

PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PENÍNSULA IBÉRICA: ASIMETRÍAS ESPACIAL Y ESTACIONAL EN LOS PATRONES DE CALENTAMIENTO

J.J. Gómez-Navarro⁽¹⁾, J.P. Montávez⁽¹⁾, S. Jerez^(2,1),
S.B. Navarro⁽¹⁾, J.A. García-Valero⁽³⁾, J.F. González-Rouco⁽⁴⁾

(1) Dpto. de Física, Universidad de Murcia, Centro de investigación en Óptica y Nanofísica (CiOyN), Campus de Espinardo, 30071 Murcia, jjgomeznava@um.es

(2) Instituto Euromediterráneo del Agua, Ctra. Nacional 301, Edificio 27, 30100 Espinardo, Murcia, sonia.jerez@gmail.com

(3) Instituto Nacional de Meteorología, Avda de la Libertad 11, 30071 Guadalupe, Murcia, agvalero@inm.es

(4) Dpto. de Astrofísica y C. C. de la Atmósfera, Universidad Complutense de Madrid, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid, fidelgr@fis.ucm.es

1. Introducción

El cambio climático es uno de los problemas más preocupantes de la sociedad actual, como ha sido puesto de manifiesto en el último informe del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 1997), donde se muestra la contribución antrópica a este problema. En concreto la Península Ibérica ha sido identificada como uno de los lugares del planeta más directamente afectados por este problema (Giorgi, 2006; Diffenbaugh et al., 2007).

Para hacer proyecciones de cambio climático, es preciso plantear escenarios de futuro, consistentes en una serie de hipótesis sobre el desarrollo social, económico, demográfico y tecnológico, a partir de las cuales se hacen estimaciones sobre las emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) que sirven para forzar los modelos globales. De entre las distintas posibilidades que se plantean, los escenarios A2 y B2 de SRES son los más comúnmente utilizados, y son los que hemos usado en este trabajo.

Los modelos globales, utilizados para estudiar el cambio climático global, poseen una baja resolución que cuestiona su utilidad para estudiar regiones tan complejas como la Península Ibérica, donde hay una gran diversidad climática. La solución a este problema es emplear técnicas de regionalización, tanto dinámicas como estadísticas (Montávez et al., 2002).

En este trabajo se estudian los patrones de cambio de temperaturas máximas y mínimas para los esce-

narios A2 y B2 de SRES obtenidos a partir de unas integraciones de alta resolución realizadas con una versión climática del modelo MM5 (Montávez et al., 2006).

En la sección 2 se describe la metodología empleada. En la sección 3 se desarrollan en detalle los resultados obtenidos. Por último, en la sección 4 se presentan algunas conclusiones y comentarios.

2. Metodología

La regionalización dinámica ha sido llevada a cabo mediante una versión propia del modelo MM5 (Grell et al., 1994) adaptada para integraciones climáticas (Montávez et al., 2006). La configuración espacial utilizado ha consistido en dos dominios anidados bidireccionalmente con resolución de 90 y 30km respectivamente (ver Figura 1) y 23 niveles sigma con su tope en 100mb. En cuanto a la configuración física del modelo, basándonos en los resultados de (Fernández et al., 2007), se ha utilizado: el esquema de humedad implícita *simple ice* (Dudhia, 1989), la parametrización de cúmulos de Grell (Grell, 1993), el modelo no local de capa límite MRF (Hong and Pan, 1996), y el modelo radiativo RRTM (Mlawer et al., 1997). Por otro lado se ha utilizado el modelo completo de suelo de Noah (Chen and Dudhia, 2001a,b).

