

ESTIMACIÓN DE LAS NECESIDADES POTENCIALES DE REFRIGERACIÓN EN ANDALUCÍA EN SITUACIONES TÉRMICAS HABITUALES Y EN SITUACIONES DE CALOR EXTREMO

Javier MARZO, Natalia LIMONES, Pilar DÍAZ, Manuel BERNAL
Depto. de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Sevilla
xavimarzo@us.es, natalialr@us.es, pilard@us.es, bernalmm@us.es

RESUMEN

En los meses de verano, en Andalucía se produce una importante demanda energética por necesidades de refrigeración, un sector que todavía no ha alcanzado su techo en la región. De ahí que sea necesario realizar estimaciones que planifiquen tanto la demanda energética total, para la cual sería necesario conocer el comportamiento habitual de la temperatura –entre otras variables–, como las puntas de demanda que se producen cuando las temperaturas son extraordinariamente elevadas, lo cual constituye el fundamento de la planificación de máxima capacidad generadora.

Para ello, se han comparado los patrones espaciales de las necesidades potenciales de refrigeración en condiciones térmicas habituales y en situaciones de temperaturas extraordinariamente elevadas, a partir de la espacialización de la variable grados-día, utilizada frecuentemente para realizar este tipo de estimaciones. Ello ha permitido identificar aquellas zonas de la región que presentan inusitadas necesidades de refrigeración en situaciones de temperaturas extremas, mayores de lo que cabría esperar si atendiéramos únicamente a las necesidades de refrigeración en condiciones térmicas habituales.

Palabras clave: grados-día refrigeración, demanda energética, extremos térmicos, modelos de regresión

ABSTRACT

In Andalusia during the summer there is a significant energy demand for cooling needs, a sector that has not reached its limit in the region yet.

Therefore, it is necessary to plan both the total energy demand using mainly the norms of behaviour of the temperatures in the region, and the demand peaks that take place when such temperatures are extremely high. This last step is considered as the basis of the maximum generating capacity planning.

To achieve that, the spatial patterns of cooling needs in average thermal conditions have been compared to the situations of extremely high temperatures, in both cases by spatializing the variable degree-days, widely used for these appraisals. It has helped to identify and explain the areas of the region that have special or unusual needs in extreme situations, greater than those expected if only average conditions were taken into account.

Key words: cooling degree-days, energy demand, temperature extremes, regression models.

1. INTRODUCCIÓN

Los episodios de temperaturas extremadamente elevadas han sido estudiados tanto desde la climatología puramente descriptiva (Pejenaute, 1995) o sinóptica (Capel Molina, 1979), como desde

otras disciplinas que describen los impactos que generan en la salud (Díaz *et al.*, 2002), en la vegetación (Jolly *et al.*, 2005), o en la demanda energética (Segal *et al.*, 1992; Valor *et al.*, 2001; Miller *et al.*, 2008).

En los meses de verano, en Andalucía se produce una importante demanda energética por necesidades de refrigeración, un sector que todavía no ha alcanzado su techo en la región. La predicción de la demanda es un asunto de vital importancia para las centrales generadoras. Una buena predicción puede ayudar a determinar si previsiblemente se va a producir una carencia de capacidad generadora -y, en consecuencia, pudiera ser conveniente considerar la construcción de nuevas centrales de energía o simplemente impulsar la adopción de medidas de conservación de ésta- o, por el contrario, si en el futuro existirá un exceso de capacidad que pudiera aconsejar la no utilización de parte del parque generador ya existente (Gutiérrez, 2003). Por otra parte, es fundamental conocer el alcance de las puntas de demanda de energía eléctrica -que suelen producirse en un contexto de temperaturas extremas-, sobre todo teniendo en cuenta que la electricidad, cuya demanda debe ser satisfecha de forma instantánea, no puede ser almacenada en cantidades considerables.

La temperatura es la variable meteorológica que mayor influencia ejerce sobre la demanda energética, por lo que a menudo aparece como variable explicativa en modelos econométricos de predicción, generalmente a partir de un número muy reducido de observatorios meteorológicos (Valor *et al.*, 2001; Gutiérrez, 2003), algo que supone una carencia en regiones con una elevada diversidad topográfica y, por ende, climática, como es el caso que nos ocupa. Más habitual todavía es la utilización de la variable grados-día, al presentar una ventaja evidente con respecto a la utilización de la temperatura: segregándola en grados-día calefacción y en grados-día refrigeración pueden establecerse sendas relaciones lineales con la demanda.

