



I. Mestre, M.J. Casado, E. Rodríguez*

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), C/ Leonardo Prieto Castro, 8, 28071, Madrid

*Correo electrónico: erodriguezc@aemet.es

2

Tendencias observadas y proyecciones de cambio climático sobre España

■ Introducción

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (más conocido por sus siglas en inglés, IPCC) es una entidad científica creada en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Se constituyó para proporcionar información objetiva, clara, equilibrada y neutral del estado de conocimientos sobre el cambio climático a los responsables políticos y otros sectores interesados. El IPCC en su Quinto Informe de Evaluación (IPCC 2013) confirma y refuerza los resultados de anteriores informes, concluyendo que el cambio climático está teniendo lugar ya y continuará en las próximas décadas y siglos, siendo los humanos la causa principal de tal cambio. También concluye que si no hay una acción urgente y significativa para reducir nuestras emisiones de gases de efecto invernadero, los impactos del cambio climático serán más graves (IPCC 2013).

El IPCC concluye que el calentamiento del sistema climático es inequívoco. Desde 1950 se han observado cambios en el sistema climático que no tienen precedente, tanto si se comparan con registros históricos observacionales, que datan de mediados del siglo XIX, como si se comparan con registros paleoclimáticos referidos a los últimos milenios. Las observaciones permiten afirmar que la atmósfera y los océanos se han calentado, que la cantidad y extensión de las masas de hielo y nieve han disminuido, que el nivel del mar ha subido y que las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado (IPCC 2013).

La temperatura media global muestra un incremento de 0,85°C (entre 0,65°C y 1,06°C) en el periodo 1880-2012. Cada una de las últimas tres décadas

ha sido más cálida que todas las anteriores desde 1850, siendo la primera década del siglo XXI la más cálida de todas. Las tendencias en periodos cortos (entre 10 y 15 años) están muy afectadas por la variabilidad natural, tal y como sucede, por ejemplo, en los últimos 15 años, en los que la tasa de calentamiento ha sido inferior a la media registrada desde 1951. La precipitación ha aumentado en las zonas terrestres de latitudes medias del hemisferio norte desde 1950. Se han observado cambios en los episodios extremos desde 1950. El número de días y noches frías ha disminuido y el número de días y noches cálidas ha aumentado a nivel global (IPCC 2013).

Respecto a las proyecciones futuras y basándose en unos nuevos escenarios de emisión (las denominadas Sendas Representativas de Concentración o RCP, de sus siglas en inglés, que se identifican por su forzamiento total para el año 2100, variando entre 2.6W/m² (RCP2.6) y 8.5W/m² (RCP8.5), el IPCC afirma que las emisiones continuadas de gases de efecto invernadero causarán un calentamiento adicional al actualmente existente. Unas emisiones iguales a las tasas actuales o superiores inducirán cambios en todos los componentes del sistema climático, algunos de ellos sin precedentes en cientos o miles de años. Los cambios tendrán lugar en todas las regiones del globo, incluyendo cambios en la tierra y en el océano, en el ciclo del agua, en la criosfera, en el nivel del mar, en algunos episodios extremos y en la acidez de los océanos. Muchos de estos cambios persistirán durante muchos siglos. La limitación del cambio climático requerirá reducciones substanciales y sostenidas de las emisiones de CO₂ (IPCC 2013).

El cambio de la temperatura superficial no será regionalmente uniforme, si bien, en el largo plazo, el calentamiento será mayor sobre tierra que sobre los océanos. La Región Ártica se calentará más rápidamente. En un clima más cálido, el contraste en la precipitación

estacional media entre las regiones secas y húmedas aumentará en la mayor parte del globo. Las regiones situadas en latitudes altas y en el océano Pacífico ecuatorial verán incrementarse sus precipitaciones. Las proyecciones para las próximas décadas de muchas magnitudes muestran cambios similares a los ya observados. En la mayoría de las regiones habrá más episodios relacionados con extremos de altas temperaturas y menos relacionados con extremos de bajas temperaturas. Las olas de calor serán más frecuentes y tendrán mayor duración. Los fríos invernales extremos continuarán ocurriendo ocasionalmente. En algunas áreas aumentará la frecuencia, intensidad y/o cantidad de precipitaciones fuertes (IPCC 2013).

En la región Mediterránea tendrá lugar un incremento de temperatura superior a la media global, más pronunciado en los meses estivales que en los invernales. Para el escenario RCP8.5 y para finales del siglo XXI, la región Mediterránea experimentará incrementos medios de temperatura de 3,8°C y de 6,0°C en los meses invernales y estivales, respectivamente, y reducciones medias de precipitación de 12% y de 24% en los meses invernales y estivales, respectivamente. Habrá un aumento de los extremos relacionados con las precipitaciones de origen tormentoso (IPCC 2013).

Mientras que la situación general se describe detalladamente a nivel global e incluso regional (región Mediterránea; IPCC 2013), en esta contribución se resumen las tendencias climáticas tanto observacionales como proyectadas para el siglo XXI sobre el territorio español que presentan características específicas y diferenciadas.

■ Tendencias observadas de temperatura y precipitación sobre España

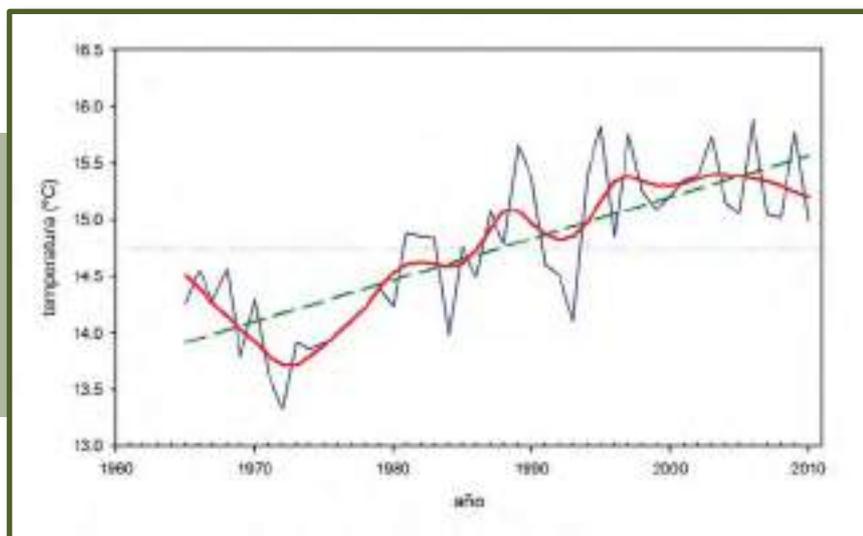
Datos y Metodología

Para analizar las tendencias observadas de temperatura y precipitación sobre España se han seleccionado unas determinadas series atendiendo a su longitud temporal y haber sido sometidas a un control de calidad, relleno de lagunas y homogeneización. Para la temperatura se han considerado por un lado los resultados obtenidos por Brunet et al. (2006) que utilizan las 22 series más largas de temperaturas medias (Tmed), máximas (Tmax) y mínimas (Tmin) diarias españolas, que cubren el periodo 1850-2005 y por otro los de Luna et al. (2012), que utilizan un conjunto de 42 observatorios principales con datos mensuales de temperatura de 1965 a 2010. Estos observatorios han sido seleccionados por AEMET atendiendo a criterios de representatividad geográfica y continuidad en el tiempo tanto en lo que se refiere a la ausencia o escasez de lagunas en el pasado como en el futuro dado que son observatorios principales. Para la precipitación se ha utilizado un conjunto de 66 series mensuales que cubren el periodo 1901-2008 (Luna et al (2012)). Los resultados se presentan en forma de gráficos y tablas que muestran la significación estadística de las tendencias, anualmente y por estaciones y para dos periodos diferentes según la disponibilidad de los datos de la variable considerada en Luna et al. (2012) (1965-2010 y 1981-2010 para temperatura y 1901-2008 y 1951-2008 para precipitación).