Las condiciones de frontera, semidiarias, han sido extraídas de los experimentos *Erik* realizados con el modelo de circulación general acoplado ECHO-G. El

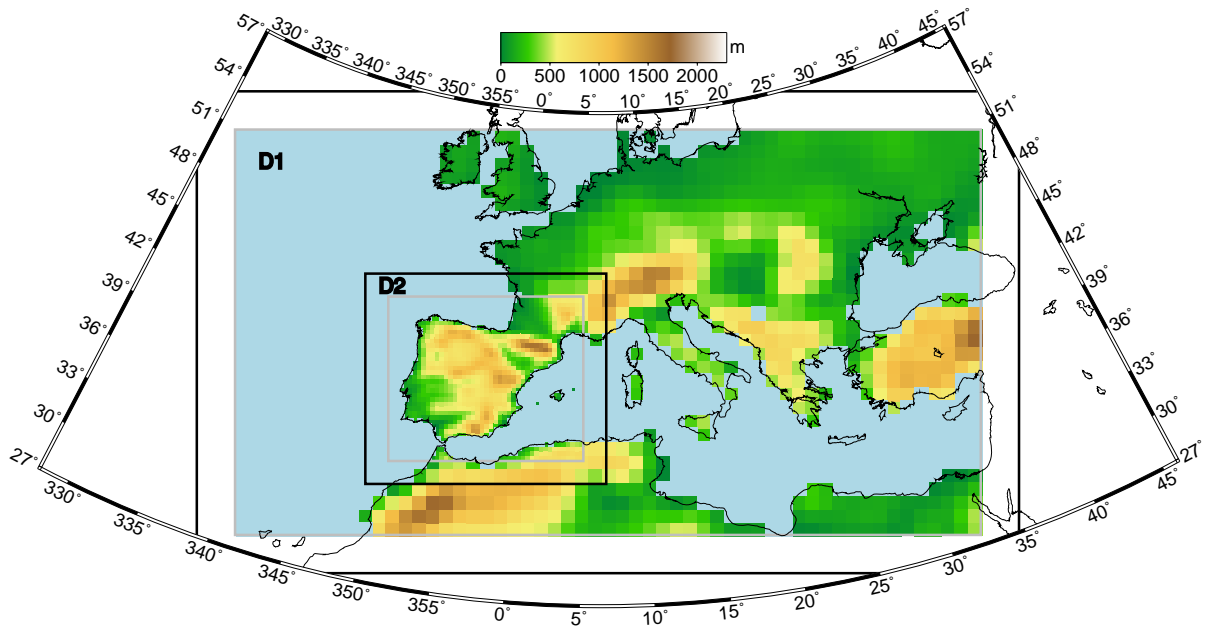


Figura 1. Dominios anidados D1 y D2 utilizados en los experimentos. Se representa también la topografía vista por el modelo en cada uno de los dominios.

modelo acoplado ECHO-G (Zorita et al., 2004) tiene como componente atmosférica el modelo ECHAM4 y como oceánica y hielo el modelo HOPE-G. ECHAM4 tiene una resolución T30 (aprox 3.75°), 19 niveles verticales sigma medios que cubren desde una altura de 30 m hasta 10mb. La componente oceánica HOPE-G es un modelo en ecuaciones primitivas y termodinámica con un modelo de hielo acoplado. Los datos de forzamiento radiativo, solar y GEIs utilizados para conducir los experimentos de *Erik* y que son coincidentes con los utilizados en los experimentos regionales se pueden encontrar en Zorita et al. (2005).

En la Tabla 1 se presentan los experimentos realizados, indicando los períodos y las condiciones de contorno utilizadas. Las integraciones han sido llevadas a cabo por períodos. En cada período se ha empleado un tiempo de *spinup* suficiente para que los resultados sean independientes de las condiciones iniciales.

Experimento	Período	Cond. de contorno
MM5-a01	1900-1990	Erik-a01
MM5-a08	1990-2100	Erik-a08
MM5-a09	1990-2100	Erik-a09

Tabla 1. Experimentos realizados.

3. Resultados

3.1. Análisis en componentes principales

En este trabajo estamos interesados en la evolución de los patrones espaciales de temperaturas máximas y mínimas. Para llevar a cabo esta tarea, utilizamos un análisis en componentes principales de los campos de temperaturas extremas medias mensuales en el dominio 2 (von Storch and Zwiers, 2007).

