senda" de valores de temperatura normal.

Dentro de este esquema general se enmarca el modelo propuesto y los modelos que se pueden denominar genéricamente como "modelos de medias". A continuación se describen dichos modelos, mostrando sus ventajas e inconvenientes, así como semejanzas y diferencias.

Modelos de medias

El modelo de medias más sencillo consiste en utilizar una media y una desviación típica para cada mes del año, es decir, un modelo con 24 coeficientes en total. Estos valores de referencia, calculados con este modelo, se conocen normalmente como valores "climatológicos normales" y son de uso común en climatología.

El proceso de ajuste de este modelo es sumamente sencillo: basta calcular para cada mes el valor medio y la desviación típica de la temperatura observada a lo largo de todos los años considerados. Nótese que en este caso la fase de sincronización está implícita en el tratamiento mensual de los datos y



que tanto el ajuste de la componente determinista como el de la estocástica encajan perfectamente con el algoritmo genérico de la Figura 3, obteniéndose los coeficientes de ambas componentes a partir de las dos nubes de puntos indicadas anteriormente.

En la Figura 4 se muestra este modelo de medias mensuales para la temperatura máxima medida en el aeropuerto de Madrid. Es un modelo genérico válido para cualquier año que indica para cada día del año el valor de la temperatura media (representada en verde) y la variabilidad esperada (representada en rojo como la temperatura media más y menos dos veces la desviación típica). Cada punto azul corresponde a un dato diario histórico de los 20 años utilizados para ajustar el modelo. Por último, las rectas discontinuas verticales marcan el inicio y fin de las cuatro estaciones climatológicas (día 21 de los meses marzo, junio, septiembre y diciembre).

Otra opción más sofisticada consiste en obtener para cada día del año las componentes determinista y estocástica como media ponderada de los valores de los días próximos al considerado (por ejemplo los 7 anteriores y posteriores), considerando superpuestos todos los años de ajuste, según el algoritmo genérico de la Figura 3.

Este modelo se puede construir utilizando un suavizador de media móvil sencillo en el que el ancho de la ventana móvil es fijo y normalmente se determina mediante ensayo y error; aunque también se puede obtener utilizando un modelo más sofisticado como el 'Supersmoother' [3, 4], en donde el ancho de la ventana es variable y se ajusta automáticamente para cada punto a partir de la información histórica. En la Figura 5 se muestra este modelo para la temperatura medida en el aeropuerto de Madrid. Se ha representado utilizando los mismos criterios que en la Figura 4.

La precisión de estos dos modelos se puede comparar utilizando una medida estándar como es el error absoluto medio (EAM) o el error cuadrático medio. En la Tabla 1 se muestra el EAM para estos dos modelos cuando se ajustan utilizando 20 años para las temperaturas mínima y máxima registradas en nueve estaciones meteorológicas diferentes. Dada la naturaleza de estos dos modelos, su complejidad, medida como número de coeficientes, no cambia con los datos. Obviamente, la extrema simpleza del modelo de medias mensuales (MM) se traduce en unos errores de ajuste sistemáticamente superiores a los

Tabla 1. Errores de ajuste y complejidad de los modelos para distintas temperaturas

Estación	Temp.	Error absoluto medio (EAM)			Complejidad (número de coef.)		
		MM	SS	MORBIL	MM	SS	MORBIL
Barcelona	máxima	1,9468	1,8345	1,8387	24	730	16
	mínima	2,1823	2,0748	2,0787	24	730	20
Bilbao	máxima	3,3292	3,2854	3,2942	24	730	14
	mínima	2,5842	2,5457	2,5585	24	730	14
Burgos	máxima	3,6770	3,5490	3,5553	24	730	18
	mínima	2,7810	2,7180	2,7236	24	730	16
Logroño	máxima	3,5965	3,4762	3,4824	24	730	18
	mínima	2,5206	2,4469	2,4546	24	730	16
Madrid	máxima	3,2071	3,0235	3,0296	24	730	20
	mínima	2,7559	2,6359	2,6367	24	730	16
Oviedo	máxima	2,9895	2,9367	2,9527	24	730	16
	mínima	2,2159	2,1700	2,1923	24	730	14
Sevilla	máxima	2,8516	2,7163	2,7273	24	730	20
	mínima	2,3457	2,2383	2,2586	24	730	16
Valencia	máxima	2,3843	2,2984	2,3098	24	730	14
	mínima	2,0705	1,9528	1,9590	24	730	16
Zaragoza	máxima	3,2767	3,1341	3,1429	24	730	22
	mínima	2,5183	2,3990	2,4087	24	730	16
Valor promedio		2,7352	2,6353	2,6446	24	730	16,8

MM: Modelo de medias mensuales
SS: Supersmoother

obtenidos con el modelo Supersmoother (SS). Por ejemplo, para la temperatura máxima de Madrid el error de ajuste del MM es de 3.207 °C, un 6.1% superior a los 3.023 °C obtenidos con el SS.