La variable grados-día cuantifica la discrepancia entre la temperatura ambiente representativa de un período de tiempo y una cierta temperatura de referencia, que es aquella en la que no se produce consumo energético para climatizar espacios. Como norma general, esta variable se calcula a partir de la diferencia entre la temperatura media diaria y la temperatura de referencia. En otros estudios, en cambio, se utilizan temperaturas máximas y mínimas diarias (Matzarakis y Balafoutis, 2004), capturándose de forma más precisa el comportamiento intradiario de las necesidades de climatización. En este estudio hemos optado por esta segunda opción.

2. OBJETIVOS, FUENTES Y METODOLOGÍA

El objetivo de esta comunicación es analizar los patrones espaciales de las necesidades potenciales de refrigeración en Andalucía, tanto en condiciones térmicas habituales como en situaciones de calor extremo, a partir de la espacialización de la variable grados-día refrigeración en ambos escenarios. Ello nos ha permitido identificar aquellas zonas de la región que presentan inusitadas necesidades de refrigeración en situaciones de temperaturas extremas, mayores de lo que cabría esperar si atendiéramos únicamente a las necesidades de refrigeración en condiciones térmicas habituales, y que por lo tanto son susceptibles de presentar puntas de demanda energética especialmente elevadas.

Para este fin hemos seleccionado las series de temperaturas máximas y mínimas diarias del periodo de verano (junio-septiembre) de 136 estaciones meteorológicas andaluzas, en el periodo 1985-1999. La distribución de los observatorios es relativamente armónica, aunque se produce una dualidad perniciosa: disponemos de muchas estaciones situadas en zonas llanas, donde existe una mayor homogeneidad climática, y pocas en zonas de mayor altitud, donde deberíamos presuponer una mayor heterogeneidad y, por lo tanto, donde precisamente se haría necesaria una mayor densidad de observatorios (ver figura 1).

Todas las estaciones seleccionadas superan el 90% de registros diarios válidos. Se ha seguido la metodología propuesta por Aguilar *et al.* (2003) para realizar el control de calidad de las series diarias de temperatura. El relleno de lagunas de cada estación se ha realizado a partir de la correlación lineal con su correspondiente estación de referencia, siguiendo el procedimiento de Brunet *et al.* (2006).

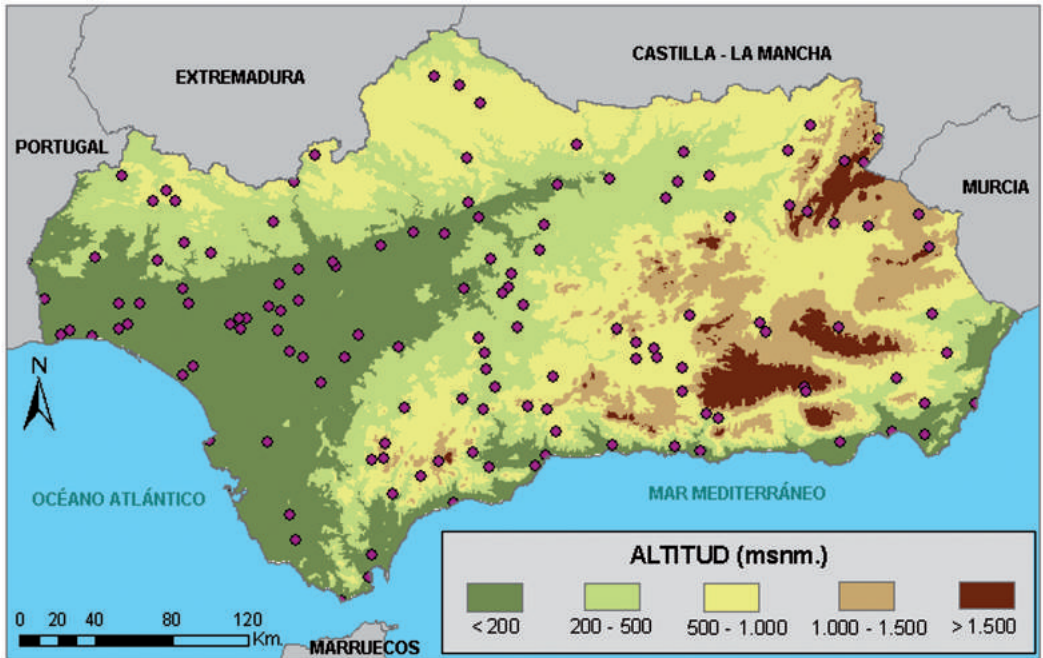


FIG. 1: Observatorios meteorológicos seleccionados, según altitud.

