

MODELIZACIÓN REGIONAL DE EVENTOS EXTREMOS DE CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA PENINSULA IBÉRICA: PERIODOS SECOS Y DURACION DE LAS ESTACIONES

Noelia López de la Franca Arema⁽¹⁾, Enrique Sánchez Sánchez⁽²⁾, Marta Domínguez Alonso⁽¹⁾.

⁽¹⁾ Instituto de Ciencias Ambientales. Universidad de Castilla – La Mancha, Toledo, España.

Noelia.LopezFranca@uclm.es, Marta.Dominguez@uclm.es

⁽²⁾ Facultad de Ciencias Ambientales y Bioquímica. Universidad de Castilla – La Mancha, Toledo, España. E.Sanchez@uclm.es

1. INTRODUCCIÓN

La Península Ibérica (PI) es una de las regiones de Europa donde se proyectan mayores incrementos de temperaturas y disminución de precipitación entre mediados y finales del siglo XXI bajo los diferentes escenarios de emisiones de gases invernadero, según el último informe del IPCC (2007). De los múltiples procesos asociados, los periodos de ausencia de precipitación o los cambios en las características de la estaciones climáticas son dos ejemplos de análisis de cambio climático que pueden también tener una influencia notable en ecosistemas y/o sectores económicos como la agricultura, ganadera, turismo, etc.. Los objetivos de este trabajo son mostrar los resultados del estudio de estos dos procesos climáticos: el análisis de la estructura espacial y temporal de la sucesión de periodos secos y los posibles cambios en el inicio y duración las estaciones climáticas desde las condiciones de clima presente (1961-1990) hasta las de finales del siglo XXI (2071-2100) bajo incrementos de emisiones de gases de efecto invernadero. Las simulaciones analizadas en este trabajo provienen de las proyecciones obtenidas con diferentes modelos regionales de clima (RCMs) forzados con modelos globales (GCMs) procedentes de los proyectos europeos PRUDENCE (con resolución horizontal de 50 km²) y ENSEMBLES (25 km²). Estos análisis forman parte del proyecto regional CLIMACHA (POII10-0255- 8836, Junta Castilla-La Mancha, 2010-2013).

1.1. Periodos secos

Cada vez son más los estudios relacionados con la modelización numérica de los procesos de precipitación extrema, sin embargo, debido a la incertidumbre que presenta esta variable (Beniston *et al.*, 2007), son menos los trabajos enfocados en el análisis de la ausencia de precipitación o periodos secos. Estos eventos pueden ser definidos a partir de aspectos meteorológicos, hidrológicos, agrícolas o socio-económicos (Keyantash y Dracup, 2002). El

análisis de estos fenómenos se ha realizado habitualmente a partir de datos observacionales (Martín-Vide y Gómez, 1999; Abaurrea y Cebrián, 2004; Cebrián y Abaurrea, 2006; Lana *et al.*, 2006; Vicente-Serrano, 2006; Vicente-Serrano y Cuadrat-Prats, 2007). También se ha llevado a cabo el análisis de proyecciones futuras a partir de GCMs (Trigo *et al.*, 2001) y RCMs (Herrera *et al.*, 2010; Sánchez *et al.*, 2011). La PI presenta una gran dispersión en la precipitación, desde regiones con valores por encima de 1500 mm/año a la zona mediterránea con valores inferiores a 300 mm/año (Rodríguez-Puebla *et al.* 1998; Martín-Vide 2004). Por tanto, el estudio de los periodos secos resulta de gran interés debido al déficit hídrico que genera; sin embargo en la mayoría de estudios, la PI es considerada como una región más dentro de Europa, (Christensen y Christensen 2007; Tapiador *et al.* 2007; Boberg *et al.* 2010). Las proyecciones de clima futuro para finales del siglo XXI apuntan hacia un incremento del riesgo de condiciones semiáridas en la mayor parte de la PI (Castro *et al.*, 2007; Gao y Giorgi, 2008), con un incremento de los periodos secos más largos en toda la cuenca mediterránea a partir de la modelización mediante RCMs (Gao *et al.*, 2006; Beniston *et al.*, 2007).

1.2. Estaciones climáticas

La mayoría de los estudios sobre la definición de las estaciones climáticas se centran en aquellas relacionadas con el periodo de crecimiento de determinadas especies vegetales, por lo que normalmente abarcan la primavera y el verano (Christidis *et al.*, 2007; Morisette *et al.*, 2008). Estos estudios (Ault *et al.*, 2011; Qian *et al.*, 2009, 2011; Songs *et al.* 2010) suelen estar basados en datos observados, mostrando una tendencia en el siglo XX hacia duraciones más largas y comienzos más tempranos de dichas estaciones. Solo algunos trabajos (Jaagus y Ahas 2000; Jaagus *et al.*, 2003) analizan la variación de las cuatro estaciones dentro de su ciclo anual, resultando también de interés en estudios de cambio climático, ya que pueden aportar

