

Capítulo 1

Clima y cambio climático en Castilla-La Mancha

Manuel de Castro Muñoz de Lucas

Instituto de Ciencias Ambientales de Castilla-La Mancha. Toledo

Introducción

El calentamiento global que ha experimentado la superficie terrestre a lo largo del último siglo, más intenso en las últimas décadas, es una evidencia incontrovertible. Y también es cada vez más firme la constatación de que ese calentamiento se debe principalmente a la acumulación en la atmósfera de gases de efecto invernadero (GEIs) emitidos por la quema de combustibles fósiles, y en menor medida a la deforestación y a los cambios del uso del terreno. Es decir, más allá de cualquier duda razonable, puede asegurarse que algunas actividades humanas están provocando un cambio climático a escala global.

Sin embargo, lo más preocupante es que todo apunta a que el ritmo actual de calentamiento se va a ir acelerando a lo largo de este siglo en la medida que lo hagan las emisiones antropogénicas. Esto provocará, sin duda, una alteración significativa de los actuales regímenes climáticos en la mayor parte de las regiones del planeta, con notables repercusiones medioambientales, sociales y económicas.

El clima de Castilla-La Mancha sigue una pauta de cambio semejante al del conjunto global, si bien el calentamiento de las últimas tres décadas (1.5 °C) es superior al experimentado en promedio en la zona continental del hemisferio norte (0.9 °C). En consecuencia, puede decirse que el clima de la región está experimentando alteraciones, que podrían estar repercutiendo en ciertos sistemas naturales de la región. Para evaluar este cambio climático es preciso examinar las características actuales del clima de Castilla-La Mancha y analizar las tendencias observadas en las últimas décadas, haciendo uso de los registros instrumentales disponibles.

En este capítulo se describen los principales rasgos del clima actual y de las tendencias observadas en Castilla-La Mancha a lo largo del periodo 1950 - 2006, utilizando las series de valores registrados en observatorios meteorológicos de la región. Esta información es esencial para evaluar los cambios climáticos observados y las zonas que podrían resultar más afectadas por ellos.

A continuación, se presentan algunos escenarios de cambio climático a escala regional en Castilla-La Mancha a lo largo del presente siglo XXI, que se han deducido de simulaciones con varios modelos climáticos bajo diversos supuestos sobre la futura evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero. Estas proyecciones futuras, acompañadas de una valoración de su incertidumbre, podrían servir de base para realizar análisis objetivos sobre los efectos que pudieran derivarse del cambio climático previsible a lo largo del presente siglo.

1. Clima actual de Castilla-La Mancha

Los rasgos más sobresalientes del clima de la región de Castilla-La Mancha están en correspondencia con su ubicación geográfica, entre las latitudes templadas y húmedas y las subtropicales áridas, y en una meseta elevada lejos del litoral marino. De octubre a abril el clima está primordialmente gobernado por las depresiones atlánticas y la alternancia de masas de aire asociadas a la circulación general de la atmósfera en las latitudes medias del hemisferio norte, mientras que en el resto del año prevalecen las masas de aire cálidas y estables asociadas al anticiclón subtropical del Atlántico. En consecuencia, Castilla-La Mancha posee un clima continental subtropical caracterizado por inviernos relativamente frescos y veranos muy cálidos. Las precipitaciones son entre moderadas y escasas en la mayor parte del territorio pero con una elevada variabilidad temporal, alternándose periodos de sequía con otros de precipitaciones relativamente abundantes.

En su mayor parte el clima es de tipo mediterráneo con veranos secos y calurosos, aunque algunas zonas presentan una pluviosidad tan escasa que se deben catalogar entre las de clima estepario templado. No obstante, la mayor elevación topográfica de las zonas orientales de las provincias de Cuenca y Guadalajara induce matices climáticos relativos a la cantidad y estacionalidad de las precipitaciones. En la figura 1 se muestra la distribución de los tipos de clima según la clasificación de Köppen, que es la más utilizada por su relación con las características de la vegetación, donde se aprecian las regiones semiáridas (clima tipo Bsk) y aquellas con mayor pluviosidad relativa (climas tipo Cwb y Cfb).

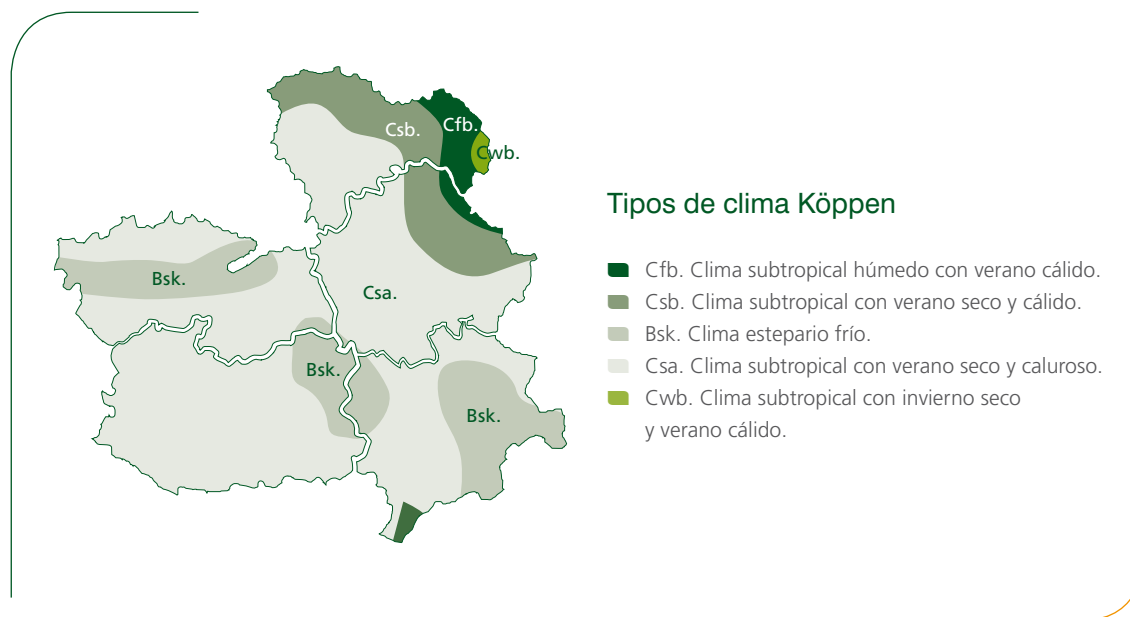


Figura 1: Regionalización climática, basada en la clasificación de Köppen (Fuente:INM).

Para analizar las características que presentan las principales variables climáticas (temperatura y precipitación) se han considerado los datos procedentes de dos fuentes:

- Los observatorios meteorológicos de la red del Instituto Nacional de Meteorología (INM), que poseen series temporales con suficiente longitud para establecer el comportamiento climático en Castilla-La Mancha, están situados en las localidades de Albacete (Los Llanos), Ciudad Real, Cuenca, Molina de Aragón y Toledo. La base de datos disponible incluye valores diarios de temperatura (máxima, mínima y media), precipitación, humedad y horas de sol en el periodo de 1971 a 2000.
- Los análisis de observaciones en una rejilla regular de 0.25° x 0.25° (latitud-longitud) elaborados por el Instituto Meteorológico de Holanda (KNMI) en el marco de los proyectos ECA (European Climate Assessment and Dataset) y ENSEMBLES. Esta base de datos está disponible en <http://eca.knmi.nl>. En la figura 2 se muestra el aspecto de la rejilla en cada una de cuyas celdillas se dispone de valores que se han deducido mediante una interpolación espacial óptima (Haylock et al., 2008) de los registros diarios en observatorios de la red climatológica. Los datos corresponden a temperaturas (máxima, mínima y media) y precipitaciones diarias en el periodo comprendido entre 1950 y 2006.

Los valores analizados en la rejilla regular son los que se utilizarán aquí para derivar la distribución espacial de las temperaturas y precipitación, su variabilidad interanual y las tendencias a lo largo de las últimas décadas, mientras que los registros en los cinco observatorios puntuales se han usado como referencia para evaluar los valores analizados en las respectivas celdillas donde estén incluidos. Las estadísticas climáticas se presentan de forma desagregada para cada una de las comarcas que componen la región de Castilla-La Mancha, cuya situación y denominación se muestran en la figura 2.



Figura 2: Situación y denominación de las comarcas de Castilla-La Mancha.

1.1 Análisis de las temperaturas

El siguiente análisis de los promedios de las temperaturas máximas, mínimas y medias diarias atiende a dos aspectos fundamentales: su distribución espacial y su estacionalidad a lo largo del año. Los valores corresponden a promedios del periodo en que se dispone de datos (1950-2006).

1.1.1 Promedios anuales y estacionales

En general, la distribución espacial del promedio anual de las temperaturas medias diarias está condicionada por la latitud y la topografía. Los menores valores se registran en las comarcas situadas al noreste de la región (10.5 °C en la Serranía Alta de Cuenca), mientras que en el resto se distribuyen con más uniformidad (13-14 °C). Esta pauta territorial se mantiene en cada una de las estaciones del año, como puede verse en la figura 3a. En invierno las temperaturas medias son inferiores a 3 °C en la Serranía Alta de Cuenca mientras que superan 7 °C en las comarcas de Hellín y Talavera. Las temperaturas más elevadas en verano se registran en las comarcas de la mitad occidental, llegando a superar 25 °C mientras en las del noreste se mantienen por debajo de 21 °C.

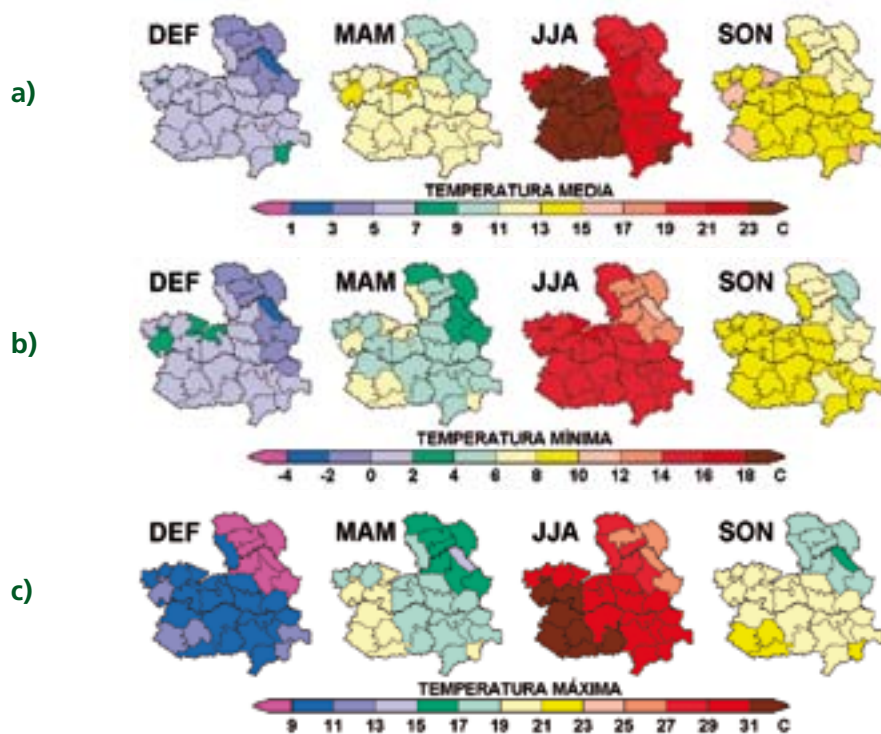


Figura 3: Distribuciones estacionales de los promedios de temperatura media (a), mínima (b) y máxima (c) diarias del periodo 1950-2006 en cada una de las comarcas de Castilla-La Mancha. (DEF: Diciembre-Enero-Febrero; MAM: Marzo-Abril-Mayo; JJA: Junio-Julio-Agosto; SON: Septiembre-Octubre-Noviembre).

