



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE FOMENTO

MINISTERIO  
DE AGRICULTURA Y PESCA,  
ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE

**CEDEX**  
CENTRO DE ESTUDIOS  
Y EXPERIMENTACIÓN  
DE OBRAS PÚBLICAS

## INFORME TÉCNICO

para

**Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente**

Secretaría de Estado de Medio Ambiente

Oficina Española de Cambio Climático

# EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS Y SEQUÍAS EN ESPAÑA

INFORME FINAL

TOMO ÚNICO

Clave CEDEX: 42-415-0-001

Madrid, julio de 2017

**Centro de Estudios Hidrográficos**





GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE FOMENTO

MINISTERIO  
DE AGRICULTURA Y PESCA,  
ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE

**CEDEX**  
CENTRO DE ESTUDIOS  
Y EXPERIMENTACIÓN  
DE OBRAS PÚBLICAS

## INFORME TÉCNICO

para

**Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente**

Secretaría de Estado de Medio Ambiente

Oficina Española de Cambio Climático

# EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS Y SEQUÍAS EN ESPAÑA

INFORME FINAL

TOMO ÚNICO

Clave CEDEX: 42-415-0-001

Madrid, julio de 2017

---

Centro de Estudios Hidrográficos





GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE FOMENTO

MINISTERIO  
DE AGRICULTURA Y PESCA,  
ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE

**CEDEX**  
CENTRO DE ESTUDIOS  
Y EXPERIMENTACIÓN  
DE OBRAS PÚBLICAS

TÍTULO:

## EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS Y SEQUÍAS EN ESPAÑA

### INFORME FINAL

CLIENTE: **Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente**  
Secretaría de Estado de Medio Ambiente  
Oficina Española de Cambio Climático

EL PRESENTE INFORME CONSTITUYE UN DOCUMENTO OFICIAL DE ESTE TRABAJO Y, DE ACUERDO CON LAS NORMAS GENERALES DEL ORGANISMO, SU ENTREGA SUPONE EL CUMPLIMIENTO DE LAS ACTUACIONES TÉCNICAS DEL MISMO REFERENTES A LA MATERIA OBJETO DEL INFORME.

### VALIDEZ OFICIAL

VISTO EL CONTENIDO DEL INFORME Y SIENDO ACORDE CON LAS CLÁUSULAS DEL CONVENIO DE COLABORACIÓN CORRESPONDIENTE, SE PROPONE AUTORIZAR SU EMISIÓN.

EL DIRECTOR DEL CENTRO DE ESTUDIOS HIDROGRÁFICOS

Fdo. Federico Estrada Lorenzo

AUTORIZA LA EMISIÓN DEL INFORME:

Madrid, a 31 de julio de 2017

EL DIRECTOR DEL CEDEX

Fdo. Mariano Navas Gutiérrez

SOLO SON INFORMES OFICIALES DEL CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS (CEDEX) LOS REFRENDADOS POR SU DIRECCIÓN





## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>PROYECCIONES CLIMÁTICAS .....</b>	<b>3</b>
2.1	PROYECCIONES CLIMÁTICAS DISPONIBLES .....	3
2.2	PROYECCIONES CLIMÁTICAS UTILIZADAS EN ESTE TRABAJO .....	6
<b>3</b>	<b>ANTECEDENTES .....</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>19</b>
<b>5</b>	<b>ANÁLISIS Y CONTRASTE DE LAS PROYECCIONES CLIMÁTICAS .....</b>	<b>25</b>
5.1	TRATAMIENTO Y ANÁLISIS .....	25
5.2	CONTRASTE .....	36
5.2.1	<i>Metodología .....</i>	<i>36</i>
5.2.2	<i>Temperatura mínima.....</i>	<i>38</i>
5.2.3	<i>Temperatura máxima .....</i>	<i>48</i>
5.2.4	<i>Precipitación.....</i>	<i>58</i>
5.2.5	<i>Valoración del contraste y del sesgo.....</i>	<i>69</i>
<b>6</b>	<b>OBTENCIÓN DE MAPAS DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS .....</b>	<b>73</b>
6.1	INTERPOLACIÓN DE LOS VALORES CLIMÁTICOS DE PARTIDA.....	73
6.2	OBTENCIÓN DE MAPAS DE TEMPERATURAS MEDIAS .....	78
6.3	CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL.....	78
6.4	CAMBIOS DE PRECIPITACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL .....	82
6.4.1	<i>Precipitación.....</i>	<i>82</i>
6.4.1.1	<i>Cambios anuales para el conjunto de España .....</i>	<i>82</i>
6.4.1.2	<i>Distribución espacial de los cambios anuales .....</i>	<i>83</i>
6.4.1.3	<i>Cambios en el ciclo anual.....</i>	<i>92</i>
6.4.2	<i>Evapotranspiración potencial .....</i>	<i>101</i>
6.4.2.1	<i>Cambios anuales para el conjunto de España .....</i>	<i>101</i>
6.4.2.2	<i>Distribución espacial de los cambios anuales. ....</i>	<i>103</i>
6.4.2.3	<i>Cambios en el ciclo anual.....</i>	<i>112</i>
<b>7</b>	<b>SIMULACIÓN HIDROLÓGICA E IMPACTOS SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS.....</b>	<b>121</b>
7.1	METODOLOGÍA .....	121



**CEDEX**

7.1.1	<i>Modelo hidrológico de SIMPA. Descripción.....</i>	121
7.1.2	<i>Modelo hidrológico de SIMPA. Parametrización .....</i>	127
7.2	EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL.....	131
7.2.1	<i>Cambios anuales para el conjunto de España .....</i>	131
7.2.2	<i>Distribución espacial de los cambios anuales .....</i>	133
7.2.3	<i>Cambios en el ciclo anual.....</i>	141
7.3	HUMEDAD DEL SUELO .....	151
7.3.1.1	<i>Cambios anuales para el conjunto de España.....</i>	151
7.3.1.2	<i>Distribución espacial de los cambios anuales.....</i>	152
7.3.1.3	<i>Cambios en el ciclo anual .....</i>	158
7.4	RECARGA SUBTERRÁNEA.....	167
7.4.1	<i>Cambios anuales para el conjunto de España .....</i>	167
7.4.2	<i>Distribución espacial de los cambios anuales .....</i>	169
7.4.3	<i>Cambios en el ciclo anual.....</i>	178
7.5	ESCORRENTÍA .....	188
7.5.1	<i>Cambios anuales para el conjunto de España .....</i>	188
7.5.2	<i>Distribución espacial de los cambios anuales .....</i>	190
7.5.3	<i>Cambios en el ciclo anual.....</i>	217
7.5.4	<i>Nieve.....</i>	229
7.6	APORTACIONES .....	234
<b>8</b>	<b>RESUMEN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL IMPACTO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS.....</b>	<b>245</b>
8.1	RESUMEN.....	245
8.2	COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS DEL INFORME CEDEX 2010 .....	256
8.3	INCERTIDUMBRES EN LOS RESULTADOS Y EN SU APLICACIÓN.....	267
8.4	APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS EN LA PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA.....	270
<b>9</b>	<b>IMPACTO EN EL RÉGIMEN DE SEQUÍAS.....</b>	<b>275</b>
9.1	METODOLOGÍA.....	275
9.2	RESULTADOS.....	278
<b>10</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>295</b>
10.1	ACTUALIZACIÓN DEL TRABAJO ANTERIOR CEDEX 2010.....	295
10.2	VALORES CLIMÁTICOS DE PARTIDA.....	295



10.3	IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS .....	296
10.4	IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL RÉGIMEN DE SEQUÍAS.....	299
<b>11</b>	<b>EQUIPO DE TRABAJO.....</b>	<b>301</b>
<b>12</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>303</b>
<b>13</b>	<b>GLOSARIO DE TÉRMINOS .....</b>	<b>311</b>
<b>14</b>	<b>ABREVIACIONES .....</b>	<b>315</b>
<b>15</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>319</b>
15.1	ANEXO 1. TENDENCIAS Y CAMBIO DE ESTADÍSTICOS PARA CADA PROYECCIÓN.....	319
15.2	ANEXO 2. TENDENCIAS PARA EL CONJUNTO DE PROYECCIONES. ....	319
15.3	ANEXO 3. ESTADÍSTICOS DE VALORES ABSOLUTOS.....	319
15.4	ANEXO 4. GRÁFICOS DE CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE SEQUÍAS .....	319
15.5	ANEXO 5. ATLAS CARTOGRÁFICO. ....	320

**DVD. CONTENIDO:**

- Memoria.
- Anexos:
  - Anexo 1. Tendencias y cambio de estadísticos para cada proyección.
  - Anexo 2. Tendencias para el conjunto de proyecciones.
  - Anexo 3. Estadísticos de valores absolutos.
  - Anexo 4. Gráficos de cambio en el régimen de sequías.
  - Anexo 5. Atlas cartográfico:
    - Complemento CAMREC.
    - Mapas digitales.
    - Manual.





## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. DEMARCACIONES HIDROGRÁFICAS DE ESPAÑA. LAS ISLAS CANARIAS SE HAN AGRUPADO EN UN ÚNICO ÁMBITO. ....	2
FIGURA 2. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS MCGAO Y ESM DEL PROYECTO DE INTERCOMPARACIÓN DE MODELOS ACOPLADOS FASE 5 (CMIP5) UTILIZADOS EN EL AR5. HT: SIMULACIÓN COMPLETA DE LA ESTRATOSFERA. LA GRADACIÓN DE COLOR DE LOS COMPONENTES ATMÓSFERA Y OCÉANO INDICA LA RESOLUCIÓN DE LAS CELDAS. LA RESOLUCIÓN DE LA SUPERFICIE DE LA TIERRA ES LA DE LA ATMÓSFERA Y LA DE LA CAPA DE HIELO ES LA DEL OCÉANO. UN TONO MÁS COLORIDO EN EL RESTO DE LOS COMPONENTES INDICA UNA MAYOR COMPLEJIDAD EN LA SIMULACIÓN. CON RELACIÓN A LOS MODELOS PRECEDENTES, LOS MODELOS DEL CMIP5 SUPONEN UNA MAYOR COMPLEJIDAD Y MEJORA AL NO TENER QUE AJUSTAR LA CORRECCIÓN DEL FLUJO (TOMADO DE IPCC 2013). ....	4
FIGURA 3. ESCENARIOS DE EMISIONES, CON INDICACIÓN DEL FORZAMIENTO RADIATIVO (ARRIBA) Y LA CONCENTRACIÓN DE CO <sub>2</sub> EQUIVALENTE EN LA ATMÓSFERA (DEBAJO) (TOMADO DE IPCC 2013). ....	5
FIGURA 4. ESTIMACIÓN ORIENTATIVA DE CAMBIO (%) DE PRE ANUAL MEDIA PARA ESPAÑA EN TRES PERIODOS DEL SIGLO XXI RESPECTO A 1961-2000 SEGÚN LAS PROYECCIONES CLIMÁTICAS REGIONALIZADAS POR EL MÉTODO DE ANÁLOGOS AEMET DEL RCP 4.5 (IZDA) Y RCP 8.5 (DCHA). EN TRAZO GRUESO SE INDICAN LAS PROYECCIONES QUE HAN SIDO SELECCIONADAS PARA REALIZAR ESTE TRABAJO. LA ESTIMACIÓN ES ORIENTATIVA YA QUE LOS VALORES DE CAMBIO EN ORDENADAS SE HAN CALCULADO COMO MEDIA DE DESVIACIONES ANUALES (DATOS TOMADOS DE AEMET 2016).....	9
FIGURA 5. ESTIMACIÓN ORIENTATIVA DE CAMBIO (%) DE PRE MEDIA ANUAL PARA ESPAÑA SEGÚN LAS PROYECCIONES CLIMÁTICAS REGIONALIZADAS POR EL MÉTODO DE ANÁLOGOS AEMET DEL RCP 8.5, DONDE SE HAN IDENTIFICADO LAS EXTREMAS (UA, MRI.CGCM3, Y RA, MIROC.ESM) Y UNA DE LAS CENTRADAS (MA, MPI.ESM.MR) (FIGURA CEDIDA POR AEMET). ....	10
FIGURA 6. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS MCG UTILIZADOS EN ESTE ESTUDIO, ENCUADRADOS EN EL CMIP5 Y USADOS EN EL AR5. COLUMNA 1: NOMBRE OFICIAL Y AÑO DE LA PRIMERA PUBLICACIÓN; COLUMNA 2: INSTITUCIÓN Y PRINCIPALES REFERENCIAS; COLUMNAS SIGUIENTES: COMPONENTES DEL MODELO CON REFERENCIAS Y DATOS DE RESOLUCIÓN, LÍMITES, ETC. (TOMADO DE IPCC 2013). ....	11
FIGURA 7. METODOLOGÍA DEL TRABAJO. VER CAPITULO ABREVIACIONES.....	20
FIGURA 8. METODOLOGÍA DEL TRABAJO PARA LA OBTENCIÓN DE LOS DIFERENTES MAPAS MENSUALES DEL IMPACTO SOBRE RRHH. EN LETRA AZUL SE INDICAN LOS FICHEROS DE TEXTO CON VALORES EN ESTACIONES, DIARIOS (D) O LOS LEMA MENSUALES (M). VER CAPÍTULO ABREVIACIONES.....	21
FIGURA 9. LOCALIZACIÓN DE LAS 2321 Y 374 ESTACIONES DONDE SE HAN SIMULADO RESPECTIVAMENTE LA PRE (IZDA) Y LAS TMN Y TMX (DCHA) SEGÚN CADA PROYECCIÓN CLIMÁTICA. ....	25