Las distintas ecuaciones que se han utilizado para calcular los grados-día refrigeración se han obtenido por analogía a las propuestas por Matzarakis y Balafoutis (2004), que únicamente calcularon las necesidades de calefacción. La temperatura de base, que es aquella por debajo de la cual no existirían necesidades de refrigeración, se ha fijado en 21°C, decisión que se apoya en su establecimiento en varios estudios de clima mediterráneo (Buyukalaka *et al.*, 2001; Sailor *et al.*, 1997). En la tabla 1 se presentan las diferentes ecuaciones utilizadas, según las relaciones que se establecen entre la temperatura de base (T_b), la temperatura mínima (T_{min}), la temperatura máxima (T_{max}) y la temperatura media (T_{med}).

CONDICIÓN		ECUACIÓN
$T_b \geq T_{min}$		$GDR = T_{med} - T_b$
$T_b < T_{min}$	$T_{med} > T_b$	$GDR = (T_{max} - T_b)/2 - (T_b - T_{min})/4$
	$T_{med} \leq T_b$	$GDR = (T_{max} - T_b)/4$

TABLA 1: Ecuaciones de cálculo de los grados-días refrigeración.

Para cada estación se han calculado todos los valores diarios de grados-día refrigeración del periodo considerado. Posteriormente se han obtenido, por una parte, el valor medio diario de grados-día refrigeración de cada observatorio, con el fin de evaluar las necesidades potenciales de refrigeración en situaciones habituales, y por otra el percentil 95, como umbral para considerar las necesidades potenciales de refrigeración en situaciones de temperaturas extremadamente elevadas, utilizado habitualmente no sólo en la literatura (Robinson, 2001; Díaz *et al.*, 2006) sino también en

distintos servicios meteorológicos de predicción para dar aviso de una situación de riesgo meteorológico por altas temperaturas (AEMET, Servei Meteorològic de Catalunya, etc.).

La modelización espacial de ambas variables se ha llevado a cabo a partir de un método mixto de espacialización, en el que en primer lugar se han obtenido modelos de regresión y a continuación se han interpolado, mediante el inverso de la distancia al cuadrado, los residuos derivados de éstos, con el objetivo de corregir los valores inexactos en las celdillas coincidentes con los puntos de observación. Se han testado las variables independientes que habitualmente se suelen introducir en la espacialización de variables climáticas (altitud, distancia euclídea al mar, latitud y longitud), además de la distancia al mar ponderada por la altitud -que en cierta medida refleja la continentalidad debido a la existencia de barreras orográficas (Álvarez, 2011)-, y el logaritmo decimal de esta última y de la distancia euclídea al mar, que han ofrecido buenos resultados en trabajos de modelización de temperatura (Ninyerola *et al.*, 2005; Álvarez, 2011).

De la misma forma que sucede con la modelización de la temperatura, en los meses de verano la obtención de un único modelo que explique el comportamiento de las necesidades potenciales de refrigeración de toda la región no parece la solución más recomendable, al presentar una varianza explicada que en ninguna de las dos variables alcanza el 50%. Esto sucede porque en los meses estivales la relación inversa entre temperatura y altitud deja de cumplirse en las zonas que reciben una cierta influencia marítima. Por esta razón se ha decidido segregar la región en dos según un criterio de continentalidad, a partir del logaritmo decimal de la distancia al mar ponderada por la altitud, obteniendo para las dos subregiones sendos mapas de grados-día refrigeración medios diarios y su percentil 95.

El principal problema derivado de esta segregación espacial es que la subregión de influencia marítima dispone únicamente de 40 observatorios, por lo que no resulta conveniente reservar algunos de ellos como puntos de validación de los modelos. Por ello se ha seguido un procedimiento de validación cruzada, estimando el valor a interpolar para cada uno de los puntos de muestreo, aunque sin incluir dicho observatorio. Obviamente, el coste computacional de este procedimiento es muy superior al de otras metodologías en las que se utilizan subconjuntos de validación (Ninyerola *et al.*, 2005; Álvarez, 2011).