Las distribuciones espaciales y estacionales de las temperaturas mínimas y máximas diarias que respectivamente se muestran en las figuras 3b y 3c, presentan un aspecto general semejante al de las temperaturas medias. La zona con promedios de temperaturas mínimas invernales inferiores a 0 °C comprende la mayor parte de las comarcas de Guadalajara y Cuenca y la Manchuela de Albacete. Las temperaturas máximas más elevadas en el periodo estival corresponden a las comarcas del sur y oeste de las provincias de Ciudad Real y Toledo, con valores promedio por encima 31 °C. Comparando las distribuciones medias de las temperaturas mínimas y máximas se puede deducir claramente los notables valores promedio que alcanza la oscilación térmica diaria (diferencia entre máxima y mínima diaria), lo que constituye uno de los rasgos más característicos de los climas de tipo continental que experimentan todas las comarcas de Castilla-La Mancha. Los valores de la oscilación térmica media son de 14 a 16 °C en verano y de 8 a 10 °C en invierno, correspondiendo en general los mayores a las comarcas del sur de Ciudad Real.

1.1.2 Variabilidad interanual

Un relevante rasgo del clima es la variabilidad interanual de las temperaturas medias estacionales o anuales, pues ofrece una idea de la amplitud de las anomalías térmicas registradas con respecto a los valores promedio absoluto en todo el periodo analizado. El estadístico que se suele utilizar para su análisis es la desviación típica (σ) de la distribución de frecuencia de las temperaturas. Su significado es que, en una distribución de tipo gaussiano, el 67% de los valores están incluidos en el intervalo ($m-\sigma$, $m+\sigma$), siendo m la media.

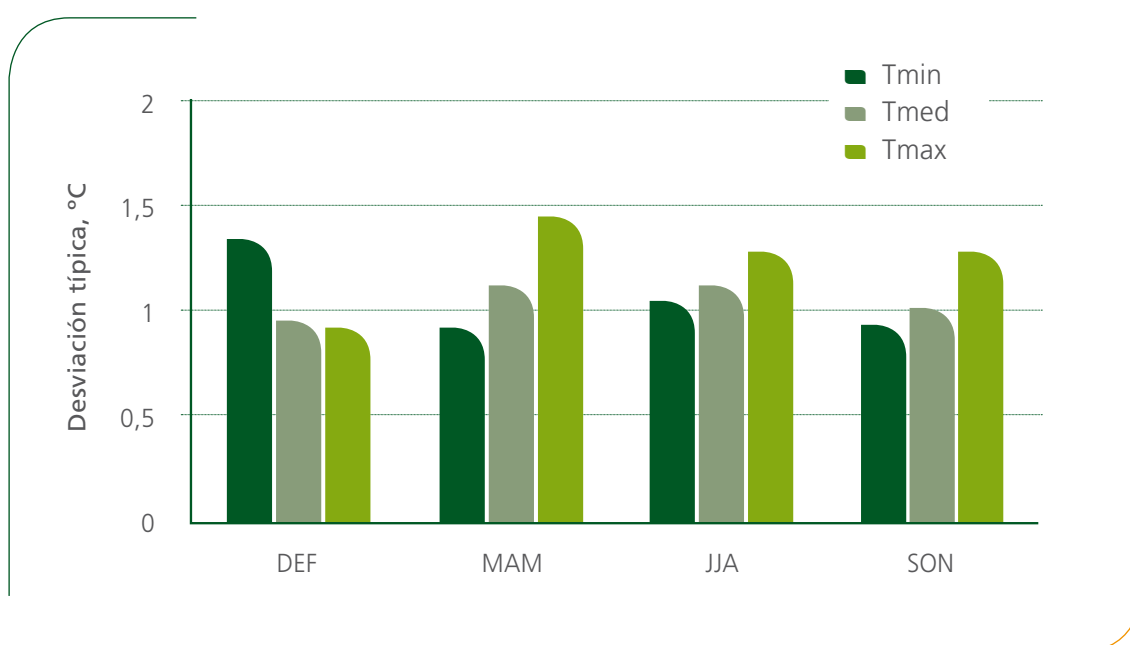


Figura 4: Desviación estándar de la distribución estacional de la temperatura mínima, media y máxima diarias en el promedio de la región de Castilla-La Mancha (1950-2006).

La distribución estacional de la variabilidad de las temperaturas, mínima, máxima y media sigue una pauta similar en todas las comarcas de Castilla-La Mancha. Como se muestra en la figura 4, la mayor variabilidad en las temperaturas mínimas se produce en el invierno, y la menor en primavera. Sin embargo, las temperaturas máximas presentan su mayor variabilidad interanual en la primavera y la menor en invierno. La mayor variabilidad de las temperaturas medias tiene lugar en primavera-verano y la menor en invierno-otoño.

1.1.3 Extremos térmicos

Otro relevante rasgo del clima son los valores extremos. Existen diversos índices para expresar la intensidad y variabilidad de eventos climáticos extremos. En el caso de las temperaturas los índices de extremos más utilizados son el percentil 95 de las temperaturas máximas diarias en el periodo cálido del año (abril a septiembre) y el percentil 5 de las mínimas diarias en el periodo frío (octubre a marzo), considerando los 57 años analizados (1950-2006). El percentil 5 de las temperaturas mínimas del periodo frío oscila entre cerca de $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el noreste de la región (Molina de Aragón y Serranía Alta de Cuenca) y $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la zona suroeste (Talavera, Toledo, Torrijos). Es decir, los extremos fríos parecen estar condicionados en mayor medida por la altitud topográfica. Sin embargo, en el percentil 95 de las máximas en el periodo cálido del año, los valores oscilan entre $38-37\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la mayor parte de las comarcas y $34-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ en las comarcas del sureste (Almansa, Hellín, Albacete). Esto podría estar relacionado con el efecto de las brisas que típicamente llegan del litoral mediterráneo a esas regiones a primeras horas de la tarde, suavizando las temperaturas máximas diarias durante el verano.

1.2 Análisis de las precipitaciones

1.2.1 Promedios

El valor promedio de las precipitaciones anuales en el periodo analizado (1950-2006) se mantiene en todas las comarcas de Castilla-La Mancha por debajo de 600 mm, el umbral que suele considerarse para delimitar si una zona tiene un clima lluvioso o seco. No obstante, de nuevo se aprecia un claro contraste entre la comarca más húmeda (Serranía Alta de Cuenca) con una precipitación acumulada anual media mayor de 550 mm y la más seca (Hellín) que apenas supera 320 mm. En la distribución espacial (figura 5) se aprecia que las regiones con mayor precipitación media anual son las ubicadas en el noreste de la región.

En cuanto a la distribución estacional de las precipitaciones (figura 5), aunque en todas las comarcas los menores valores corresponden al verano, en la distribución del resto de estaciones del año se observa un cierto contraste entre las diversas comarcas. Mientras que en algunas la

estación más lluviosa es el invierno, lo que sugiere que las perturbaciones lluviosas que mayoritariamente les afectan son de origen atlántico, en otras comarcas dicho máximo ocurre en otoño lo que podría ser un indicativo de que resultan algo más afectadas por los sistemas lluviosos mediterráneos. Entre las primeras se incluyen las situadas más al oeste de la región, mientras que las localizadas en el centro y este corresponden a las segundas.

1.2.2 Variabilidad interanual

Quizá el rasgo más sobresaliente del régimen de precipitaciones en todas las comarcas de Castilla-La Mancha sea la notable variabilidad que presentan de un año para otro, es decir la sucesión de años anómalamente secos y lluviosos respecto al promedio absoluto de la totalidad del periodo considerado. El estadístico que suele utilizarse en este caso es la desviación estándar normalizada por el promedio, pues hay grandes diferencias en los valores de precipitación entre las estaciones del año, como antes se ha comentado. En la figura 6 se muestra la distribución estacional de los valores de este estadístico normalizado para los valores promedio en toda Castilla-La Mancha, considerando el periodo total (1950-2006) y el de 1980-2006. Se observa que la variabilidad normalizada mayor corresponde a la estación más seca (verano), una pauta que se repite en todas las comarcas. En la misma figura se incluyen los valores medios estacionales y anual de precipitación con los que se pueden deducir las variabilidades absolutas.

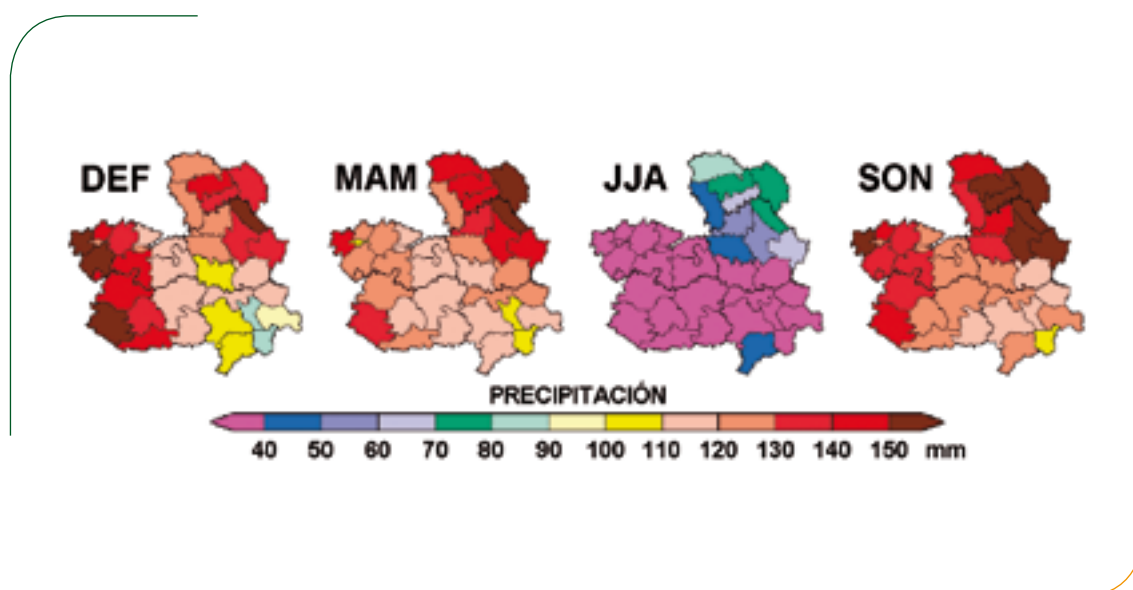


Figura 5: Distribuciones estacionales de los promedios de precipitación del periodo entre 1950 y 2006 en cada una de las comarcas de Castilla-La Mancha. (DEF: Diciembre-Enero-Febrero; MAM: Marzo-Abril-Mayo; JJA: Junio-Julio-Agosto; SON: Septiembre-October-Noviembre).