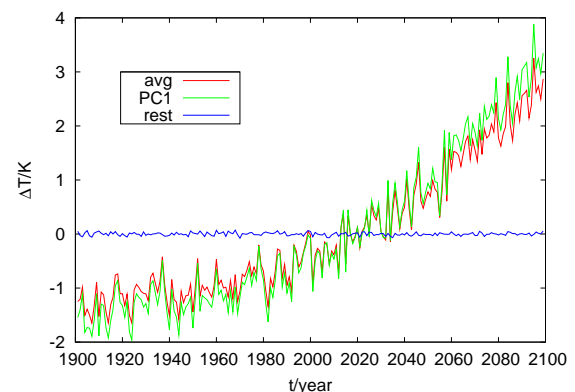


Figura 2. Anomalías en la componente principal de la primera EOF frente a las anomalías en la temperatura media sobre la PI. En azul se representa la serie obtenida de restar a la temperatura media el patrón de la primera EOF. Se observa cómo esta última serie carece de tendencia.

Los resultados obtenidos (ver Tabla 2) muestran que la mayor parte de la varianza de los campos es explicada por la primera función ortogonal (EOF), sien-

Serie	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$T_{\max}a01$	78.6	73.6	78.9	76.1	69.6	68.1	69.1	66.6	66.5	64.4	76.0	77.6
$T_{\min}a01$	78.6	76.4	75.8	74.7	61.9	59.4	66.3	63.3	62.3	65.9	74.0	75.9
$T_{\text{med}}a01$	82.0	79.8	81.3	80.2	71.1	67.9	71.6	68.7	67.9	68.8	78.4	78.8
$T_{\max}a08$	80.9	81.7	83.7	86.4	87.3	89.0	89.1	88.1	87.3	84.8	82.3	78.5
$T_{\min}a08$	82.2	80.8	81.2	83.4	81.9	86.9	88.2	85.9	84.7	81.8	78.7	78.8
$T_{\text{med}}a08$	84.8	84.6	85.4	87.6	87.4	90.0	90.6	89.2	88.2	85.7	82.9	81.4
$T_{\max}a09$	75.0	81.1	81.6	83.2	81.4	78.4	81.2	79.6	80.9	83.2	80.5	77.6
$T_{\min}a09$	69.0	79.1	77.7	79.7	76.9	72.6	80.2	77.9	77.0	80.9	80.2	77.7
$T_{\text{med}}a09$	74.2	83.6	82.7	84.8	82.4	79.1	83.8	81.9	81.8	85.1	83.9	80.9

Tabla 2. Porcentaje de la varianza total de la serie correspondiente explicada por la primera EOF. Se representa éste para cada serie temporal y separado por meses.

do el porcentaje de ésta superior al 60 % en la mayor parte de los casos, y especialmente en los escenarios de cambio climático. Es decir, podemos explicar la mayor parte de la variabilidad del campo con un solo patrón espacial.

La componente principal asociada a la primera EOF está directamente relacionada con la tendencia de la temperatura promedio del campo, como ha sido obtenido por otros autores (Zorita et al., 2005). Como muestra de ello, en la Figura 2 se representa la serie anual de temperaturas máximas promedio de la PI para la composición de experimentos a01+a08 y la componente principal (CP) asociada a la primera EOF. La correlación entre estas dos series es cercana al 1. También hemos representado en la misma Figura el resto de CPs, y como se puede apreciar no presentan tendencia alguna, indicando que ésta ha sido captada por la primera EOF.

Este comportamiento se reproduce fielmente en las doce series mensuales estudiadas, pero obteniendo diferentes patrones de calentamiento para cada mes, evidenciando un ciclo anual. Por lo tanto, en adelante se estudia el comportamiento de estos patrones de manera independiente para cada mes.

3.2. Influencia del forzamiento

Resulta interesante estudiar la influencia de los diferentes escenarios en los patrones de calentamiento. En las Figura 3 se representan los patrones obtenidos (primera EOF) para un mes de cada estación para las temperaturas máximas y mínimas, respectivamente, para el experimento a08. Los meses no representados tienen un comportamiento intermedio. Los patrones obtenidos para el experimento a09 presentan una gran similitud con los anteriores. En la Tabla 3 se muestran los coeficientes de correlación entre las EOFs de cada experimento, para cada mes y variable. En la mayor parte de los casos, los coeficientes de correlación son superiores a 0.9.