información adicional, al estar cada estación influenciada por procesos meteorológicos que afectan a sectores socioeconómicos tan relevantes como la administración de los recursos hídricos (Pálus *et al.*, 2005). Los métodos empleados para definir las estaciones son muy variados, usando criterios fenológicos (Zhu *et al.*, 2012), climáticos (Linderholm *et al.*, 2008; Wallace & Obsorn, 2002) o la combinación de ambos (Ault *et al.*, 2011); siendo los climáticos los que menos incertidumbre generan (Qian *et al.*, 2011). La mayoría de los trabajos (Cayan *et al.*, 2009; Song *et al.*, 2010) que usan estos criterios, aplican umbrales fijos en grandes áreas de latitudes medio-altas con un tipo de clima bastante homogéneo. En regiones en donde distintos tipos de climas se dan en un área relativamente pequeña, el uso umbrales fijos no resulta del todo adecuado (Jaagus y Ahas, 2000), como es el caso de la PI, donde encontramos clima fríos, templado y áridos (Castro *et al.*, 2007).

1.3. Objetivos

En este trabajo se plantean dos objetivos principales. El primero de ellos es el análisis de la distribución estadística de los periodos secos en la Península Ibérica en condiciones de clima observado y futuro (2071-2100) a partir de los resultados de un GCM y la regionalización dinámica mediante un RCM a dos resoluciones, forzado por el mismo GCM.

El segundo consiste en la definición de las estaciones climáticas en la España Peninsular (EP) e Islas Baleares (BA) a partir de la aplicación de umbrales dinámicos de temperatura, usando RCMs de alta resolución espacial forzados por distintos GCMs para analizar el inicio de las estaciones tanto en periodo observado (1961-1990) como bajo condiciones de cambio climático (2071-2100).

2. DATOS Y MÉTODOS

2.1. Periodos secos

Se han usado las bases de datos observacionales de precipitación diaria Spain02 (Herrera *et al.*, 2012) y ECA (Haylock *et al.*, 2008). Spain02 (20 x 20 km de resolución horizontal) es la base de datos observados más completa para el dominio de estudio, con una densidad de datos más alta que ECA aunque no cubre Portugal, mientras que ECA sí. Como modelos numéricos climáticos se han empleado el GCM HadAM3h (Pope *et al.*, 2000) y el RCM PROMES (Sánchez *et al.*, 2004) forzado por ese GCM, ambos procedentes del proyecto europeo PRUDENCE (Christensen y Christensen, 2007). Las resoluciones espaciales son de 1.875°x1.25° para el GCM, mientras que el RCM simula a 50 y 25 km de resolución horizontal, usando una proyección

Lambert. Los periodos de simulación son clima observado (1961-1990) y clima futuro (2071-2100), bajo el escenario de emisiones A2, donde se proyectan importantes incrementos de gases de efecto invernadero (Nakicenovic y Swart, 2000). Para el cálculo de la distribución estadística de los periodos secos se propone un ajuste a una distribución Weibull (Lana *et al.*, 2008). Se define un episodio seco como aquel en el que durante al menos 1 día no llueve (definido cuando la precipitación es menor que 1 mm/día). La bondad del ajuste de la distribución se lleva a cabo mediante un test de Kolmogorov-Smirnov (Von Storch y Zwiers, 1999). La distribución Weibull es la siguiente:

$$F(x; \kappa, u, \varepsilon) = P(x \leq X) = 1 - e^{-\left(\frac{x-\varepsilon}{u-\varepsilon}\right)^\kappa}$$

donde x corresponde a la longitud del episodio seco, siendo κ , u los dos parámetros de la distribución (u el de escala y κ de forma). $\varepsilon = 1$, corresponde al mínimo valor de x (Lana *et al.*, 2008). A partir de esta función de distribución, se puede obtener, por ejemplo, la longitud del periodo seco máximo (x_r) asociado a un periodo de retorno dado (T_r) mediante la expresión:

$$x_r = 1 + (u - 1) \left(\ln(b T_r) \right)^{1/\kappa}$$

donde b es el número promedio de periodos secos por año, de forma que x_r es la longitud del periodo seco que es excedida o igualada $b \cdot T_r$ veces en un periodo de retorno de T_r años.

2.2. Estaciones climáticas

Las variables climáticas empleadas en este trabajo son las temperaturas mínimas y máximas diarias sobre la EP y BA. La base de datos observados en rejilla que hemos usado es Spain02. Se han empleado 10 RCMs (25 x 25 km de resolución horizontal) procedentes del proyecto europeo ENSEMBLES (2004-2009, Van der Linden *et al.*, 2009). Con el fin de validar el periodo observado, se ha comparado la base de datos de Spain02 con la media de los 10 RCMs forzado con el reanálisis ERA40 (Uppala *et al.*, 2005). Posteriormente son analizados los resultados de los RCMs para condiciones de clima presente (1961-1990) frente a las condiciones de futuro (2071-2100) obtenidos para el escenario de emisiones A1B forzados con distintos GCMs.