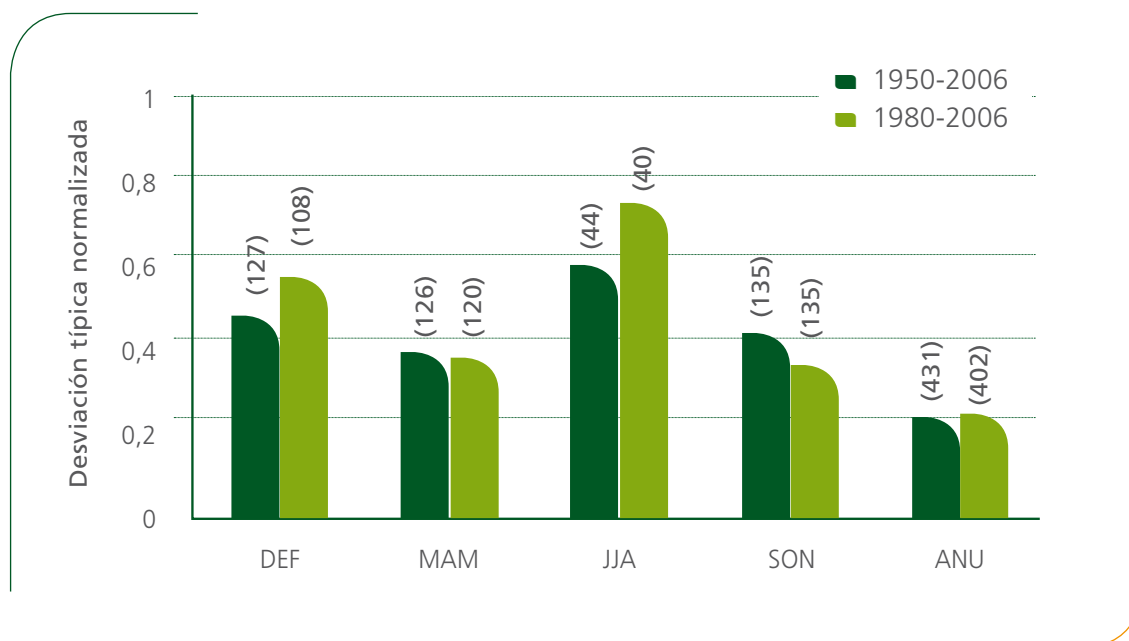


Figura 6: Desviación estándar normalizada de la distribución estacional y anual de la precipitación en el promedio de la región de Castilla-La Mancha durante los periodos 1950-2006 y 1980-2006. Los valores entre paréntesis son los promedios estacionales y anual de precipitación en cada periodo.

1.2.3 Extremos de precipitación

Para analizar los eventos extremos de precipitación, se ha utilizado el valor del percentil 90 de los días de lluvia (con precipitación superior a 1 mm) para cada estación del año a lo largo del periodo considerado (1950-2006). Un resultado reseñable es que los valores más elevados de este índice corresponden al otoño en todas las comarcas de Castilla-La Mancha, con máximo de 20 mm en las comarcas de Molina y Serranía Alta. Los percentiles mayores en todas las estaciones del año corresponden por lo general a las comarcas más montañosas. Otro resultado destacable es que, durante el verano, el máximo valor de este índice (18 mm) corresponde a la comarca de la Sierra de Segura, destacando sobre los valores que se alcanzan en el resto de las comarcas en dicha estación del año.

2. Tendencias y cambios climáticos actuales

La manifestación más evidente de que se haya producido algún cambio climático relacionado con el calentamiento global por causas antropogénicas se percibe analizando las tendencias de las principales variables climáticas a lo largo de las últimas décadas. Como se señala con claridad en el 4º Informe de Evaluación del IPCC (2007), la aceleración del calentamiento global

observado no puede explicarse sin la concurrencia de la creciente concentración de gases de efecto invernadero emitido por actividades humanas. Por ello, en este apartado se analizan las tendencias de las temperaturas (máximas, mínimas y medias) y de las precipitaciones que se han observado en Castilla-La Mancha desde la segunda mitad del siglo XX hasta la actualidad.

2.1 Tendencia de las temperaturas

Atendiendo a los registros más antiguos que existen en España (San Fernando y Madrid-Retiro), se aprecian claros signos de calentamiento desde finales del siglo XIX hasta la actualidad, aunque la tendencia en dicho periodo no ha sido uniforme. Analizando las series de los 22 registros más largos y fiables de las temperaturas en España peninsular a lo largo del periodo 1850-2005, Brunet et al. (2006) distinguen tres intervalos con diferentes tendencias: Ligerio ascenso térmico hasta mediados del siglo XX, estancamiento en las décadas del 50 y 60 y ascenso mucho más acusado desde la década del 70 hasta la actualidad (figura 7a).

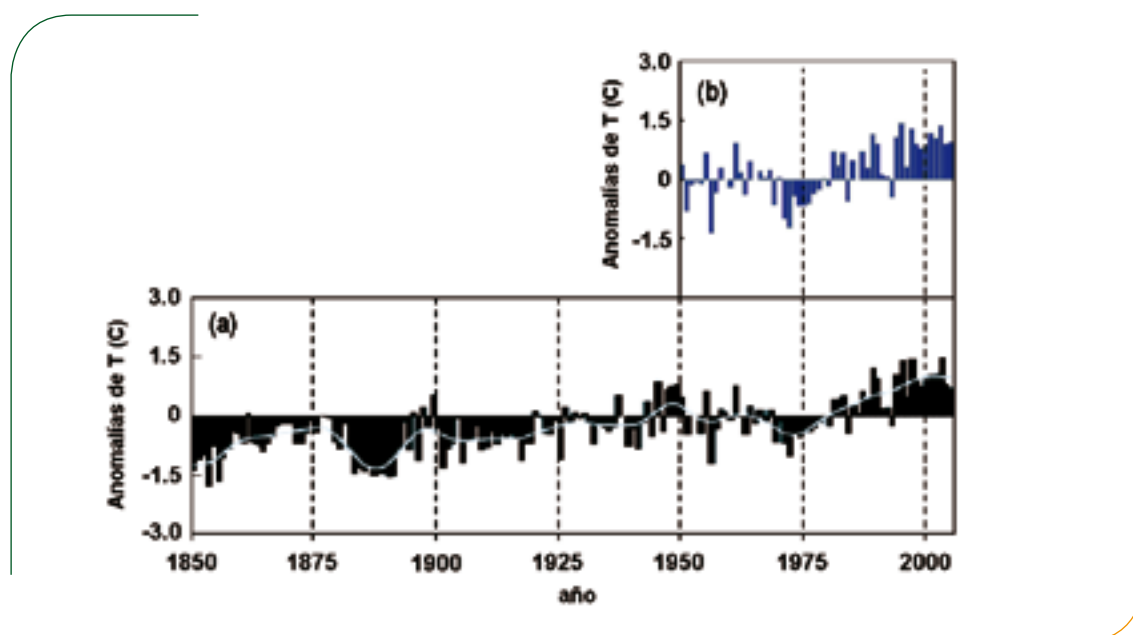


Figura 7: (a) Anomalías de las temperaturas medias anuales en España respecto al promedio de 1961-90 (columnas) suavizadas por un filtro Gausiano de 13 términos (línea gris) (Tomada de Brunet et al. 2006). (b) Anomalías medias en Castilla-La Mancha entre 1950 y 2006 respecto al promedio de 1961-90 deducidas de la base de datos ECA-Ensembles.

A partir de la base de datos del proyecto ECA-Ensembles, se han obtenido las anomalías medias anuales de temperatura respecto al promedio del periodo 1961-90 en Castilla-La Mancha, cuya evolución se muestra en la figura 7b. De esta manera se aprecia que la evolución de las anoma-

lías presenta una gran semejanza con la del promedio de la España peninsular, coincidiendo en el significativo incremento de la tendencia en los últimos 27 años respecto a los 30 precedentes.

En la Tabla 1 se muestran las tendencias lineales de los promedios estacionales de la temperatura media diaria correspondientes a dos periodos (1950 - 2006 y 1980 - 2006), con objeto de cuantificar y comparar las tasas de calentamiento en cada uno. Los valores de estas tendencias se presentan de forma desagregada para cada comarca de Castilla-La Mancha. Se expresan en grados C por década y van acompañados de los correspondientes intervalos de confianza de 5% a 95%, mostrándose sólo aquellos que tengan un nivel de significación superior al 5%.

Tabla 1: Tendencias lineales de los promedios estacionales de las temperaturas medias diarias de cada año (expresados en °C/década) en cada comarca de Castilla-La Mancha con los correspondientes intervalos de confianza de 5% a 95%. Sólo se muestran los valores de aquellas tendencias con una significación mayor del 5% (en negrita con significación mayor del 1%), según un test T.

Tendencias de los promedios estacionales y anuales de las temperaturas medias diarias en cada celda del dominio (°C/decada)										
Comarcas	Dic-Ene-Feb		Mar-Abr-May		Jun-Jul-Ago		Sep-Oct-Nov		ANUAL	
	1950-2006	1980-2006	1950-2006	1980-2006	1950-2006	1980-2006	1950-2006	1980-2006	1950-2006	1980-2006
Almansa	0,22 ± 0,15	-	0,30 ± 0,14	0,71 ± 0,40	0,31 ± 0,13	0,69 ± 0,28	0,23 ± 0,15	-	0,27 ± 0,08	0,38 ± 0,23
Llanos de Albacete	0,22 ± 0,15	-	0,32 ± 0,15	0,74 ± 0,42	0,32 ± 0,14	0,74 ± 0,40	0,23 ± 0,16	-	0,27 ± 0,09	0,37 ± 0,25
Hellín	0,20 ± 0,15	-	0,27 ± 0,14	0,73 ± 0,40	0,29 ± 0,14	0,75 ± 0,39	0,20 ± 0,14	-	0,24 ± 0,09	0,39 ± 0,24
La Mancha	0,20 ± 0,14	-	0,24 ± 0,17	0,96 ± 0,45	0,34 ± 0,16	0,91 ± 0,42	0,18 ± 0,15	-	0,24 ± 0,09	0,52 ± 0,25
Sierra de Segura	0,23 ± 0,15	-	0,32 ± 0,15	0,79 ± 0,41	0,37 ± 0,14	0,76 ± 0,40	0,24 ± 0,15	-	0,29 ± 0,09	0,40 ± 0,24
Sierra de Alcaraz	0,20 ± 0,15	-	0,27 ± 0,16	0,85 ± 0,44	0,30 ± 0,15	0,81 ± 0,43	0,19 ± 0,16	-	0,24 ± 0,09	0,44 ± 0,26
La Manchuela	0,19 ± 0,14	-	0,26 ± 0,16	0,81 ± 0,43	0,29 ± 0,15	0,77 ± 0,42	0,17 ± 0,15	-	0,23 ± 0,09	0,42 ± 0,25
Alcudia	0,18 ± 0,14	-	0,20 ± 0,19	1,07 ± 0,47	0,29 ± 0,16	0,88 ± 0,42	-	-	0,20 ± 0,10	0,55 ± 0,27
Calatrava	-	-	-	1,12 ± 0,48	0,28 ± 0,18	1,04 ± 0,43	-	-	0,18 ± 0,11	0,64 ± 0,29
Montiel	0,16 ± 0,15	-	0,21 ± 0,18	0,98 ± 0,47	0,28 ± 0,17	0,94 ± 0,44	-	-	0,20 ± 0,10	0,55 ± 0,28
Sierra Morena	-	-	-	1,11 ± 0,48	0,24 ± 0,18	1,00 ± 0,44	-	-	0,16 ± 0,12	0,63 ± 0,31
La Alcarria	0,23 ± 0,13	-	0,27 ± 0,16	0,89 ± 0,43	0,42 ± 0,15	0,83 ± 0,43	0,21 ± 0,15	-	0,28 ± 0,08	0,45 ± 0,23
Mancha Alta	0,23 ± 0,13	-	0,26 ± 0,16	0,91 ± 0,43	0,42 ± 0,15	0,86 ± 0,42	0,21 ± 0,15	-	0,28 ± 0,08	0,47 ± 0,22
Mancha Baja	0,22 ± 0,14	-	0,28 ± 0,16	0,89 ± 0,43	0,37 ± 0,15	0,86 ± 0,42	0,21 ± 0,15	-	0,27 ± 0,09	0,47 ± 0,24
Serranía Alta	0,24 ± 0,14	-	0,28 ± 0,16	0,87 ± 0,44	0,42 ± 0,14	0,75 ± 0,43	0,20 ± 0,16	-	0,28 ± 0,09	0,42 ± 0,24
Serranía Baja	0,24 ± 0,14	-	0,30 ± 0,15	0,82 ± 0,42	0,41 ± 0,14	0,73 ± 0,41	0,22 ± 0,15	-	0,29 ± 0,08	0,39 ± 0,23
Serranía Media	0,23 ± 0,14	-	0,29 ± 0,16	0,86 ± 0,43	0,41 ± 0,14	0,78 ± 0,43	0,21 ± 0,16	-	0,29 ± 0,09	0,43 ± 0,24
Alcarria Alta	0,23 ± 0,13	-	0,24 ± 0,16	0,91 ± 0,43	0,41 ± 0,15	0,80 ± 0,44	0,19 ± 0,15	-	0,27 ± 0,09	0,46 ± 0,23
Alcarria Baja	0,23 ± 0,13	-	0,25 ± 0,16	0,91 ± 0,43	0,42 ± 0,15	0,81 ± 0,43	0,20 ± 0,15	-	0,28 ± 0,09	0,45 ± 0,23
La Campiña	0,23 ± 0,13	-	0,23 ± 0,16	0,91 ± 0,44	0,43 ± 0,15	0,87 ± 0,43	0,21 ± 0,15	-	0,28 ± 0,08	0,48 ± 0,22
Molina de Aragón	0,22 ± 0,14	-	0,26 ± 0,16	0,88 ± 0,43	0,41 ± 0,14	0,74 ± 0,43	0,19 ± 0,15	-	0,27 ± 0,09	0,43 ± 0,24
Sierra	0,21 ± 0,14	-	0,23 ± 0,16	0,89 ± 0,42	0,39 ± 0,15	0,74 ± 0,43	0,18 ± 0,15	-	0,25 ± 0,09	0,45 ± 0,24
Oropesa	0,22 ± 0,14	-	0,20 ± 0,18	0,84 ± 0,48	0,30 ± 0,14	0,56 ± 0,42	-	-	0,21 ± 0,09	0,28 ± 0,25
La Jara	0,23 ± 0,14	-	0,23 ± 0,18	0,91 ± 0,48	0,32 ± 0,15	0,66 ± 0,41	-	-	0,23 ± 0,09	0,36 ± 0,25
Mesa de Ocaña	0,22 ± 0,13	-	0,23 ± 0,16	0,94 ± 0,44	0,41 ± 0,15	0,90 ± 0,42	0,20 ± 0,15	-	0,27 ± 0,09	0,50 ± 0,23
La Sagra	0,22 ± 0,13	-	0,22 ± 0,16	0,92 ± 0,44	0,41 ± 0,15	0,85 ± 0,42	0,20 ± 0,15	-	0,26 ± 0,09	0,47 ± 0,23
Montes de Toledo	0,21 ± 0,14	-	0,22 ± 0,18	1,01 ± 0,47	0,34 ± 0,16	0,87 ± 0,41	0,15 ± 0,15	-	0,23 ± 0,09	0,50 ± 0,25
San Vicente	0,22 ± 0,14	-	0,20 ± 0,17	0,87 ± 0,47	0,33 ± 0,15	0,68 ± 0,41	-	-	0,22 ± 0,09	0,35 ± 0,25
Talavera	0,22 ± 0,14	-	0,20 ± 0,17	0,85 ± 0,46	0,31 ± 0,14	0,65 ± 0,40	0,15 ± 0,15	-	0,22 ± 0,09	0,36 ± 0,25
Toledo	0,22 ± 0,13	-	0,22 ± 0,17	0,94 ± 0,45	0,39 ± 0,15	0,86 ± 0,41	0,19 ± 0,15	-	0,25 ± 0,09	0,48 ± 0,23
Torrijos	0,22 ± 0,13	-	0,21 ± 0,17	0,90 ± 0,46	0,37 ± 0,15	0,77 ± 0,42	0,17 ± 0,15	-	0,24 ± 0,09	0,42 ± 0,24