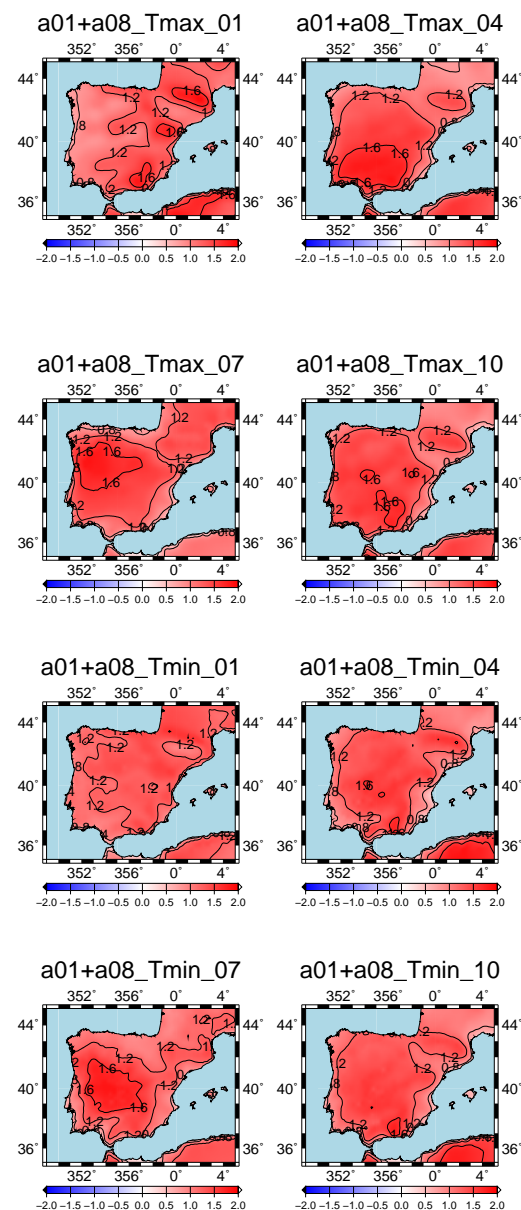


Figura 3. Primera EOF obtenida de las temperaturas mensuales máximas y mínimas en el período 1901-2100 para el experimento a01+a08. Se representan los meses de enero, abril, julio y septiembre, como muestra representativa de cada estación.

Serie	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$T_{\text{máx}}$	0.94	0.87	0.95	0.91	0.97	0.97	0.97	0.89	0.98	0.93	0.94	0.97
$T_{\text{mín}}$	0.78	0.90	0.95	0.91	0.98	0.98	0.94	0.88	0.97	0.92	0.90	0.92
T_{med}	0.91	0.80	0.96	0.91	0.97	0.98	0.97	0.87	0.98	0.92	0.91	0.95

Tabla 3. Correlación de la primera EOF para las series mensuales entre los resultados obtenidos para los escenarios A2 y B2. Se presentan los datos para cada mes y cada variable (temperaturas máximas, mínimas y medias). Los patrones obtenidos para ambos experimentos son prácticamente idénticos.