Tendencias observadas de temperatura

Según Brunet et al. (2006), las 22 series más largas muestran que los promedios anuales de la temperatura media diaria se han incrementado significativamente en 0,13°C/década en el periodo 1901-2005, aunque no de forma lineal. Según Luna et al. (2012), con el conjunto de 42 observatorios se ha estimado que la tendencia media (significativa al 1%) para el periodo completo 1965-2010

■ Figura 1.



▲ **Figura 1.** Evolución de la temperatura media anual para España peninsular y Baleares para el periodo 1965-2010. Se representa también la serie suavizada con un filtro *loess* (en rojo).

Fuente: Elaborado a partir de Luna et al. (2012).

Tabla 1. Tendencias de la temperatura media para España peninsular y Baleares para dos periodos temporales (en negrita las significativas al 5% pero no al 1%, en negrita y cursiva las significativas al 1%; Luna et. al. 2012)

Tendencias en °C/10 años	1965-2010	1981-2010
AÑO	0.37	0.26
PRIM (MAM)	0.50	0.51
VER (JJA)	0.56	0.52
OTO (SON)	0.23	-0.05
INV (DEF)	0.13	0.04

es de 0,37°C/10 años, un valor ciertamente elevado que si se extrapolara a cien años conduciría a un valor de la tendencia del orden de 5 veces superior a la tendencia media global en los últimos 100 años. Para los últimos 30 años la tendencia (significativa al 5%) se reduce algo, resultando en 0,26°C/100 años. La curva de temperatura media anual también sobre España (Fig. 1) muestra la estabilización de las temperaturas en los últimos años detectada a nivel global por el IPCC.

Como se muestra en la Tabla 1, las dos estaciones del año con mayor tendencia son primavera y verano, ambas con tendencias muy significativas estadísticamente en los dos periodos considerados. El valor de estas tendencias es aproximadamente 0,5°C/10 años. El otoño presenta la particularidad de mostrar una tendencia ligeramente negativa y no significativa en los últimos 30 años, si bien para el periodo completo 1965-2010 la tendencia es positiva y significativa al 5%. El invierno es la estación que para el conjunto de los dos periodos considerados tiene menor tendencia, y en los últimos 30 años casi no tiene tendencia. Las tendencias para los dos periodos considerados no son significativas estadísticamente al 5%, siendo la única estación para la

que sucede esto.

Tendencias observadas de precipitación

Luna et al (2012) y Luna et al. 2012b, muestran que las tres primeras décadas (1901-1930) presentan valores promediados muy similares a los de las tres últimas (1981-2008) mientras que las décadas (1961-1979) son las más lluviosas del registro coincidiendo con un pico en la precipitación. Destaca también un máximo secundario en la década de los 30, seguido por años de sequía centrados en 1950. El contraste entre estos años secos y los muy lluviosos que vienen a continuación, en la década de los 60, dibujan el tramo ascendente más pronunciado de la serie filtrada en la Fig. 2.

Como muestra la Tabla 2, la tendencia a lo largo del periodo completo de 108 años es despreciable, del orden de 8 mm por siglo. En cambio si empezamos la serie en 1951 encontramos una tendencia decreciente apreciable, de 13,2 mm/10 años, que sin embargo no llega a la significación estadística al 5%. Es evidente de la Fig. 2, por otra parte, que si empezáramos en 1961 la tendencia decreciente sería todavía mayor, pues los años 50 fueron

Figura 2.

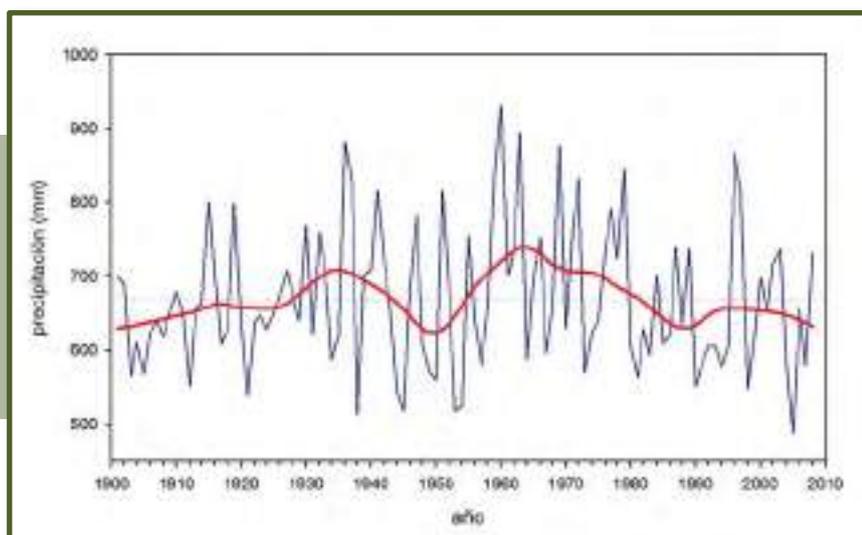


Figura 2. Evolución de la precipitación acumulada anual para España peninsular y Baleares para el periodo 1900-2010. Se representa también la serie suavizada con un filtro *loess* (en rojo)

Fuente: Elaborado a partir de Luna et al. (2012).

Tabla 2. Tendencias en series largas de precipitación (mm/10 años) para dos periodos temporales (en negrita las tendencias significativas al 5% pero no al 1%, en negrita y cursiva las significativas al 1%; Luna et. al. 2012)

Tendencias en °C/10 años	1901-2008	1951-2008
AÑO	0.8	-13.2
PRIM (MAM)	-0.8	-2.1
VER (JJA)	0.05	-3.3
OTO (SON)	0.2	1.7
INV (DEF)	1.6	-9.9

relativamente secos. Esta tendencia es en efecto de -19,4 mm/10 años, valor que extrapolado a un siglo supondría un descenso de la precipitación media de casi 1/3. Con todo esta tendencia tan acusada desde 1961 no llega a ser significativa al 5% con el test de Mann-Kendall, aunque está muy cerca. Una conclusión que podemos extraer de este análisis es que la gran variabilidad decadal de la precipitación hace que puedan aparecer tendencias sobre varios decenios que no sean extrapolables sin más a periodos más largos (Luna et. al. 2012).