FIGURA 10. DISPERSIÓN DE VALORES MÁS ALTOS DE PRE O TMX Y MÁS BAJOS DE TMN DURANTE EL PC Y EL PF (RCP 4.5 Y RCP 8.5) POR ESTACIÓN METEOROLÓGICA, SEGÚN CADA PROYECCIÓN. ....	29
FIGURA 11. DIAGRAMAS DE CAJAS DE UNA SELECCIÓN DE SERIES SIMULADAS PARA EL PC Y EL PF EN ESTACIONES AEMET, SEGÚN LAS PROYECCIONES FA. ....	31
FIGURA 12. DIAGRAMAS DE CAJAS DE UNA SELECCIÓN DE SERIES SIMULADAS PARA EL PC Y EL PF EN ESTACIONES AEMET, SEGÚN LAS PROYECCIONES MA. ....	32
FIGURA 13. DIAGRAMAS DE CAJAS DE UNA SELECCIÓN DE SERIES SIMULADAS PARA EL PC Y EL PF EN ESTACIONES AEMET, SEGÚN LAS PROYECCIONES NA. ....	33
FIGURA 14. DIAGRAMAS DE CAJAS DE UNA SELECCIÓN DE SERIES SIMULADAS PARA EL PC Y EL PF EN ESTACIONES AEMET, SEGÚN LAS PROYECCIONES QA. ....	34
FIGURA 15. DIAGRAMAS DE CAJAS DE UNA SELECCIÓN DE SERIES SIMULADAS PARA EL PC Y EL PF EN ESTACIONES AEMET, SEGÚN LAS PROYECCIONES RA. ....	35
FIGURA 16. DIAGRAMAS DE CAJAS DE UNA SELECCIÓN DE SERIES SIMULADAS PARA EL PC Y EL PF EN ESTACIONES AEMET, SEGÚN LAS PROYECCIONES UA. ....	36
FIGURA 17. EJEMPLO DE FICHERO CON FORMATO LEMA. ....	37
FIGURA 18. LOCALIZACIÓN DE LAS 621 Y 229 ESTACIONES DONDE SE HA REALIZADO EL CONTRASTE DE LA PRE (IZDA) Y LAS TMN Y TMX (DCHA) SEGÚN CADA PROYECCIÓN CLIMÁTICA. ....	38
FIGURA 19. EVOLUCIÓN DE LA TMN ANUAL PARA ESPAÑA PARA EL PC SEGÚN LOS DATOS OBERVADOS (OBS) Y LOS VALORES SIMULADOS EN LAS 229 ESTACIONES DE CONTRASTE. TAMBIÉN SE MUESTRAN LOS ESTADÍSTICOS DE CADA SERIE PARA TODO EL PERIODO: MEDIAS (MED), DESVIACIÓN TÍPICA (DT), VALORES MÁXIMOS (MÁX) Y MÍNIMOS (MÍN) Y P-VALOR OBTENIDO CON EL TEST DE MANN-KENDALL (PV). ....	39
FIGURA 20. DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN DE LA TMN OBSERVADA FRENTE A LA TMN SIMULADA EN CADA ESTACIÓN METEOROLÓGICA PROMEDIADA EN EL PC. IZQUIERDA: TMN ANUAL; DERECHA: DT DE LA TMN ANUAL. ....	41
FIGURA 21. MAPAS CON LAS DIFERENCIAS SEGÚN LAS DISTINTAS PROYECCIONES ENTRE LA TMN ANUAL SIMULADA Y OBSERVADA EN LAS 229 ESTACIONES METEOROLÓGICAS DONDE SE HA REALIZADO EL CONTASTE. ....	44
FIGURA 22. DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LA TMN OBSERVADA Y SIMULADA PARA EL CONJUNTO DE ESPAÑA SEGÚN VALORES EN ESTACIONES. ....	45
FIGURA 23. DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LA TMN OBSERVADA Y LA SIMULADA PARA CADA DH SEGÚN VALORES EN ESTACIONES. ....	48
FIGURA 24. EVOLUCIÓN DE LA TMX ANUAL PARA ESPAÑA PARA EL PC SEGÚN LOS DATOS OBERVADOS (OBS) Y LOS VALORES SIMULADOS EN LAS 229 ESTACIONES DE CONTRASTE. TAMBIÉN SE MUESTRAN LOS ESTADÍSTICOS DE CADA SERIE PARA TODO EL PERIODO: MEDIAS (MED), DESVIACIÓN TÍPICA (DT), VALORES MÁXIMOS (MÁX) Y MÍNIMOS (MÍN) Y P-VALOR OBTENIDO CON EL TEST DE MANN-KENDALL (PV). ....	49



FIGURA 25. DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN DE LA TMX OBSERVADA FRENTE A LA TMX SIMULADA EN CADA ESTACIÓN METEOROLÓGICA. IZQUIERDA: TMX MEDIA ANUAL EN EL PC; DERECHA: DT DE LA TMX ANUAL EN EL PC. ....	51
FIGURA 26. MAPAS CON LAS DIFERENCIAS SEGÚN LAS DISTINTAS PROYECCIONES ENTRE LA TMX ANUAL SIMULADA Y OBSERVADA EN LAS 229 ESTACIONES METEOROLÓGICAS DONDE SE HA REALIZADO EL CONTASTE.....	54
FIGURA 27. DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LA TMX OBSERVADA Y SIMULADA PARA EL CONJUNTO DE ESPAÑA SEGÚN VALORES EN ESTACIONES. ....	55
FIGURA 28. DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LA TMX OBSERVADA Y LA SIMULADA PARA CADA DH SEGÚN VALORES EN ESTACIONES. ....	58
FIGURA 29. EVOLUCIÓN DE LA PRE MEDIA ANUAL PARA ESPAÑA PARA EL PC SEGÚN LOS DATOS OBSERVADOS (OBS) Y LOS VALORES SIMULADOS EN LAS 621 ESTACIONES DE CONTRASTE. TAMBIÉN SE MUESTRAN LOS ESTADÍSTICOS DE CADA SERIE PARA TODO EL PERIODO: MEDIAS (MED), DESVIACIÓN TÍPICA (DT), VALORES MÁXIMOS (MÁX) Y MÍNIMOS (MÍN) Y P-VALOR OBTENIDO CON EL TEST DE MANN-KENDALL (PV).....	59
FIGURA 30. DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN DE LA PRE OBSERVADA FRENTE A LA PRE SIMULADA EN CADA ESTACIÓN METEOROLÓGICA. IZQUIERDA: PRE MEDIA ANUAL EN EL PC; DERECHA: DESVIACIÓN TÍPICA DE LA PRE ANUAL EN EL PC. ....	61
FIGURA 31. MAPA CON LOS EMR (%) DE LA PRE ANUAL SIMULADA SEGÚN LAS DISTINTAS PROYECCIONES EN LAS 621 ESTACIONES METEOROLÓGICAS DONDE SE HA REALIZADO EL CONTASTE. ....	64
FIGURA 32. DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LA PRE OBSERVADA Y LA SIMULADA SEGÚN LAS DISTINTAS PROYECCIONES PARA EL CONJUNTO DE ESPAÑA SEGÚN VALORES EN ESTACIONES. ....	66
FIGURA 33. DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LA PRE OBSERVADA Y LA SIMULADA SEGÚN LAS DISTINTAS PROYECCIONES PARA CADA DH SEGÚN VALORES EN ESTACIONES. ....	69
FIGURA 34. DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LA PRE OBSERVADA Y LA SIMULADA DE LAS PROYECCIONES REGIONALIZADAS QUE SE UTILIZARON EN EL INFORME CEDEX (2010). MEDIAS DE ESPAÑA DE VALORES EN ESTACIONES PARA 1961-1990. ....	70
FIGURA 35. DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LA PRE OBSERVADA Y LA SIMULADA DE LAS PROYECCIONES UTILIZADAS EN EL INFORME CEDEX (2010). MEDIAS DE ALGUNAS DDHH CON VALORES INTERPOLADOS. ....	71
FIGURA 36. MAPAS PATRONES DE MEDIAS DE PRE SEGÚN LAS PROYECCIONES MA. ....	74
FIGURA 37. MAPAS PATRONES DE DT DE PRE SEGÚN LAS PROYECCIONES MA. ....	75
FIGURA 38. MAPAS PATRONES DE MEDIAS DE TMN SEGÚN LAS PROYECCIONES MA.....	76
FIGURA 39. MAPAS PATRONES DE MEDIAS DE TMX SEGÚN LAS PROYECCIONES MA.....	77
FIGURA 40. MAPAS DE PRE (IZQUIERDA), TMN (CENTRO) Y TMX (DERECHA) PARA ABRIL DE 1995 (ARRIBA) Y DE 2095 (ABAJO) SEGÚN LA PROYECCIÓN M8A. ....	78
FIGURA 41. MAPAS DE TEM PARA ABRIL DE 1995 (IZQUIERDA) Y DE 2095 (DERECHA) SEGÚN LA PROYECCIÓN M8A. ....	78



**CEDEX**

FIGURA 42. MAPAS CORRECTORES PENMAN MONTEITH / HARGREAVES (%) (TOMADO DE CEDEX 2010). .....	80
FIGURA 43. COEFICIENTE DE CULTIVO EN ESPAÑA PARA EL CÁLCULO DE LA ETP (TOMADO DE CEDEX 2010). .....	81
FIGURA 44. MAPAS DE ETP PARA ABRIL DE 1995 (IZQUIERDA) Y DE 2095 (DERECHA) SEGÚN LA PROYECCIÓN M8A. ....	81
FIGURA 45. TENDENCIA DEL $\Delta$ (%) PRE DEL AÑO 2010 AL 2099 PARA LOS RCP 4.5 (ARRIBA) Y 8.5 (ABAJO) PARA EL CONJUNTO DE ESPAÑA. LA BANDA GRIS INDICA EL RANGO DE RESULTADOS DE LAS PROYECCIONES. LA LÍNEA GRUESA INDICA SU PROMEDIO Y LA RECTA DELGADA SU PENDIENTE. SE INDICA SU P-VALOR SEGÚN EL TEST DE MANN KENDALL; NEGRA: SIN TENDENCIA, ROJA: DECRECIENTE, AZUL: CRECIENTE. ....	82
FIGURA 46. $\Delta$ (%) PRE EN CADA PI. IZQUIERDA: VALORES MEDIOS ANUALES. DERECHA: DT DE LOS VALORES ANUALES. ....	83
FIGURA 47. $\Delta$ (%) PRE ANUAL PARA 2010-2040 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 4.5. ....	85
FIGURA 48. $\Delta$ (%) PRE ANUAL PARA 2010-2040 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 8.5. ....	85
FIGURA 49. $\Delta$ (%) PRE ANUAL PARA 2040-2070 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 4.5. ....	86
FIGURA 50. $\Delta$ (%) PRE ANUAL PARA 2040-2070 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 8.5. ....	86
FIGURA 51. $\Delta$ (%) PRE ANUAL PARA 2070-2100 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 4.5. ....	87
FIGURA 52. $\Delta$ (%) PRE ANUAL PARA 2070-2100 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 8.5. ....	87
FIGURA 53. $\Delta$ (%) PRE DE VALORES MEDIOS ANUALES EN CADA DH Y PI. ....	91
FIGURA 54. CAMBIOS (%) EN EL CICLO ANUAL DE PRE PARA CADA PI RESPECTO AL PC PARA EL CONJUNTO DE ESPAÑA SEGÚN LAS DISTINTAS PROYECCIONES Y SUS VALORES MEDIOS PARA CADA RCP. ....	93
FIGURA 55. $\Delta$ (%) PRE ESTACIONAL PARA 2010-2040 RCP 4.5. ....	95
FIGURA 56. $\Delta$ (%) PRE ESTACIONAL PARA 2010-2040 RCP 8.5. ....	96
FIGURA 57. $\Delta$ (%) PRE ESTACIONAL PARA 2040-2070 RCP 4.5. ....	97
FIGURA 58. $\Delta$ (%) PRE ESTACIONAL PARA 2040-2070 RCP 8.5. ....	98
FIGURA 59. $\Delta$ (%) PRE ESTACIONAL PARA 2070-2100 RCP 4.5. ....	99
FIGURA 60. $\Delta$ (%) PRE ESTACIONAL PARA 2070-2100 RCP 8.5. ....	100
FIGURA 61. TENDENCIA DEL $\Delta$ (%) ETP DEL AÑO 2010 AL 2099 PARA LOS RCP 4.5 (ARRIBA) Y 8.5 (ABAJO) PARA EL CONJUNTO DE ESPAÑA. LA BANDA GRIS INDICA EL RANGO DE RESULTADOS DE LAS PROYECCIONES. LA LÍNEA GRUESA INDICA SU PROMEDIO Y LA RECTA DELGADA SU PENDIENTE. SE INDICA SU P-VALOR SEGÚN EL TEST DE MANN KENDALL; NEGRA: SIN TENDENCIA, ROJA: DECRECIENTE, AZUL: CRECIENTE. ....	102
FIGURA 62. $\Delta$ (%) ETP EN CADA PI. IZQUIERDA: VALORES MEDIOS ANUALES. DERECHA: DT DE LOS VALORES ANUALES. ....	103
FIGURA 63. $\Delta$ (%) ETP ANUAL PARA 2010-2040 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 4.5. ....	105



FIGURA 64. $\Delta$ (%) ETP ANUAL PARA 2010-2040 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 8.5. ....	105
FIGURA 65. $\Delta$ (%) ETP ANUAL PARA 2040-2070 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 4.5. ....	106
FIGURA 66. $\Delta$ (%) ETP ANUAL PARA 2040-2070 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 8.5. ....	106
FIGURA 67. $\Delta$ (%) ETP ANUAL PARA 2000-2100 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 4.5. ....	107
FIGURA 68. $\Delta$ (%) ETP ANUAL PARA 2070-2100 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 8.5. ....	107
FIGURA 69. $\Delta$ (%) ETP DE VALORES MEDIOS ANUALES EN CADA DH Y PI. ....	111
FIGURA 70. CAMBIOS (%) EN EL CICLO ANUAL DE ETP PARA CADA PI RESPECTO AL PC PARA EL CONJUNTO DE ESPAÑA SEGÚN LAS DISTINTAS PROYECCIONES Y SUS VALORES MEDIOS PARA CADA RCP.....	113
FIGURA 71. $\Delta$ (%) ETP ESTACIONAL PARA 2010-2040 RCP 4.5.....	115
FIGURA 72. $\Delta$ (%) ETP ESTACIONAL PARA 2010-2040 RCP 8.5.....	116
FIGURA 73. $\Delta$ (%) ETP ESTACIONAL PARA 2040-2070 RCP 4.5.....	117
FIGURA 74. $\Delta$ (%) ETP ESTACIONAL PARA 2040-2070 RCP 8.5.....	118
FIGURA 75. $\Delta$ (%) ETP ESTACIONAL PARA 2070-2100 RCP 4.5.....	119
FIGURA 76. $\Delta$ (%) ETP ESTACIONAL PARA 2070-2100 RCP 8.5.....	120
FIGURA 77. ESQUEMA CONCEPTUAL DEL MÓDULO DE EVALUACIÓN DE RRHH DE SIMPA. ...	121
FIGURA 78. ESQUEMA CONCEPTUAL DEL BALANCE HÍDRICO DEL MODELO HIDROLÓGICO. ....	122
FIGURA 79. CÁLCULO DEL EXCEDENTE SEGÚN EL MODELO HIDROLÓGICO (MODIFICADO DE TÉMEZ, 1977). ....	123
FIGURA 80. CÁLCULO DE LA INFILTRACIÓN SEGÚN EL MODELO HIDROLÓGICO (MODIFICADO DE TÉMEZ, 1977). ....	125
FIGURA 81. MODELO D8 DE PROPAGACIÓN DE FLUJO A PARTIR DE UN MODELO DIGITAL DEL TERRENO. ....	126
FIGURA 82. PANTALLA DEL MENÚ PRINCIPAL DE SIMPA. ....	127
FIGURA 83. MAPA DE $H_{MAX}$ (MM) UTILIZADO EN LAS SIMULACIONES HIDROLÓGICAS. ....	129
FIGURA 84. MAPA DEL PARÁMETRO $C$ (%) UTILIZADO EN LAS SIMULACIONES HIDROLÓGICAS. ....	129
FIGURA 85. MAPA DEL PARÁMETRO $I_{MAX}$ (MM/MES) UTILIZADO EN LAS SIMULACIONES HIDROLÓGICAS.....	130
FIGURA 86. MAPA DEL COEFICIENTE $A$ (DÍAS <sup>-1</sup> ) ASIGNADO A CADA UNIDAD ACUÍFERA UTILIZADO EN LAS SIMULACIONES HIDROLÓGICAS.....	130
FIGURA 87. TENDENCIA DEL $\Delta$ (%) ETR DEL AÑO 2010 AL 2099 PARA LOS RCP 4.5 (ARRIBA) Y 8.5 (ABAJO) PARA EL CONJUNTO DE ESPAÑA. LA BANDA GRIS INDICA EL RANGO DE RESULTADOS DE LAS PROYECCIONES. LA LÍNEA GRUESA INDICA SU PROMEDIO Y LA RECTA DELGADA SU PENDIENTE. SE INDICA SU P-VALOR SEGÚN EL TEST DE MANN KENDALL; NEGRA: SIN TENDENCIA, ROJA: DECRECIENTE, AZUL: CRECIENTE .....	131