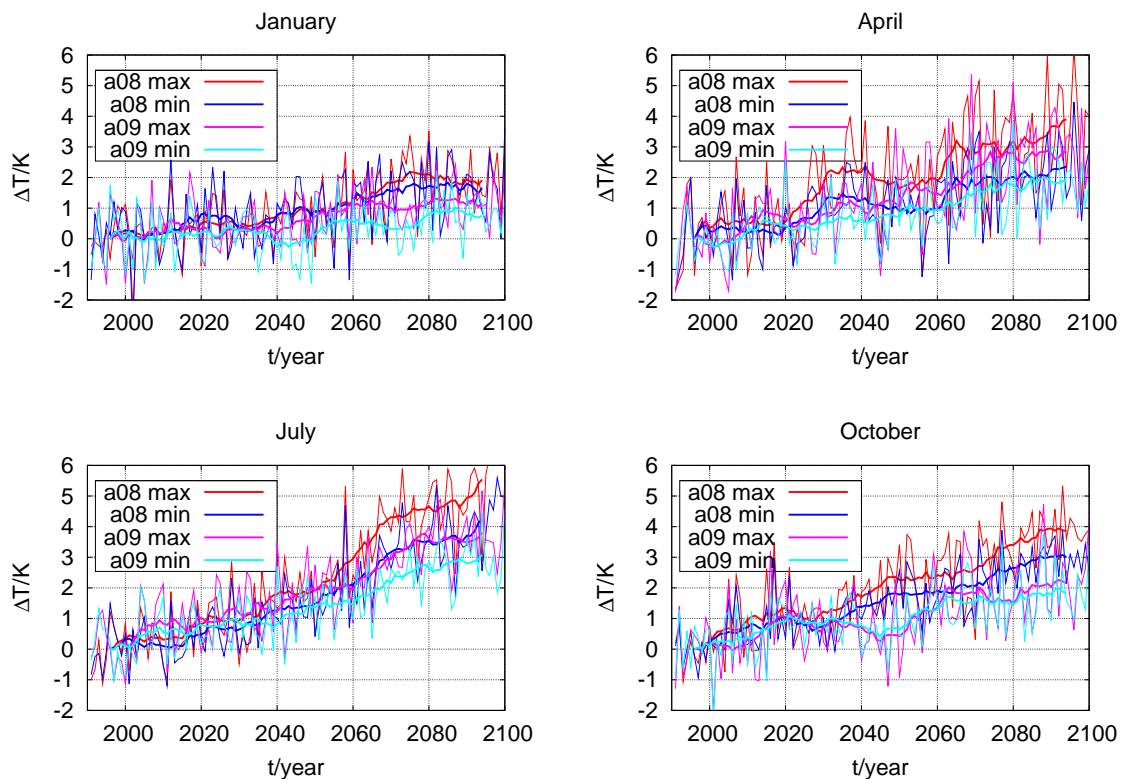


Figura 4. Series de la componente principal asociada a la primera EOF para las temperaturas máximas y mínimas, así como para los escenarios a08 y a09, respectivamente. Se presentan los datos para un mes representativo de cada estación, puesto que las series presentan una fuerte dependencia con el mes de referencia. Se puede apreciar la tendencia hacia el calentamiento en todos los casos, así como que las temperaturas son mayores para el escenario A2 (experimento a08). Así mismo podemos ver cómo la tendencia de las máximas es sensiblemente mayor, sobre todo en los meses centrales del año.

La diferencia entre los dos escenarios es la intensidad del calentamiento. Esto se puede apreciar en la Figura 4, donde se representan las componentes principales asociadas a la primera EOF de las temperaturas máximas y mínimas de cada mes. Como se puede apreciar, las componentes principales asociadas a la temperatura máxima (mínima) para el experimento a08, línea roja (azul), es siempre superior a la del experimento a09, en rosa (azul cielo).

Es importante resaltar que el calentamiento presenta un ciclo anual, siendo menor invierno que en los meses estivales. Así por ejemplo, a finales de siglo, en los meses de verano para el escenario A2 (B2) se alcanzan aumentos de hasta 5.5K (4K) en las máximas, mientras que en invierno no se superan los 2K (1K). Las tendencias para las mínimas presentan un comportamiento similar, aunque de menor magnitud.

3.3. Influencia del período

En la sección anterior se ha mostrado la similitud en los patrones de calentamiento obtenidos para los experimentos a08 y a09. La cuestión que se plantea es si estos patrones fundamentales de variación de temperatura aparecen también en otras épocas en las que el forzamiento introducido es menor y tiene diferentes orígenes, solares o de GEIs.