Las tendencias estacionales para el periodo completo son todas de magnitud pequeña (véase Tabla 2), ninguna llega a los 2 mm/10 años, y tampoco ninguna es estadísticamente significativa. En cambio si empezamos en 1951 el invierno muestra una tendencia decreciente importante de casi 10 mm/10 años, que extrapolada a un siglo reduciría a la mitad la precipitación invernal en España. Pese a su magnitud esta tendencia no es significativa estadísticamente al 5% con el test de Mann-Kendall, lo que da idea de la importantísima variabilidad interanual de la precipitación invernal. De hecho en esta estación el coeficiente de variación (cociente entre la desviación típica y la media) es de un 35,6%, el mayor de todas las estaciones del año, seguido a corta distancia por el verano, con un 34,2% (pero la precipitación media en verano es menos de la mitad que en invierno, lo que infla el coeficiente de variación). En otoño y primavera el coeficiente de variación es de alrededor del 26%. Para la serie anual es inferior, un 15%. La única tendencia significativa ocurre en verano desde 1951, con una magnitud de -3,3 mm/10 años. En este mismo periodo la primavera y el otoño muestran pequeñas tendencias, decreciente la primera y creciente el segundo (Luna et al. 2012)

■ Proyecciones de cambio climático

Datos y Metodología

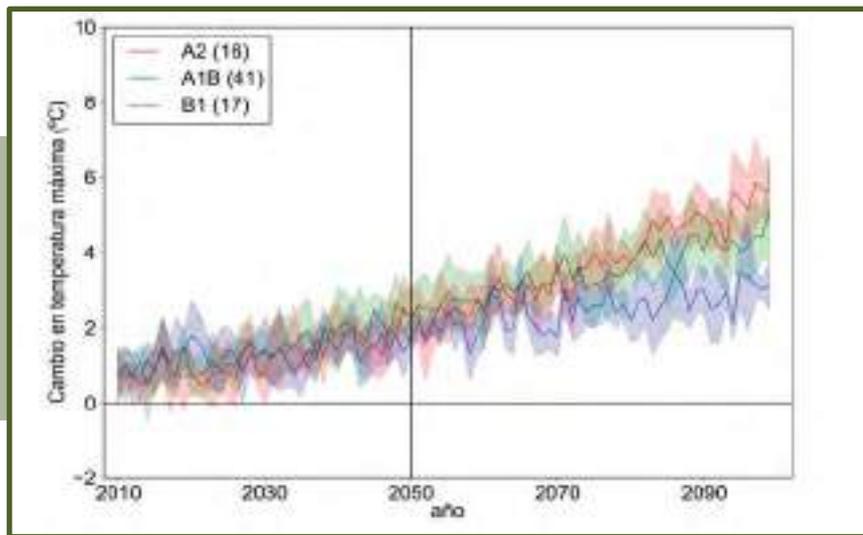
Los datos utilizados en esta contribución –salvo que explícitamente se indique lo contrario– proceden de la base de datos denominada “Escenarios PNACC-Datos mensuales” que constituye la colección de escenarios climáticos regionalizados del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. La colección de datos procede de distintas fuentes que abarcan metodologías alternativas de regionalización: (i) dos proyectos (ESCENA, de regionalización dinámica y ESTCENA, de regionalización estadística) financiados por el antiguo

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, hoy Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) en el marco del Plan Nacional de I+D+i 2008-11 y su Acción Estratégica Energía y Cambio Climático; (ii) Proyectos de regionalización de AEMET; (iii) Proyecto ENSEMBLES, del 6º Programa Marco de I+D de la UE. Los datos y la colección de variables consideradas por su utilidad para los distintos sectores activos en la evaluación de los efectos del cambio climático, están descritos con detalle en la correspondiente guía de usuario de “Escenarios-PNACC Datos mensuales” (disponible en <http://www.aemet.es/>). Todos los datos regionalizados utilizan modelos globales del CMIP3 y escenarios de emisión (SRES) correspondientes al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC. Las características de los datos basados en regionalización dinámica (proyecto ESCENA) están descritas en (Fernández et. al 2012), mientras que las características de los datos basados en regionalización estadística (proyecto ESTCENA) están descritas en (Gutiérrez et. al 2012). Los datos generados por AEMET están descritos en (Ramos et al. 2013). La información se presenta en gráficos que incluyen la evolución media de todas las proyecciones obtenidas por los distintos modelos y técnicas de regionalización utilizados así como su incertidumbre, expresada en forma de banda coloreada que representa más/menos una desviación típica estándar alrededor de la evolución media. A todas las proyecciones se les ha asignado el mismo peso. El número de modelos y técnicas utilizados para cada escenario está indicado, entre paréntesis, en las figuras. Todas las gráficas que se presentan en esta sección están referidas a cambios en las variables consideradas respecto al periodo de referencia 1961-2000.

Temperatura

Todas las proyecciones generadas muestran un aumento progresivo de las temperaturas máximas a lo largo del siglo XXI (Fig. 3), más rápido para el escenario SRES más emisoro (A2) y más lento para el escenario menos emisoro (B1). Así, para finales de siglo, cuando los aumentos son mayores, es probable que la variación del valor medio de la temperatura máxima de los dos últimos decenios respecto al valor de referencia (1961/2000) esté comprendida entre 3,8°C y 5,8°C para el escenario de emisiones altas (A2) y entre 2,1°C y 3,3°C para un escenario de emisiones bajas (B1). Las temperaturas máximas estivales son las que experimentarán mayores cambios, entre 3,4°C y 6,7°C mientras que las invernales son las que tendrán menos variaciones, entre 2,1°C y

■ **Figura 3.**



▲ **Figura 3.** Evolución del cambio en temperatura máxima diaria. Promedio para España Peninsular e Islas Baleares a partir de datos integrados producidos por AEMET y por los proyectos ENSEMBLES, ESCENA, ESTCENA respecto al periodo 1961-2000 y para los escenarios de emisión A2, A1B y B1. El sombreado indica su incertidumbre (+/- una desviación típica). Los números en la leyenda, entre paréntesis, indican el número de proyecciones utilizadas

Fuente: Escenarios PNACC-Datos mensuales (AEMET).

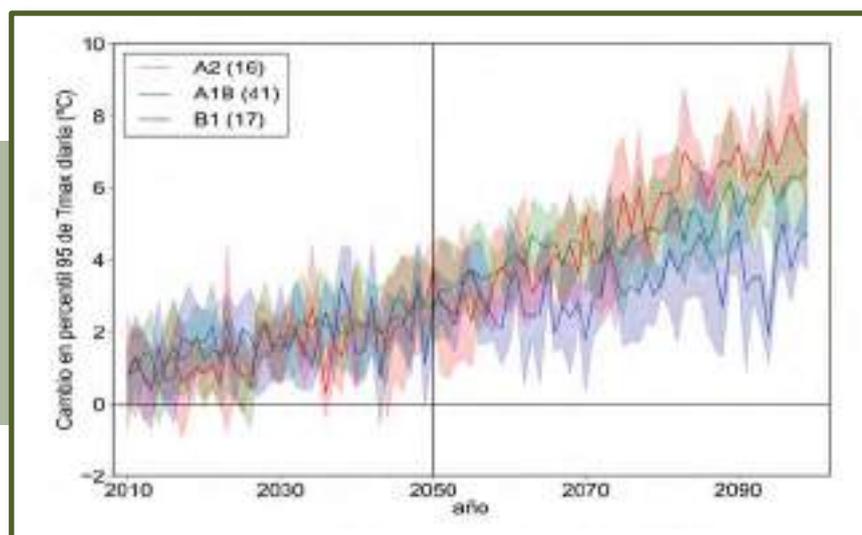
4,0°C, ambas para el escenario de emisiones medias-altas (A1B). Respecto a la incertidumbre debida a los modelos globales y las técnicas de regionalización, estas son mayores en el verano. Los resultados con la base de datos integrada aquí utilizada confirman los resultados obtenidos por Casado y Ramos (2013) con unos datos que incluyen un menor número de miembros en las simulaciones.

Estos cambios en las temperaturas máximas inducen cambios en los índices extremos asociados a esta variable. El percentil 95% de la temperatura máxima diaria (referido al mismo periodo de referencia) (Fig.