3. RESULTADOS

3.1. Calidad de los modelos

Previo a la descripción de los patrones espaciales de las necesidades potenciales de refrigeración, es necesario establecer algunas consideraciones en cuanto a la calidad de los modelos obtenidos. En primer lugar, debe resaltarse la absoluta conveniencia de haber segregado la región según un criterio de continentalidad, al producirse una mejora sustancial en todos los casos. La varianza explicada supera en el peor de los modelos el 60%, correspondiéndose con el modelo del percentil 95 en la subregión de mayor influencia marítima, siendo ligeramente superior (64%) en la subregión complementaria; por otra parte, el porcentaje del modelo de grados-día refrigeración medios en la zona de mayor continentalidad alcanza el 75%, ciñéndose a un 72% en la zona de influencia marítima.

Podemos afirmar que, por lo tanto, la calidad de los modelos es mayor en las zonas de mayor continentalidad, y en condiciones térmicas habituales. Una de las causas que pueden justificar lo primero es la intervención de la altitud como variable explicativa, tanto en la espacialización de los valores medios diarios como del percentil 95, al presentar una relación inversa y directa evidente, matizada con el logaritmo decimal de la distancia ponderada al mar, de mucha menor capacidad explicativa. En cambio, los modelos de las zonas de mayor influencia marítima únicamente están constituidos por el logaritmo decimal de la distancia euclídea al mar. Por otra parte, parece evidente que la calidad de los modelos que intentan representar las necesidades potenciales de refrigeración en situaciones térmicas excepcionales es menor porque su distribución espacial no obedece de igual forma a los factores fisiográficos que hemos tenido en consideración, pudiéndose ver más

influenciados por eventos meteorológicos de carácter local (efecto foehn, por ejemplo). Debe resaltarse la notable coherencia espacial que se produce en la zona limítrofe de las dos subregiones generadas, indicativa también de la confiabilidad de todos los modelos generados.

3.2. Distribución de las necesidades potenciales de refrigeración

La configuración de las necesidades potenciales de refrigeración presenta una variabilidad propia de una región con marcados contrastes fisiográficos. En condiciones térmicas habituales, los valores más elevados de la región superan los 5 grados-día en toda la depresión del Guadalquivir, alcanzando sus valores máximos en la zona de la campiña sevillana y gaditana, y en las zonas de menor altitud de la provincia de Jaén, donde además interviene en cierta medida el aislamiento de cualquier influencia marítima (ver figura 2). En cualquier caso, en estas zonas de marcada continentalidad el factor que propicia el descenso de las necesidades de refrigeración es la altitud, a razón de 0'5 grados-día por cada 100 metros de ascenso, aproximadamente. De hecho, por lo general a partir de la cota 1.600 metros los valores medios diarios de grados-día refrigeración se aproximan a 0.

Las zonas costeras presentan valores intermedios, alrededor de 3 grados-día en la línea de costa tanto de la vertiente atlántica como de la mediterránea, aumentando exponencialmente a medida que la distancia al mar lo hace. Como excepciones destacan la zona del estrecho de Gibraltar, con valores inferiores a 2 grados-día, y la zona del cabo de Gata, por encima de 4 grados-día incluso en la línea de costa.

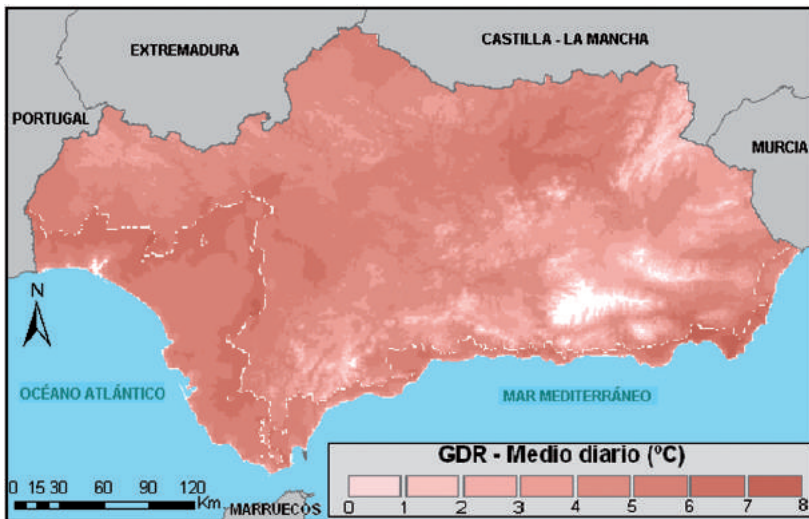


FIG. 2: Grados-día refrigeración medios diarios. La línea blanca separa las dos subregiones.