Análogamente a como se ha hecho anteriormente, se han calculado las correlaciones espaciales entre los patrones de temperaturas máximas, mínimas y medias para los experimentos a08 y a01. El resultado se muestra en la Tabla 4, donde se aprecia que las EOF presentan una fuerte correlación, aunque no tan clara como en el caso anterior. Por otro lado, también es importante notar que las correlaciones son mayores en los meses centrales del año.

3.4. Influencia del mes y la variable

Una vez mostrada la independencia de los patrones de calentamiento tanto del período como del escenario, pasamos a analizar la forma de éstos y la evolución interanual.

En la figura 3 podemos apreciar las diferencias en los patrones para temperaturas máximas y mínimas para algunos meses. Se aprecia una fuerte dependencia en la forma de los patrones con el mes.

Por otro lado, también se aprecian diferencias entre los patrones de temperaturas máximas y mínimas para un mismo mes, aunque éstas son menos importantes. Sin embargo, las tendencias de las temperaturas máximas son mayores que las de las mínimas, apareciendo por lo tanto una tendencia positiva en el rango diario de temperatura (ver Figura 4).

3.5. Aspectos geofísicos de los patrones

En esta sección se plantea la relación que los diferentes patrones encontrados guardan con distintos aspectos geofísicos, tales como la latitud, la orografía y la continentalidad.

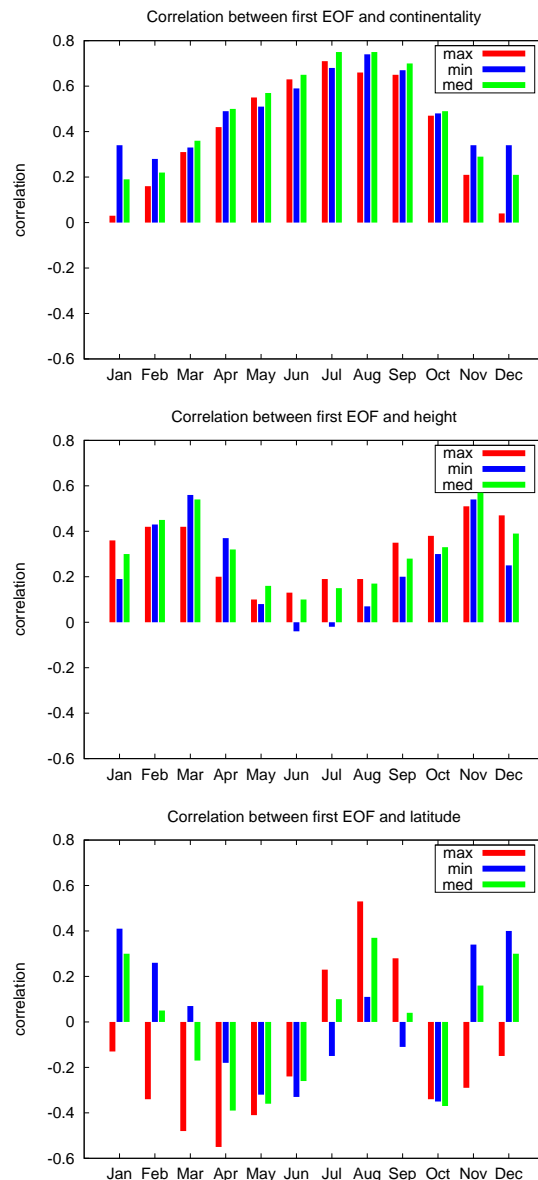


Figura 5. Correlación entre los diferentes patrones de calentamiento con la continentalidad, altura y latitud respectivamente a lo largo del ciclo anual. Se presentan los datos para la temperaturas máxima, mínima y media.