4) muestra mayores cambios que el correspondiente al valor medio indicando un ensanchamiento de la curva de distribución de probabilidad.

La longitud máxima de las olas de calor aumentará progresivamente a lo largo del siglo. Este aumento será más rápido en la zona interior del cuadrante sureste de la península. También se observa un aumento apreciable de la incertidumbre inducida por los modelos globales para finales de siglo (Fig. 5).

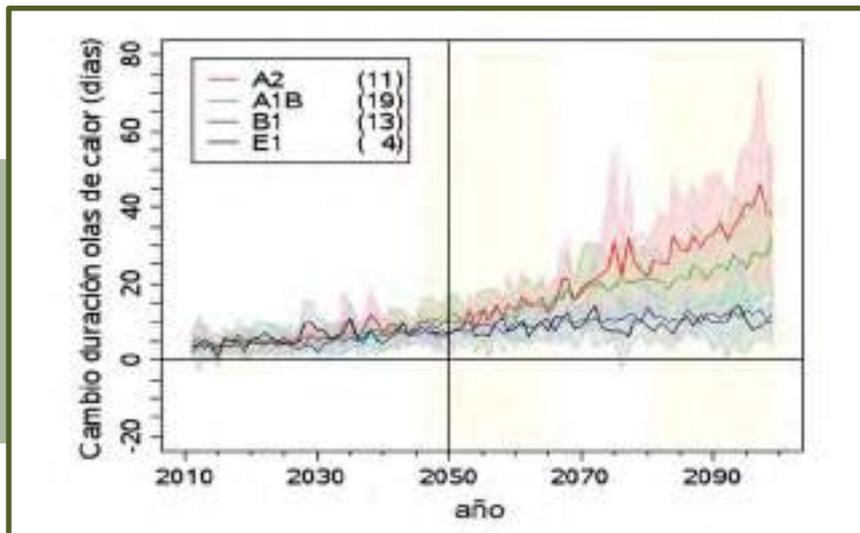
■ **Figura 4.**



▲ **Figura 4.** Evolución del cambio del percentil 95% de la temperatura máxima diaria. Promedio para España Peninsular e Islas Baleares a partir de datos integrados producidos por AEMET y por los proyectos ENSEMBLES, ESCENA, ESTCENA respecto al periodo 1961-2000 y para los escenarios de emisión A2, A1B y B1. El sombreado indica su incertidumbre (+/- una desviación típica). Los números en la leyenda, entre paréntesis, indican el número de proyecciones utilizadas.

Fuente: Escenarios PNACC-Datos mensuales (AEMET).

■ Figura 5.



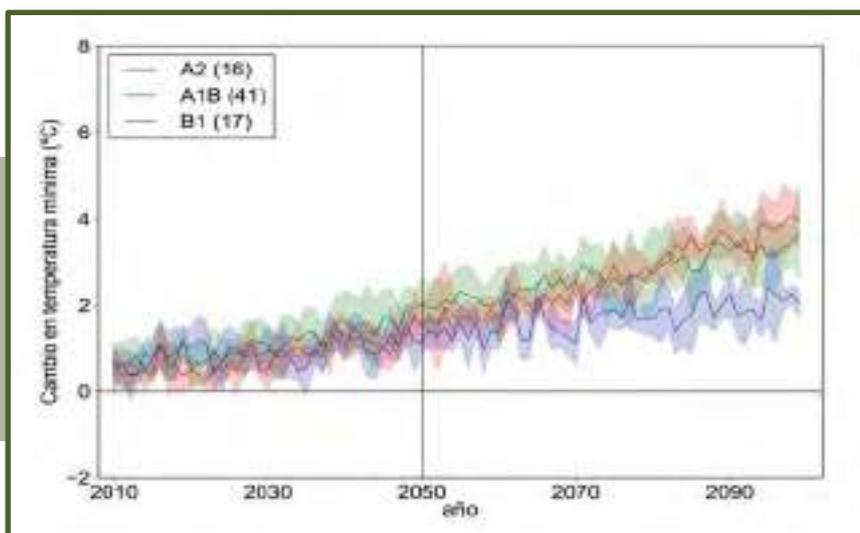
▲ **Figura 5.** Evolución del cambio en la longitud máxima de las olas de calor. Promedio para España Peninsular e Islas Baleares a partir de datos integrados producidos por AEMET utilizando métodos estadísticos respecto al periodo 1961-2000 y para los escenarios de emisión A2, A1B, B1 y E1. El sombreado indica su incertidumbre (+/- una desviación típica). Los números en la leyenda, entre paréntesis, indican el número de proyecciones utilizadas.

Fuente: www.aemet.es

Al igual que para la temperatura máxima, todas las proyecciones de temperatura mínima (Fig. 6) muestran un aumento progresivo a lo largo del siglo XXI, en todas las zonas geográficas de España peninsular aunque menor que para la temperatura máxima. Por tanto, los mayores aumentos se obtienen para finales de siglo. Sin embargo, la rapidez con la que se puede producir este aumento varía, principalmente, según el escenario de emisión, poniéndose de manifiesto esta diferencia a finales de siglo. Los aumentos mayores son más probables en los escenarios más emisivos, así, es probable que la variación del valor medio de la temperatura mínima de España peninsular para los dos últimos decenios esté comprendida entre 2,8°C y 4,3°C para el escenario más emisivo (A2) y entre 1,6°C y 2,5°C para el escenario menos emisivo (B1).

Los cambios son mayores en los meses estivales (entre 2,5°C y 4,6°C) y menores en invierno (1,6°C y 3,4°C) y primavera para el escenario de emisiones medias-altas (A1B). Respecto a la incertidumbre debida a modelos globales y técnicas de regionalización, también son mayores en el verano que en el invierno. Al igual que en el caso de la temperatura máxima, los resultados con la base de datos integrada aquí utilizada confirman los resultados obtenidos por Casado y Ramos (2013).

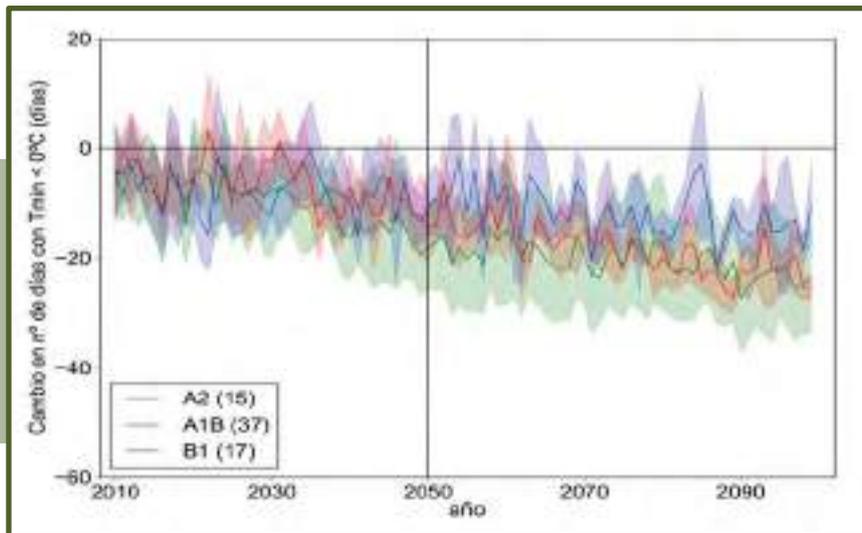
■ Figura 6.