El inicio de las estaciones se ha definido en cada punto del dominio a partir de dos umbrales dinámicos basados en la media climática (media de 30 años) de los percentiles 25 y 75 de las temperaturas mínimas (T_{min}) y máximas (T_{max})

diarias, respectivamente. Para la primavera y el invierno se ha aplicado el percentil 25 de la Tmin; mientras que para el verano y el otoño se ha usado el percentil 75 de la Tmax. El cálculo de la duración de las estaciones se deduce a partir de la definición de su inicio (López de la Franca et al., 2012).

La independencia estadística entre los resultados obtenidos para clima presente y futuro, se ha realizado a través de un test T-Student con un grado de confianza de $\alpha=95\%$.

3. RESULTADOS

3.1. Periodos secos

3.1.1. Periodo clima observado (1961-1990)

La figura 1 representa el número medio de episodios secos para clima presente. Las bases de datos observacionales (Spain02 y ECA) muestran un gradiente norte-sur (mínimo-máximo), con un máximo relativo en la zona sureste costera. Los valores oscilan entre los 3-4 días en el norte de la PI y 15 en el sur. Los valores de la base de datos ECA son más suavizados que Spain02 debido a la diferencia en el número de estaciones empleadas.

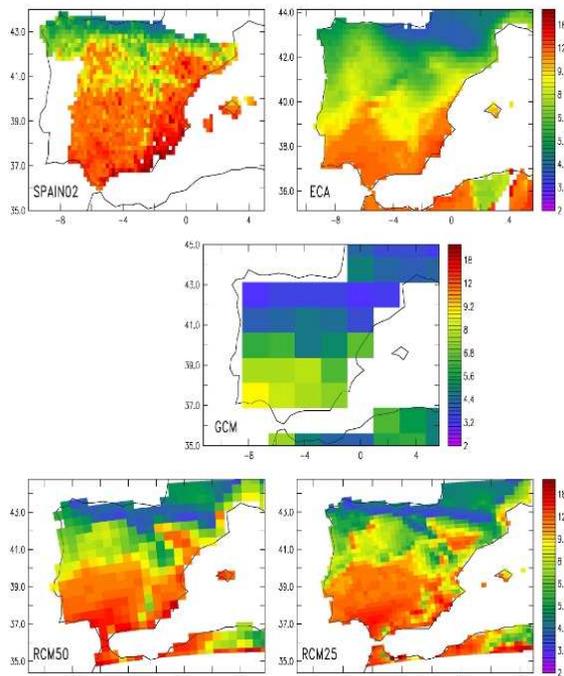
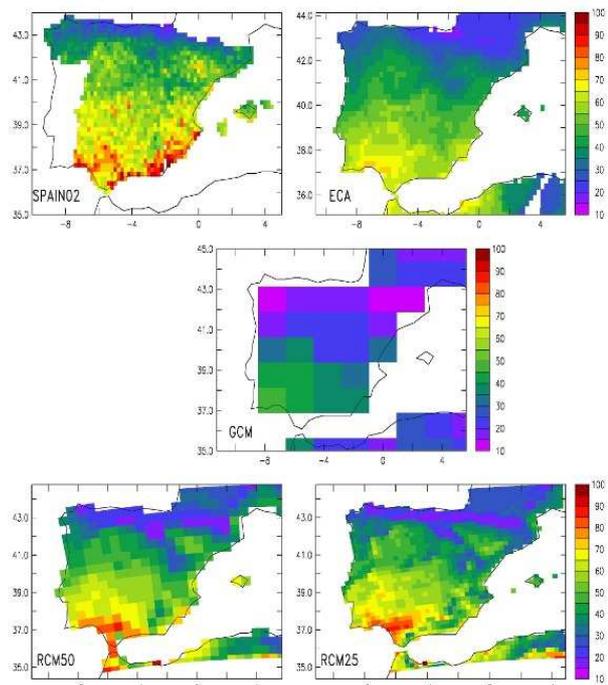


Fig. 1. - Distribución espacial de la duración media de episodios secos (días) para clima observado(1961-1990)

Los simulaciones numéricas al igual que las bases de datos de observaciones presentan un gradiente norte-sur. El GCM subestima los valores de estos episodios, especialmente en la mitad sur de la PI; mientras que los RCMs obtienen resultados mucho

más cercanos a las observaciones, tanto en los valores, como en la distribución espacial. El RCM a 25 km muestra más detalles regionales en zonas de costa, valles o zonas montañosas.

La figura 2 presenta la duración de los episodios secos más largos para un periodo de retorno de 2 años. Mediante el test de Kolmogorov-Smirnov, se ha comprobado previamente que todos los puntos presentan un ajuste a la distribución con un 99% de intervalo de confianza. Los resultados son consistentes con lo obtenido para la duración media de los episodios. En este caso, aunque el GCM de forma global presenta la misma distribución espacial



que los datos observados, su valores distan mucho entre sí.