Se observa que las tendencias de las medias anuales en los últimos 27 años (1980-2006) son siempre mayores que las del periodo completo de 57 años (1950-2006), en especial en las comarcas más meridionales donde llegan a triplicarse. Este notable incremento de las tendencias se ha producido principalmente en primavera y verano, llegando a tasas cercanas a 1 °C por década en la mayor parte de las comarcas a lo largo de los últimos 27 años. Sin embargo en invierno y otoño no se aprecian tendencias significativas en este periodo, llegando a tasas de apenas 0.2 °C por década en el periodo completo de 57 años. Un comportamiento similar se aprecia en las tendencias de las temperaturas mínimas y máximas, que no se muestran aquí, aunque en general es resultan algo más acusadas las de las primeras.

Por lo que respecta a la variabilidad interanual de las temperaturas, aplicando un test F se ha comprobado que no ha habido cambios significativos ($\alpha = 0.05$) entre los valores de las varianzas de las distribuciones de las temperaturas correspondientes al periodo completo (1950-2006) y los de los últimos 27 años (1980-2006). Es decir, no se aprecia alteración significativa en la intensidad de las anomalías térmicas interanuales en ninguna estación del año.

Tabla 2: Tendencias lineales (en °C/década) de los valores extremos de las temperaturas mínimas diarias (percentil 5) en el periodo frío (octubre a marzo) y de las temperatura máximas diarias (percentil 95) en el periodo cálido (abril a septiembre) en cada comarca de Castilla-La Mancha, con los correspondientes intervalos de confianza de 5% a 95%. Sólo se muestran los valores de aquellas tendencias con una significación mayor del 5% (en negrita con significación mayor del 1%), según un test T.

Comarcas	Tendencias del percentil 5 de las temperaturas mínimas (°C / década)		Tendencias del percentil 95 de las temperaturas máximas (°C / década)	
	1950-2006	1980-2006	1950-2006	1980-2006
Almansa	0,29 ± 0,20	-	0,25 ± 0,15	-
Llanos de Albacete	0,26 ± 0,21	-	0,23 ± 0,15	-
Hellín	0,24 ± 0,21	-	0,23 ± 0,16	-
La Mancha	-	-	0,33 ± 0,18	-
Sierra de Segura	0,23 ± 0,19	-	0,30 ± 0,14	-
Sierra de Alcaraz	0,21 ± 0,20	-	0,31 ± 0,16	-
La Manchuela	0,26 ± 0,20	-	0,28 ± 0,16	-
Alcudia	-	-	0,34 ± 0,17	-
Calatrava	-	-	0,33 ± 0,17	-
Montiel	-	-	0,30 ± 0,20	-
Sierra Morena	-	-	0,28 ± 0,20	-
La Alcarria	0,19 ± 0,19	-	0,54 ± 0,14	0,41 ± 0,38
Mancha Alta	0,20 ± 0,18	-	0,55 ± 0,14	0,49 ± 0,36
Mancha Baja	-	-	0,41 ± 0,14	0,42 ± 0,35
Serranía Alta	0,33 ± 0,19	-	0,47 ± 0,14	-
Serranía Baja	0,31 ± 0,19	-	0,44 ± 0,15	-
Serranía Media	0,29 ± 0,19	-	0,46 ± 0,14	0,41 ± 0,35
Alcarria Alta	0,23 ± 0,20	-	0,48 ± 0,14	-
Alcarria Baja	0,25 ± 0,19	-	0,50 ± 0,14	0,40 ± 0,40
La Campiña	0,18 ± 0,17	-	0,60 ± 0,15	0,47 ± 0,42
Molina de Aragón	0,35 ± 0,19	-	0,41 ± 0,15	-
Sierra	0,25 ± 0,19	-	0,51 ± 0,15	-
Oropesa	-	-	0,28 ± 0,16	-
La Jara	-	-	0,33 ± 0,16	-
Mesa de Ocaña	-	-	0,52 ± 0,15	0,49 ± 0,40
La Sagra	-	-	0,55 ± 0,15	0,46 ± 0,43
Montes de Toledo	-	-	0,36 ± 0,16	-
San Vicente	-	-	0,41 ± 0,16	0,47 ± 0,46
Talavera	-	-	0,33 ± 0,16	-
Toledo	-	-	0,51 ± 0,15	0,45 ± 0,41
Torrijos	-	-	0,37 ± 0,15	-

En cuanto a los extremos térmicos, en la tabla 2 se muestran las tendencias (en °C por década) del percentil 5 de las temperaturas mínimas diarias (Octubre-Marzo) y el percentil 95 de las temperaturas máximas diarias (Abril-Septiembre). En todas las comarcas se observan tendencias positivas muy significativas en los extremos cálidos, aunque solo en el periodo completo (1950-2006). En unas pocas comarcas también se obtienen tendencias crecientes con menos significación y generalmente con valor menor. En los extremos fríos también se observan tendencias positivas, pero no en todas las regiones y tan solo en el periodo completo. La baja significación estadística de las tendencias en el último periodo (1980-2006) posiblemente se deba en parte a que no es suficientemente largo en relación con la variabilidad interanual de estos eventos extremos. Algo similar ocurre con las tendencias de las precipitaciones que se analizan en el siguiente apartado.

2.2 Tendencia de las precipitaciones

Del análisis de las series de precipitación estacional y anual no se han identificado tendencias significativas (significación mayor del 5%) en ninguna de las regiones de Castilla-La Mancha, ni en el periodo total de la serie (1950-2006), ni en los últimos 27 años (1980-2006). Lo más posible es que esta ausencia de una cualificada significación estadística en las tendencias se deba a que la serie temporal disponible no es suficientemente larga para la elevada variabilidad interanual de la pluviosidad que, como antes se ha señalado, constituye el rasgo más relevante de las precipitaciones en todas las comarcas de Castilla-La Mancha. Así, aunque por lo general las tendencias lineales en los últimos 57 años muestran un signo negativo, sus valores no son suficientemente grandes como para que, al aplicar el test de significación estadística, lleguen a superar al umbral mínimo del 5% como consecuencia de los valores relativamente altos de las varianzas. Un ejemplo de esto se puede observar en la figura 8, que muestra la evolución de las precipitaciones anuales

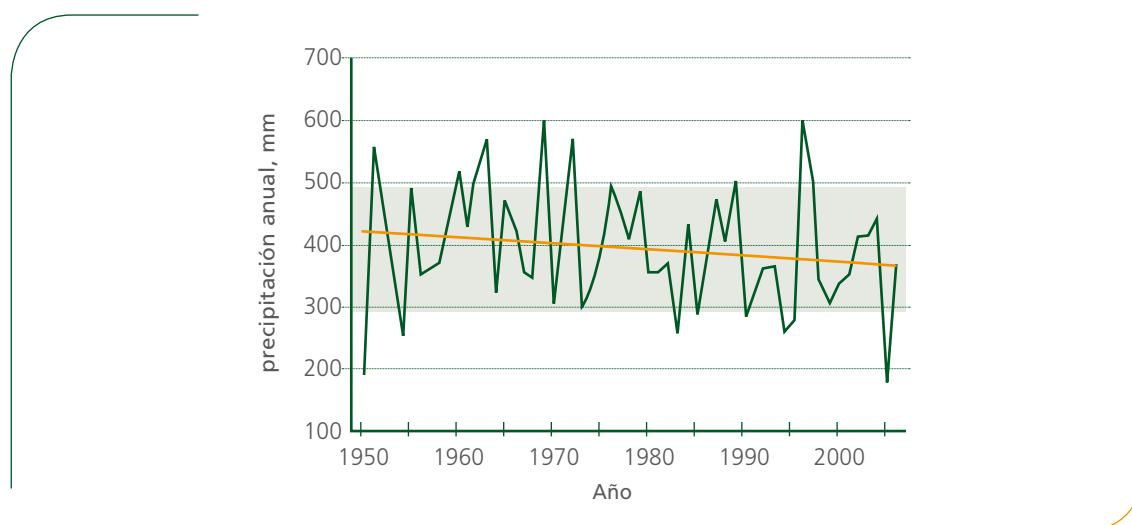


Figura 8: Evolución de las precipitaciones medias anuales (mm) en la comarca de La Mancha. La línea naranja indica la pendiente y el sombreado la desviación estándar alrededor de la media (397 ± 99 mm).

en la comarca de La Mancha. Aunque la tendencia lineal en el periodo de 57 años es negativa (-10 mm/década), el intervalo de confianza de 5% a 95% (± 15 mm/década) es bastante mayor que el valor absoluto de la tendencia, lo que indica su pobre significación estadística.