▲ **Figura 6.** Evolución del cambio en temperatura mínima diaria. Promedio para España Peninsular e Islas Baleares a partir de datos integrados producidos por AEMET y por los proyectos ENSEMBLES, ESCENA, ESTCENA respecto al periodo 1961-2000 y para los escenarios de emisión A2, A1B y B1. El sombreado indica su incertidumbre (+/- una desviación típica). Los números en la leyenda, entre paréntesis, indican el número de proyecciones utilizadas.

Fuente: Escenarios PNACC-Datos mensuales (AEMET).

■ **Figura 7.**



▲ **Figura 7.** Evolución del cambio del número de días de helada ($T_{min} < 0^{\circ}C$) en temperatura mínima diaria. Promedio para España Peninsular e Islas Baleares a partir de datos integrados producidos por AEMET y por los proyectos ENSEMBLES, ESCENA, ESTCENA respecto al periodo 1961-2000 y para los escenarios de emisión A2, A1B y B1. El sombreado indica su incertidumbre (\pm una desviación típica). Los números en la leyenda, entre paréntesis, indican el número de proyecciones utilizadas.

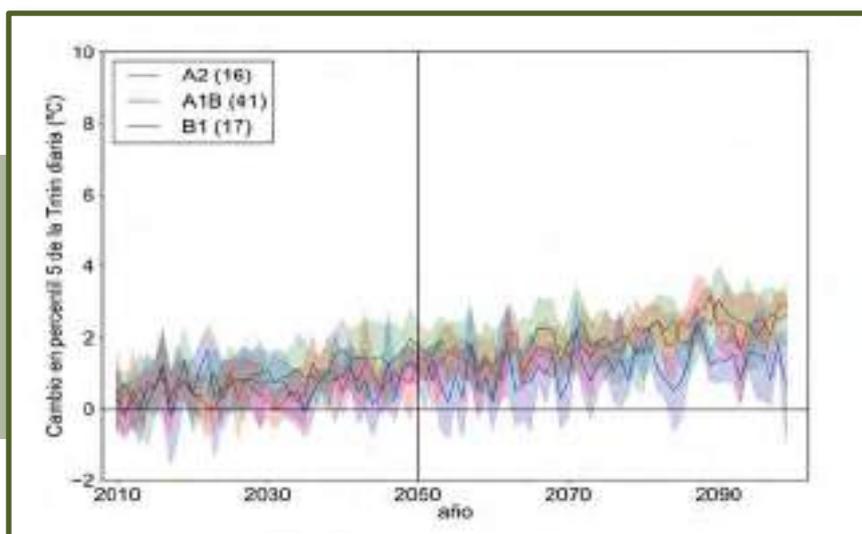
Fuente: Escenarios PNACC-Datos mensuales (AEMET).

Igualmente al caso de la temperatura máxima, este aumento de la temperatura mínima lleva consigo una variación de los índices extremos asociados a esta variable. Así, se estima una disminución en el número de días de heladas ($T_{min} < 0^{\circ}C$) (Fig. 7), especialmente en el área pirenaica. En esta zona y para finales de siglo (periodo 2081/2100) es probable que haya entre 20 y 40 días menos de heladas que en el periodo 1961/2000. En las zonas de la mitad sur peninsular y zonas costeras, donde actualmente se registran pocos días de heladas, es muy probable que para finales de siglo las temperaturas no bajen por debajo de los $0^{\circ}C$.

El percentil 5% de la temperatura mínima diaria (referido al mismo periodo de referencia) (Fig. 8) muestra cambios menores que el correspondiente al valor medio indicando un ensanchamiento de la curva de distribución de probabilidad.

A lo largo del siglo XXI habrá un aumento progresivo en el número de noches cálidas ($T_{min} > 20^{\circ}C$). Así, para finales de siglo y a nivel de la España peninsular, es probable que el porcentaje de noches cálidas anuales aumente hasta en 50 días respecto al periodo de referencia para el escenario más emisor (Fig. 9). Este aumento será más acusado en la parte sur y este peninsular y más suave en la cornisa cantábrica.

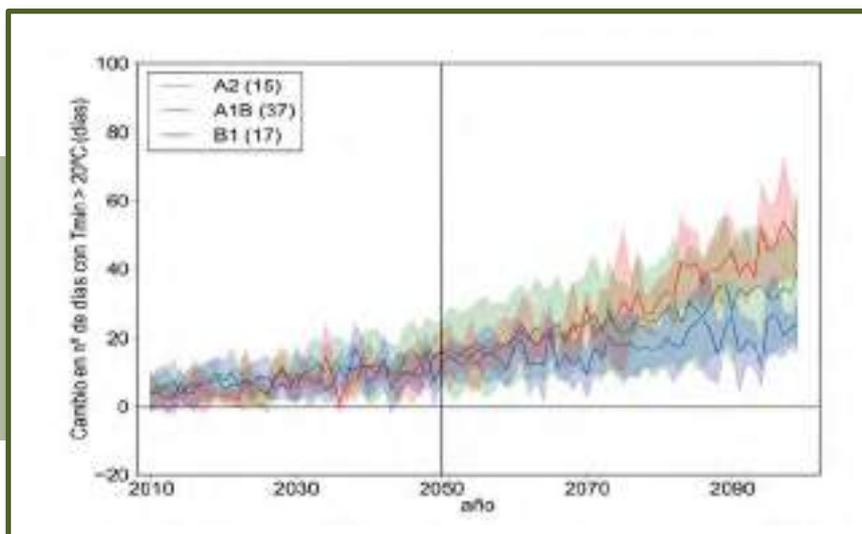
■ **Figura 8.**



▲ **Figura 8.** Evolución del cambio del percentil 5% de la temperatura mínima diaria. Promedio para España Peninsular e Islas Baleares a partir de datos integrados producidos por AEMET y por los proyectos ENSEMBLES, ESCENA, ESTCENA respecto al periodo 1961-2000 y para los escenarios de emisión A2, A1B y B1. El sombreado indica su incertidumbre (\pm una desviación típica). Los números en la leyenda, entre paréntesis, indican el número de proyecciones utilizadas.

Fuente: Escenarios PNACC-Datos mensuales (AEMET).

■ Figura 9.



▲ **Figura 9.** Evolución del cambio en el número de días con $T_{min} > 20^{\circ}\text{C}$. Promedio para España Peninsular e Islas Baleares a partir de datos integrados producidos por AEMET y por los proyectos ENSEMBLES, ESCENA, ESTCENA respecto al periodo 1961-2000 y para los escenarios de emisión A2, A1B y B1. El sombreado indica su incertidumbre (+/- una desviación típica). Los números en la leyenda, entre paréntesis, indican el número de proyecciones utilizadas.

Fuente: Escenarios PNACC-Datos mensuales (AEMET).