Fig. 2. - Distribución espacial del episodio seco más largo (días) para un periodo de retorno de 2 años para el periodo (1961-1990) a partir del ajuste Weibull

3.1.2. Cambio Climático: (2071-2100) – (1961-1990)

La figura 3 muestra el cambio del clima futuro respecto al clima presente obtenido por los modelos numéricos a la hora de simular tanto la duración media como la máxima de los periodos secos. El patrón de cambio obtenido tanto por el GCM como por los RCMs muestran una tendencia al aumento de los episodios medios y los más largos en buena parte del dominio. En la zona costera cantábrica el cambio es pequeño mientras que cuanto más hacia el sur, el aumento es mayor. Por tanto, el gradiente norte-sur se verá incrementado según estas proyecciones de cambio climático.

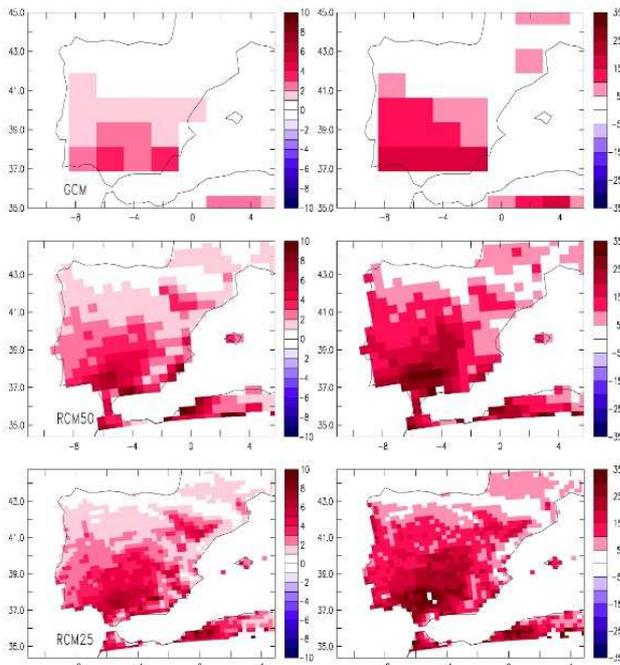


Fig. 3. - Columna de la izquierda como figura 1, y columna de la derecha como figura 2, pero para el cambio en los resultados de las simulaciones para clima futuro (2071-2100) menos clima observado (1961-1990)

Los RCMs muestran algunos detalles diferentes del GCM, pues la zona de cambios pequeños está limitada a la zona costera del Cantábrico, mientras que el GCM no muestra cambios importantes para el tercio norte. Los valores de cambio son también superiores para los RCMs, así como la estructura relativa a ciertos aspectos orográficos, como por ejemplo el valle del Guadalquivir.

3.2. Estaciones climáticas

3.2.1. Clima observado (1961-2000)

La figura 4 muestra el cálculo de la duración de las estaciones comparando la base de datos observados Spain02 y la media de los 10 RCMs forzados con el reanálisis ERA40.

La duración de las estaciones calculadas a partir de la base de datos observacional se asemejan bastante al patrón que siguen las estaciones astronómicas, con una duración centrada en 90 días y un rango de entre 70 y 120 días en todo el dominio. Primavera e invierno presentan duraciones ligeramente más largas, mientras que en el otoño son más pequeñas. El verano muestra la mayor homogeneidad espacial con valores en torno a 90 días. Las estaciones calculadas con la Tmin (primavera e invierno) muestran una fuerte influencia orográfica, probablemente debido a que la temperatura mínima suele estar asociada a procesos atmosféricos locales; mientras que el verano y el otoño muestran más homogeneidad espacial ya que la temperatura

máxima está más ligada a procesos radiativos a gran escala.

La media de los RCMs forzados con ERA40 exhibe un comportamiento muy similar al de la base de datos observados, aunque con un patrón espacial más suavizado y homogéneo. La primavera es más larga en la zona mediterránea y algunos puntos del interior de la PI, comparada con el resto de estaciones. El verano muestra el mismo comportamiento que la base de datos observados, con duraciones de alrededor 90 días en todo el dominio. Tanto el otoño como el invierno presentan un gradiente decreciente norte-sur.