Inconvenientes de los modelos de medias

El utilizar el modelo sencillo de medias mensuales tiene como principal ventaja la simplicidad, tanto en su cálculo como en su posterior interpretación. Sin embargo, este modelo presenta dos serios inconvenientes. Primero, todos los días de un mismo mes tienen asociados el mismo valor de temperatura "normal" (media calculada del histórico) y desviación típica. Por otro lado, dependiendo de la estación meteorológica y de los meses, la existencia de transiciones demasiado fuertes de unos meses a otros produce errores sistemáticos en la identificación y cuantificación de desviaciones significativas en el entorno de la transición: la misma temperatura puede considerarse como normal el día último de un mes y como atípica al día siguiente, debido al cambio brusco de la temperatura de referencia, no de la temperatura real.

El modelo de media móvil solventa en gran parte estos dos inconvenientes ya que no aparecen grandes transiciones al permitir tener un valor distinto para cada día del año. A cambio,

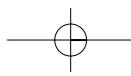


Figura 6. MORBIL para la temperatura máxima de Madrid

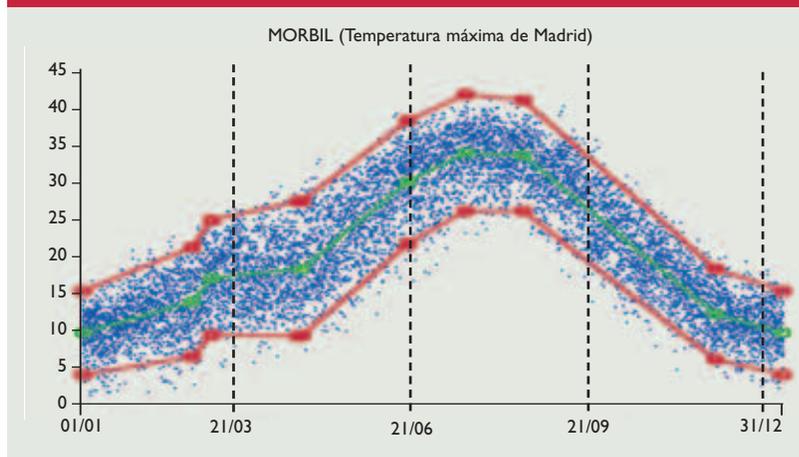
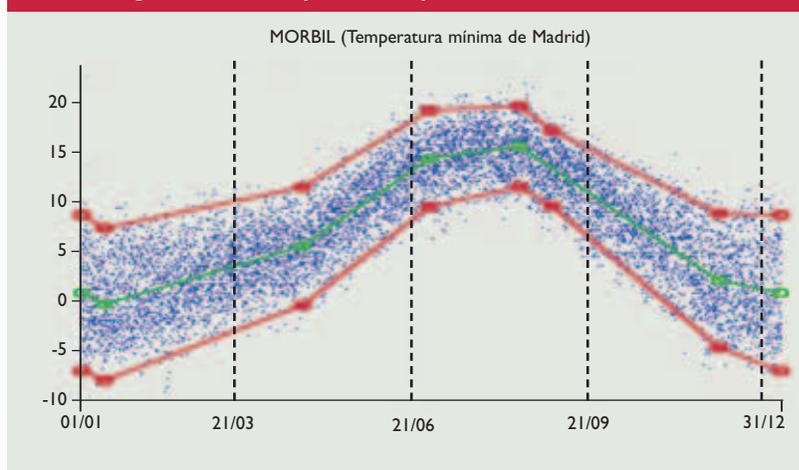


Figura 7. MORBIL para la temperatura mínima de Madrid



el modelo es más complejo de calcular; puede presentar fluctuaciones espurias (Figura 5), y es más difícil de gestionar ya que tiene 730 coeficientes (dos para cada día del año).