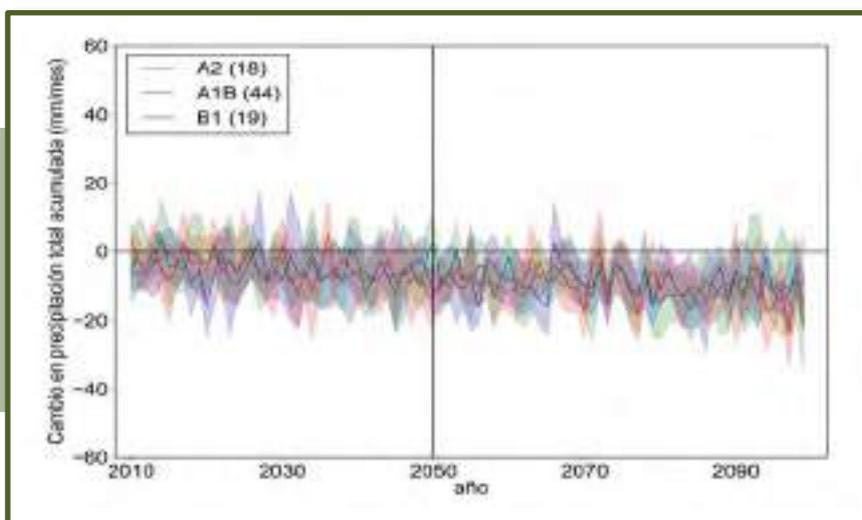
Precipitación

A diferencia de las temperaturas máximas y mínimas, para la precipitación acumulada no todas las proyecciones muestran una tendencia similar, incluso en el signo. Mayoritariamente, se aprecia una tendencia a la disminución de la precipitación aunque existen proyecciones que no muestran tendencia significativa o incluso pueden tener una tendencia positiva. Las proyecciones de los escenarios más emisivos son las que muestran mayor acuerdo en sí (más de la mitad de las proyecciones muestran tendencia significativa y éstas son todas negativas) y dan mayor disminución de las precipitaciones para finales de siglo. El cambio relativo de la precipitación media del periodo 2081/2100 respecto al periodo de referencia se sitúa entre -10% y -27% para el escenario A2 y entre el -2% y el -17% para el escenario

B1 (Casado y Ramos 2013). En términos absolutos y promediados para toda la península la reducción en la precipitación acumulada anual puede llegar a alcanzar los 20 mm/mes (Fig. 10).

El desacuerdo entre las proyecciones es mayor en el invierno (algo más de la mitad de las proyecciones obtenidas para el escenario A1B muestran tendencia negativa, siendo significativas solo en un cuarto de ellas), con una variación de la precipitación invernal entre -21% y 12% para finales de siglo. Para el resto de las estaciones, el acuerdo entre las proyecciones es mayor (alrededor del 85% tienen una tendencia negativa, siendo significativa para la mitad de ellas). Las reducciones mayores se producirían en otoño y primavera (Casado y Ramos 2013).

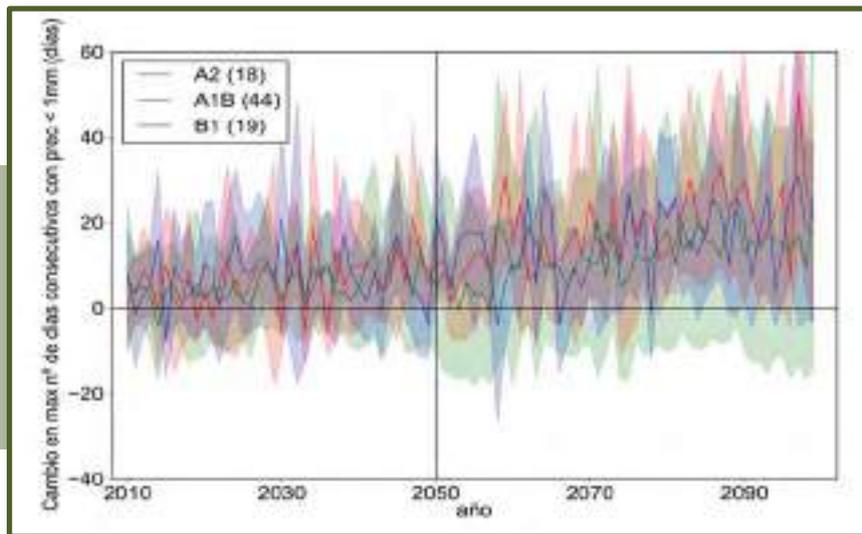
■ Figura 10.



▲ **Figura 10.** Evolución del cambio en la precipitación total acumulada anual (expresado en mm/mes). Promedio para España Peninsular e Islas Baleares a partir de datos integrados producidos por AEMET y por los proyectos ENSEMBLES, ESCENA, ESTCENA respecto al periodo 1961-2000 y para los escenarios de emisión A2, A1B y B1. El sombreado indica su incertidumbre (+/- una desviación típica). Los números en la leyenda, entre paréntesis, indican el número de proyecciones utilizadas.

Fuente: Escenarios PNACC-Datos mensuales (AEMET).

■ **Figura 11.**



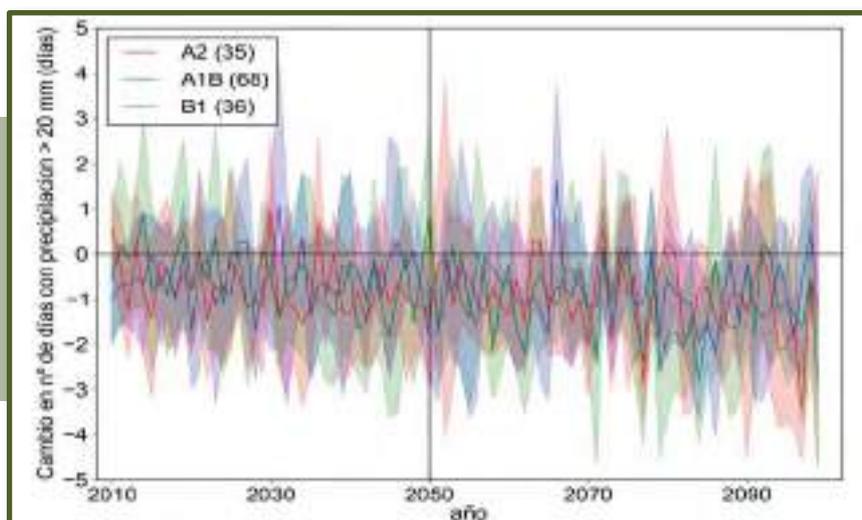
▲ **Figura 11.** Evolución del cambio en el máximo número de días consecutivos sin precipitación o con precipitación menor que 1 mm. Promedio para España Peninsular e Islas Baleares a partir de datos integrados producidos por AEMET y por los proyectos ENSEMBLES, ESCENA, ESTCENA respecto al periodo 1961-2000 y para los escenarios de emisión A2, A1B y B1. El sombreado indica su incertidumbre (+/- una desviación típica). Los números en la leyenda, entre paréntesis, indican el número de proyecciones utilizadas.

Fuente: Escenarios PNACC-Datos mensuales (AEMET).