Del análisis de comparación de varianzas entre la serie completa (57 años) y la de los últimos 27 años no se deduce que haya habido cambio con suficiente significación estadística en ninguna de las comarcas. Lo mismo puede decirse de los valores extremos de precipitación diaria (percentil 90 de días con lluvia) en cualquiera de las estaciones del año.

3. Escenarios de cambio climático

Los escenarios de cambio climático futuro se obtienen aplicando modelos físicos de simulación que han demostrado su capacidad para reproducir el calentamiento global de las pasadas décadas y que de forma inequívoca lo atribuyen a las emisiones precedentes de gases de efecto invernadero (GEI) a causa de actividades humanas. Para realizar proyecciones climáticas, los modelos necesitan disponer de futuros *escenarios de emisiones* de tales gases que se elaboran bajo supuestos plausibles acerca de cómo podrían evolucionar la población mundial, la tecnología y los comportamientos sociales en las próximas décadas. Así, para cada uno de tales supuestos se deducen las posibles alteraciones climáticas a escala global o regional a que darían lugar, es decir los *escenarios de cambio climático*. Ahora bien, esta concurrencia de *supuestos* sobre futuras emisiones y del uso de modelos físicos *aproximados* obliga a contemplar también las inherentes *incertidumbres*, que solo pueden evaluarse disponiendo de un conjunto de escenarios simulados por diversos modelos climáticos.

En este apartado se presenta un conjunto de escenarios de cambio climático a lo largo del presente siglo en la región de Castilla-La Mancha. Para ello se han utilizado los resultados de las simulaciones realizadas por un conjunto de modelos climáticos europeos en el marco del Proyecto PRUDENCE financiado por el 5º Programa Marco de I+D de la Comisión Europea entre 2001 y 2004 (Christensen et al., 2007). Concretamente se utilizaron tres modelos climáticos globales y nueve regionales que han demostrado su habilidad para simular los diversos climas regionales en Europa a lo largo de las pasadas décadas (Jacob et al., 2007).

La base de datos generada en el proyecto PRUDENCE constituye la última y mejor información actualmente disponible sobre proyecciones de cambio climático en Europa con una resolución espacial relativamente alta (50×50 km²). Por esta razón, desde Febrero de 2007 el Instituto Nacional de Meteorología ha puesto a disposición pública este conjunto de escenarios regionalizados de cambio climático en España. Además, al utilizar una decena de modelos climáticos regionales, es posible disponer de una valoración objetiva de la incertidumbre asociada a las

propias simulaciones, que es una información necesaria para la evaluación de riesgos en que se ha de basar cualquier toma de decisión relativa a la mitigación y/o adaptación a los efectos del cambio climático a escala regional.

3.1 Obtención de escenarios de cambio climático regionalizados

Para realizar las proyecciones de cambio climático se han utilizado los escenarios de emisiones que se describen en el Special Report on Emissions Scenarios (SRES) del IPCC (2001). En la figura 9a se muestran las evoluciones de las emisiones globales antropogénicas de dióxido de carbono (CO_2) a lo largo del presente siglo correspondientes a los cuatro escenarios de emisiones que aquí se consideran, identificados con las siguientes siglas: A1FI (escenario de emisiones altas), A2 (escenario de emisiones medias-altas), B2 (escenario de emisiones medias-bajas) y B1 (escenario de emisiones bajas). En la figura 9b se muestran las evoluciones de la concentración global media de CO_2 correspondientes a cada escenario de emisiones.

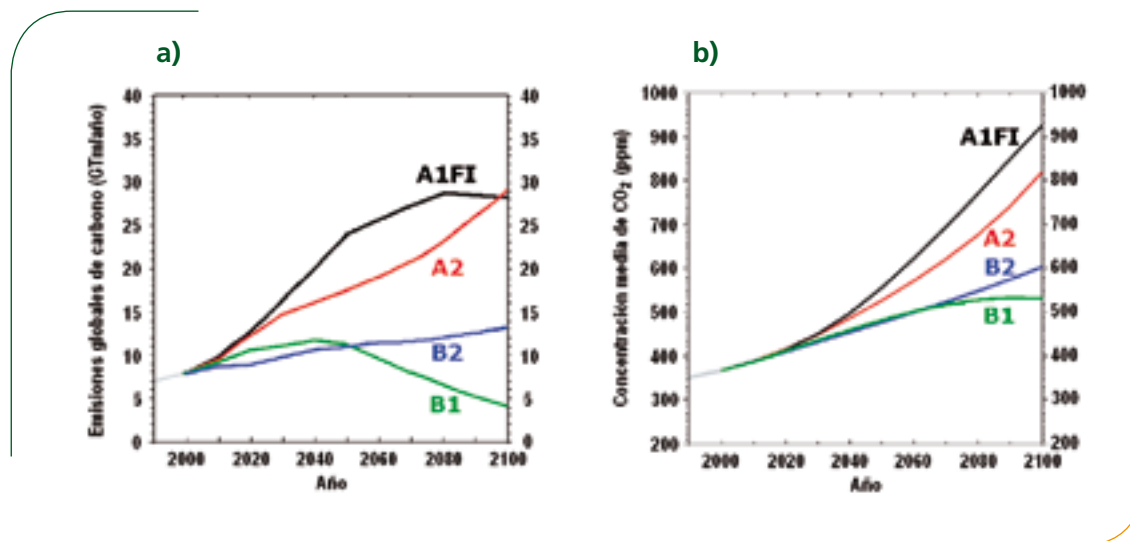


Figura 9: (a) Emisiones globales de carbono (Gt/año) correspondientes a diversos escenarios. (b) Concentraciones globales de CO_2 (ppm). Tomada de SRES-IPCC, 2001.

Hay que señalar que los escenarios de emisiones que se van a considerar, han sido elaborados con la finalidad de deducir la dependencia entre la señal del cambio climático proyectada por los modelos y la evolución futura de las concentraciones de GEIs y aerosoles, sin que quepa atribuir a ninguno de ellos una mayor o menor probabilidad de ocurrencia, sino que a priori todos deben suponerse igualmente posibles. Asimismo, conviene señalar que su propósito es utilizarlos para obtener indicaciones objetivas de la sensibilidad del clima a diversas estrategias de control de emisiones humanas a escala planetaria, no para predecir de forma inequívoca la

evolución del clima. Por eso, en este caso se debe hablar de *proyecciones* de cambio climático, no de predicciones.

Los modelos climáticos consisten en una representación matemática de los procesos que tienen lugar en el llamado “sistema climático”, formado por cinco componentes: atmósfera, océanos, criosfera (hielo y nieve), suelos y biosfera. Entre tales componentes se producen enormes intercambios de materia, calor y momento e incesantes interacciones mediante multitud de procesos físicos, químicos y biológicos, lo que hace que el sistema climático terrestre sea extremadamente complejo. Los modelos climáticos son la única herramienta de que se dispone para derivar objetivamente las futuras alteraciones del clima que podrían causar las emisiones antropogénicas de GEI y aerosoles.

Con los modelos climáticos se simula la evolución de las condiciones climáticas observadas a lo largo de un extenso periodo de tiempo (50-150 años), teniendo en cuenta la variación observada de la concentración atmosférica de GEI y de aerosoles. Los resultados obtenidos se comparan con los registros climáticos disponibles en dicho periodo, para evaluar la calidad de los modelos. Una vez comprobado que son capaces de reproducir aceptablemente el clima observado, se continúa la simulación hasta el final del presente siglo (o más allá), considerando diversos escenarios de emisiones de GEI y aerosoles, antes comentados. Así, para cada uno de tales supuestos, se obtienen los cambios proyectados de las principales variables climáticas en cualquier zona del globo terrestre.

Por último, conviene señalar que el clima de cualquier región se determina a partir de promedios de las condiciones meteorológicas diarias a lo largo de periodos de decenas de años, y eso es lo que pueden simular los modelos climáticos. Dicho de forma simplista, su objetivo no es reproducir de forma exacta la secuencia diaria de las condiciones del tiempo meteorológico a lo largo de decenas de años. Resulta imposible predecir la evolución real de situaciones meteorológicas en cualquier lugar más allá de un plazo de pocos días. Esto no se debe a imperfecciones de los modelos, sino esencialmente a que la atmósfera es un sistema caótico. Con los modelos climáticos se simula una posible secuencia diaria de condiciones atmosféricas en cualquier zona del globo terrestre, a lo largo de decenas o centenares de años. Dicha secuencia es muy poco probable que coincida día a día con la real, aunque no haya razones físicas que imposibiliten su ocurrencia. Pero se comprueba que las distribuciones estadísticas (promedios y variabilidad) de dicha secuencia se corresponden ajustadamente con las del clima real observado en el periodo simulado. Después, se continúa la simulación considerando diversas evoluciones de GEI y aerosoles que cabría esperar en el futuro. Y, finalmente, se comparan las estadísticas de los valores simulados en un periodo de referencia del pasado reciente (“clima actual”) con las de un periodo de igual extensión correspondiente al clima futuro, deduciéndose así los escenarios de cambio climático en dicha época.

3.2 Escenarios de cambio climático regionalizados en Castilla-La Mancha

Para construir los escenarios de cambio climático regionalizados se han utilizado los valores medios diarios de diversas variables climáticas, simulados por el conjunto los modelos regionales (MCR) utilizados en el proyecto PRUDENCE. Los datos diarios corresponden a los periodos 1961-1990 y 2071-2100. Los dominios geográficos donde se aplicaron los MCR abarcan a la mayor parte del continente europeo, pero como cada modelo utiliza su propio mallado, para deducir los cambios climáticos medios del conjunto (ensemble) de modelos regionales usados, se ha elegido una malla regular común en cuyos nodos se han asignado por interpolación los valores diarios simulados de las variables climáticas. En concreto, la malla está compuesta por celdillas con un tamaño aproximado de 50 km (0.5°x0.5° en latitud y longitud). Una vez definida esta malla común, se interpolaron a ella los valores diarios simulados por todos los modelos, aplicando el método de la interpolación del punto más cercano, ya que la relación entre ventajas e inconvenientes de dicho método es mejor que la de los otros posibles.

Los escenarios de cambio climático se han deducido calculando primero las diferencias entre los valores medios mensuales del periodo 2071-2100 y del 1961-1990 que fueron simulados por cada RCM, después se obtuvieron los cambios medios anuales y estacionales de cada modelo en particular y por último se dedujeron los correspondientes promedios del conjunto de modelos, que son los que finalmente se presentan.

3.2.1 Escenarios de cambio de temperatura y precipitación media anual y estacional

En la figura 10 se muestran las distribuciones geográficas de los cambios anuales y estacionales de la temperatura media del aire cerca de la superficie, correspondientes a tres periodos sucesivos de 30 años a lo largo del siglo (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100) y a los cuatro escenarios de emisiones considerados: B1 (emisiones bajas), B2 (emisiones medias-bajas), A2 (emisiones medias-altas) y A1FI (emisiones altas). Las simulaciones realizadas por los modelos climáticos regionales utilizados en el proyecto PRUDENCE corresponden exclusivamente a los periodos 1961-1990 y 2071-2100 y a los escenarios de emisiones B2 y A2 del IPCC. Para derivar escenarios de cambio climático correspondientes a periodos intermedios (2011-2040 y 2041-2070) y a los otros escenarios de emisiones se ha aplicado el conocido método de "escalamiento de patrones" ("pattern-scaling").

En dicha figura se aprecia un calentamiento medio progresivo a lo largo del siglo en todas las comarcas de Castilla-La Mancha, tanto en promedio anual como estacional. También se observa que el ritmo de dicho calentamiento va creciendo claramente a medida que transcurre el siglo. En el primer periodo tridecenal (2011-2040) apenas se aprecian diferencias en el cambio medio de temperatura anual o estacional entre los escenarios de emisiones mayores y menores. Sin

embargo, en el último tercio de siglo, son muy notables las diferencias de calentamiento medio anual o estacional entre los diversos escenarios de emisiones.