FIGURA 88. $\Delta$ (%) ETR EN CADA PI. IZQUIERDA: VALORES MEDIOS ANUALES. DERECHA: DT DE LOS VALORES ANUALES.....	133
FIGURA 89. $\Delta$ (%) ETR ANUAL PARA 2010-2040 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 4.5. ....	134
FIGURA 90. $\Delta$ (%) ETR ANUAL PARA 2010-2040 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 8.5. ....	135
FIGURA 91. $\Delta$ (%) ETR ANUAL PARA 2040-2070 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 4.5. ....	135
FIGURA 92. $\Delta$ (%) ETR ANUAL PARA 2040-2070 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 8.5. ....	136
FIGURA 93. $\Delta$ (%) ETR ANUAL PARA 2070-2100 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 4.5. ....	136
FIGURA 94. $\Delta$ (%) ETR ANUAL PARA 2070-2100 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 8.5. ....	137
FIGURA 95. $\Delta$ (%) ETR DE VALORES MEDIOS ANUALES EN CADA DH Y PI. ....	140
FIGURA 96. CAMBIOS (%) EN EL CICLO ANUAL DE ETR PARA CADA PI RESPECTO AL PC PARA EL CONJUNTO DE ESPAÑA SEGÚN LAS DISTINTAS PROYECCIONES Y SUS VALORES MEDIOS PARA CADA RCP.....	142
FIGURA 97. $\Delta$ (%) ETR ESTACIONAL PARA 2010-2040 RCP 4.5 .....	145
FIGURA 98. $\Delta$ (%) ETR ESTACIONAL PARA 2010-2040 RCP 8.5 .....	146
FIGURA 99. $\Delta$ (%) ETR ESTACIONAL PARA 2040-2070 RCP 4.5 .....	147
FIGURA 100. $\Delta$ (%) ETR ESTACIONAL PARA 2040-2070 RCP 8.5 .....	148
FIGURA 101. $\Delta$ (%) ETR ESTACIONAL PARA 2070-2100 RCP 4.5 .....	149
FIGURA 102. $\Delta$ (%) ETR ESTACIONAL PARA 2070-2100 RCP 8.5 .....	150
FIGURA 103. $\Delta$ (%) HMR ANUAL PARA 2010-2040 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 4.5. ...	153
FIGURA 104. $\Delta$ (%) HMR ANUAL PARA 2010-2040 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 8.5. ...	153
FIGURA 105. $\Delta$ (%) HMR ANUAL PARA 2040-2070 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 4.5. ...	154
FIGURA 106. $\Delta$ (%) HMR ANUAL PARA 2040-2070 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 8.5. ...	154
FIGURA 107. $\Delta$ (%) HMR ANUAL PARA 2070-2100 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 4.5. ...	155
FIGURA 108. $\Delta$ (%) HMR ANUAL PARA 2070-2100 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 8.5. ...	155
FIGURA 109. VALORES DE HMS EN ESPAÑA POR ESTACIÓN CLIMÁTICA. VALORES DE PROYECCIONES PROMEDIADOS EN CADA RCP Y PI. ....	158
FIGURA 110. CAMBIOS (%) EN LA ESTACIONALIDAD DE HMR PARA CADA PI RESPECTO AL PC PARA EL CONJUNTO DE ESPAÑA SEGÚN LAS DISTINTAS PROYECCIONES Y SUS VALORES MEDIOS PARA CADA RCP.....	159
FIGURA 111. $\Delta$ (%) HMR ESTACIONAL PARA 2010-2040 RCP 4.5 .....	161
FIGURA 112. $\Delta$ (%) HMR ESTACIONAL PARA 2010-2040 RCP 8.5 .....	162
FIGURA 113. $\Delta$ (%) HMR ESTACIONAL PARA 2040-2070 RCP 4.5 .....	163
FIGURA 114. $\Delta$ (%) HMR ESTACIONAL PARA 2040-2070 RCP 8.5 .....	164
FIGURA 115. $\Delta$ (%) HMR ESTACIONAL PARA 2070-2100 RCP 4.5 .....	165



FIGURA 116. $\Delta$ (%) HMR ESTACIONAL PARA 2070-2100 RCP 8.5.....	166
FIGURA 117. TENDENCIA DEL $\Delta$ (%) REC DEL AÑO 2010 AL 2099 PARA LOS RCP 4.5 (ARRIBA) Y 8.5 (ABAJO) PARA EL CONJUNTO DE ESPAÑA. LA BANDA GRIS INDICA EL RANGO DE RESULTADOS DE LAS PROYECCIONES. LA LÍNEA GRUESA INDICA SU PROMEDIO Y LA RECTA DELGADA SU PENDIENTE. SE INDICA SU P-VALOR SEGÚN EL TEST DE MANN KENDALL; NEGRA: SIN TENDENCIA, ROJA: DECRECIENTE, AZUL: CRECIENTE. ....	168
FIGURA 118. $\Delta$ (%) REC EN CADA PI. IZQUIERDA: VALORES MEDIOS ANUALES. DERECHA: DT DE LOS VALORES ANUALES.....	169
FIGURA 119. $\Delta$ (%) REC ANUAL PARA 2010-2040 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 4.5.....	171
FIGURA 120. $\Delta$ (%) REC ANUAL PARA 2010-2040 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 8.5.....	171
FIGURA 121. $\Delta$ (%) REC ANUAL PARA 2040-2070 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 4.5.....	172
FIGURA 122. $\Delta$ (%) REC ANUAL PARA 2040-2070 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 8.5.....	172
FIGURA 123. $\Delta$ (%) REC ANUAL PARA 2070-2100 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 4.5.....	173
FIGURA 124. $\Delta$ (%) REC ANUAL PARA 2070-2100 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 8.5.....	173
FIGURA 125. $\Delta$ (%) REC DE VALORES MEDIOS ANUALES EN CADA DH Y PI.....	177
FIGURA 126. CAMBIOS (%) EN EL CICLO ANUAL DE REC PARA CADA PI RESPECTO AL PC PARA EL CONJUNTO DE ESPAÑA SEGÚN LAS DISTINTAS PROYECCIONES Y SUS VALORES MEDIOS PARA CADA RCP.....	179
FIGURA 127. $\Delta$ (%) REC ESTACIONAL PARA 2010-2040 RCP 4.5.....	182
FIGURA 128. $\Delta$ (%) REC ESTACIONAL PARA 2010-2040 RCP 8.5.....	183
FIGURA 129. $\Delta$ (%) REC ESTACIONAL PARA 2040-2070 RCP 4.5.....	184
FIGURA 130. $\Delta$ (%) REC ESTACIONAL PARA 2040-2070 RCP 8.5.....	185
FIGURA 131. $\Delta$ (%) REC ESTACIONAL PARA 2070-2100 RCP 4.5.....	186
FIGURA 132. $\Delta$ (%) REC ESTACIONAL PARA 2070-2100 RCP 8.5.....	187
FIGURA 133. TENDENCIA DEL $\Delta$ (%) ESC DEL AÑO 2010 AL 2099 PARA LOS RCP 4.5 (ARRIBA) Y 8.5 (ABAJO) PARA EL CONJUNTO DE ESPAÑA. LA BANDA GRIS INDICA EL RANGO DE RESULTADOS DE LAS PROYECCIONES. LA LÍNEA GRUESA INDICA SU PROMEDIO Y LA RECTA DELGADA SU PENDIENTE. SE INDICA SU P-VALOR SEGÚN EL TEST DE MANN KENDALL; NEGRA: SIN TENDENCIA, ROJA: DECRECIENTE, AZUL: CRECIENTE. ....	188
FIGURA 134. $\Delta$ (%) ESC EN CADA PI. IZQUIERDA: VALORES MEDIOS ANUALES. DERECHA: DT DE LOS VALORES ANUALES.....	190
FIGURA 135. $\Delta$ (%) ESC ANUAL PARA 2010-2040 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 4.5.....	191
FIGURA 136. $\Delta$ (%) ESC ANUAL PARA 2010-2040 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 8.5.....	192
FIGURA 137. $\Delta$ (%) ESC ANUAL PARA 2040-2070 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 4.5.....	192
FIGURA 138. $\Delta$ (%) ESC ANUAL PARA 2040-2070 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 8.5.....	193
FIGURA 139. $\Delta$ (%) ESC ANUAL PARA 2070-2100 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 4.5.....	193



FIGURA 140. $\Delta$ (%) ESC ANUAL PARA 2070-2100 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 8.5. ...	194
FIGURA 141. MEDIA DE $\Delta$ (%) ESC ANUAL PARA PI1 (ARRIBA), PI2 (MEDIO) Y PI3 (ABAJO) Y RCP 4.5 (IZQUIERDA) Y 8.5 (DERECHA). .....	196
FIGURA 142. MEDIA Y RANGO DE $\Delta$ (%) ESC ANUAL PARA TODAS LAS PROYECCIONES DURANTE PI1 (ARRIBA), PI2 (MEDIO) Y PI3 (ABAJO).....	198
FIGURA 143. MÍNIMOS Y MÁXIMOS $\Delta$ (%) ESC ANUAL DE TODAS LAS PROYECCIONES DURANTE PI1 (ARRIBA), PI2 (MEDIO) Y PI3 (ABAJO).....	199
FIGURA 144. PROYECCIÓN QUE DA LOS MÁXIMOS Y MÍNIMOS $\Delta$ (%) ESC ANUAL DURANTE PI1 (ARRIBA), PI2 (MEDIO) Y PI3 (ABAJO).....	200
FIGURA 145. TENDENCIA DEL $\Delta$ (%) ESC DEL AÑO 2010 AL 2099 PARA LOS RCP 4.5 (ARRIBA) Y 8.5 (ABAJO) EN CADA DH. LA BANDA GRIS INDICA EL RANGO DE RESULTADOS DE LAS PROYECCIONES. LA LÍNEA GRUESA INDICA SU PROMEDIO Y LA RECTA DELGADA SU PENDIENTE; NEGRA: SIN TENDENCIA, ROJA: DECRECIENTE, AZUL: CRECIENTE SE INDICA EL P-VALOR DEL TEST DE MANN KENDALL. ....	208
FIGURA 146. $\Delta$ (%) ESC DE VALORES MEDIOS ANUALES EN CADA DH Y PI. ....	212
FIGURA 147. $\Delta$ DE VARIABILIDAD (%) DE ESC ANUAL EN CADA DH Y PI. ....	215
FIGURA 148. CICLO ANUAL DE ESC PARA EL PC Y CADA PI PARA EL CONJUNTO DE ESPAÑA SEGÚN LA MEDIA DE LAS DISTINTAS PROYECCIONES PARA CADA RCP. ....	217
FIGURA 149. CAMBIOS (%) EN EL CICLO ANUAL DE ESC PARA CADA PI RESPECTO AL PC PARA EL CONJUNTO DE ESPAÑA SEGÚN LAS DISTINTAS PROYECCIONES Y SUS VALORES MEDIOS PARA CADA RCP. ....	218
FIGURA 150. CICLO ANUAL ESTANDARIZADO DE ESC PARA EL CONJUNTO DE ESPAÑA SEGÚN LOS VALORES MEDIOS PARA CADA RCP (ARRIBA) Y SUS CAMBIOS PARA CADA PI RESPECTO AL PC (ABAJO).....	219
FIGURA 151. $\Delta$ (%) ESC ESTACIONAL PARA 2010-2040 RCP 4.5 .....	222
FIGURA 152. $\Delta$ (%) ESC ESTACIONAL PARA 2010-2040 RCP 8.5 .....	223
FIGURA 153. $\Delta$ (%) ESC ESTACIONAL PARA 2040-2070 RCP 4.5 .....	224
FIGURA 154. $\Delta$ (%) ESC ESTACIONAL PARA 2040-2070 RCP 8.5 .....	225
FIGURA 155. $\Delta$ (%) ESC ESTACIONAL PARA 2070-2100 RCP 4.5 .....	226
FIGURA 156. $\Delta$ (%) ESC ESTACIONAL PARA 2070-2100 RCP 8.5 .....	227
FIGURA 157. $\Delta$ (%) ESC ESTACIONAL PARA EL PROMEDIO DE PROYECCIONES. ....	228
FIGURA 158. EVALUACIÓN DE LOS RRHH NIVALES EN ESPAÑA (COBOS Y MORENO 2017). ....	229
FIGURA 159. ÁREAS DEL TERRITORIO ESPAÑOL CON MÁS DE 1.500 METROS DE ALTITUD.....	230
FIGURA 160. TEM ESTIMADAS POR EL CONJUNTO DE PROYECCIONES SEGÚN LOS RCP 4.5 Y RCP 8.5 DURANTE EL PC Y LOS PI EN LAS DDHH CON MAYORES RECURSOS NIVALES. ....	231
FIGURA 161. DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LA NIEVE ACUMULADA (IZQUIERDA) Y DE LOS RRHH PROCEDENTES DE LA FUSIÓN DE LA NIEVE ACUMULADOS DESDE OCTUBRE (DERECHA)	