Respecto al número de días con y sin precipitación, se ha documentado una tendencia a aumentar el número de días sin precipitación o con precipitación inferior a 1 mm, manifestándose más claramente hacia final de siglo y llegando a situarse el incremento entorno a 20 días para el escenario de emisión A1B, con la consiguiente disminución en el número de días con precipitación superior a 1 mm. Esta variación es más apreciable en las proyecciones basadas en modelos regionales de clima que en algoritmos estadísticos muy probablemente debido a la mayor tendencia a suavizar extremos de los algoritmos estadísticos (Ramos et al. 2011, Petisco et al. 2012). Estas tendencias también se aprecian claramente cuando se calcula el cambio en el número de días consecutivos con y sin precipitación. Como en el presente informe se analizan los impactos y

vulnerabilidades al cambio climático de los bosques y la biodiversidad, en este apartado se aborda el análisis de la sequía, desde el punto de vista meteorológico, y el índice considerado para ello es el del máximo número de días consecutivos sin precipitación o con precipitación inferior a 1 mm, observándose para este índice un aumento del orden de 20-30 días en el sur y este peninsular y de 15-20 días en el resto. Para la España peninsular este cambio se mueve con bastante incertidumbre también en el entorno de 15-20 días (Fig. 11). También son interesantes los extremos de precipitación relacionados con eventos intensos. Ramos et al. (2013) estiman, utilizando solamente datos de modelos regionales para el escenario A1B, que el cambio en el índice de contribución de la precipitación muy intensa (fracción de la precipitación anual debida a eventos que exceden el percentil 95% del

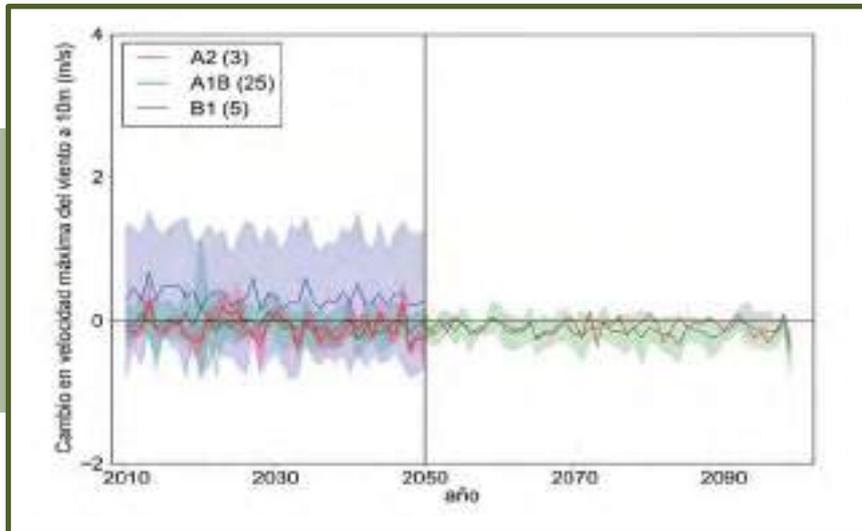
■ **Figura 12.**



▲ **Figura 12** Evolución del cambio en el número de días con precipitación superior a 20 mm. Promedio para España Peninsular e Islas Baleares a partir de datos integrados producidos por AEMET y por los proyectos ENSEMBLES, ESCENA, ESTCENA respecto al periodo 1961-2000 y para los escenarios de emisión A2, A1B y B1. El sombreado indica su incertidumbre (+/- una desviación típica). Los números en la leyenda, entre paréntesis, indican el número de proyecciones utilizadas.

Fuente: Escenarios PNACC-Datos mensuales (AEMET).

■ **Figura 13.**



▲ **Figura 13.** Evolución del cambio en la velocidad máxima del viento a 10 m (expresado en m/s). Promedio para España Peninsular e Islas Baleares a partir de datos integrados producidos AEMET y por los proyectos ENSEMBLES, ESCENA respecto al periodo 1961-2000 y para los escenarios de emisión A2, A1B y B1. El sombreado indica su incertidumbre (+/- una desviación típica). Los números en la leyenda, entre paréntesis, indican el número de proyecciones utilizadas.

Fuente: Escenarios PNACC-Datos mensuales (AEMET).

periodo de referencia) aumenta alrededor de 3% con una banda de incertidumbre de alrededor de 5%.

Finalmente, se aprecia una disminución en el número de días con precipitación superior a 20 mm del orden de 2 días hacia final de siglo (Fig. 12).

Viento

La velocidad del viento muestra un comportamiento bastante irregular tanto espacialmente como en su distribución anual. Una descripción exhaustiva del comportamiento de esta variable puede verse en (Morata 2014). Podemos señalar aquí como característica más destacable de las proyecciones de esta variable -y en promedio sobre toda la península Ibérica- una ligera disminución de la componente meridional

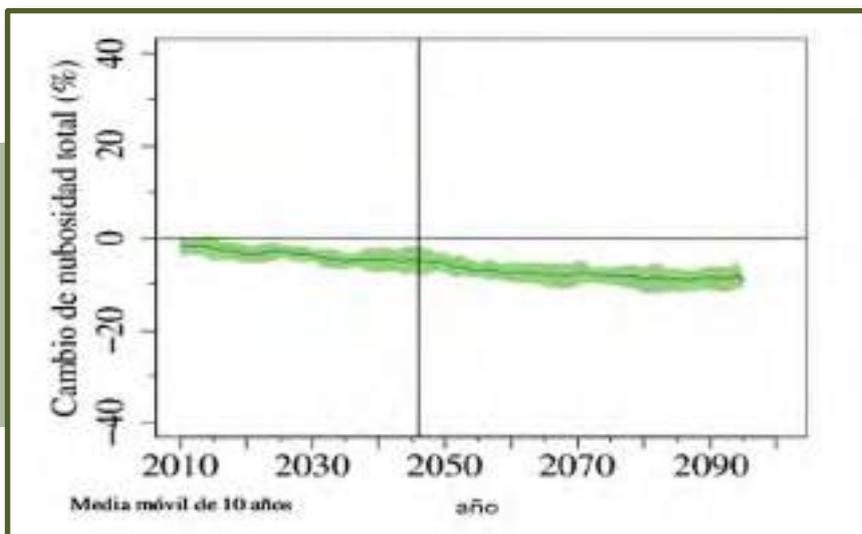
del viento y asimismo una pequeña reducción en la intensidad de las rachas máximas.

La Fig. 13 muestra el cambio en la intensidad de las rachas máximas. Solamente el escenario de emisión medio-alto (A1B) posee un número suficiente de simulaciones como para otorgar robustez a los resultados. Las simulaciones con otros escenarios son pocas y no llegan hasta final de siglo por lo que la robustez de los resultados es escasa.

Nubosidad

La nubosidad es uno de los parámetros proporcionados por los modelos climáticos que poseen más incertidumbre y que por lo tanto son más dependientes de

■ **Figura 14.**



▲ **Figura 14.** Evolución del cambio en la nubosidad total (expresado en %). Promedio para España Peninsular e Islas Baleares a partir de datos del proyecto ENSEMBLES respecto al periodo 1961-2000 y para el escenario de emisión A1B. El sombreado indica su incertidumbre (+/- una desviación típica).

Fuente: www.aemet.es

la formulación específica de cada modelo. Sin embargo, utilizando la base de datos de modelos regionales del proyecto ENSEMBLES se obtiene una tendencia relativamente robusta para el cambio porcentual de la nubosidad total alcanzándose valores medios para toda la península Ibérica de aproximadamente -10% para el escenario de emisión A1B y para finales del siglo XXI (Fig. 14). Estos valores son consistentes con los cambios proyectados en precipitación, temperatura y humedad relativa (véase más abajo).

Humedad relativa

La humedad relativa consistentemente con la temperatura muestra una tendencia decreciente que para finales del siglo XXI y para el escenario de emisión A1B se sitúa alrededor de -5% (Fig. 15). También consistentemente con la tendencia de las temperaturas máxima y mínima, la humedad relativa muestra una mayor tendencia negativa en los meses estivales que en los invernales. La tendencia negativa en la humedad relativa también es consistente con la tendencia negativa estimada en las proyecciones de precipitación y nubosidad.

Morata (2014) ha analizado la tendencia de otras variables -tales como la evapotranspiración y la escorrentía- estrechamente relacionadas con la humedad relativa, la nubosidad y la precipitación. Concluye utilizando solamente datos de ENSEMBLES para el escenario de emisiones A1B que la escorrentía puede alcanzar para finales del siglo XXI reducciones superiores a la precipitación hasta valores cercanos al 30%, mientras que para la evapotranspiración las reducciones pueden llegar hasta valores próximos al 10%. Tanto las tendencias de la escorrentía como de la evapotranspiración muestran diferencias estacionales similares a la precipitación.