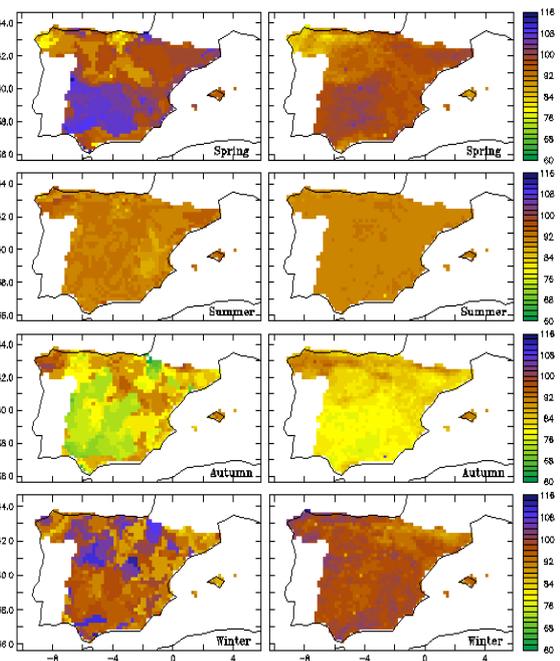


Fig. 4.- Distribución espacial de la duración de las estaciones (días) para condiciones de clima observado (1961-2000). La columna de la izquierda corresponde a la base de datos observados Spain02 y la columna de la derecha representa la media de los 10 RCMs forzados con el reanálisis ERA40.

Con el fin de completar los resultados obtenidos con el método propuesto, la figura 5 muestra el inicio de la primavera comparando la base de datos de Spain02 con la media de los 10 RCMs forzados con el reanálisis de ERA40. Se ha elegido la primavera debido a su estrecha relación con la estación de crecimiento vegetativo (Frich et al., 2002). Esta figura es un ejemplo de cómo las estaciones climáticas calculadas se asemejan bastante a las astronómicas dentro de su ciclo anual en clima presente (López de la Franca et al., 2012). Spain02 muestra el valor astronómico esperado (día 90 del año, finales de Marzo). Se observa también una dependencia orográfica, ya que empieza más temprano en el interior y más tarde en el norte. Al igual que ocurre con los resultados obtenidos en la duración de las estaciones, la media de los modelos

regionales muestra un patrón muy similar a los datos observados pero con valores más suavizados y homogéneos espacialmente.



Fig. 5. - Como la figura 4 pero para la fecha de inicio de la primavera. La división por regiones se ha realizado según el criterio de *Herrera et al., 2010*: NW (Noroeste), EB (Cuenca del río Ebro, CA (Costa Catalana), LE (Costa Levantina), CS (Centro-Sur) y BA (Islas Baleares).

3.2.2. Cambio Climático: (2071-2100) – (1961-1990)

La figura 6 representa el inicio y duración de las estaciones por subregiones en los periodos presente y futuro, simulados por la media de los 10 RCMs.

Los resultados obtenidos para clima presente forzado con GCM son bastante similares a los obtenidos forzados con el reanálisis ERA40 en el periodo observado (Figura 4). Se aprecian pequeñas diferencias entre las subregiones mostradas en la figura 5. Así, la primavera es la estación que muestra la mayor heterogeneidad en sus resultados, comenzando más tarde en NW y BA que en el resto de las regiones, donde empieza a mediados de Marzo. El resto de las estaciones presentan menos retrasos en NW y BA.

A finales del siglo XXI, el resultado que más resalta es la desaparición del invierno en todas las regiones, considerando que está definido a partir de los valores de clima presente. El resto de las estaciones muestran un alargamiento en su duración, siendo más significativo en el verano y primavera. Ambas estaciones presentan un adelanto en la fecha de su comienzo, mientras que el otoño se atrasa. BA presenta un comportamiento un poco distinto al resto de las regiones, pues la primavera se alarga mientras que el otoño disminuye su duración, mientras que en el resto de regiones donde dura más. Estas diferencias podrían deberse a la gran influencia de la temperatura del Mar Mediterráneo sobre BA frente a las demás subregiones.

Las diferencias entre los periodos presente y futuro para cada punto del dominio de cada RCM, son estadísticamente significativas según el test T aplicado con un intervalo de confianza del $\alpha=95\%$.

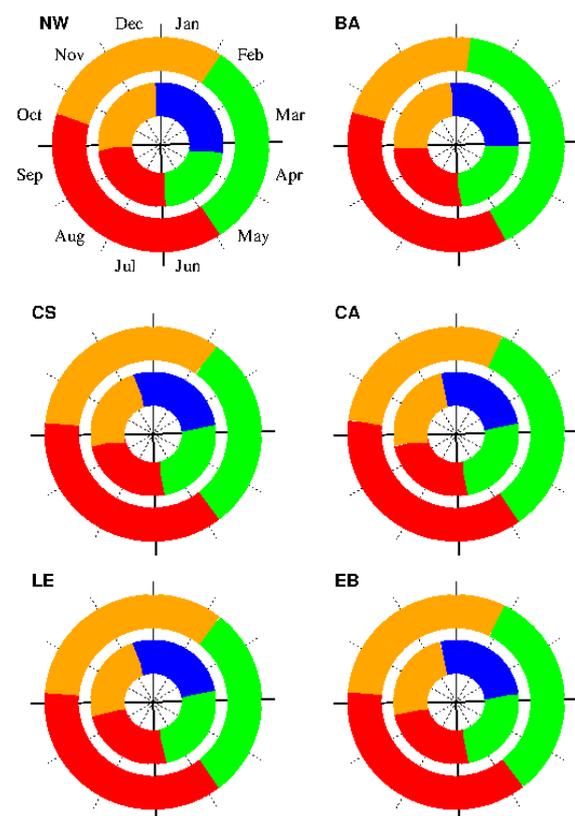


Fig. 6. - Cambios en el inicio y duración de las estaciones. Los anillos interiores corresponden a las condiciones de clima presente (1960-1990), mientras que los anillos exteriores a las condiciones de clima futuro (2071-2100) bajo el escenario de emisiones A1B. Cada color representa una estación: primavera (verde), verano (rojo), otoño (naranja) e invierno (azul).