ESTIMADOS POR EL CONJUNTO DE PROYECCIONES SEGÚN LOS RCP 4.5 Y RCP 8.5 DURANTE EL PC Y LOS PI EN LAS ZONAS ANALIZADAS.....	233
FIGURA 162. CAUCES DE RÍO DONDE SE HA ANALIZADO LA APN EN ESTE ESTUDIO. ....	235
FIGURA 163. $\Delta$ (%) APN ANUAL PARA 2010-2040 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 4.5.....	237
FIGURA 164. $\Delta$ (%) APN ANUAL PARA 2010-2040 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 8.5.....	238
FIGURA 165. $\Delta$ (%) APN ANUAL PARA 2040-2070 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 4.5.....	239
FIGURA 166. $\Delta$ (%) APN ANUAL PARA 2040-2070 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 8.5.....	240
FIGURA 167. $\Delta$ (%) APN ANUAL PARA 2070-2100 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 4.5.....	241
FIGURA 168. $\Delta$ (%) APN ANUAL PARA 2070-2100 SEGÚN LAS PROYECCIONES RCP 8.5.....	242
FIGURA 169. APN ANUAL EN ALGUNOS PUNTOS FLUVIALES REPRESENTATIVOS, SIMULADOS A PARTIR DE DATOS CLIMÁTICOS OBSERVADOS PARA EL PC Y ESTIMADOS PARA LOS TRES PI SEGÚN PROYECCIONES CLIMÁTICAS DEL RCP 4.5 (AZUL) Y RCP 8.5 (ROJO). ....	244
FIGURA 170. CAMBIO (%) EN LAS PRINCIPALES VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LOS TRES PI RESPECTO AL PC PARA EL CONJUNTO DE ESPAÑA. RANGO Y MEDIA DE RESULTADOS PARA RCP 4.5 (CÍRCULOS) Y RCP 8.5 (CUADRADOS). ....	246
FIGURA 171. CAMBIO (%) EN LAS PRINCIPALES VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LOS TRES PI RESPECTO AL PC PARA LA DH DEL MIÑO-SIL. RANGO Y MEDIA DE RESULTADOS PARA RCP 4.5 (CÍRCULOS) Y RCP 8.5 (CUADRADOS).....	248
FIGURA 172. CAMBIO (%) EN LAS PRINCIPALES VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LOS TRES PI RESPECTO AL PC PARA LA DH DE GALICIA COSTA. RANGO Y MEDIA DE RESULTADOS PARA RCP 4.5 (CÍRCULOS) Y RCP 8.5 (CUADRADOS). ....	248
FIGURA 173. CAMBIO (%) EN LAS PRINCIPALES VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LOS TRES PI RESPECTO AL PC PARA LA DH DEL CANTÁBRICO ORIENTAL. RANGO Y MEDIA DE RESULTADOS PARA RCP 4.5 (CÍRCULOS) Y RCP 8.5 (CUADRADOS).....	249
FIGURA 174. CAMBIO (%) EN LAS PRINCIPALES VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LOS TRES PI RESPECTO AL PC PARA LA DH DEL CANTÁBRICO OCCIDENTAL. RANGO Y MEDIA DE RESULTADOS PARA RCP 4.5 (CÍRCULOS) Y RCP 8.5 (CUADRADOS).....	249
FIGURA 175. CAMBIO (%) EN LAS PRINCIPALES VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LOS TRES PI RESPECTO AL PC PARA LA DH DEL DUERO. RANGO Y MEDIA DE RESULTADOS PARA RCP 4.5 (CÍRCULOS) Y RCP 8.5 (CUADRADOS).....	250
FIGURA 176. CAMBIO (%) EN LAS PRINCIPALES VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LOS TRES PI RESPECTO AL PC PARA LA DH DEL TAJO. RANGO Y MEDIA DE RESULTADOS PARA RCP 4.5 (CÍRCULOS) Y RCP 8.5 (CUADRADOS). ....	250
FIGURA 177. CAMBIO (%) EN LAS PRINCIPALES VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LOS TRES PI RESPECTO AL PC PARA LA DH DEL GUADIANA. RANGO Y MEDIA DE RESULTADOS PARA RCP 4.5 (CÍRCULOS) Y RCP 8.5 (CUADRADOS). ....	251
FIGURA 178. CAMBIO (%) EN LAS PRINCIPALES VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LOS TRES PI RESPECTO AL PC PARA LA DH DEL GUADALQUIVIR. RANGO Y MEDIA DE RESULTADOS PARA RCP 4.5 (CÍRCULOS) Y RCP 8.5 (CUADRADOS). ....	251



FIGURA 179. CAMBIO (%) EN LAS PRINCIPALES VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LOS TRES PI RESPECTO AL PC PARA LA DH DE LAS CC. MEDITERRÁNEAS ANDALUZAS. RANGO Y MEDIA DE RESULTADOS PARA RCP 4.5 (CÍRCULOS) Y RCP 8.5 (CUADRADOS). .....	252
FIGURA 180. CAMBIO (%) EN LAS PRINCIPALES VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LOS TRES PI RESPECTO AL PC PARA LA DH DEL GUADALETE Y BARBATE. RANGO Y MEDIA DE RESULTADOS PARA RCP 4.5 (CÍRCULOS) Y RCP 8.5 (CUADRADOS). .....	252
FIGURA 181. CAMBIO (%) EN LAS PRINCIPALES VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LOS TRES PI RESPECTO AL PC PARA LA DH DEL TINTO, ODIEL Y PIEDRAS. RANGO Y MEDIA DE RESULTADOS PARA RCP 4.5 (CÍRCULOS) Y RCP 8.5 (CUADRADOS). .....	253
FIGURA 182. CAMBIO (%) EN LAS PRINCIPALES VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LOS TRES PI RESPECTO AL PC PARA LA DH DEL SEGURA. RANGO Y MEDIA DE RESULTADOS PARA RCP 4.5 (CÍRCULOS) Y RCP 8.5 (CUADRADOS). .....	253
FIGURA 183. CAMBIO (%) EN LAS PRINCIPALES VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LOS TRES PI RESPECTO AL PC PARA LA DH DEL JÚCAR. RANGO Y MEDIA DE RESULTADOS PARA RCP 4.5 (CÍRCULOS) Y RCP 8.5 (CUADRADOS). .....	254
FIGURA 184. CAMBIO (%) EN LAS PRINCIPALES VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LOS TRES PI RESPECTO AL PC PARA LA DH DEL EBRO. RANGO Y MEDIA DE RESULTADOS PARA RCP 4.5 (CÍRCULOS) Y RCP 8.5 (CUADRADOS). .....	254
FIGURA 185. CAMBIO (%) EN LAS PRINCIPALES VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LOS TRES PI RESPECTO AL PC PARA LA DH DE LAS CCII DE CATALUÑA. RANGO Y MEDIA DE RESULTADOS PARA RCP 4.5 (CÍRCULOS) Y RCP 8.5 (CUADRADOS). .....	255
FIGURA 186. CAMBIO (%) EN LAS PRINCIPALES VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LOS TRES PI RESPECTO AL PC PARA LA DH DE LAS ISLAS BALEARES. RANGO Y MEDIA DE RESULTADOS PARA RCP 4.5 (CÍRCULOS) Y RCP 8.5 (CUADRADOS). .....	255
FIGURA 187. CAMBIO (%) EN LAS PRINCIPALES VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LOS TRES PI RESPECTO AL PC PARA LAS DDHH DE CANARIAS. RANGO Y MEDIA DE RESULTADOS PARA RCP 4.5 (CÍRCULOS) Y RCP 8.5 (CUADRADOS). .....	256
FIGURA 188. COMPARATIVA DE CAMBIOS DE PRE ENTRE CEDEX 2010 (SRES) Y EL PRESENTE ESTUDIO (RCP). .....	260
FIGURA 189. COMPARATIVA DE CAMBIOS DE ETP ENTRE CEDEX 2010 (SRES) Y EL PRESENTE ESTUDIO (RCP). .....	262
FIGURA 190. COMPARATIVA DE CAMBIOS DE ETR ENTRE CEDEX 2010 (SRES) Y EL PRESENTE ESTUDIO (RCP). .....	264
FIGURA 191. COMPARATIVA DE CAMBIOS DE ESC ENTRE CEDEX 2010 (SRES) Y EL PRESENTE ESTUDIO (RCP). .....	266
FIGURA 192. CONCEPTO Y DEFINICIÓN DE RACHA DE SEQUÍAS ( $ESC_0 = \text{UMBRAL}$ ). .....	276
FIGURA 193. PERIODO DE RETORNO DE SEQUÍAS EN ESPAÑA PARA DIFERENTES DÉFICITS MEDIOS ANUALES Y DURACIÓN 2 AÑOS (ARRIBA) Y 5 AÑOS (DEBAJO) PARA EL PC Y LOS TRES PI SEGÚN CADA UNA DE LAS PROYECCIONES RCP 4.5. ....	281



FIGURA 194. PERIODO DE RETORNO DE SEQUÍAS EN ESPAÑA PARA DIFERENTES DÉFICITS MEDIOS ANUALES Y DURACIÓN 2 AÑOS (ARRIBA) Y 5 AÑOS (DEBAJO) PARA EL PC Y LOS TRES PI SEGÚN CADA UNA DE LAS PROYECCIONES RCP 8.5.....	282
FIGURA 195. PERIODO DE RETORNO DE SEQUÍAS EN GALICIA COSTA PARA DIFERENTES DÉFICITS MEDIOS ANUALES Y DURACIÓN 2 AÑOS (ARRIBA) Y 5 AÑOS (DEBAJO) PARA EL PC Y LOS TRES PI SEGÚN CADA UNA DE LAS PROYECCIONES RCP 4.5.....	283
FIGURA 196. PERIODO DE RETORNO DE SEQUÍAS EN GALICIA COSTA PARA DIFERENTES DÉFICITS MEDIOS ANUALES Y DURACIÓN 2 AÑOS (ARRIBA) Y 5 AÑOS (DEBAJO) PARA EL PC Y LOS TRES PI SEGÚN CADA UNA DE LAS PROYECCIONES RCP 8.5.....	284
FIGURA 197. PERIODO DE RETORNO DE SEQUÍAS EN EL TAJO PARA DIFERENTES DÉFICITS MEDIOS ANUALES Y DURACIÓN 2 AÑOS (ARRIBA) Y 5 AÑOS (DEBAJO) PARA EL PC Y LOS TRES PI SEGÚN CADA UNA DE LAS PROYECCIONES RCP 4.5.....	285
FIGURA 198. PERIODO DE RETORNO DE SEQUÍAS EN EL TAJO PARA DIFERENTES DÉFICITS MEDIOS ANUALES Y DURACIÓN 2 AÑOS (ARRIBA) Y 5 AÑOS (DEBAJO) PARA EL PC Y LOS TRES PI SEGÚN CADA UNA DE LAS PROYECCIONES RCP 8.5.....	286
FIGURA 199. PERIODO DE RETORNO DE SEQUÍAS EN EL GUADALQUIVIR PARA DIFERENTES DÉFICITS MEDIOS ANUALES Y DURACIÓN 2 AÑOS (ARRIBA) Y 5 AÑOS (DEBAJO) PARA EL PC Y LOS TRES PI SEGÚN CADA UNA DE LAS PROYECCIONES RCP 4.5.....	287
FIGURA 200. PERIODO DE RETORNO DE SEQUÍAS EN EL GUADALQUIVIR PARA DIFERENTES DÉFICITS MEDIOS ANUALES Y DURACIÓN 2 AÑOS (ARRIBA) Y 5 AÑOS (DEBAJO) PARA EL PC Y LOS TRES PI SEGÚN CADA UNA DE LAS PROYECCIONES RCP 8.5.....	288
FIGURA 201. PERIODO DE RETORNO DE SEQUÍAS EN EL SEGURA PARA DIFERENTES DÉFICITS MEDIOS ANUALES Y DURACIÓN 2 AÑOS (ARRIBA) Y 5 AÑOS (DEBAJO) PARA EL PC Y LOS TRES PI SEGÚN CADA UNA DE LAS PROYECCIONES RCP 4.5.....	289
FIGURA 202. PERIODO DE RETORNO DE SEQUÍAS EN EL SEGURA PARA DIFERENTES DÉFICITS MEDIOS ANUALES Y DURACIÓN 2 AÑOS (ARRIBA) Y 5 AÑOS (DEBAJO) PARA EL PC Y LOS TRES PI SEGÚN CADA UNA DE LAS PROYECCIONES RCP 8.5.....	290
FIGURA 203. PERIODO DE RETORNO DE SEQUÍAS EN EL EBRO PARA DIFERENTES DÉFICITS MEDIOS ANUALES Y DURACIÓN 2 AÑOS (ARRIBA) Y 5 AÑOS (DEBAJO) PARA EL PC Y LOS TRES PI SEGÚN CADA UNA DE LAS PROYECCIONES RCP 4.5.....	291
FIGURA 204. PERIODO DE RETORNO DE SEQUÍAS EN EL EBRO PARA DIFERENTES DÉFICITS MEDIOS ANUALES Y DURACIÓN 2 AÑOS (ARRIBA) Y 5 AÑOS (DEBAJO) PARA EL PC Y LOS TRES PI SEGÚN CADA UNA DE LAS PROYECCIONES RCP 8.5.....	292
FIGURA 205. PERIODO DE RETORNO DE SEQUÍAS EN LAS CUENCAS INTERNAS DE CATALUÑA PARA DIFERENTES DÉFICITS MEDIOS ANUALES Y DURACIÓN 2 AÑOS (ARRIBA) Y 5 AÑOS (DEBAJO) PARA EL PC Y LOS TRES PI SEGÚN CADA UNA DE LAS PROYECCIONES RCP 4.5.....	293
FIGURA 206. PERIODO DE RETORNO DE SEQUÍAS EN LAS CUENCAS INTERNAS DE CATALUÑA PARA DIFERENTES DÉFICITS MEDIOS ANUALES Y DURACIÓN 2 AÑOS (ARRIBA) Y 5 AÑOS (DEBAJO) PARA EL PC Y LOS TRES PI SEGÚN CADA UNA DE LAS PROYECCIONES RCP 8.5.....	294





## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. DISPONIBILIDAD DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO REGIONALIZADOS PARA ESPAÑA (PROYECCIONES) SEGÚN EL MÉTODO DE ANÁLOGOS DE AEMET (AEMET 2016).	7
TABLA 2. VARIABLES, PERIODOS Y ESTACIONES DE CADA PROYECCIÓN CLIMÁTICA.	8
TABLA 3. VARIABLES, PERIODOS Y ESTACIONES DE CADA PROYECCIÓN CLIMÁTICA.	13
TABLA 4. DISTRIBUCIÓN Y DENSIDAD POR ÁMBITO DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS DONDE SE HAN SIMULADO LAS PRE Y LAS TEMPERATURAS (TMN Y TMX).	26
TABLA 5. VALORES DE PRE ANUAL OBSERVADOS (OBS) Y SIMULADOS DURANTE EL PC EN DIFERENTES DDHH. SE HAN OBTENIDO COMO PROMEDIO DE LOS VALORES EN LAS ESTACIONES DE CONTRASTE QUE CAEN EN CADA DH. TAMBIÉN SE INDICA EL EMR PARA CADA UNA DE LAS 6 PROYECCIONES.	65
TABLA 6. $\Delta$ (%) PRE EN CADA PI SEGÚN CADA PROYECCIÓN PARA EL CONJUNTO DE ESPAÑA. SE INDICAN LOS VALORES MÁXIMO (Mx), MÍNIMO (Mn) Y EL PROMEDIO (MED) PARA CADA RCP. LOS COLORES REFLEJAN LA GRADACIÓN DEL CAMBIO.	83
TABLA 7. $\Delta$ (%) PRE EN CADA DH Y PI SEGÚN CADA PROYECCIÓN. SE INDICAN LOS VALORES MÁXIMO (Mx), MÍNIMO (Mn) Y EL PROMEDIO (MED) PARA CADA RCP. LOS COLORES REFLEJAN LA GRADACIÓN DEL CAMBIO.	89
TABLA 8. $\Delta$ (%) PRE ESTACIONAL EN ESPAÑA PARA CADA PI Y PROYECCIÓN. SE INDICAN LOS VALORES MÁXIMO (Mx), MÍNIMO (Mn) Y EL PROMEDIO (MED) PARA CADA RCP. LOS COLORES REFLEJAN LA GRADACIÓN DEL CAMBIO.	94
TABLA 9. $\Delta$ (°C) TEM, TMN Y TMX EN CADA PI SEGÚN CADA PROYECCIÓN PARA EL CONJUNTO DE ESPAÑA. SE INDICAN LOS VALORES MÁXIMO (Mx), MÍNIMO (Mn) Y EL PROMEDIO (MED) PARA CADA RCP. LOS COLORES REFLEJAN LA GRADACIÓN DEL CAMBIO.	101
TABLA 10. $\Delta$ (%) ETP EN CADA PI SEGÚN CADA PROYECCIÓN PARA EL CONJUNTO DE ESPAÑA. SE INDICAN LOS VALORES MÁXIMO (Mx), MÍNIMO (Mn) Y EL PROMEDIO (MED) PARA CADA RCP. LOS COLORES REFLEJAN LA GRADACIÓN DEL CAMBIO.	102
TABLA 11. $\Delta$ (%) ETP EN CADA DH Y PI SEGÚN CADA PROYECCIÓN. SE INDICAN LOS VALORES MÁXIMO (Mx), MÍNIMO (Mn) Y EL PROMEDIO (MED) PARA CADA RCP. LOS COLORES REFLEJAN LA GRADACIÓN DEL CAMBIO.	109
TABLA 12. $\Delta$ (%) ETP ESTACIONAL EN ESPAÑA PARA CADA PI Y PROYECCIÓN. SE INDICAN LOS VALORES MÁXIMO (Mx), MÍNIMO (Mn) Y EL PROMEDIO (MED) PARA CADA RCP. LOS COLORES REFLEJAN LA GRADACIÓN DEL CAMBIO.	114
TABLA 13. $\Delta$ (%) ETR EN CADA PI SEGÚN CADA PROYECCIÓN PARA EL CONJUNTO DE ESPAÑA. SE INDICAN LOS VALORES MÁXIMO (Mx), MÍNIMO (Mn) Y EL PROMEDIO (MED) PARA CADA RCP. LOS COLORES REFLEJAN LA GRADACIÓN DEL CAMBIO.	132
TABLA 14. $\Delta$ (%) ETR EN CADA DH Y PI SEGÚN CADA PROYECCIÓN. SE INDICAN LOS VALORES MÁXIMO (Mx), MÍNIMO (Mn) Y EL PROMEDIO (MED) PARA CADA RCP. LOS COLORES REFLEJAN LA GRADACIÓN DEL CAMBIO.	138