3.5.1. Continentalidad

Se ha definido el índice de continentalidad como la menor distancia desde un punto de tierra determinado al mar. A partir de él, a cada punto de tierra de D2 se le ha asignado un valor normalizado de este índice. A continuación se ha calculado la correlación espacial

Serie	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$T_{\text{máx}}$	0.64	0.64	0.72	0.88	0.89	0.92	0.86	0.64	0.67	0.95	0.55	0.74
$T_{\text{mín}}$	0.74	0.89	0.73	0.80	0.84	0.91	0.81	0.81	0.85	0.46	0.67	0.54
T_{med}	0.68	0.81	0.66	0.78	0.90	0.92	0.87	0.71	0.82	0.75	0.64	0.77

Tabla 4. Correlación de la primera EOF para las series mensuales entre los resultados obtenidos para el escenario A2 y la simulación efectuada con datos de reanálisis.

de las EOFs mascareadas para puntos de tierra con el campo de índices obtenido. En la Figura 5 se presentan los coeficientes de correlación obtenidos para cada uno de los patrones mensuales.

Se observa un claro ciclo anual del coeficiente de correlación, donde los mayores valores se dan para los meses estivales. Este comportamiento se reproduce por igual tanto para temperaturas máximas como para mínimas o medias.

3.5.2. Orografía

En este caso se han calculado, tomando sólo los puntos de tierra, las correlaciones entre los patrones de temperaturas con la altura de cada punto de D2. Aparece una fuerte correlación para algunos meses, mejorando el coeficiente cuando se seleccionan sólo los puntos que superan una cierta altura, en este caso mostramos los resultados al tomar un umbral de 300m (ver Figura 5).

En este caso, la correlación sigue un comportamiento bianual, donde las mayores correlaciones aparecen en los meses de primavera y otoño, y prácticamente desaparecen en las otras dos estaciones. Las temperaturas máximas y mínimas presentan un comportamiento similar, con mayores diferencias principalmente en los meses invernales.

3.5.3. Latitud

Por último, se ha calculado la relación entre los patrones de las EOFs con la latitud en cada punto. La relación encontrada en este caso es algo más compleja: aparece un ciclo bianual, alternándose coeficientes de correlación positivos y negativos y con diferencias muy significativas entre las temperaturas máximas y mínimas (ver Figura 5).

4. Conclusiones

En este artículo se ha presentado un estudio de los patrones mensuales de calentamiento para temperaturas máximas y mínimas sobre la Península Ibérica, obtenidas a partir de proyecciones regionales de cambio climático para los escenarios A2 y B2 con una

versión del modelo climático regional MM5, alimentada por las salidas del modelo ECHO-G.

El método habitual de presentar los cambios proyectados en escenarios regionalizados de cambio climático consiste en mostrar las diferencias de una determinada variable entre promedios de distintos períodos: normalmente uno de control o representación del clima actual y un periodo de futuro. Sin embargo, en este trabajo se muestra que se puede obtener un patrón fundamental de variación de una determinada variable.

Un aportación importante de esta metodología es que los patrones proyectados de cambio en las temperaturas son casi independientes de la variabilidad de baja frecuencia natural aleatoria que se pueda dar en un período determinado, sobre todo si éste no es lo suficientemente extenso.

Los resultados obtenidos indican que cuando se emplea un mismo modelo de circulación general acoplado a océano, los patrones de calentamiento son independientes del escenario, modificando simplemente la amplitud del calentamiento. Sería interesante investigar la dependencia de dichos patrones con el modelo global, y por lo tanto con los modos de reproducción de la circulación por los distintos AOGCMs.

Los patrones obtenidos muestran robustez temporal. Es decir, son independientes del período en el que se calculen, aunque tienen un marcado ciclo anual, siendo diferentes para cada estación.

Aparecen asimetrías espaciales y temporales en el comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas. Las diferencias en los patrones espaciales para un mismo mes son principalmente debidas a una distinta dependencia latitudinal. En cuanto al comportamiento temporal, destaca el mayor aumento de las temperaturas máximas, sobre todo en los meses estivales, aumentado por lo tanto el rango de temperatura diario.

Al igual que en otros trabajos (Zorita et al., 2005), los patrones obtenidos tienen una fuerte componente de continentalidad. En este trabajo, además de mostrar las diferencias de los patrones de calentamiento entre mar y tierra, se muestra una fuerte dependencia con el índice de continentalidad, definido como la distancia al mar. Este factor muestra un claro ciclo anual

con su máximo en los meses estivales.