Los incrementos relativos de temperatura media resultarán en todas las comarcas mucho más notables en verano y menos acusados en invierno. Sin embargo, su magnitud dependerá críticamente del escenario de emisiones que se considere. Así, en el último tercio de siglo, el calentamiento proyectado en el escenario de emisiones altas (A1) es de unos 3 °C mayor que en el de emisiones bajas (B1), lo que pone de manifiesto la importancia de las posibles medidas de mitigación que se acuerden a escala global en las próximas décadas.

Las distribuciones de los cambios proyectados en los promedios de temperaturas máxima y mínima diarias se asemejan notablemente a las de las temperaturas medias antes comentadas, por lo que no se muestran. No obstante, entre los valores de tales cambios se aprecian algunas diferencias, que se hacen más aparentes en el último tercio de siglo. Así, por ejemplo, en tal periodo y el escenario A2 (emisiones medias-altas), los incrementos proyectados para las temperaturas máximas diarias son generalmente 0.5 °C superiores a los de las temperaturas medias, mientras que los de las temperaturas mínimas diarias son unos 0.4 °C inferiores. Ambos valores corresponden a promedios anuales. En consecuencia, podría decirse que hay una tendencia a

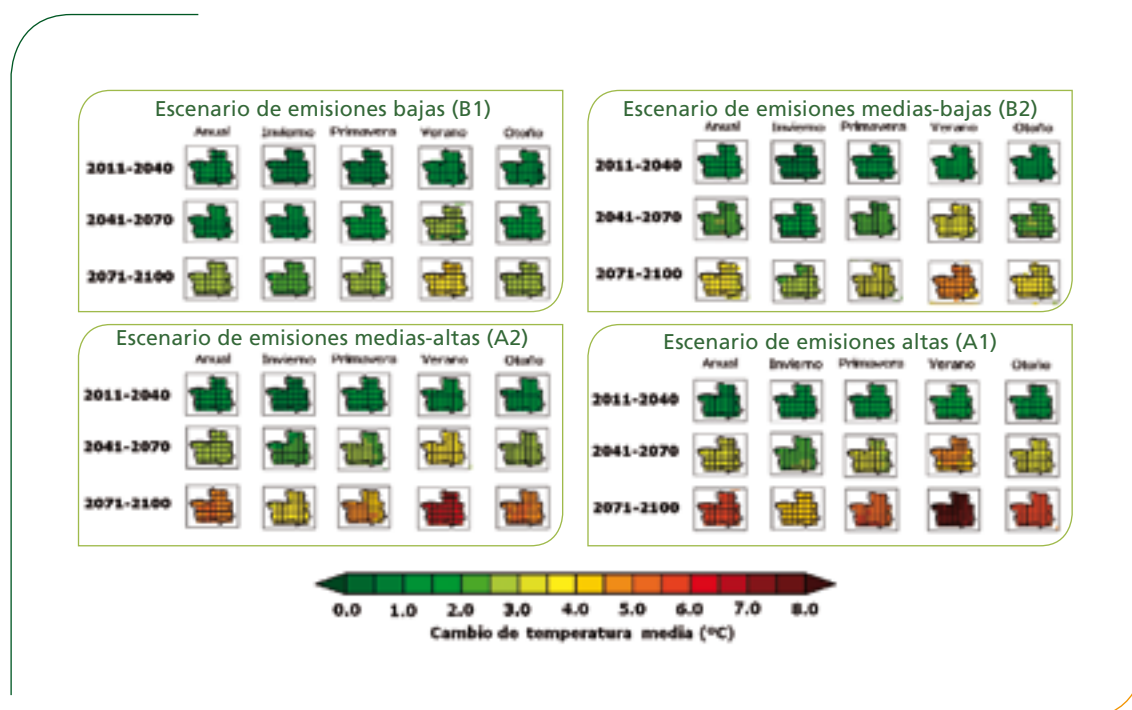


Figura 10: Proyecciones de los cambios del promedio anual y estacional de la temperatura superficial en cada periodo tridecenal del presente siglo con respecto al “clima actual” (1961-1990), para cuatro posibles escenarios de emisiones (B1, B2, A2, A1).

que la oscilación térmica diaria (diferencia entre temperatura máxima y mínima) se acreciente en los diversos escenarios de cambio climático, más en los de emisiones altas. Estas diferencias entre las tendencias de temperaturas máximas y mínimas se suavizan en invierno en todas las regiones y se acrecientan en primavera en la mitad sur y en verano en las regiones del interior, aunque estos contrastes entre épocas del año son relativamente menores.

Los escenarios de cambio de precipitación presentan, por lo general, un aspecto algo menos regular que los de temperatura. En la figura 11 se muestran los cambios porcentuales de los promedios de precipitación anual y estacional en los tres periodos tridecenales del presente siglo con respecto al de referencia (1961-1990) para los cuatro escenarios de emisiones considerados, que también se han deducido aplicando la conocida técnica de escalamiento de patrones (*"pattern-scaling"*). En todas las regiones se proyecta una tendencia progresiva a la disminución del promedio anual de precipitaciones, que será más acusada a partir de mitad de siglo y aún mayor en los escenarios de emisiones altas. Así, en el promedio de la próxima treintena (2011-2040) no se aprecian diferencias sustanciales entre los diversos escenarios de emisiones, de forma que en todos ellos las reducciones del promedio anual de precipitación podrían mantenerse por debajo del 10%. Pero en las proyecciones del último tercio del siglo, el contraste entre escenarios de emisiones bajas y altas es mucho mayor. En las comarcas de la mitad sur-occidental podrían producirse reducciones en el promedio de precipitación anual de hasta el 30% en el escenario A1 (emisiones altas), pero se mantendrían por debajo del 15% en el escenario B1 (emisiones bajas). Esto pone de manifiesto, una vez más, la importancia de las medidas de control de emisiones de GEI a escala global en las próximas tres décadas.

Los cambios relativos de precipitación presentan notables diferencias entre las estaciones del año, proyectándose por lo general las máximas reducciones en primavera y verano. Asimismo, los porcentajes de cambio en todas las comarcas se exacerban en los escenarios de emisiones altas a final de siglo y se moderan en los de emisiones bajas. Otra particularidad son los contrastes del cambio en las precipitaciones medias estacionales. En la mayor parte de las comarcas se aprecian tendencias de la precipitación muy pequeñas en invierno. En primavera las proyecciones apuntan a una significativa disminución de la precipitación media en todas las comarcas. Algo similar se proyecta en verano, aunque se ha de considerar que la escasez de precipitaciones estivales, típica del clima de Castilla-La Mancha, relativiza la importancia cuantitativa de los valores de reducción porcentual. En otoño, las menores reducciones relativas de precipitación media se localizan en el tercio oriental. Pero, también hay que advertir que la técnica de escalamiento de patrones, que aquí se aplica para deducir los cambios climáticos en cada treintena del siglo y cada escenario de emisiones, introduce un grado adicional de incertidumbre en los escenarios de cambio de precipitación. Este importante aspecto se abordará más adelante.

Además de los cambios proyectados en los valores medios, resulta importante examinar si también se alteraría en el futuro la variabilidad interanual de los promedios estacionales de la tem-

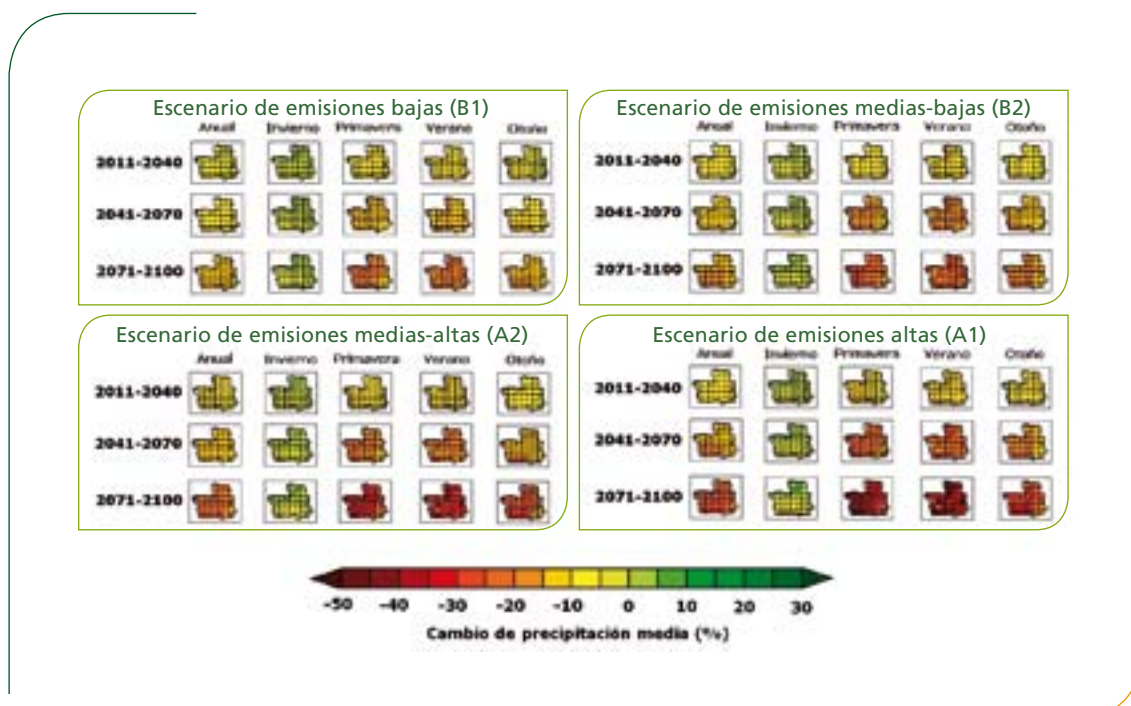


Figura 11: Proyecciones de los cambios relativos (en %) del promedio anual y estacional de la precipitación en cada periodo tridecenal del presente siglo con respecto al "clima actual" (1961-1990), para cuatro posibles escenarios de emisiones (B1, B2, A2, A1).

peratura y la precipitación, que se suele expresar como el porcentaje de cambio que experimentaría la desviación típica de la población de las medias climáticas estacionales en un escenario de clima futuro respecto al actual. Los resultados de las simulaciones indican que la variabilidad interanual de las temperaturas medias anuales y estacionales tendería a incrementarse en todas las comarcas. La interpretación de este resultado sería que, en un escenario de cambio climático acusado (crecimiento medio-alto de emisiones y último tercio de siglo), las temperaturas estacionales de los años anómalos (cálidos o fríos) se diferenciarían más de las medias climatológicas del periodo 2071-2100 que lo que ocurre en el clima actual.

Un razonamiento semejante se podría aplicar para interpretar los cambios proyectados en la variabilidad interanual de las precipitaciones. Ahora bien, en este caso, la menor consistencia espacial que se observa en todos los mapas puede considerarse como un indicativo de su probable escasa fiabilidad. Posiblemente la principal razón de ello radique en que el sencillo criterio estadístico utilizado para derivar cambios en la variabilidad interanual resulta cuestionable en el caso de las precipitaciones, pues su distribución de frecuencias no se ajusta a un tipo gaussiano, como ocurre con las temperaturas. Por lo tanto, para un análisis más adecuado de la posible alteración en la variabilidad de las precipitaciones habría que examinar el posible cambio en la frecuencia de eventos extremos diarios que más adelante se presenta.