TABLA 15. $\Delta$ (%) ETR ESTACIONAL EN ESPAÑA PARA CADA PI Y PROYECCIÓN. SE INDICAN LOS VALORES MÁXIMO (Mx), MÍNIMO (Mn) Y EL PROMEDIO (MED) PARA CADA RCP. LOS COLORES REFLEJAN LA GRADACIÓN DEL CAMBIO.	143
TABLA 16. $\Delta$ (%) HMR EN CADA PI SEGÚN CADA PROYECCIÓN PARA EL CONJUNTO DE ESPAÑA. SE INDICAN LOS VALORES MÁXIMO (Mx), MÍNIMO (Mn) Y EL PROMEDIO (MED) PARA CADA RCP. LOS COLORES REFLEJAN LA GRADACIÓN DEL CAMBIO.	152
TABLA 17. $\Delta$ (%) HMR EN CADA DH Y PI SEGÚN CADA PROYECCIÓN. SE INDICAN LOS VALORES MÁXIMO (Mx), MÍNIMO (Mn) Y EL PROMEDIO (MED) PARA CADA RCP. LOS COLORES REFLEJAN LA GRADACIÓN DEL CAMBIO.	157
TABLA 18. $\Delta$ (%) HMR ESTACIONAL EN ESPAÑA PARA CADA PI Y PROYECCIÓN. SE INDICAN LOS VALORES MÁXIMO (Mx), MÍNIMO (Mn) Y EL PROMEDIO (MED) PARA CADA RCP. LOS COLORES REFLEJAN LA GRADACIÓN DEL CAMBIO.	159
TABLA 19. $\Delta$ (%) REC EN CADA PI SEGÚN CADA PROYECCIÓN PARA EL CONJUNTO DE ESPAÑA. SE INDICAN LOS VALORES MÁXIMO (Mx), MÍNIMO (Mn) Y EL PROMEDIO (MED) PARA CADA RCP. LOS COLORES REFLEJAN LA GRADACIÓN DEL CAMBIO.	168
TABLA 20. $\Delta$ (%) REC EN CADA DH Y PI SEGÚN CADA PROYECCIÓN. SE INDICAN LOS VALORES MÁXIMO (Mx), MÍNIMO (Mn) Y EL PROMEDIO (MED) PARA CADA RCP. LOS COLORES REFLEJAN LA GRADACIÓN DEL CAMBIO.	175
TABLA 21. $\Delta$ (%) REC ESTACIONAL EN ESPAÑA PARA CADA PI Y PROYECCIÓN. SE INDICAN LOS VALORES MÁXIMO (Mx), MÍNIMO (Mn) Y EL PROMEDIO (MED) PARA CADA RCP. LOS COLORES REFLEJAN LA GRADACIÓN DEL CAMBIO.	180
TABLA 22. PENDIENTES DE LAS SERIES ANUALES DE $\Delta$ (%) DE PRE Y ESC DEL AÑO 2010 AL 2099 SEGÚN CADA PROYECCIÓN PARA EL CONJUNTO DE ESPAÑA. EN RELLENO NARANJA SE INDICAN LAS SERIES CON TENDENCIA DECRECIENTE SEGÚN EL TEST DE MANN-KENDALL	188
TABLA 23. $\Delta$ (%) ESC EN CADA PI SEGÚN CADA PROYECCIÓN PARA EL CONJUNTO DE ESPAÑA. SE INDICAN LOS VALORES MÁXIMO (Mx), MÍNIMO (Mn) Y EL PROMEDIO (MED) PARA CADA RCP. LOS COLORES REFLEJAN LA GRADACIÓN DEL CAMBIO.	189
TABLA 24. $\Delta$ (%) ESC EN CADA DH Y PI SEGÚN CADA PROYECCIÓN. SE INDICAN LOS VALORES MÁXIMO (Mx), MÍNIMO (Mn) Y EL PROMEDIO (MED) PARA CADA RCP. LOS COLORES REFLEJAN LA GRADACIÓN DEL CAMBIO.	210
TABLA 25. $\Delta$ (%) ESC EN CADA PI SEGÚN CADA PROYECCIÓN EN LAS DDHH DE CANARIAS Y CEUTA Y MELILLA. LOS COLORES REFLEJAN LA GRADACIÓN DEL CAMBIO.	216
TABLA 26. $\Delta$ (%) ESC ESTACIONAL EN ESPAÑA PARA CADA PI Y PROYECCIÓN. SE INDICAN LOS VALORES MÁXIMO (Mx), MÍNIMO (Mn) Y EL PROMEDIO (MED) PARA CADA RCP. LOS COLORES REFLEJAN LA GRADACIÓN DEL CAMBIO.	220
TABLA 27. RANGO Y MEDIA DE $\Delta$ EN LAS VARIABLES HIDROCLIMÁTICAS EN ESPAÑA EN CADA PI Y ESCENARIO DE EMISIONES SEGÚN EL PRESENTE ESTUDIO Y COMPARACIÓN CON EL DE CEDEX 2010.	257



TABLA 28. TABLA COMPARATIVA DE $\Delta$ ESC (%) ENTRE CEDEX 2010 (SRES) Y EL PRESENTE ESTUDIO (RCP).	265
TABLA 29. PORCENTAJE DE CAMBIO PARA CONSIDERAR EL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SEGÚN LA IPH (HORIZONTE 2027), CEDEX 2010 Y EL PRESENTE INFORME (2010-2040 EN RELACIÓN A 1940-2006).	271
TABLA 30. PORCENTAJE DE CAMBIO A APLICAR A LAS SERIES DE ESC 1940-2006 PARA CONSIDERAR EL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL HORIZONTE 2039.	272
TABLA 31. CAMBIO DE ESCORRENTÍA EN CADA ÁMBITO HIDROGRÁFICO. SE INDICAN LOS VALORES MÁXIMO (Mx), MÍNIMO (Mn) Y EL PROMEDIO (MED) PARA CADA RCP. LOS COLORES REFLEJAN LA GRADACIÓN DEL CAMBIO.	298





## 1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de este informe es presentar los trabajos realizados para evaluar el impacto del cambio climático en los recursos hídricos (RRHH) en régimen natural y en el régimen de sequías en España.

El trabajo es fruto del cumplimiento de la “*Encomienda de Gestión de la Oficina Española del Cambio Climático (OECC) al Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) para la Evaluación del Impacto del Cambio Climático en los Recursos Hídricos y Sequías en España (2015)*” y de lo especificado en el pliego de prescripciones técnicas que la desarrolla.

Los valores climáticos de partida de este trabajo proceden de modelos climáticos globales y de escenarios de emisiones utilizados en el 5º Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).

Este trabajo constituye una actualización de otro anterior ya realizado en el CEDEX (CEDEX 2010, Álvarez-Rodríguez et al. 2012, Barranco et al. 2014) que usaba un conjunto de proyecciones climáticas regionalizadas para España a partir de resultados de simulaciones con modelos climáticos del 3º informe del IPCC.

Se ha evaluado el impacto de 12 proyecciones climáticas con objeto de recoger la incertidumbre asociada a las simulaciones climáticas y, por lo tanto, de expresar de manera más completa el impacto del cambio climático.

El ámbito del trabajo es el territorio de España. No obstante, el ámbito se ha ampliado a zonas limítrofes de Portugal y Francia con objeto de simular en aquellas zonas que vierten agua al territorio español y que por lo tanto le aportan RRHH.

La base del estudio es cada una de las celdas en las que se ha compartimentado el territorio español. El tamaño de celda donde se realizan los cálculos básicos es de 1 km x 1 km, si bien los cálculos de acumulación hídrica se realizaron en celdas del doble de resolución (0,5 km x 0,5 km). De ese modo, el análisis básico se hace de manera distribuida en cada una de las aproximadamente 500.000 celdas de 1 km<sup>2</sup> en las que se discretiza España.

El impacto sobre los RRHH se presenta también agregado para el conjunto de España y para cada Demarcación Hidrográfica (DH), habida cuenta de que la cuenca hidrográfica es la unidad física integral del ciclo hidrológico donde, salvo excepciones, se encuadran los procesos de transferencia de agua en la fase terrestre. Para este trabajo, las islas Canarias se han agrupado en una única DH. Ceuta y Melilla, aunque dependen formalmente de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, se han integrado en la DH de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas por su proximidad geográfica y mayor similitud de resultados (Figura 1).



CEDEX



Figura 1. Demarcaciones Hidrográficas de España. Las islas Canarias se han agrupado en un único ámbito.

Este informe contiene la descripción y resultados de los trabajos llevados a cabo. El capítulo 2 es una introducción a las proyecciones climáticas, haciendo referencia a las del 5º y último informe de evaluación del IPCC (AR5, 5º Assessment Report). En el capítulo 3 se comentan los antecedentes principales. El capítulo 4 describe la metodología del trabajo. En el capítulo 5 se analizan las proyecciones climáticas seleccionadas, así como los resultados del contraste con los datos observados. El capítulo 6 trata la obtención de mapas de las variables climáticas, incluyendo la interpolación de los valores en estaciones, el cálculo de la evapotranspiración potencial y la estimación del cambio en la precipitación y la evapotranspiración potencial. El capítulo 7 describe los resultados de aplicar la simulación hidrológica a las proyecciones climáticas y del impacto sobre los RRHH. En el capítulo 8 se resumen y discuten los resultados del impacto en los RRHH. El capítulo 9 trata el impacto sobre el régimen de sequías. El capítulo 10 contiene las conclusiones del trabajo. Posteriormente, se añaden otros capítulos con el equipo de trabajo, las referencias bibliográficas, el glosario de términos, las abreviaciones usadas en este documento y, para terminar, la descripción de unos anexos. Se incluye además un DVD con el informe digital y los anexos, incluyendo el atlas cartográfico y la aplicación informática para la visualización y análisis de los mapas.



## 2 PROYECCIONES CLIMÁTICAS

### 2.1 PROYECCIONES CLIMÁTICAS DISPONIBLES

Un escenario climático se obtiene simulando el clima global con un modelo de circulación general, o modelo climático global, (MCG) al cual se le ha dado una hipótesis determinada de escenario de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El IPCC pone a disposición pública un conjunto de escenarios climáticos elaborados a escala global por diferentes organismos.

No obstante, la escala de esos escenarios climáticos globales es muy baja para ser utilizada en los estudios de impacto, por lo que es necesario proceder a su regionalización. De ese modo se obtienen los denominados escenarios climáticos regionalizados, también llamados a veces proyecciones climáticas. En consecuencia, en este trabajo se utilizará el término “proyección climática” para identificar un escenario climático generado por un MCG, bajo un escenario de emisiones determinado y regionalizado mediante una técnica dada de proyección local. Cada proyección climática es una hipótesis climática que es susceptible de ser analizada para estudiar los impactos que producirá, entre otros, sobre el ciclo del agua, que es el caso de este trabajo.

Para el AR5 (IPCC 2013) se trabajó con un conjunto de nuevos MCG, tanto MCGAO como ESM (Figura 2). Los MCG acoplados Atmósfera-Océano (MCGAO o AOGCM en inglés) simulan la dinámica de los componentes físicos del sistema climático (atmósfera, océano, tierra y capa de hielo). Los Modelos del Sistema Terrestre ESM (del inglés, Earth System Models) son más completos e incluyen la representación de varios ciclos bioquímicos como aquéllos implicados en el ciclo del carbono, del azufre o del ozono.

También para el AR5 se han definido cuatro nuevos escenarios de emisiones, las denominadas Sendas Representativas de Concentración (RCP, por sus siglas en inglés). Éstas se identifican por su forzamiento radiativo total para el año 2100 que varía desde 2.6 a 8.5 W/m<sup>2</sup> (Figura 3). Los cuatro RCP son: RCP2.6, RCP 4.5, RCP6.0 y RCP 8.5. Cada RCP tiene asociada una base de datos de alta resolución espacial de emisiones de sustancias contaminantes (clasificadas por sectores), de emisiones y concentraciones de GEI y de usos de suelo hasta el año 2100, basada en una combinación de modelos de distinta complejidad de la química atmosférica y del ciclo del carbono (IPCC 2013). Los RCP suponen un avance con respecto a los escenarios de emisiones utilizados en anteriores informes del IPCC (denominados SRES) ya que los nuevos RCP pueden contemplar los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XXI<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Hay un cambio en los términos utilizados para definir los escenarios de emisiones respecto al tercer (TAR) y cuarto (AR4) informe de evaluación del IPCC. Mientras que anteriormente el escenario de emisiones SRES se definía respecto a unas condiciones socioeconómicas, en el AR5 se utiliza el término RCP que se refiere exclusivamente a la proyección de emisiones y forzamiento radiativo.