4. CONCLUSIONES

4.1. Periodos secos

Los resultados muestran como los modelos numéricos climáticos son capaces de reproducir los diferentes aspectos relativos a la estructura de los episodios secos sobre la PI para el clima presente (1961-1990). Sin embargo los resultados de los modelos regionales se asemejan más a los datos observados tanto en la distribución espacial como en los detalles de las diferentes regiones del dominio que los resultados del modelo global de clima. El ajuste de la distribución de periodos secos a una función Weibull permite analizar periodos secos máximos asociados a un periodo de retorno dado. Los resultados de episodios secos más largos muestran también un mejor resultado para los RCMs, por lo que este trabajo puede ser un indicativo del valor añadido de los modelos regionales frente a los modelos globales. Las proyecciones para el escenario de cambio climático A2, a finales del siglo XXI indican un aumento tanto de los episodios medios como de los episodios más largos, siendo mayores en el sur del dominio.

4.2. Estaciones climáticas

El método propuesto basado en los percentiles 25 y 75 de las temperaturas mínima y máxima es capaz de reproducir las características de las 4 estaciones astronómicas; tanto el inicio, como la duración (alrededor de 90 días) en clima observado (1960 – 2000) en cualquier punto de la España peninsular e Islas Baleares usando RCMs (López de la Franca et al., 2012).

Los resultados obtenidos son consistentes con estudios previos parciales, principalmente la primavera (Schwartz et al., 2006; Song et al., 2010; Qian et al., 2011) pero con la ventaja de poder cubrir todas las estaciones sin presentar valores espacio-dependientes. El uso de la temperatura mínima para el cálculo de las estaciones frías y el de la temperatura máxima para las cálidas, ha dado lugar a valores más homogéneos para el verano y más influenciados por la orografía en invierno.

A finales del siglo XXI, bajo el escenario de emisiones A1B, cuando se espera que tanto la temperatura mínima como máxima aumenten, las estaciones de la primera mitad del año (primavera y verano) se adelantan; mientras que el otoño se atrasa. Resultados similares han sido obtenidos al analizar la tendencia en el siglo XX (Sparks and Menzel, 2002; Zhu et al. 2012). El invierno prácticamente desaparece en el futuro en cualquier modelo y región estudiadas. Las tres estaciones restantes (principalmente el verano y la primavera) alargan su duración, pudieron relacionarse este hecho con cambios en la variación interanual estacional (D'Odorico et al., 2002). Las Islas Baleares presentan un comportamiento especial (el otoño se acorta) comparado con el resto del dominio. Esto puede deberse a la gran influencia del Mar Mediterráneo en ella. Se espera extender el método aquí propuesto a otras regiones con el fin de confirmar si puede ser aplicado a regiones donde distintas condiciones climáticas están presentes en un área relativamente pequeña.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto regional CLIMANCHA (2010-2013, POII100255-8836, Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha). Los datos de los RCMs pertenecen a los proyectos europeos PRUDENCE (FP5, contrato EVK2-2000-00132) y ENSEMBLES (2004-2009, 6th EU Framework Programme, GOCE-CT-2003-505539) y la base de datos observacionales Spain02 al proyecto nacional ESCENA (2008-2011, Secretaria de Estado de Cambio Climático, Ministerio de Agricultura,

REFERENCIAS

Abaurrea, J. & Cebrián, A. C. (2002), 'Drought Analysis Based on a Cluster Poisson Model: distribution of the most severe drought', *Climate Research* **22**, 227--235.

Ault, T.; Macalady, A.; Pederson, G.; Betancourt, J. & Schwartz, M. (2011), 'Northern Hemisphere Modes of Variability and the Timing of Spring in Western North America', *Journal of climate* **24**(15), 4003--4014.

Beniston, M. (2004), 'The 2003 heat wave in Europe: A shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations', *Geophysical Research Letters* **31**(2), L02202.

Boberg, F.; Berg, P.; Thejll, P.; Gutowski, W. J. & Christensen, J. H. (2010), 'Improved confidence in climate change projections of precipitation further evaluated using daily statistics from the ENSEMBLES models', *Climate Dynamics* **35**, 1509-1520.