Finalmente, con objeto de que los valores del cambio proyectado en la temperatura media y la precipitación puedan extrapolarse fácilmente a cualquier otro posible escenario de emisiones no considerado aquí, los resultados del conjunto de modelos regionales usados se han escalado en función del cambio de temperatura media global simulado por los modelos globales en que se “anidaron” los respectivos modelos regionales. Por tanto los valores que se presentan, corresponderían a los cambios estacionales de la temperatura y de la precipitación que, en promedio, podrían experimentarse en Castilla-La Mancha por cada 1 °C de calentamiento global adicional respecto al clima presente. Esto permite también realizar una evaluación sencilla de la eficacia de las posibles estrategias globales de mitigación que se adopten. Por ejemplo, si se hicieran efectivas las limitaciones futuras de emisiones de GEIs y aerosoles que propugna la Unión Europea, para que a finales de siglo el calentamiento global no sobrepase el valor de 2 °C con respecto al clima preindustrial, es decir aproximadamente 1.4 °C respecto al clima del periodo 1961-90, los cambios medios de la temperatura y la precipitación proyectados para la región en el último tercio de siglo se podrían deducir sin más que multiplicar por 1.4 los correspondientes valores que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Promedios regionales de los cambios anual y estacional (DEF: invierno, MAM: primavera, JJA: verano, SON: otoño) de temperatura (°C) y de precipitación (%) por cada grado de aumento de la temperatura media global respecto al periodo 1961-1990. Se muestran los valores mínimos (Mn), máximos (Mx), medios (50) y de los cuartiles 25% y 75% de los cambios resultantes de todas las simulaciones realizadas con los modelos regionales. El color naranja indica un consenso entre todas las simulaciones en reducción de precipitación respecto al “clima actual” (periodo 1961-1990).

Comunidad	Periodo	Cambio de temperatura (°C)					Cambio de precipitación (%)				
		Mn	25	50	75	Mx	Mn	25	50	75	Mx
Castilla-La Mancha	DEF	0,7	1,0	1,1	1,3	1,4	-9	-2	0	1	9
	MAM	0,9	1,2	1,4	1,5	1,8	-17	-13	-10	-6	-2
	JJA	1,4	1,9	2,0	2,1	2,4	-28	-16	-10	-5	0
	SON	1,2	1,4	1,5	1,6	1,7	-15	-9	-7	-7	-1
	Anual	1,2	1,4	1,5	1,6	1,7	-12	-9	-6	-5	-2

Por otra parte, para proporcionar una información objetiva sobre la incertidumbre asociada a las proyecciones de cambio climático en cada comarca, además del valor promedio de las 31 simulaciones realizadas, se ha extraído el de aquella simulación que ha proyectado el valor mínimo, el de la que ha proyectado el máximo y los valores de los cuartiles 25% y 75% de la distribución de los 31 valores obtenidos. Para calcular tales valores se ha tenido en cuenta que no

todos los modelos regionales realizaron simulaciones anidados en los dos modelos globales. De otro modo, la distribución estadística resultaría obviamente sesgada. Con estos cinco valores, se puede examinar el grado de consenso entre las proyecciones de cambio de los modelos, que es un indicativo de la magnitud de la incertidumbre asociada a ellas: Menor incertidumbre cuanto mayor semejanza haya entre las proyecciones. También sería posible asignar probabilidades a cualquier intervalo de valores de cambio proyectados para la temperatura o la precipitación en cada comarca, por cada 1 °C de calentamiento medio global.

3.2.2 Escenarios de cambio de otras variables climáticas

A continuación se muestran las proyecciones de cambio correspondientes a otras tres variables climáticas: humedad relativa, nubosidad y velocidad del viento. Pero, sólo se presentarán los escenarios de cambio de tales variables para el último tercio de siglo y los dos escenarios de emisiones intermedias (B2 y A2). Los correspondientes a los periodos tridecenales anteriores del siglo y a los escenarios de emisiones A1 y B1 podrían deducirse fácilmente aplicando la misma técnica de escalamiento que para las temperaturas medias y precipitaciones estacionales.

Humedad relativa

Los cambios en la humedad relativa alteran el potencial evaporativo del aire, de forma que una reducción implicaría una mayor capacidad del aire para admitir vapor de agua, es decir un mayor poder desecante. En la figura 12a se observa que la humedad relativa se reduciría en todas las estaciones del año, aunque con porcentajes mayores en verano que en invierno. No obstante, ha de tenerse en cuenta que en verano los valores medios de humedad relativa son menores que en invierno, por lo que una misma reducción absoluta daría lugar a una mayor reducción porcentual en la estación estival. También se aprecia que las magnitudes del cambio de humedad relativa son bastante similares en los dos escenarios de emisiones considerados, salvo en primavera donde la reducción es mayor en el escenario con emisiones más altas (A2).

Nubosidad

Una alteración en la cubierta de nubes implica también un cambio en el flujo de radiación solar que llega a la superficie, de manera que una disminución en la nubosidad daría lugar a un incremento en la insolación. En la figura 12b se aprecia que la mayor reducción porcentual de nubosidad se proyecta durante el verano en la mitad occidental, aunque de nuevo hay que advertir que tal porcentaje viene determinado por ser la estación del año con mayor escasez de nubosidad en casi todo el territorio. En primavera y otoño los porcentajes de reducción de nubosidad son mayores, mientras que en invierno variarían poco en relación al clima actual. La distribución geográfica de los cambios proyectados de la nubosidad es bastante similar en los

dos escenarios de emisiones considerados, aunque en general tiene una magnitud algo mayor en el escenario con emisiones más altas (A2).

Velocidad del viento

En la figura 12c se muestran los escenarios de cambio de la intensidad del viento cerca de la superficie (a 10 m sobre el suelo). En invierno y primavera los cambios proyectados a lo largo de todo el territorio son generalmente poco significativos. En verano se proyecta un cierto incremento, posiblemente ligado a la intensificación de los gradientes térmicos entre la periferia y el interior de la Península que daría lugar a un incremento de las brisas, mientras que en otoño se observa un cierto debilitamiento general en el escenario con emisiones más altas (A2). En general, la distribución geográfica del signo de los cambios proyectados es bastante similar en los dos escenarios de emisiones considerados, aunque su magnitud tiende a ser algo mayor en el de emisiones más altas.

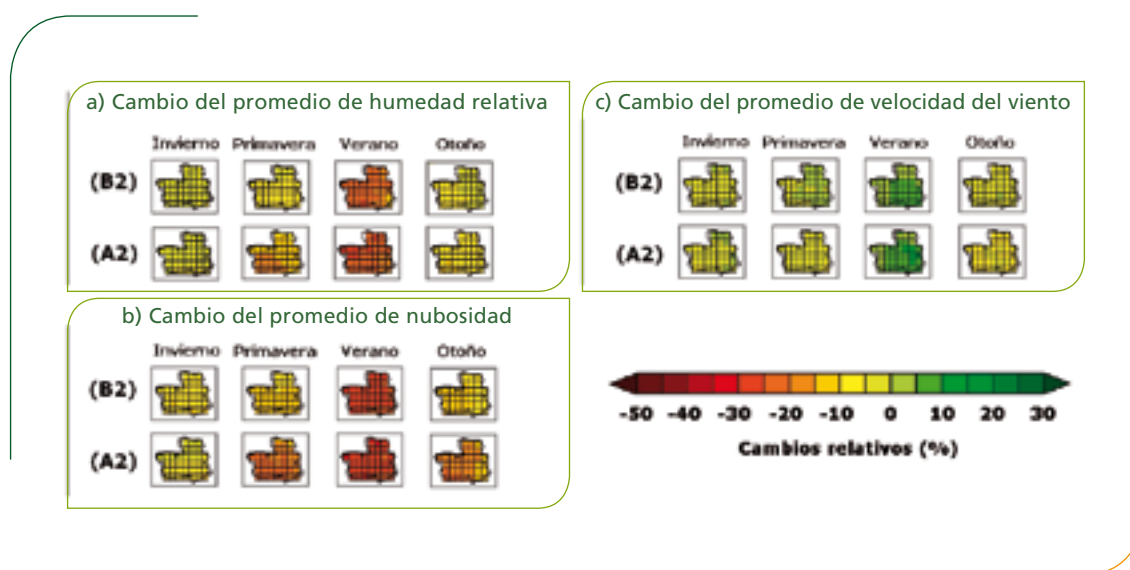


Figura 12: Proyecciones de los cambios relativos (%) del promedio estacional de otras variables climáticas en dos escenarios de emisiones (A2 y B2) y el último tercio de siglo (2071-2100), con respecto al “clima actual” (1961-1990).

3.2.3 Escenarios de cambio de eventos climáticos extremos

Un aspecto de las proyecciones de clima futuro tan importante como el de los cambios en los valores medios de la temperatura o la precipitación, es la posible alteración en la intensidad y frecuencia de eventos climáticos extremos. Generalmente se entiende por extremos climáticos los valores de variables atmosféricas muy alejados de los promedios climatológicos, que se producen

en situaciones meteorológicas excepcionales. El interés que presenta este tipo de análisis radica en que los impactos de las alteraciones del clima futuro debidos a cambios en extremos climáticos serían por lo general más severos que los asociados al cambio del clima promedio. Aunque la frecuencia con que ocurren tales eventos es relativamente pequeña, los daños que producen sobre el medio ambiente, las actividades socio-económicas o la salud humana suelen ser muy notables.

Existen varios criterios o índices para caracterizar los eventos climáticos extremos, aunque los más usuales son los basados en percentiles de las distribuciones estadísticas. Así, para caracterizar la intensidad de condiciones térmicas extremas cálidas o frías podría usarse, respectivamente, el percentil 90 o 95 de la distribución de temperaturas máximas diarias y el percentil 10 o 5 de la distribución de temperaturas mínimas diarias. A partir de las simulaciones realizadas por los modelos regionales anidados en uno de los modelos globales (HadAM3), se han calculado los cambios que podrían experimentar algunos de estos índices de intensidad de extremos térmicos y pluviométricos diarios en el último tercio de siglo (2071-2100) respecto al periodo de "clima actual" (1961-1990), en los escenarios de emisiones A2 (medias-altas) y B2 (medias-bajas).

Aunque este análisis sería más completo si se contemplaran los resultados del conjunto total de simulaciones climáticas de que se dispone, el desigual número de MCR anidados en cada uno de los dos modelos climáticos globales (HadAM3 y ECHAM 4) haría mucho más complejos los cálculos y posiblemente no añadiría una certidumbre significativa a las conclusiones. En cualquier caso, el análisis que aquí se presenta puede tomarse como un indicativo razonable de las tendencias de cambio que cabría esperar en los extremos climáticos en el clima a partir de la segunda mitad del siglo con respecto al de las tres décadas anteriores al presente, en los escenarios de emisiones contemplados. Extender estas tendencias a periodos futuros más próximos, o escenarios de emisiones muy diferentes; aplicando el método de "escalamiento de patrones", como se ha hecho antes en el caso de los cambios de valores climáticos promedio, tendría menos consistencia científica por la notable no-linealidad en la relación entre el número o la intensidad de extremos climáticos regionales y el grado de calentamiento global. No obstante, ya se ha señalado que las medidas globales de mitigación que se lleguen a acordar en las siguientes dos décadas serían las que determinarían esencialmente la magnitud del cambio climático global a partir de la segunda mitad de siglo. Por tanto, el análisis que aquí se realiza para dicho plazo tendría una clara aplicabilidad en la evaluación de estrategias de mitigación.

Cambios en extremos térmicos

En la figura 13a se muestran las distribuciones espaciales de los cambios proyectados en los valores del percentil 90 de las temperaturas máximas diarias correspondientes a cada estación del año, expresados en °C. Estos valores indican, por tanto, el incremento que en promedio experimentarían las temperaturas máximas de los días más calurosos en cada estación del año. Así se aprecia que,

mientras en invierno tales incrementos apenas superarían los 3 °C en todas las regiones, en verano serían por lo general mayores de 5 °C, sobre todo en el escenario con mayores emisiones (A2).