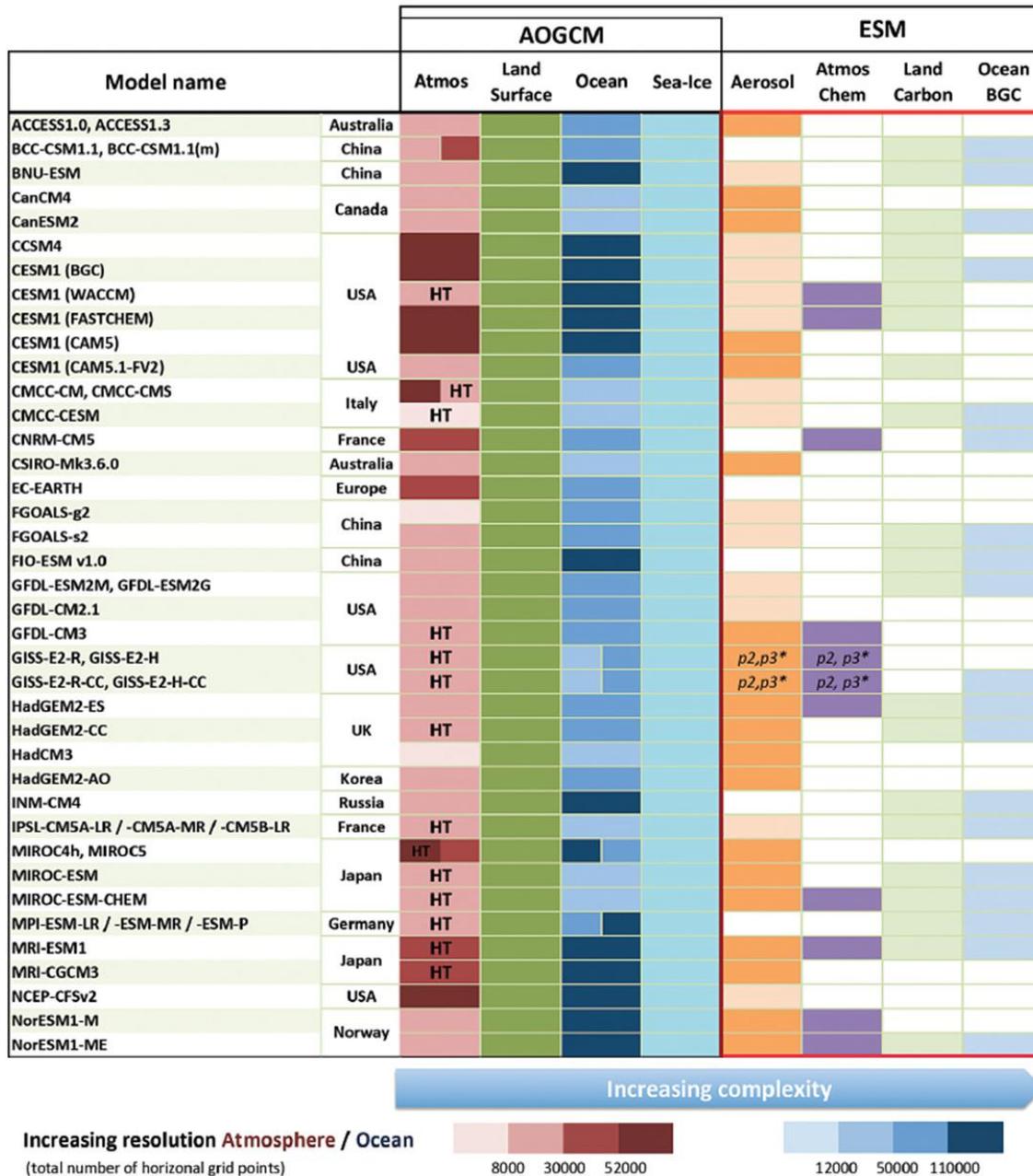


Figura 2. Principales características de los MCGAO y ESM del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5) utilizados en el AR5. HT: simulación completa de la estratosfera. La gradación de color de los componentes atmósfera y océano indica la resolución de las celdas. La resolución de la superficie de la tierra es la de la atmósfera y la de la capa de hielo es la del océano. Un tono más colorido en el resto de los componentes indica una mayor complejidad en la simulación. Con relación a los modelos precedentes, los modelos del CMIP5 suponen una mayor complejidad y mejora al no tener que ajustar la corrección del flujo (tomado de IPCC 2013).

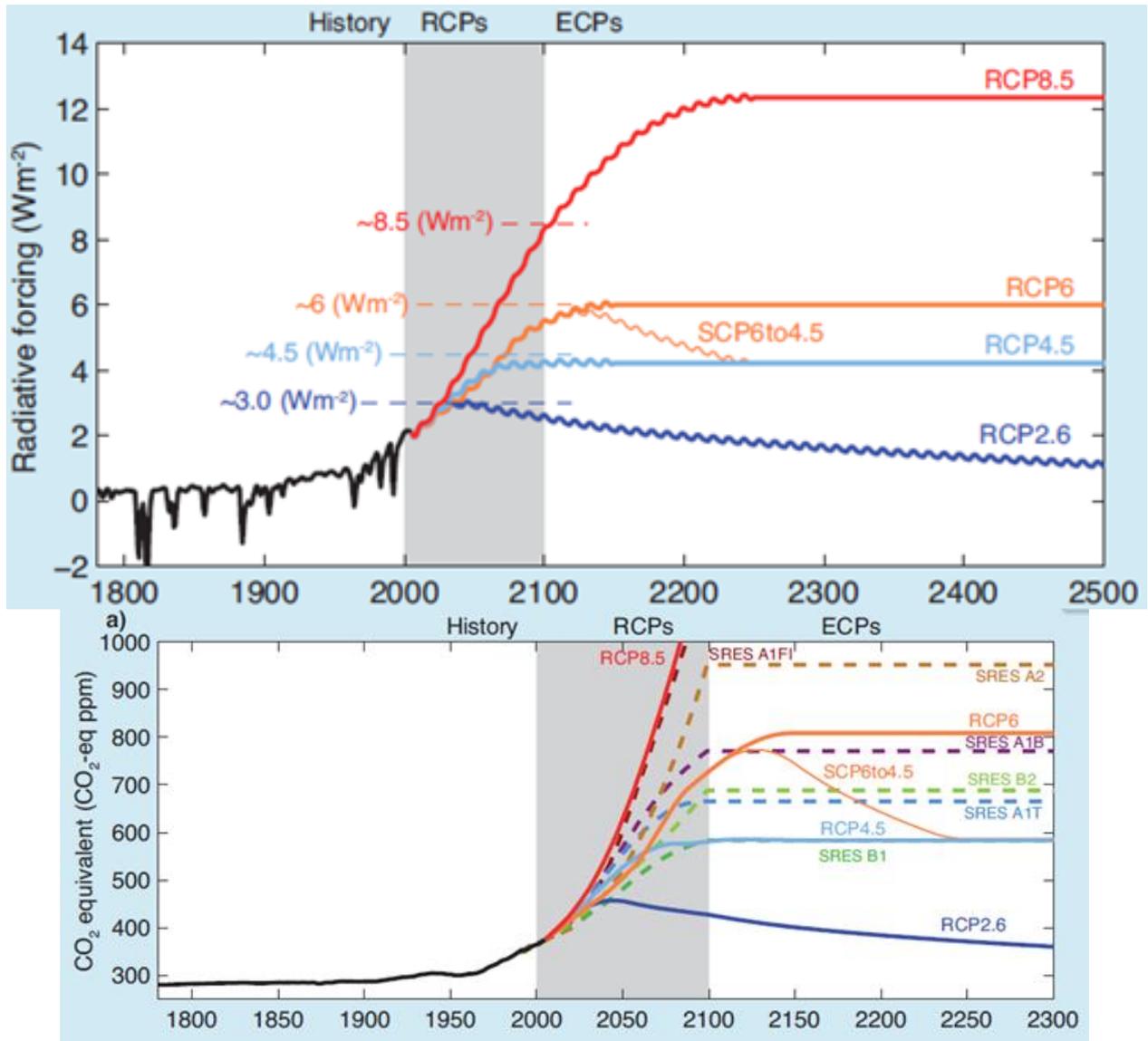


Figura 3. Escenarios de emisiones, con indicación del forzamiento radiativo (arriba) y la concentración de  $CO_2$  equivalente en la atmósfera (debajo) (tomado de IPCC 2013).

La Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) ha llevado a cabo una regionalización para España de escenarios climáticos de los RCP 4.5, 6.0 y 8.5 del IPCC mediante dos técnicas: Análogos y SDSM (AEMET 2016). El método de análogos consiste en trasladar los valores alcanzados en situaciones análogas registradas históricamente a los valores locales (Wilby et al. 2004, AEMET 2008). A partir de unos predictores (el patrón atmosférico previsto por el MCG), se obtiene un modelo local para el predictando deseado (por ejemplo, la precipitación local en un observatorio concreto), utilizando para ello la relación entre predictando y predictores proporcionada por aquellas situaciones atmosféricas análogas registradas. El método estadístico SDSM (Statistical DownScaling Method) consiste en establecer ecuaciones de regresión múltiple entre los predictandos o valores observados de la variable en cada estación meteorológica (temperaturas extremas, precipitación etc.) y los predictores o valores



estimados en el escenario climático en su correspondiente celda del MCG (Wilby et al. 2002).

Con ambos métodos, cada proyección resultante consiste en valores estimados diarios de temperaturas máximas (TMX) y mínimas (TMN) y de precipitación (PRE) proyectados sobre un conjunto de puntos de observación. Estos puntos corresponden a 374 estaciones termométricas y 2321 estaciones pluviométricas que cubren el territorio de la España peninsular, Baleares y Canarias (AEMET 2016). Los valores cubren los periodos 1-1-1961 a 31-12-2000 y 1-1-2006 a 31-12-2100.

## **2.2 PROYECCIONES CLIMÁTICAS UTILIZADAS EN ESTE TRABAJO**

Debido al gran número de proyecciones climáticas disponibles hoy día, es necesario efectuar una selección representativa de las mismas para poder realizar estudios de impacto. La elección de las proyecciones climáticas que van a ser utilizadas es vital, pues condicionan los resultados del análisis del impacto hidrológico del cambio climático.

La selección de las proyecciones climáticas que se utilizan en este estudio se ha basado en las recomendaciones y criterios que han sido transmitidos por AEMET y la OECC:

- AEMET recomendó que se utilizaran aquellas proyecciones regionalizadas según el método de Análogos\_AEMET. Las proyecciones que cumplían este requisito y que estaban disponibles a junio de 2016 son todas aquéllas que están indicadas en la Tabla 1.
- La OECC recomendó que se eligieran proyecciones del RCP 8.5 y del RCP 4.5. Esta sugerencia se basa en abarcar el espectro más razonable y se fundamenta en la evolución reciente de las emisiones de GEI, en las previsiones que había de la cumbre de París de 2015 al inicio de este estudio y en la mayor disponibilidad de información.
- En consecuencia, las proyecciones deben de tener valores diarios simulados de PRE, TMN y TMX en los RCP 4.5 y 8.5. Había 10 proyecciones que cumplían con este requisito y que abarcaban tanto el RCP 4.5 como el RCP 8.5 (en **negrita** en la Tabla 1).
- Otro criterio seguido fue el de no tomar dos MCG del mismo centro climático. AEMET eligió la que se consideraba más adecuada en función de la complejidad del modelo. Se prefirió el modelo MPI.ESM.MR al MPI.ESM.LR, al ser el primero de mayor resolución y se prefirió el MIROC-ESM al MIROC5, al ser más complejo el primero. De ese modo, hay 8 proyecciones en RCP 4.5 y las 8 respectivas en RCP 8.5 que cumplen con este requisito.
- Las proyecciones deben de reproducir razonablemente los valores observados de PRE y temperaturas para el conjunto de España y deben de recoger el margen de variación del conjunto de proyecciones para el conjunto de España. Tras el estudio previo realizado por personal de AEMET se eligen 6 proyecciones en RCP 4.5 y las 6 respectivas en RCP 8.5 (en **amarillo** en la Tabla 1), descartándose la de los MCG ACCESS1.0 y BNU.ESM.

Tabla 1. Disponibilidad de Escenarios de Cambio Climático Regionalizados para España (proyecciones) según el método de Análogos de AEMET (AEMET 2016).

RCP:	PRE			TMN / TMX		
	8.5	6	4.5	8.5	6	4.5
<b>ACCESS1.0</b>	√		√	√		√
ACCESS1.3	√			√		
<b>bcc.csm1.1</b>	√	√	√	√	√	√
bcc.csm1.1.m	√	√	√		√	√
<b>BNU.ESM</b>	√		√	√		√
CMCC.CESM	√			√		
CMCC.CM	√		√	√		
CMCC.CMS			√			√
<b>CNRM.CM5</b>	√		√	√		√
GFDL.ESM2G	√		√			
GFDL.ESM2M			√			
HadGEM2.CC	√			√		
<b>inmcm4</b>	√		√	√		√
IPSL.CM5A.LR	√	√	√			
IPSL.CM5A.MR		√	√		√	√
IPSL.CM5B.LR			√			
<b>MIROC5</b>	√	√	√	√	√	√
<b>MIROC.ESM</b>	√		√	√		√
MIROC.ESM.CHEM		√			√	
<b>MPI.ESM.LR</b>	√		√	√		√
<b>MPI.ESM.MR</b>	√		√	√		√
<b>MRI.CGCM3</b>	√	√	√	√	√	√

De ese modo, las 12 proyecciones (6 proyecciones en RCP 4.5 y las 6 respectivas en RCP 8.5) que se utilizan en este estudio son las siguientes:

- bcc-csm1-1 – RCP 4.5 – Anaemet, que en adelante será identificada por la sigla Q4A
- bcc-csm1-1 – RCP 8.5 – Anaemet, que en adelante será identificada por la sigla Q8A
- CNRM-CM5 – RCP 4.5 – Anaemet, que en adelante será identificada por la sigla F4A
- CNRM-CM5 – RCP 8.5 – Anaemet, que en adelante será identificada por la sigla F8A
- inmcm4 – RCP 4.5 – Anaemet, que en adelante será identificada por la sigla N4A



- inmcm4 – RCP 8.5 – Anaemet, que en adelante será identificada por la sigla N8A
- MIROC.ESM– RCP 4.5 – Anaemet, que en adelante será identificada por la sigla R4A
- MIROC.ESM– RCP 8.5 – Anaemet, que en adelante será identificada por la sigla R8A
- MPI.ESM.MR – RCP 4.5 – Anaemet, que en adelante será identificada por la sigla M4A
- MPI.ESM.MR – RCP 8.5 – Anaemet, que en adelante será identificada por la sigla M8A.
- MRI.CGCM3– RCP 4.5 – Anaemet, que en adelante será identificada por la sigla U4A
- MRI.CGCM3– RCP 8.5 – Anaemet, que en adelante será identificada por la sigla U8A

Así pues, son esas 12 proyecciones con las que se ha trabajado en esta encomienda y que son objeto de este informe (Tabla 2). Esto supone una mejora con lo estipulado en el pliego de prescripciones técnicas que contemplaba trabajar una única proyección climática. La sigla FA corresponderá en adelante a las proyecciones F4A y F8A, MA M4A y M8A, NA a N4A y N8A, QA a Q4A y Q8A, RA a R4A y R8A y UA a U4A y U8A.

Tabla 2. Variables, periodos y estaciones de cada proyección climática.

Sigla	Sigla	Escenario RCP	MCG	Método de Regionalización	Estaciones series
FA	F4A	4.5	CNRM-CM5	Análogos AEMET	PRE: 2321 TEM: 374
	F8A	8.5			
MA	M4A	4.5	MPI.ESM.MR		
	M8A	8.5			
NA	N4A	4.5	inmcm4		
	N8A	8.5			
QA	Q4A	4.5	bcc-csm1-1		
	Q8A	8.5			
RA	R4A	4.5	MIROC.ESM		
	R8A	8.5			
UA	U4A	4.5	MRI.CGCM3		
	U8A	8.5			

Estas proyecciones son fruto de regionalizar mediante análogos el resultado de forzar los MCG bcc-csm1-1, CNRM-CM5, inmcm4, MIROC.ESM, MPI.ESM.MR y MRI.CGCM3 con cada uno de los dos escenarios de emisiones RCP 4.5 y RCP 8.5. El escenario de emisiones RCP 8.5 es el más negativo de los 4 RCP que se han definido ya que supone los niveles más altos de CO<sub>2</sub> equivalente en la atmósfera para el siglo XXI, no sólo con relación a los demás escenarios RCP sino también con relación a los escenarios de emisiones usados en los anteriores informes del IPCC (Figura 3), dos de los cuales, SRES B2 y A2, fueron utilizados en el informe CEDEX (2010). El escenario de emisiones RCP 4.5 es más moderado y, a priori, presentará un menor impacto sobre el ciclo hidrológico que el RCP 8.5. El RCP 4.5 supone niveles de CO<sub>2</sub> equivalente similares a los del escenario SRES B2, salvo para finales del siglo XXI que son inferiores (Figura 3).