Castro, M.; Gallardo, C.; Jylhä, K. & Tuomenvirta, H. (2007), 'The use of a climate-type classification for assessing climate change effects in Europe from an ensemble of nine regional climate models', *Climate Change* **81** (S1), 329--341.

Cebrián, A. C. & Abaurrea, J. (2006), 'Drought Analysis Based on a Marked Cluster Poisson Model', *Journal of Hydrometeorology* **7**, 713—723.

Christensen, J. H. & Christensen, O. B. (2007), 'A summary of the PRUDENCE model projection of changes in European climate by the end of this century', *Climatic Change* **81**, 1--30.

Christidis, N.; Stoot, P. A.; Brown, S.; J.Karoly, D. & Caesar, J. (2007), 'Human Contribution to the Lengthening of the Growing Season during 1950-99', *Journal of Climate* **20**, 5441--5454.

D'Odorico, P.; Yoo, J. & Jaeger, S. (2002), 'Changing Seasons: An Effect of the North Atlantic Oscillation?', *Journal of Climate* **15**(4), 435--445.

Frich, P.; Alexander, L. V.; Della-Marta, P.; Gleason, B.; Haylock, M.; Klein Tank, A. M. & Peterson, T. (2002), 'Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century', *Climate Research* **19**(3), 193--212.

- Gao, X. & Giorgi, F. (2008), 'Increased aridity in the Mediterranean region under greenhouse gas forcing estimated from high resolution simulations with a regional climate model', *Global and Planetary Change* **62**, 195--209.
- Gao, X.; Pal, J. S. & Giorgi, F. (2006), 'Projected changes in mean and extreme precipitation over the Mediterranean region from a high resolution double nested RCM simulation', *Geophysical Research Letters* **33**(L03706).
- Haylock, M.; Hofstra, N.; Klein-Tank, A. M. G.; Klok, E. J.; Jones, P. D. & New, M. (2008), 'A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation for 1950-2006', *Journal of Geophysical Research* **113**(D20119).
- Herrera, S.; Fita, L.; Fernández, J. & Gutiérrez, J. M. (2010), 'Evaluation of the mean and extreme precipitation regimes from the ENSEMBLES regional climate multimodel simulations over Spain', *Journal of Geophysical Research* **115**(D21), D21117.
- Herrera, S.; Gutiérrez, J. M.; Ancell, R.; Pons, M. R.; Frias, M. D. & Fernández, J. (2012), 'Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02)', *International Journal of Climatology* **32**, 74-85.
- Jaagus, J. & Ahas, R. (2000), 'Space-time variations of climatic seasons and their correlation with the phenological development of nature in Estonia', *Climate Research* **15**(3), 207--219.
- Jaagus, J.; Truu, J.; Ahas, R. & Aasa, A. (2003), 'Spatial and temporal variability of climatic seasons on the East European Plain in relation to large-scale atmospheric circulation', *Climate Research* **23**(2), 111--129.
- Keyantash, J. & Dracup, J. A. (2002), 'The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices', *Bulletin of the American Meteorological Society* **83**, 1167--1180.
- Lana, X.; Burgueco, A.; Martínez, M. D. & Serra, C. (2006), 'Statistical distributions and sampling strategies for the analysis of extreme dry spells in Catalonia (NE Spain)', *Journal of Hydrology* **324**, 94--114.
- Lana, X.; Martínez, M. D.; Burgueño, A.; Serra, C.; Martín-Vide, J. & Gómez, L. (2008), 'Spatial and temporal patterns of dry spell lengths in the Iberian Peninsula for the second half of the twentieth century', *Theoretical and Applied Climatology* **91**(1), 99--116.
- Linderholm, H.; Walther, A. & Chen, D. (2008), 'Twentieth-century trends in the thermal growing season in the Greater Baltic Area', *Climate Change* **87**(3), 405--419.
- López de la Franca, N., Sánchez, E. y Domínguez, M. (2012) "Changes in the onset and length of seasons from an ensembles of regional climate models over the Iberian Peninsula for future climate conditions". *Theoretical and Applied Climatology* (Submitted)
- Martín-Vide, J. (2004), 'Spatial distribution of a daily precipitation concentration index in peninsular Spain', *International Journal of Climatology* **24**(8), 959--971.
- Martín-Vide, J. & Gómez, L. (1999), 'Regionalization of peninsular Spain based on the length of dry spells', *International Journal of Climatology* **19**(5), 537--555.
- Morisette, J.; Richardson, A.; Knapp, A.; Fisher, J.; Graham, E.; Abatzoglou, J.; Wilson, B.; Breshears, D.; Henebry, G.; Hanes, J. & L., L. (2008), 'Tracking the rhythm of the seasons in the face of global change: phenological research in the 21st century', *Frontiers in Ecology and the Environment* **7**(5), 253--260.
- Nakicenovic, N. & Swart, R., ed. (2000), *Emissions Scenarios. A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*, Cambridge University Press.,
- Palus, M.; Novotná, D. & Tichavsk, P. (2005), 'Shifts of seasons at the European mid-latitudes: Natural fluctuations correlated with the North Atlantic Oscillation', *Geophysical Research Letters* **32**, L12805.
- Pope, V.; Gallani, M.; Rowntree, P. & Stratton, R. (2000), 'The impact of new physical parameterizations in the Hadley Centre climate model: HadAM3', *Climate Dynamics* **16**, 123--146.
- Qian, C.; Fu, C.; Wu, Z. & Yan, Z. (2011), 'The role of changes in the annual cycle in earlier onset of climatic spring in northern China', *Advances in Atmospheric Sciences* **28**(2), 284--296.
- Qian, C.; Fu, C.; Wu, Z. & Yan, Z. (2009), 'On the secular change of spring onset at Stockholm', *Geophysical Research Letters* **36**, L12706.
- Rodríguez-Puebla, C.; Encinas, A. H.; Nieto, S. & Garmendia, J. (1998), 'Spatial and temporal patterns