Otro resultado interesante es la dependencia de los patrones con la altura. Se ha mostrado que la relación con la altura tiene un ciclo bianual, con sus máximos en las estaciones de primavera y otoño, apareciendo discrepancia en el comportamiento de las máximas y las mínimas en invierno y en verano. Es interesante notar cómo las zonas más altas son más sensibles al calentamiento.

Como trabajo para el futuro, nos planteamos estudiar si los patrones y comportamientos expuestos se reproducen usando otros modelos de circulación general, e incluso datos de reanálisis.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido subvencionado por el proyecto 00619/PI/04, financiado por la Fundación Séneca de la Región de Murcia. Juan José Gómez Navarro quiere agradecer al Ministerio de Educación y Ciencia la concesión de una beca FPU para la realización de su tesis doctoral. Así mismo, Sonia Jerez Rodríguez agradece al Instituto Euremediterráneo del Agua su financiación por medio de una beca de investigación.

Los autores agradecen a Gonzalo Medina Arellano, de la Universidad Nacional de Colombia, sus valiosas aportaciones a la composición del texto También a la comunidad de Software Libre el tiempo dedicado a crear programas de calidad para hacer investigación.

Referencias

- Climate Change 2007 – The Physical Science Basis*. WMO, 1997.
- F. Chen and J. Dudhia. Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the penn state/ncar mm5 modeling system. part i: Model implementation and sensitivity. *Mon. Wea. Rev.*, 129:569–585, 2001a.
- F. Chen and J. Dudhia. Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the penn state/ncar mm5 modeling system. part ii: Preliminary model validation. *Mon. Wea. Rev.*, 129:587–604, 2001b.
- N.S. Diffenbaugh, J.S. Pal, F. Giorgi, X.J. Gao, D.i. A, J.e. Pal, F.i. Giorgi, and X.u. Gao. Heat stress intensification in the mediterranean climate change hotspot. *Geophys. Res. Lett.*, 34(11):53 – 70, JUN 2007.
- J. Dudhia. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, 46: 3077–3107, 1989.
- J. Fernández, J. P. Montávez, J. Sáenz, J. F. González-Rouco, and E. Zorita. Sensitivity of MM5 mesoscale model to physical parameterizations for regional climate studies: Annual cycle. *J. Geophys. Res.*, 112, 2007.
- F. Giorgi. Climate change hot-spots. *Geophys. Res. Lett.*, 33(8):11217 – 11222, APR 2006.
- G. A. Grell. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, 121:764–787, 1993.
- G. A. Grell, J. Dudhia, and D. R. Stauffer. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). Technical Report NCAR/TN-398+STR, National Center for Atmospheric Research, 1994.
- S. Y. Hong and H. L. Pan. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, 124:2322–2339, 1996.
- E. J. Mlawer, S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: Rrtm, a validated correlated- model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 102:16663–16682, 1997.
- J.P. Montávez, J.F. González-Rouco, and F. Valero. *Riesgos Climáticos e Impacto Ambiental*, chapter Modelización dinámica del viento. Editorial Complutense, 2002.
- J.P. Montávez, J. Fernández, J.F. González-Rouco, J. Saenz, E. Zorita, and F. Valero. Proyecciones de cambio climático sobre la península ibérica. In *V Asamblea Hispano Portuguesa de geodesia y geofísica*, 2006.
- H. von Storch and F.W. Zwiers. *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge university Press, 2007.
- E. Zorita, H. von Storch, F.J. Gonzalez-Rouco, U. Cubasch, J. Luterbacher, S. Legutke, I. Fischer-Bruns, and U. Schlese. Climate evolution in the last five centuries simulated by an atmosphere-ocean model: global temperatures, the north atlantic oscillation and the late maunder minimum. *Meteorol. Z.*, 13(4):271 – 289, 2004.
- E. Zorita, J.F. Gonzalez-Rouco, H. von Storch, J.P. Montavez, and F. Valero. Natural and anthropogenic modes of surface temperature variations in the last thousand years. *Geophys. Res. Lett.*, 32(8):755 – 762, 2005.