Según se ha comentado anteriormente, las proyecciones deben de reproducir razonablemente los valores observados de PRE y temperaturas para el conjunto de España y deben de recoger el margen de variación del conjunto de proyecciones para el conjunto de España. Según estos criterios, la variable climática más crítica es la PRE, por su fuerte relación hidrológica y por ser la variable más difícil de simular. Así, la proyección UA es la que da los mayores aumentos de PRE, mientras que RA da los mayores descensos de PRE, abarcando de ese modo los valores más diferentes (Figura 4 y Figura 5). El resto de las proyecciones seleccionadas dan cambios en la PRE media para España que están centrados respecto a los cambios que dan el conjunto de proyecciones.

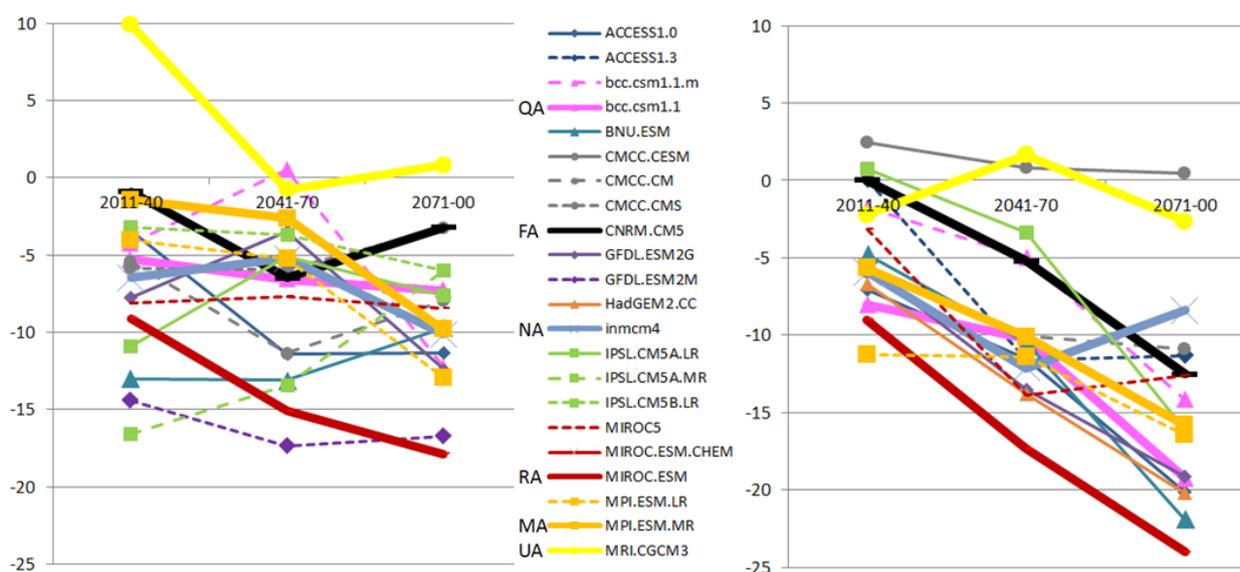


Figura 4. Estimación orientativa de cambio (%) de PRE anual media para España en tres periodos del siglo XXI respecto a 1961-2000 según las proyecciones climáticas regionalizadas por el método de análogos AEMET del RCP 4.5 (izda) y RCP 8.5 (dcha). En trazo grueso se indican las proyecciones que han sido seleccionadas para realizar este trabajo. La estimación es orientativa ya que los valores de cambio en ordenadas se han calculado como media de desviaciones anuales (datos tomados de AEMET 2016).



CEDEX

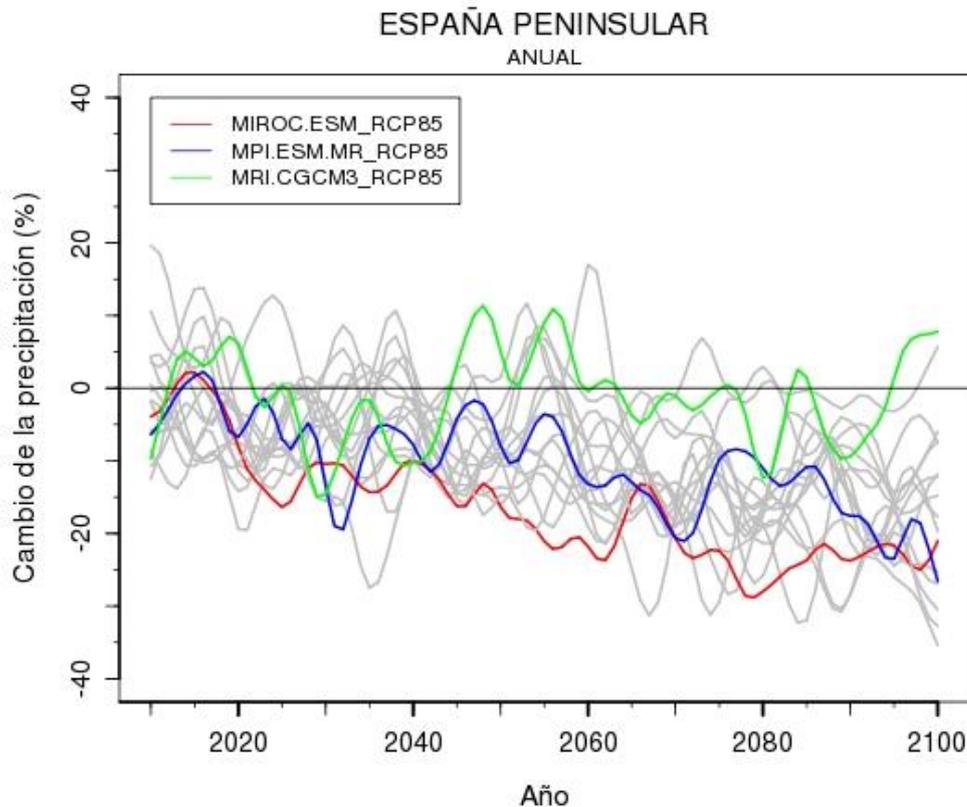


Figura 5. Estimación orientativa de cambio (%) de PRE media anual para España según las proyecciones climáticas regionalizadas por el método de análogos AEMET del RCP 8.5, donde se han identificado las extremas (UA, MRI.CGCM3, y RA, MIROC.ESM) y una de las centradas (MA, MPI.ESM.MR) (figura cedida por AEMET).

En la Figura 6 se muestran las principales características de los MCG cuyos resultados se han utilizado en este estudio. Todos esos MCG son del CMIP5 y han sido utilizados para la elaboración del AR5.

El MCG bcc-csm1-1, por sus siglas en inglés Beijing Climate Center-Climate System Model versión 1.1, es un modelo del sistema climático acoplado desarrollado por el Centro Climático de Pekín, China. El modelo es un sistema climático que acopla la atmósfera, el océano, la superficie terrestre y el hielo marino e incorpora el ciclo global del carbono y la cubierta vegetal (<http://forecast.bccesm.cma.gov.cn/web/channel-1.htm>).

El MCG CNRM-CM5, por sus siglas en inglés, Centre National de Recherches Meteorologiques – Coupled Model 5, es un modelo del sistema terrestre (ESM) diseñado por el Centro Nacional de Investigaciones Meteorológicas de Meteo France, de Francia. El modelo consiste en varios modelos existentes diseñados independientemente que se acoplan mediante el software OASIS. Los modelos que acopla son: atmósfera (ARPEGE), océano (NEMO), hielo marino (GELATO), superficie terrestres (SURFEX) y escorrentía (TRIP) (<http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article126&lang=en>).

(1) Model Name (2) Vintaje	(1) Institution (2) Main Reference(s)	Atmosphere (1) Component Name (2) Horizontal Grid (3) Number of Vert Levels (4) Grid Top (5) References	Aerosol (1) Component Name or type (2) References	Atmos Chemistry (1) Component Name (2) References	Land Surface (1) Component Name (2) References	Ocean (1) Component Name (2) Horizontal Resolution (3) Number of Vertical Levels (4) Top Level (5) z Co-ord (6) Top BC (7) References	Ocean Biogeo-chemistry (1) Component Name (2) References	Sea Ice (1) Component Name (2) References
(1) BCC-CSM1.1 (2) 2011	(1) Beijing Climate Center, China Meteorological Administration (2) Wu, 2012; Xin et al., 2012; Xin et al., 2013	(1) BCC-AGCM2.1 (2) T42 T42L26 (3) 26 (4) 2.917 hPa (5) (Wu et al., 2008b; Wu et al., 2010b, 2010a; Wu, 2012)	Prescribed	Not implemented	(1) BCC-AVMI1.0 (2) (Ji, 1995; Lu and Ji, 2006; Ji et al., 2008; Wu, 2012)	(1) MOM4-L40 (2) 1° with enhanced resolution in the meridional direction in the tropics (1/3° meridional resolution at the equator) tripolar (3) 40 (4) 25 m (5) z (6) linear split-explicit (7) (Griffies et al., 2005)	(1) Included (2) Based on the protocols from the Ocean Carbon Cycle Model Intercomparison Project-Phase 2 (OCMIP2, <a href="http://www.ipcl.jussieu.fr/OCMIP/phase2/">http://www.ipcl.jussieu.fr/OCMIP/phase2/</a> )	(1) GFDL Sea Ice Simulator (SIS) (2) (Winton, 2000)
(1) CNRM-CM5 (2) 2010	(1) Centre National de Recherches Meteorologiques and Centre Europeen de Recherche et Formation Avancees en Calcul Scientifique. (2) (Voldoire et al., 2013)	(1) ARPEGE-Climat (2) T127 (3) 31 (4) 10 hPa (5) (Dequé et al., 1994; Voldoire et al., 2013)	Prescribed	(1) (3-D linear ozone chemistry model) (2) (Canolle and Teysedre, 2007)	(1) SURFEX (Land and Ocean Surface) (2) (Voldoire et al., 2013)	(1) MEMO (2) 0.7° on average ORCA1 (3) 42 (4) 5 m (5) z-coordinate (6) linear filtered (7) (Maack, 2008)	(1) PISCES (2) (Aumont and Bopp, 2006; Seland et al., 2013)	(1) Gelato5 (Sea Ice) (2) (Salas-Melia, 2002; Voldoire et al., 2013)
(1) INM-CM4 (2) 2009	(1) Russian Institute for Numerical Mathematics (2) (Volodin et al., 2010)	(1) Included (2) 2 x 1.5° in longitude and latitude latitude-longitude (3) 21 (4) sigma = 0.01	Prescribed	Not implemented	(1) Included (2) (Aleksiev et al., 1998; Volodin and Lykosov, 1998)	(1) Included (2) 1 x 0.5° in longitude and latitude generalized spherical coordinates with poles displaced outside ocean (3) 40 (4) sigma = 0.0010426 (5) sigma (6) linear implicit (7) (Volodin et al., 2010; Zalesov et al., 2010)	(1) Included (2) (Volodin, 2007)	(1) Included (2) (Yakovlev, 2009)
(1) MIROC-ESM (2) 2010	(1) University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (2) (Watanabe et al., 2011)	(1) MIROC-AGCM (2) 2.8125 x 2.8125° T42 (3) 80 (4) 0.003 hPa (5) (Watanabe, 2008)	(1) SPRINTARS (2) (Takemura et al., 2005; Takemura et al., 2009)	Not implemented	(1) MATSIRO (2) (Takata et al., 2003)	(1) COCO3.4 (2) 1.4° (zonally) x 0.5-1.4° (meridionally) (3) 44 (4) 1.25 m (5) hybrid z-s (6) linear split-explicit (7) (Hasumi and Emori, 2004)	(1) NP2D-type (2) (Schmittner et al., 2005)	Included
(1) MPI-ESM-MR (2) 2009	(1) Max Planck Institute for Meteorology (2)	(1) ECHAM6 (2) approx. 1.8° T63 (3) 95 (4) 0.01 hPa (5) (Stevens et al., 2012)	Prescribed	Not implemented	(1) ISBACH (2) (Reick et al., 2013)	(1) MPOM (2) approx. 0.4° TP04 (3) 40 (4) 6 m (5) depth (6) linear implicit (7) (Jungbaeus et al., 2013)	(1) HAMOCC (2) (Maier-Reimer et al., 2005; Ilyina et al., 2013)	(1) Included (2) (Noz et al., 2013)
(1) MRI-CGCM3 (2) 2011	(1) Meteorological Research Institute (2) (Yukimoto et al., 2011; Yukimoto et al., 2012)	(1) MRI-AGCM3.2 (2) 320 x 160 TL159 (3) 48 (4) 0.01 hPa (5) (Yukimoto et al., 2011; Yukimoto et al., 2012)	(1) MASINGAR mk-2 (2) (Yukimoto et al., 2011; Yukimoto et al., 2012; Adachi et al., 2013)	Not implemented	(1) HAL (2) (Yukimoto et al., 2011; Yukimoto et al., 2012)	(1) MRI-COM3 (2) 1 x 0.5 (3) 50 + 1 Bottom Boundary Layer (4) 0 m (5) hybrid sigma-z (6) nonlinear split-explicit (7) (Tsujino et al., 2011; Yukimoto et al., 2011; Yukimoto et al., 2012)	Not implemented	(1) Included (MRI-COM3) (2) (Tsujino et al., 2011; Yukimoto et al., 2011; Yukimoto et al., 2012)

Figura 6. Principales características de los MCG utilizados en este estudio, encuadrados en el CMIP5 y usados en el AR5. Columna 1: nombre oficial y año de la primera publicación; Columna 2: institución y principales referencias; columnas siguientes: componentes del modelo con referencias y datos de resolución, límites, etc. (tomado de IPCC 2013).



El MCG inmcm4, por sus siglas en inglés, Institute of Numerical Mathematics Climate Model Version 4, es un modelo acoplado atmósfera-océano desarrollado por el Instituto de Matemáticas Numéricas de Moscú, Rusia (Volodin et al. 2010). El modelo consiste en dos modelos principales: el modelo atmosférico y el modelo oceánico. Usado para proyectar la sensibilidad climática a incrementos de CO<sub>2</sub>.

El MCG MIROC.ESM, por sus siglas en inglés Model for Interdisciplinary Research on Climate Institute – Earth System Model, es un modelo que acopla la atmósfera, el océano y la superficie terrestre, mediante el intercambio de energía, momento, agua y el CO<sub>2</sub>. Ha sido desarrollado por la Universidad de Tokio, el Instituto Nacional de Estudios Medioambientales de Japón y la Agencia de Ciencia Marina y Terrestre y de Tecnología de Japón (<http://www.geosci-model-dev.net/4/845/2011/gmd-4-845-2011.pdf>).