of annual precipitation variability over the Iberian Peninsula', *International Journal of Climatology* **18**, 219—316.

Sánchez, E.; Dominguez, M.; Romera, R.; López de la Franca, N.; Gaertner, M. A.; Gallardo, C. & Castro, M. (2011), 'Regional modeling of dry spells over the Iberian Peninsula for present climate and climate change conditions', *Climate Change*, 1--10.

Sánchez, E.; Gallardo, C.; Gaertner, M. A.; Arribas, A. & de Castro, M. (2004), 'Future climate extreme events in the Mediterranean simulated by a regional climate model: a first approach', *Global Planet. Change* **44**, 163—180.

Schwartz, M.; Ahas, R. & Aasa, A. (2006), 'Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere', *Glob. Change. Biol.* **12**(2), 343--351.

Song, Y.; Linderholm, H.; Chen, D. & Walther, A. (2010), 'Trends of the thermal growing season in China, 1951–2007', *International Journal of Climatology* **30**(1), 33—43.

Sparks, T. & Menzel, A. (2002), 'Observed changes in seasons: an overview', *International Journal of Climatology* **22**(14), 1715--1725.

Storch, H. V. & Zwiers, F. (1999), *Statistical analysis in climate research*, Cambridge University Press..

Tapiador, F. J.; Sánchez, E. & Gaertner, M. A. (2007), 'Regional changes in precipitation in Europe under an increased greenhouse emissions scenario', *Geophysical Research Letters* **34**. Trigo, R. M. & Palutikof, J. P. (2001), 'Precipitation Scenarios over Iberia: A Comparison between Direct GCM Output and Different Downscaling Techniques', *Journal of Climate* **14**, 4422-4446.

Uppala, S. M.; Kallberg, P. W.; Simmons, A. J.; Andrae, U.; da Costa Bechtold, V.; Fiorino, M.; Gibson, J. K.; Haseler, J.; Hernandez, A.; Kelly, G. A.; Li, X.; Onogi, K.; Saarinen, S.; Sokka, N.; Allan, R. P.; Andersson, E.; Arpe, K.; Balmaseda, M. A.; Beljarrs, A. C. M.; van der Berg, L.; Bidlot, J.; Borgmann, N.; Caires, S.; Chevalier, F.; Dethof, A.; Dragosvac, M.; Fischer, M.; Fuentes, M.; Hagemann, S.; Holm, E.; Hoskins, B. J.; Isaksen, L.; Janssen, P. A. E. M.; Jenne, R.; McNally, A. P.; Mahfouf, J. F.; Morcrette, J. J.; Rayner, N. A.; Saunders, R. W.; Simon, P.; Sterl, A.; Trenberth, K. E.; Untch, A.; Vasiljevic, D.; Viterbo, P. & Woollen, J. (2005), 'The ERA-40 re-analysis', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **131**, 2961—3012.

Van der Linden, P. & Mitchell, J. F. B. (2009), 'ENSEMBLES: Climate Change and its impacts:

Summary of research and results from the ENSEMBLES project.', Technical report, Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK.

Vicente-Serrano, S. M. (2006), 'Spatial and temporal analysis of droughts in the Iberian Peninsula (1910-2000)', *Hydrological sciences journal* **51**(1), 83—97.

Vicente-Serrano, S. M. & Cuadrat-Prats, J. M. (2007), 'Trends in drought intensity and variability in the middle Ebro valley (NE of the Iberian peninsula) during the second half of the twentieth century', *Theoretical and Applied Climatology* **88**, 247—258.

Wallace, C. & Osborn, T. (2002), 'Recent and future modulation of the annual cycle', *Climate Research* **22**(1), 1—11.

Zhu, W.; Tian, H.; Xu, X.; Pan, Y.; Chen, G. & Lin, W. (2012), 'Extension of the growing season due to delayed autumn over mid and high latitudes in North America during 1982–2006', *Global Ecology and Biogeography* **21**, 260-271.