La distribución espacial de las necesidades potenciales de refrigeración en situaciones de temperaturas extremas es, a grandes rasgos, muy similar, aunque obviamente la variable grados-día adquiere valores más elevados en todos los casos (ver figura 3). De nuevo, los máximos se corresponden con las zonas más deprimidas del valle del Guadalquivir, superando en algunas zonas los 12 grados-día refrigeración. Sólo las zonas por encima de los 2.100 metros de altitud (2,5% de la superficie de la región) no requerirían refrigeración en una situación de temperaturas extremas con el umbral considerado.

Determinados puntos de la línea de costa alcanzan valores superiores a 9 grados-día. De nuevo, la zona del cabo de Gata alcanza los valores más extremos. Por otra parte, las necesidades de refrigeración que se producen en la zona del estrecho de Gibraltar apenas superan los 4 grados-día, produciéndose una diferencia muy acentuada con respecto al resto de zonas costeras de la región, mayor que la que se producía en la estimación de las necesidades de refrigeración medias.

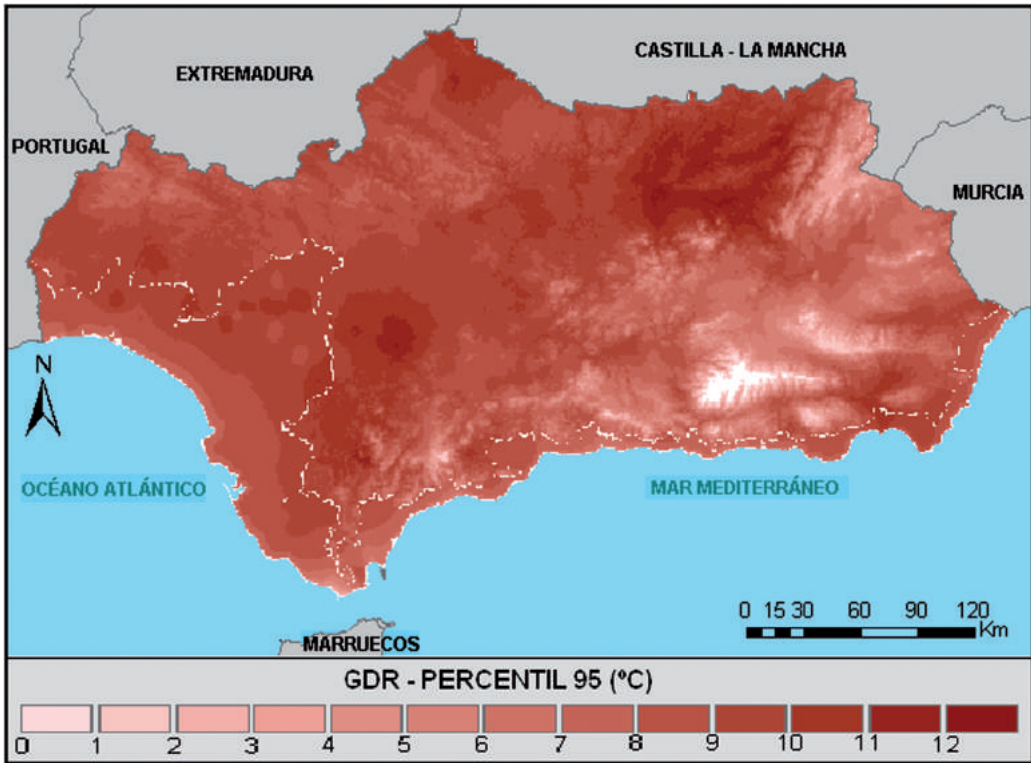


FIG. 3: Percentil 95 de grados-día refrigeración. La línea blanca separa las dos subregiones.