Modelo de referencia propuesto (MORBIL)

El MORBIL (Modelo de Referencia de Bisagras Lineales) surge como alternativa a los modelos de medias. Es un modelo que combina las ventajas de los modelos paramétricos (como el de medias mensuales) con las de los modelos no-paramétricos (como los suavizadores), evitando los inconvenientes de los dos tipos (ver [4]). En concreto, es capaz de conseguir errores en el ajuste similares a los del Supersmoother, con una complejidad inferior a la del modelo de medias mensuales.

Al igual que los modelos anteriores, el MORBIL consta de dos componentes: una determinista que indica la temperatura normal, y otra estocástica que recoge la variabilidad entorno

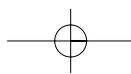
a dicho valor normal. La diferencia estriba en que en el MORBIL esas dos componentes están representadas utilizando un modelo unidimensional de bisagras lineales ([2, 4]), una función continua formada por tramos rectos. Dada una nube de puntos, el algoritmo de ajuste del modelo unidimensional de bisagras decide automáticamente el número de nodos y su posición.

En la Figura 6 se muestra el MORBIL obtenido para la temperatura máxima registrada en el aeropuerto de Madrid. Este modelo consta de 20 coeficientes, dos para cada bisagra. Se ha representado utilizando los mismos criterios que en la Figura 4. El MORBIL es muy superior al modelo de medias mensuales (con 20 coeficientes, un 16.7% inferior; consigue un error de ajuste un 5.5% inferior), siendo comparable al Supersmoother en cuanto error de ajuste (sólo un 0.2% superior) aunque mucho mejor en cuanto a número de coeficientes (20 frente a 730).

Estas diferencias entre los tres modelos considerados son sistemáticas. Según la información de la Tabla 1, el modelo de medias mensuales es siempre la peor alternativa ya que tiene más error y más coeficientes. El modelo Supersmoother es el que tiene menor error de ajuste, aunque utiliza un número de coeficientes muy elevado. Como alternativa, el MORBIL consigue errores de ajuste similares al modelo Supersmoother, pero con una complejidad incluso inferior a la del modelo de medias mensuales.

Comparando el MORBIL de la temperatura máxima de Madrid, con el modelo de temperatura mínima de Madrid (Figura 7) se puede observar que la dispersión en los meses de invierno es mucho mayor en la temperatura mínima que en la máxima. También se puede ver que la llegada de la primavera afecta fundamentalmente a la temperatura máxima. Es más, según la Tabla 1, para una determinada estación meteorológica, el MORBIL de la temperatura mínima es algo más sencillo que el modelo de la temperatura máxima.

En la Figura 8 se ha representado las mismas olas de frío y calor mostradas en la Figura 2, junto con la información suministrada por el MORBIL una vez evaluado en esas fechas. En ambas gráficas se ha representado la componente estocástica del modelo mediante una banda de color verde calculada como el valor esperado más (y menos) una vez la desviación típica estimada por el modelo. Una mera inspección visual de la figura



permite corroborar que gracias al modelo es posible identificar cuándo se produjo el ascenso de las temperaturas durante agosto de 2003, y el descenso de las temperaturas durante diciembre de 2001. Además, el mismo modelo permite medir fácilmente la cantidad de frío o calor como diferencia entre el valor real y la banda de confianza.

Conclusiones

Se ha presentado un nuevo modelo de referencia que permite identificar y cuantificar fácilmente las desviaciones significativas en la temperatura. Este modelo, denominado MORBIL, se construye automáticamente a partir de los históricos de temperatura, y presenta como principal ventaja el buen compromiso que realiza entre su precisión en el ajuste y su simplicidad, tanto desde el punto de vista conceptual como práctico.