Merecen también una especial consideración los cambios que podrían experimentar el número de olas de calor en el periodo estival, por incidir más directamente en los aspectos relacionados con la salud humana. Aunque hay diversos criterios para seleccionar los eventos de olas de calor, aquí se han considerado aquellos días entre junio y septiembre en que la temperatura máxima local supera el valor del percentil 95 en el periodo simulado de "clima actual" (1961-1990). En la figura 13b se presentan los incrementos (en %) del número de "olas de calor" proyectados para el último tercio de siglo en los dos escenarios de emisiones considerados. Se observa que en la mayor parte del territorio la frecuencia de estos eventos extremos aumentaría en más de seis veces en el escenario B2 y en más de siete veces en el escenario A2. Eso significa que, si en el periodo de referencia (1961-1990) se registran en una determinada región un promedio de seis "olas de calor" por año (percentil 95 de los días entre junio y septiembre), en el último tercio de siglo se esperaría que dicha región experimentara en promedio más de 36 "olas de calor" por año en el caso del escenario B2 (emisiones medias-bajas) y más de 42 en el del escenario A2 (emisiones medias-altas).

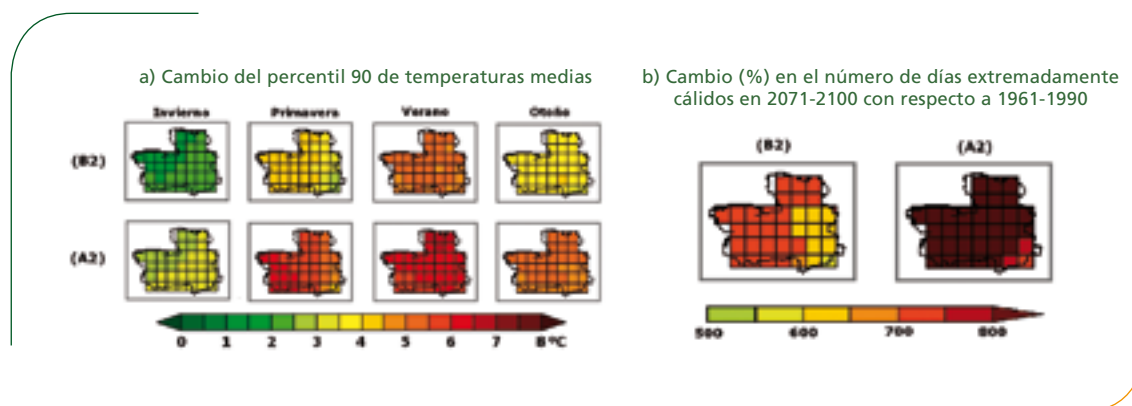


Figura 13: (a) Proyecciones del cambio en el valor percentil 90 de las temperaturas máximas diarias para cada estación del año en el último tercio de siglo (2071-2100) con respecto a de "clima actual" (1961-1990) en dos escenarios de emisiones (B2 y A2). (b) Cambio relativo (%) del número de días extremadamente cálidos entre junio y septiembre (olas de calor) en 2071-2100 respecto a 1961-1990 en dos escenarios de emisiones.

Cambios en extremos de precipitación

Para caracterizar el cambio proyectado en la intensidad y frecuencia de los eventos extremos de precipitación se ha considerado, respectivamente, el valor percentil 90 de la precipitación diaria en el total de días de lluvia (aquellos en la precipitación acumulada supera 1 mm) y el número de días extremadamente lluviosos (con precipitación mayor que dicho percentil 90). Ambos índices de extremos pluviométricos se han deducido también considerando el conjunto total de valores

simulados por todos los modelos regionales en el periodo de referencia (1961-1990) y en el último tercio de siglo (2071-2100), para cada uno de los dos escenarios de emisiones (B2 y A2).

Los cambios proyectados del percentil 90 de precipitaciones diarias en todas las estaciones del año se mantienen por lo general en un intervalo de $\pm 10\%$ en la mayor parte del territorio, con pocos casos en los que tales cambios se sitúan ligeramente fuera de dichas cotas. Por ello, no se muestran las figuras con estos resultados. Sin embargo, son relativamente más acusados los cambios proyectados en el número de días con precipitaciones extremas, como se presentan en la figura 14. En ella se observan reducciones superiores al 30% en verano en ambos escenarios de emisiones (algo mayores en el A2 que en el B2) en toda región. Algo similar resulta en primavera, aunque los porcentajes de reducción son menores.

Sin embargo hay más contrastes entre los resultados de ambos escenarios correspondientes a las otras dos estaciones del año. En el escenario A2 se proyecta en invierno una reducción de días con precipitación extrema en la mitad meridional, mientras que en el escenario B2 no se percibe un contraste territorial semejante. En otoño ocurriría algo similar.

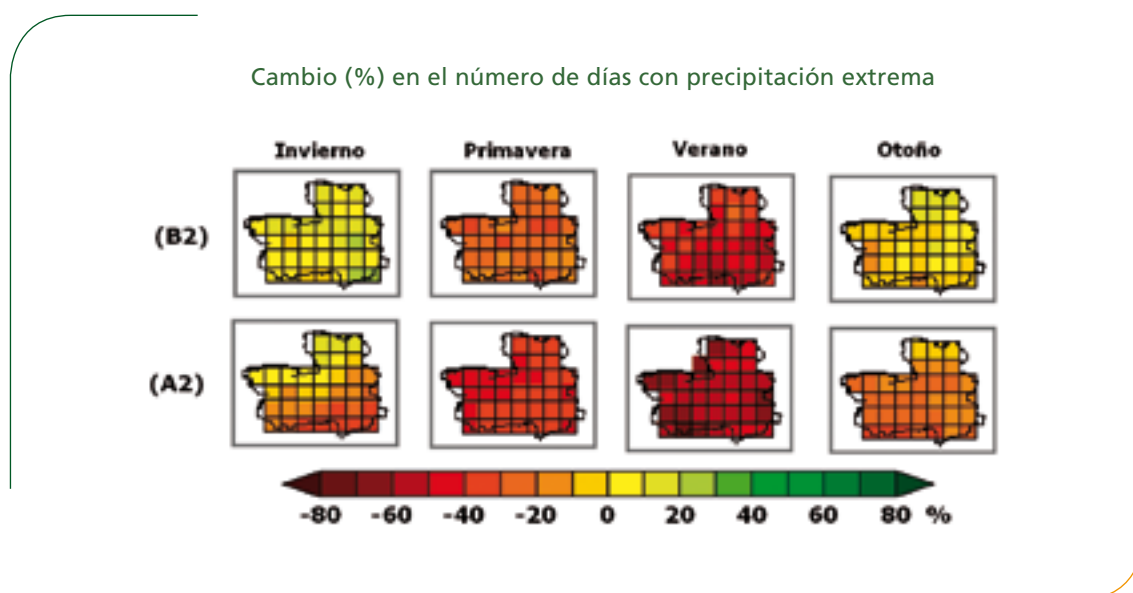


Figura 14: Cambio relativo (%) con respecto al "clima actual" (1961-1990) del número medio de días en cada estación del año con precipitación extrema (mayor que los correspondientes valores percentil 90 de la simulación de referencia) proyectado en el último tercio de siglo (2071-2100), en dos escenarios de emisiones (A2 y B2).

La interpretación general de estos resultados del cambio proyectado en eventos extremos de precipitación es que, mientras no cabría esperar que las intensidades máximas de lluvia diaria varíen significativamente con respecto al "clima actual", es probable que en la mayor parte del

territorio se reduzca el número de días con precipitación torrencial en primavera y verano. Este cambio de frecuencia de eventos de precipitación extrema tendría un reparto territorial más heterogéneo y unos patrones de distribución algo diferentes en los dos escenarios de emisiones considerados. No obstante, la relativa disparidad entre los resultados de los diversos modelos climáticos usados indica la mayor incertidumbre que presentan estas proyecciones de cambio en eventos extremos de lluvia en comparación con las de cambio de temperaturas extremas.

Elaborados de forma semejante a como antes se explicó, a continuación se presentan los escenarios promedio de cambio de eventos climáticos extremos en la Comunidad de Castilla-La Mancha. De nuevo se señala que no es adecuado aplicar el método de escalamiento de patrones a los cambios de eventos extremos, pues no cabe suponer que su evolución futura se ajuste linealmente a la del calentamiento medio global. Por tanto, en este caso, los valores que se muestran corresponden a proyecciones de cambio climático realizados con los modelos regionales anidados en el modelo global HadAM3, es decir en la última treintena del presente siglo (2071-2100) y en los escenarios de emisiones A2 y B2.

Tabla 4: Proyecciones de cambios estacionales en 2071-2100 respecto a 1961-1990 correspondientes a dos escenarios de emisiones (B2: medias-bajas y A2: medias-altas) y a las simulaciones realizadas por los modelos climáticos regionales anidados en el modelo global HadAM3, del percentil 90 de temperaturas máximas diarias, del número medio por año de "olas de calor" (días con temperaturas superiores al percentil 95 de la temperatura máxima diaria en "clima actual") entre Junio y Septiembre y del número medio de días por año excepcionalmente lluviosos (precipitación diaria superior al percentil 90 en "clima actual"). Cada valor se acompaña de un intervalo de variación en el que están incluidos los resultados del 90% de las simulaciones consideradas. En el caso de los cambios en el número medio de días por año con precipitación extrema, los colores indican el grado de consenso entre los modelos regionales (naranja cuando todos los modelos proyectan cambios negativos y amarillo cuando la mayoría de ellos proyectan cambios negativos).

Comunidad	Estación del año	Cambio en la temperatura máxima diaria (°C) de los días con calor extremo		Cambio en el número de "olas de calor" estivales ^(*) por año		Cambio relativo (%) estacional del número de días por año con precipitación extrema	
		B2	A2	B2	A2	B2	A2
Castilla-La Mancha	DEF	2.0 ±0,2	3.0 ±0,4			9% ±11	-11% ±10
	MAM	4.0 ±0,6	5.7 ±0,7			-24% ±11	-38% ±9
	JJA	5.1 ±0,5	6.2 ±0,7	45 ±3	57 ±9	-44% ±16	-56% ±24
	SON	3.7 ±0,6	5.1 ±0,6			0% ±10	-21% ±8

En la Tabla 4 se han incluido los valores promedio de los cambios en los tres índices de extremos que antes se mostraron con mapas. Es decir, los cambios estacionales del valor percentil 90 de las temperaturas máximas diarias, los del número medio de días extremadamente calurosos entre junio-septiembre y los del número de medio de días con precipitación extrema, todos ellos correspondientes al promedio de las celdillas que abarca la región en la malla común de los modelos. Estos valores medios del cambio van acompañados por los intervalos en que están incluidos los resultados del 90% de las simulaciones consideradas, lo que proporciona una indicación del grado relativo de confianza que tales cambios ofrecen en cada territorio.

Bibliografía

- BRUNET, M.; SALADIE, O.; JONES, P.; SIGRÓ, J. MOBERG, A.; AGUILAR, E.; WALTER, A.; LISTER, D. AND LÓPEZ, D. (2006): The development of a new dataset of Spanish Daily Adjusted Temperature Series (1850-2003). *International Journal of Climatology*, 26: 1777-1802.
- CHRISTENSEN, J.H., T.R. CARTER, M. RUMMUKAINEN, AND G. AMANATIDIS (2007): Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project. *Climatic Change*, 81, 1-6.
- HAYLOCK, M.R., N. HOFSTRA, A.M.G. KLEIN TANK, E.J. KLOK, P.D. JONES AND M. NEW (2008): A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation *Journal Geophysical Research* (en prensa).
- D. JACOB, L. BÄRRING, O.B. CHRISTENSEN, J.H. CHRISTENSEN, M. CASTRO, M. DEQUE, F. GIORGI, S. HAGEMANN, M. HIRSCHI, R. JONES, E. KJELLSTRÖM, G. LENDERINK, B. ROCKEL, E. SANCHEZ, CH. SCHÄR, S.I. SENEVIRATNE, S. SOMOT, A. VAN ULDEN AND B. VAN DEN HURK (2007): An intercomparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate. *Climatic Change*, 81, 31- 52.
- IPCC (2001): Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- IPCC (2007). Climate Change 2007 - The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC Cambridge University Press.