3.3. Grados-día refrigeración en situaciones de calor extremo con respecto a valores medios

Dado que el comportamiento de los percentiles con respecto a los valores medios presenta diferencias regionales significativas, se ha decidido comparar ambas situaciones estableciendo la diferencia, en valor absoluto, entre ambos mapas (ver figura 4). El resultado, obtenido mediante álgebra cartográfica, indica en qué medida aumentan los valores de grados-día refrigeración en situaciones de temperaturas extremas con respecto al valor medio. Sólo se ha calculado la diferencia en aquellas celdas en las que tanto el valor medio como el percentil 95 eran superiores a 0.

Por lo general, los mayores incrementos (que incluso superan los 6 grados-día) se producen en las zonas que presentan los valores más elevados de la región en ambas variables: depresión del Guadalquivir, campiña sevillana y gaditana, y extremo septentrional de la provincia de Córdoba.

En cualquier caso, y aunque la representatividad espacial es mucho menor, la situación más relevante es la que se produce en numerosas zonas de la línea de costa, en las que la diferencia entre los valores extremos y los medios supera los 5 grados-día. Esta gran discordancia generalmente desaparece a pocos kilómetros de distancia hacia el interior, probablemente porque en situaciones térmicas habituales la influencia suavizadora marítima disminuye exponencialmente a medida que aumenta la distancia al mar pero, en cambio, en situaciones de calor extremo la influencia marítima suele desaparecer casi por completo, incluso en la franja más cercana al mar, al ser generadas muy habitualmente por el efecto foehn, del que hay numerosos y conocidos ejemplos en ambas vertientes: el levante de Cádiz o Huelva, o el terral de Málaga. El estrecho de Gibraltar queda al margen de esta situación, al presentar en ambos casos valores bajos de grados-día refrigeración. La propia dinámica de su clima local, en la que además los terrales no inciden con la misma frecuencia e intensidad, parecen la causa más probable.

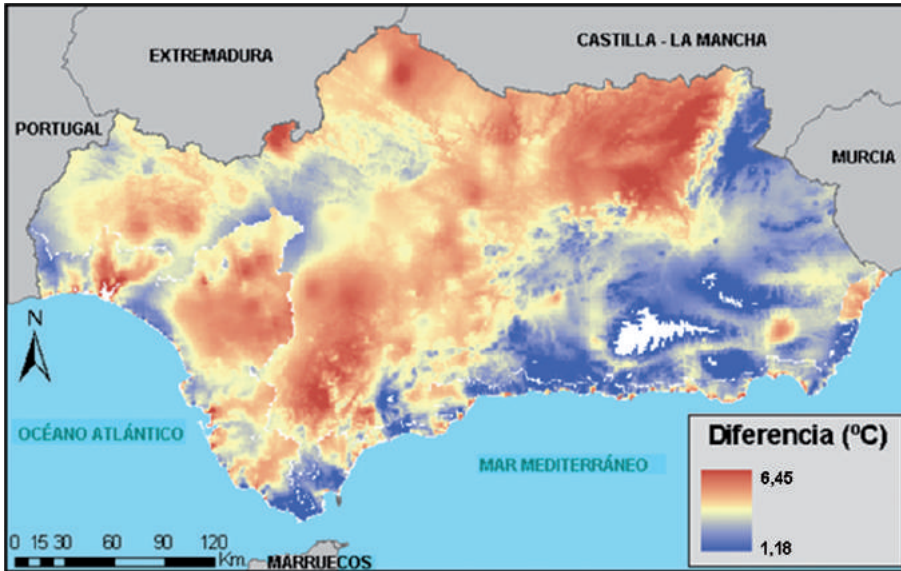


FIG. 4: Diferencia entre el percentil 95 y el valor medio diario de grados-día de refrigeración.

4. CONCLUSIONES

La variable grados-día es una excelente herramienta para realizar estimaciones de la demanda energética por necesidades de climatización. La obtención de modelos que expliquen su comportamiento en el territorio tanto en condiciones térmicas medias como en situaciones de calor extremo ha sido un primer resultado relevante, y puede tener utilidad en la planificación energética de la región.

En cuanto al proceso de modelización, la decisión de haber segregado la región según un criterio de continentalidad ha sido absolutamente conveniente, al producirse una mejora notable con respecto a la obtención de un único modelo regional para cada una de las variables. Este resultado metodológico podría ser extrapolable a la modelización de la temperatura, e incluso a otras variables climáticas.