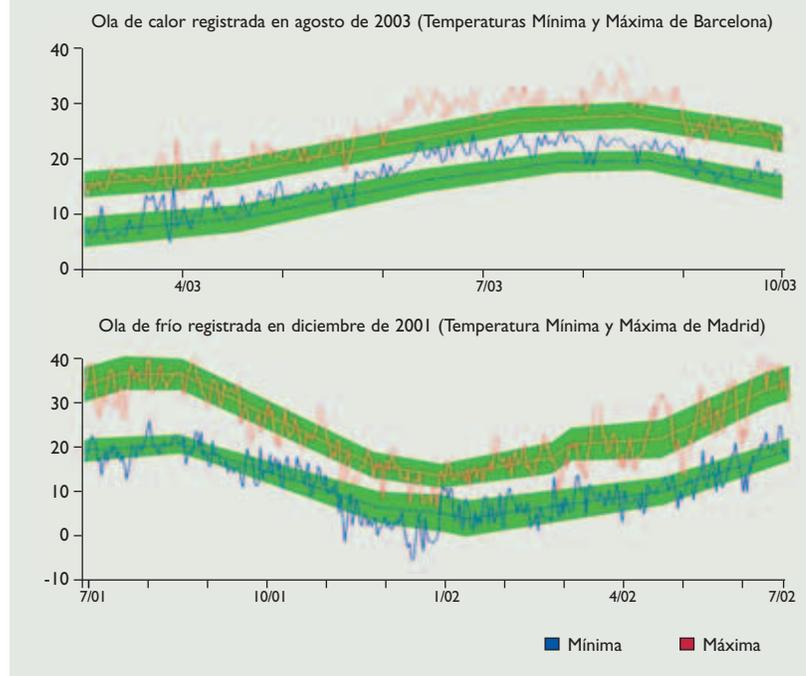
Dada la naturaleza del modelo, existen numerosas aplicaciones en donde puede resultar de utilidad. A parte de servir para ayudar a determinar de una forma objetiva si se está frente a una **ola de frío o calor**, este modelo permite, por ejemplo, cuantificar el impacto térmico de dichos fenómenos mediante el cálculo de unos **grados día** dinámicos que recojan las variaciones respecto a una temperatura de referencia normal.

Otra aplicación práctica en la que ha demostrado su validez es en la **predicción de series diarias de consumo energético** (electricidad y gas), en donde es muy importante recoger correctamente la sensibilidad del consumo energético a las variaciones de la temperatura máxima y mínima respecto a la temperatura normal esperada para distintos periodos del año (ver por ejemplo los trabajos [5, 6, 7]).

Finalmente, la **generación de escenarios futuros** de temperatura aparece como otra aplicación práctica directa ya que el MORBIL puede servir para modelar la componente determinista que, junto con un modelo estructural [8, 9] pueden recoger de forma realista la dinámica fluctuante entorno a la temperatura de referencia. Los escenarios de temperatura construidos de este modo pueden permitir realizar análisis de riesgos frente a escenarios más o menos extremos de temperatura.

En la actualidad el MORBIL está siendo utilizado por la empresa Enagás, principal responsable del transporte de gas natural en España, dentro de sus modelos predictivos PATRONES de medio plazo para caracterizar el impacto de la temperatura en el consumo de gas.

Figura 8. MORBIL en las olas de frío y calor registradas en agosto de 2003 y diciembre de 2001



Agradecimientos

Este trabajo es fruto de la colaboración entre el Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) de la Universidad Pontificia Comillas y Enagás. ■

Referencias

- [1] Instituto Nacional de Meteorología, www.inm.es.
- [2] Sánchez-Úbeda, E.F., Wehenkel, L., "The Hinges model: A one-dimensional continuous piecewise linear model". Proc. IPMU'98, pp. 878-885, Paris, July 1998.
- [3] Friedman, J., "A variable Smoother", Dept. Statistics, LCS 05, Universidad de Stanford, Noviembre 1984.
- [4] Sánchez-Úbeda, E.F., *Models for data analysis: contributions to automatic learning*, Tesis doctoral, Univ. Pontificia Comillas, 1999.
- [5] Pardo, A., Meneu, V., Valor, E., "Temperature and seasonality influences on Spanish electricity load," *Energy Economics*, vol. 24, pp. 55-70, 2002.
- [6] Burgnion, V., Sogomonian, A., y Swindle, G., "Modelling weather-sensitive electrical loads", *Energy & Power Risk Management*, 2002.
- [7] Taylor, J.W. and Buizza, R., "Using weather ensemble predictions in electricity demand forecasting", *International Journal of forecasting*, vol. 19, pp. 57-70, 2002.
- [8] Lucia, J.J., Schwartz, E.S., "Electricity prices and power derivatives: Evidence from the Nordic Power Exchange", *Review of Derivatives Research*, 5, pp. 5-50, 2002.
- [9] Taylor, J.W., *Modelling prices in competitive electricity markets*, Bunn, D.W. (ed.), pp. 307-330, John Wiley & Sons Inc., 2004.