Conclusiones

El territorio español muestra unas características diferenciadas de los promedios globales y regionales que presenta por ejemplo el IPCC (2013) tanto en cuanto a las observaciones del clima pasado como a las proyecciones para el siglo XXI. En esta contribución se ha resumido, utilizando fundamentalmente los datos de una colección integrada de proyecciones regionalizadas de cambio climático calculada específicamente para España, las principales características de la posible evolución del clima dependiendo de los diferentes escenarios de emisión contemplados.

- Las temperaturas, tanto máximas como mínimas, muestran una clara tendencia a incrementarse a lo largo del siglo XXI tanto más cuanto más emisor sea el escenario contemplado. Esta tendencia es consistente con la observación en el siglo XX, especialmente a partir de los años 70's. Este incremento es mayor que el promedio global estimado por el IPCC (2013). Esta tendencia es asimismo consistente con las tendencias de los extremos relacionados con las temperaturas, por ejemplo, disminución de días de heladas, aumento de días y noches cálidos, mayor longitud y frecuencia de olas de calor
- La evolución de la precipitación muestra mayor discrepancia e incertidumbre en cuanto a su posible evolución en el siglo XXI. Incluso las observaciones a lo largo del siglo XX no muestran tendencias sostenidas y en muchos casos sin significación estadística. En términos generales, la precipitación en el siglo XXI muestra una tendencia hacia una reducción más acusada en las latitudes más bajas y en términos porcentuales más acusada en los meses estivales que en los invernales. Consistentemente con esta tendencia hay una ligera reducción del número de días con precipitación, un aumento de la longitud máxima

Figura 15.

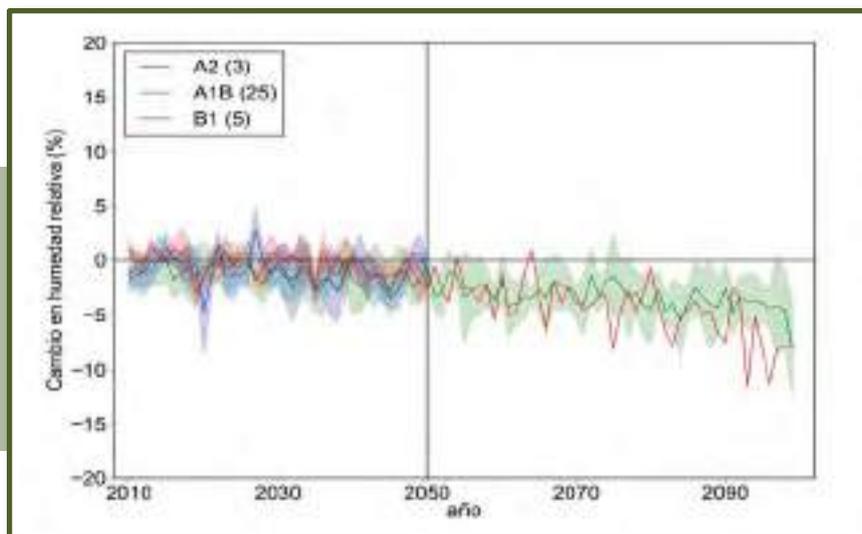


Figura 15. Evolución del cambio en la humedad relativa a 2 m (expresado en %). Promedio para España Peninsular e Islas Baleares a partir de datos integrados producidos AEMET y por los proyectos ENSEMBLES, ESCENA respecto al período 1961-2000 y para los escenarios de emisión A2, A1B y B1. El sombreado indica su incertidumbre (+/- una desviación típica). Los números en la leyenda, entre paréntesis, indican el número de proyecciones utilizadas.

Fuente: Escenarios PNACC-Datos mensuales (AEMET).

de los periodos secos y un aumento de la fracción de la precipitación que cae en los percentiles más altos (menos precipitaciones pero más intensas). Con respecto a la sequía meteorológica, se observa un aumento de 15 a 20 días en el máximo número de días consecutivos sin precipitación en la España peninsular.

- También se han incluido por completitud las tendencias de otras variables no tan habituales en los estudios climáticos pero de indudable interés en sectores específicos, tales como la nubosidad, humedad, viento, escorrentía, etc.

■ Referencias bibliográficas

- Brunet M, Saladie O, Jones P, Sigró J, Aguilar E, Moberg A, Lister D, Walther A, Lopez D, Almarza C (2006) The development of a new dataset of Spanish daily adjusted temperature series (SDATS)(1850–2003). *International Journal Climatology* 26:1777-1802
- Casado MJ, Ramos P (2013) Evidencias y escenarios de cambio climático. *ROP (Revista de Obras Públicas)* 3545:51-62
- Gutiérrez JM, Ribalaygua J, Llasat C, Romero R, Abaurrea J, Rodríguez E (2012) Escenarios-PNACC 2012: descripción y análisis de los resultados de regionalización estadística. Cambio Climático: extremos e impactos. *Actas del 8º Congreso Asociación Española de Climatología (AEC)*. pp. 125-135
- Fernández J, Fita F, García-Díez M, Montávez JP, Jiménez-Guerrero P, Domínguez M, Romera R, López de la Franca N, Sánchez E, Liguori G, Cabos WD, Gaertner MA (2012) Escenarios-PNACC 2012: Resultados de regionalización dinámica. Cambio Climático: extremos e impactos. *Actas del 8º Congreso Asociación Española de Climatología (AEC)*. pp. 63-72
- IPCC (2013) *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge and New York
- Luna Y, López JA & Guijarro JA (2012) Tendencias Observadas en España en Precipitación y Temperatura. *Revista Española de Física* 26:12-17
- Luna Y, Guijarro JA, López JA (2012b) A monthly precipitation database for Spain (1851–2008): reconstruction, homogeneity and trend. *Advances in Science & Research* 8:1-4
- Morata A (2014) Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR4. *Nota Técnica AEMET*.
- Petisco E, Ramos P, Martín JM (2012) Extremos de temperatura y precipitación para el siglo XXI en España. Cambio Climático: extremos e impactos. *Actas del 8º Congreso Asociación Española de Climatología (AEC)*.

Ramos P, Petisco & Rodríguez E (2011) Temperature and precipitation extremes over Spain for the 21st century. *EMS Annual Meeting Abstracts* 8:163

Ramos P, Petisco E, Martín JM, Rodríguez E (2013) Downscaled climate change projections over Spain: application to water resources. *International Journal of Water Resources Development* 29:201-218

Ramos P, Petisco E, Martín JM, Rodríguez E (2013) Downscaled climate change projections over Spain: application to water resources. *International Journal of Water Resources Development* 29:201-218

■ Acrónimos

- AEMET: Agencia Estatal de Meteorología
- CMIP3: Coupled Model Intercomparison Project (Phase 3)
- ENSEMBLES: Proyecto del 6º Programa Marco de I+D de la UE
- ESCENA: Programa coordinado para la generación de escenarios regionalizados de cambio climático: Regionalización dinámica
- ESTCENA: Programa coordinado para la generación de escenarios regionalizados de cambio climático: Regionalización estadística
- IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change
- OMM: Organización Meteorológica Mundial
- PNUMA: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
- PNACC: Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático
- RCP: Representative Concentration Pathways
- SRES: Special Report on Emissions Scenarios