Numerosas zonas de la franja costera se erigen como vulnerables ante una situación de calor extremo, al presentar un aumento en las necesidades de refrigeración similar al de las zonas que presentan los máximos de la comunidad, debido probablemente a la incidencia de vientos locales (terrales) que provocan un marcado efecto foehn, que elimina la constante influencia marítima. Si bien este fenómeno no tiene una gran relevancia espacial, sí debe tenerse en cuenta que la franja costera concentra un elevado porcentaje de la población regional, por lo que es potencialmente muy demandante de energía.

REFERENCIAS

- Aguilar, E.; Auer, I.; Brunet, M.; Peterson, T.C. & Wieringa, J. (2003). *Guidelines on climate metadata and homogenization*. WCDMP-No. 53, WMO-TD No. 1186. World Meteorological Organization: Geneve.
- Álvarez, J.I. (2011). *Espacialización de la temperatura media mensual en Andalucía mediante técnicas estadísticas y SIG*. Trabajo de investigación tutelado de doctorado. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Sevilla.
- Brunet, M.; Saladié, O.; Jones, P.; Sigró, J.; Aguilar, E.; Moberg, A.; Walther, A.; Lister, D.; López, D. & Almarza, C. (2006). "The development of a new daily adjusted temperature dataset for Spain (1850– 2003)", *International Journal of Climatology*, 26, pp. 1777–1802.

- Büyükalaca, O.; Bulut, H. & Yılmaz, T. (2001). "Analysis of Variable-Base Heating and Cooling Degree-Days for Turkey", *Applied Energy*, vol. 69, n°4, pp.269-283.
- Capel Molina, J.J. (1979): "Avance sobre las invasiones de aire cálido en la Península Ibérica: los mecanismos". *Cuadernos Geográficos*, Universidad de Granada, pp. 45-62.
- Díaz, J., Jordán, A., García, R., López, C., Alberdi, J.C., Hernández E. & Otero, A. (2002). "Heat waves in Madrid 1986-1997: effects on the health of the elderly". *Int Arch Occup Environ Health*, 75, pp. 163- 170.
- Díaz, J.; García-Herrera, R.; Trigo, R.M; Linares, C.; Valente, M.A.; De Miguel, J.M. & Hernández, E. (2006). "The impact of the summer 2003 heat wave in Iberia: how should we measure it?", *Int J Biometeorol*, 50, pp.159–166
- Gutiérrez, E. (2003). *La demanda residencial de energía eléctrica en Andalucía: un análisis cuantitativo*. Tesis doctoral. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Sevilla.
- Jolly, W. M.; Dobbertin, N.; Zimmermann, E. & Reichstein, M. (2005). "Divergent vegetation growth responses to the 2003 heat wave in the Swiss Alps". *Geophysical Research Letters*, 32: doi:10.1029/2005GL023252.
- Matzarakis, A. & Balafoutis, C. (2004). "Heating degree-days over Greece as an index of energy consumption". *Int. J. Climatol.*, vol. 24, pp. 1817-1828.
- Miller, N. L.; Hayhoe, K.; Jin, J. & Auffhammer, M. (2008). "Climate, Extreme Heat, and Electricity Demand in California". *Journal of Applied Meteorology*, 47, pp. 1834–1844.
- Ninyerola, M.; Pons, X. & Roure, J.M. (2005). *Atlas Climático Digital de la Península Ibérica. Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica*. ISBN 932860-8-7. Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra.
- Pejenaute, J.M. (1995). "La ola de calor de octubre de 1995 en Navarra". *Espacio, Tiempo y Forma*, serie VI, Geografía, t.8, pp. 11-33.
- Robinson, P. J. (2001). "On the Definition of a Heat Wave". *Journal of Applied Meteorology*, 40, pp. 762-775.
- Sailor, D. & Muñoz, R. (1997). "Sensitivity of electricity and natural gas consumption to climate in the U.S.A: Methodology and results for eight states". *Energy*, vol. 22, n°10, pp. 987-998.
- Segal, M.; Shafir, H.; Mandel, M.; Alpert, P. & Balmor, Y. (1992). "Climatic-related Evaluations of the Summer Peak-Hours' Electric Load in Israel". *Journal of Applied Meteorology*, vol. 31, Issue 12, pp.1492-1498
- Valor, E.; Meneu, V. & Caselles, V. (2001). "Daily Air Temperature and Electricity Load in Spain". *Journal of Applied Meteorology*, 40, pp.1413–1421.