El MCG MPI-ESM-MR, por sus siglas en inglés Max Planck Institute – Earth System Model – Medium Resolution, es un modelo que acopla la atmósfera, el océano y la superficie terrestre, mediante el intercambio de energía, momento, agua y el CO<sub>2</sub>. Ha sido desarrollado por el Instituto Max Planck de Meteorología de Hamburgo (Alemania) (<http://www.mpimet.mpg.de/en/science/models/mpi-esm.html>). Es la evolución mejorada de los MCG ECHAM. El MCG ECHAM4 fue uno de los que se utilizaron en la anterior evaluación del impacto del cambio climático sobre los RRHH en España (CEDEX 2010). Las principales mejoras del MCG MPI-ESM-MR respecto a los ECHAM consisten en la incorporación del ciclo del carbono, la mejor representación del albedo, de aerosoles, de la transferencia radiativa de onda corta, de la atmósfera media y de la dinámica de la vegetación.

El MCG MRI.CGCM3, por sus siglas en inglés Meteorological Research Institute (MRI) – Coupled General Circulation Model versión 3, es un modelo acoplado atmósfera – océano, mediante el intercambio de energía entre ambos. Ha sido desarrollado por el Instituto de Investigación Meteorológica de Japón ([http://www.mri-jma.go.jp/Publish/Technical/DATA/VOL\\_64/tec\\_rep\\_mri\\_64.pdf](http://www.mri-jma.go.jp/Publish/Technical/DATA/VOL_64/tec_rep_mri_64.pdf)).

Los datos de partida que caracterizan cada una de las proyecciones climáticas consisten en 6.138 ficheros en formato ASCII. Cada fichero contiene una serie temporal con los valores de PRE diaria, de TMN diaria o de TMX diaria que han sido simulados en la ubicación de una estación meteorológica de AEMET. Cada fichero cubre el periodo que abarca desde el 1 de enero de 1961 al 31 de diciembre de 2000, denominado periodo de control (PC) o un periodo futuro (PF) que abarca desde el 1 de enero de 2006 al 31 de diciembre de 2100 (Tabla 3). Lógicamente, los valores del PC son los mismos para las proyecciones del RCP 4.5 y RCP 8.5.



Tabla 3. Variables, periodos y estaciones de cada proyección climática.

<b>Variable</b>	<b>Periodo</b>	<b>Nº Estaciones (series)</b>
PRE	1-1-1961 al 31-12-2000	2321
PRE	1-1-2006 al 31-12-2100	2321
TMX	1-1-1961 al 31-12-2000	374
TMX	1-1-2006 al 31-12-2100	374
TMN	1-1-1961 al 31-12-2000	374
TMN	1-1-2006 al 31-12-2100	374



**CEDEX**



### 3 ANTECEDENTES

Los antecedentes de estudios del impacto sobre RRHH en España son muy variados, tanto en la metodología, como en los supuestos climáticos de partida, en los periodos analizados y en el ámbito territorial estudiado (escala de trabajo), por lo que los resultados son muy dispares y de difícil comparación.

Los estudios de impacto hidrológico del cambio climático de ámbito global o europeo sintetizados en los informes del IPCC (Kundzewicz et al. 2007, Bates et al. 2008, AEMA 2008, 2017, Jiménez Cisneros et al. 2104), dan para el entorno geográfico de España una estimación futura pesimista. Hay una gran dispersión de resultados según los estudios y una gran variabilidad regional y estacional; sin embargo, hay consenso en pronosticar un gradiente norte-sur para Europa, con aumento de escorrentía (ESC) en el norte y descenso en el sur. Los patrones de cambio para España son muy diversos, siendo las más comunes las polaridades norte-sur, con mayores reducciones hacia el sur. Así, el último informe del IPCC muestra un mapa donde se pronostican reducciones para España entre el 10% (norte) y el 50% (sur), si bien también hay zonas con incremento de RRHH hacia el este peninsular (Jiménez Cisneros et al. 2014). Otros resultados anteriores pronostican patrones de reducciones diferentes, condicionados en gran parte por los modelos utilizados (Lehner et al. 2005, Arnell 2003).

Los estudios sobre el impacto de RRHH en España de ámbito nacional, comienzan a partir del momento en que el Instituto Nacional de Meteorología (ahora AEMET) publica los resultados del modelo climático global HadCM2, de 1990 (INM 1995), forzado con el escenario de emisiones de GEI IS92a. Con los resultados climáticos de esa única proyección, Ayala (1996) estima el impacto para el horizonte de año 2060 con relación al periodo 1940-85 mediante un modelo hidrológico agregado de paso anual. El impacto para el año 2060 se cifraba en una reducción de RRHH en España de un 17%, como consecuencia de un incremento de TEM anual de 2,5°C y un descenso de PRE anual de 8% para ese horizonte temporal. El descenso de ESC pronosticado era más acusado hacia el sur de España, llegando al 34% en el Guadalquivir.

A finales de los 90, el CEDEX lleva a cabo unas estimaciones del impacto que causaría el cambio climático en los RRHH para los trabajos del Libro Blanco del Agua en España (LBAE) (Cabezas et al. 1999, MIMAM 2000a, 2000b). Se consideran dos escenarios climáticos para el horizonte 2030. El escenario 1 implicaría un aumento de 1°C en la TEM anual, mientras que en el escenario 2 habría además una disminución de un 5% en la PRE anual. Se utilizó el modelo hidrológico SIMPA (Sistema Integrado para la Modelización Precipitación Aportación) para el cálculo de los RRHH en el periodo de control (1940-95) y el modelo hidrológico simplificado de Schreiber-Budyko (Budyko 1974) para la simulación en los dos escenarios de impacto. Se concluía que se estimaban descensos de aportación (APN) para España que oscilaban entre un 5% para el escenario 1, hasta el 14% para el escenario 2. La disminución sería más acusada en el SE peninsular, la cuenca del Guadiana, el valle del Ebro y la España insular. Esta disminución vendría acompañada con una mayor variabilidad anual, interanual y estacional.



Los resultados para el escenario 1 son los que posteriormente se incluyen en la instrucción de planificación hidrológica (IPH) (MARM 2008), con el objeto de que se aplicaran de forma provisional en los planes hidrológicos para el horizonte del año 2027, hasta el momento en que se actualizaran esas cifras de impacto. Los mismos escenarios del LBAE se utilizaron en posteriores estudios de sensibilidad para calcular los RRHH disponibles en España (Garrote et al. 1999, Rodríguez 2004).

Posteriormente, se lleva a cabo un estudio del impacto sobre la ESC media en España para la década 2050-60 (Cabezas 2004). Utiliza las proyecciones del proyecto europeo ACACIA y, además, cinco MCGAO y seis modelos hidrológicos. Se concluye que la ESC para el conjunto de España disminuiría en un 9%, tomando la media de todas las simulaciones de los modelos para el escenario SRES A2, y un 6% para el SRES A1.

Garrote et al. (2007) analizaron los valores diarios de ESC aportados por el proyecto PRUDENCE para la España peninsular. La comparación entre los valores mensuales obtenidos para el periodo de control lleva a concluir que la capacidad de la mayor parte de los modelos regionales para reproducir el valor medio de la ESC en España es bastante pobre ya que dan series simuladas de ESC muy inferiores a las observadas. Los resultados pronostican una reducción media de ESC del 35% para el periodo 2071-2100 según las 12 proyecciones del SRES A2, siendo el impacto mayor en la mitad meridional peninsular, con descensos simulados superiores al 50% en algunas zonas. La media de las 4 proyecciones del SRES B2 da un aumento de ESC de 15%, si bien dos de ellas dan una reducción y las otras dos un aumento.

Un hito importante en los estudios de impacto del cambio climático en España lo constituye la publicación de los escenarios climáticos regionalizados (o proyecciones) para España (AEMET, 2008), llevado a cabo con los resultados de MCG del TAR y del proyecto PRUDENCE y que fueron puestas a disposición del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático para su utilización en estudios de impacto en diferentes sectores. Se pronosticaba un aumento de las TMX y TMN a lo largo del siglo XXI, más acusado en el interior de la Península, para el SRES A2 y hacia final de siglo, y un cambio menos claro de PRE, con una amplia variación de resultados según proyecciones y zonas, si bien se detectaba un descenso de lluvias medias hacia el sur peninsular y más acusado conforme avanzara el siglo XXI.

Doce de esas proyecciones de AEMET fueron los valores de partida del estudio del CEDEX (2010). Éste es el principal antecedente del presente estudio. Se simuló con el modelo hidrológico cuasi-distribuido de SIMPA en cada una de las celdas de 1000 x 1000 m en las que se reticuló España, mientras que la aportación hídrica se acumuló en celdas de 500 x 500 m. Los resultados indicaban un sesgo notable en la PRE de las proyecciones de partida y una gran disparidad de resultados entre las proyecciones. Promediando los resultados de las proyecciones, se estimaba una disminución media de la ESC para el conjunto de España del -8% para el periodo 2011-2040, -11% (SRES B2) y -16% (SRES A2) para el 2041-2070 y -14% (SRES B2) y -28% (SRES A2) para el 2071-2100, siendo las disminuciones más acusadas hacia el SO de España y Canarias. Los descensos serían porcentualmente mayores en invierno que en verano.

Fernández (2002) realiza un estudio del impacto del cambio climático en 19 pequeñas cuencas españolas repartidas por el territorio de España. Considera el efecto de una duplicación del CO<sub>2</sub> para el horizonte 2050, utilizando para ello el modelo climático



regional PROMES y el modelo hidrológico SIMPA. La ESC estimada aumenta en términos anuales en 11 cuencas entre el 9 y el 74%, disminuye en otras 4 cuencas entre el 11% y 41% y no cambia en el resto.

Se han elaborado además diferentes estudios para evaluar el impacto hidrológico del cambio climático de ámbito regional o local.

En la DH del Júcar, Hernández (2007) hace un estudio de sensibilidad de los RRHH de la cuenca del Júcar a distintas estimaciones climáticas. Utiliza tres proyecciones: la primera comprende los periodos 2011-40, 2041-70 y 2071-2100 simulados con el MCG HadCM2, forzado con el escenario de emisiones Is92a y regionalizado por análogos INM; la segunda y tercera para el periodo 2071-2100 con el MCG HadCM3, forzado con los SRES A2 y B2, respectivamente, y regionalizado con el MCR PROMES. Utiliza el modelo hidrológico PATRICAL. Sus resultados dan las siguientes variaciones de RRHH: -13% para el periodo 2011-40 (una proyección), -18% para 2041-70 (una proyección) y -28% (HadCM2), -34% (B2) y -43% (A2) para 2071-2100. Posteriormente, y también para el Júcar, Chirivella (2010) analiza el impacto del cambio climático sobre los RRHH para el periodo 2011-40. Parte de 11 proyecciones regionalizadas según AEMET (2008) y de una proyección dinámica. Aplica el modelo hidrológico PATRICAL y efectúa la corrección del sesgo. Obtiene una alta disparidad de resultados con desviaciones de ESC que oscilan entre -13% y +18% para el total del periodo 2011-40, siendo su media de -2% (proyecciones AEMET) y -21% (proyección dinámica). Recientemente, Marcos-García y Pulido-Velázquez (2017) estudian el impacto en el Sistema de Explotación Júcar con 14 combinaciones de modelos climáticos, los RCP 4.5 y 8.5 y 3 modelos hidrológicos. Estiman reducciones de APN respecto 1940-2009 del 20% para 2011-2040 y del 29% (RCP 4.5) y 36% (RCP 8.5) para 2040-70. Resaltan la dispersión de resultados y la alta incertidumbre y la variabilidad espacial de los cambios previstos, con diferencias entre la zonas de cabecera y las partes bajas de la cuenca.

Se ha publicado recientemente el Tercer informe sobre el cambio climático en Cataluña. Calbó et al. (2016) utilizan un conjunto de múltiples proyecciones e indican que el cambio de PRE respecto a 1971-2000 es poco significativo para el periodo 2012-2021 y de un 7% para 2031-2050. Mas-Pla et al. (2016) utilizan las proyecciones anteriores para evaluar los impactos sobre RRHH mediante un modelo de balance simplificado. Estiman una reducción media de RRHH para Cataluña del 11% para el horizonte 2021 y del 18% para 2051, siendo menor la reducción en el Pirineo. Otros estudios previos se han realizado en cuencas más pequeñas de ese ámbito (Ortuño et al. 2009, Delgado et al. 2010, Manzano 2010, Martínez 2010, Candela et al. 2012, Pascual et al. 2014).

En las cuencas del Tajo y del Guadiana, Kilsby et al. (2007) utilizaron dos modelos climáticos y un modelo hidrológico distribuido de paso mensual y estimaron disminuciones del recurso medio anual en el periodo 2071-2100 respecto al de control 1961-1990 del 49% y 20% en el Tajo y del 26% y 21% en el Guadiana (para cada uno de los dos modelos climáticos). Indican además que los descensos se darían en todas las estaciones del año, siendo los menos acusados porcentualmente en verano.

Un estudio del impacto del cambio climático en los RRHH de Extremadura se realizó aplicando el método de la estimación del balance hídrico directo a unas proyecciones



derivadas de un MCG y los SRES A2 y B2 (Corzo et al. 2013). Concluyen que hay una gran variabilidad espacial de resultados si bien se estima una reducción de RRHH en 2011-40 y 2041-70 respecto a 1961-90.

Para el territorio de Andalucía, se evaluó el impacto de 4 hipótesis climáticas para el año 2050 mediante un balance hídrico (Junta de Andalucía 2012). Hay bastante variabilidad territorial con reducciones de RRHH que oscilan del 20% al 50% según el escenario SRES A2 y del 0% al 30% según el B2, siendo mayor los descensos hacia Almería.

Se han llevado a cabo estudios en cuencas pequeñas del Ebro y Navarra (Samper y Álvarez 2005, Martínez 2010, Zambrano et al. 2011, Bovolo et al. 2011, Quiroga et al. 2011), donde se aplicaron diferentes metodologías y, en ocasiones, con un número escaso de proyecciones climáticas. Se obtuvieron resultados que estimaban en general descensos de RRHH pero con amplios márgenes de variación allí donde se trabajó con varias proyecciones. Así por ejemplo, la Oficina de Planificación Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Ebro ha dirigido un trabajo de evaluación de impacto en numerosas subcuencas aplicando los resultados del MCG CGCM3 al modelo hidrológico BALAN implementado sobre un SIG (Sámper y Álvarez 2005). El impacto durante los tres periodos del siglo XXI: 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 (respecto a 1970-2000) se cifraba, respectivamente, en los siguientes cambios medios de ESC: -12%, -21% y -19%. Los descensos serían superiores en la vertiente derecha del Ebro que en la vertiente pirenaica.

Menos frecuentes son los estudios centrados en los impactos futuros en otros recursos del ciclo hidrológico, tales como la cobertura nival (López-Moreno et al. 2009) o las aguas subterráneas (Pernía y Fornés 2008, Ortuño et al. 2009, Molina et al. 2013).



## 4 METODOLOGÍA

La metodología del trabajo viene esquematizada en la Figura 7 y la Figura 8. Hay 4 etapas en la metodología, identificadas con fondos de colores en dichas figuras:

- Preparación de los mapas mensuales de PRE y evapotranspiración potencial (ETP) que alimentan el modelo hidrológico.
- Modelización hidrológica para generar mapas mensuales de RRHH.
- Evaluación del impacto sobre los RRHH.
- Evaluación del impacto sobre las sequías.

El impacto se ha evaluado en 3 periodos futuros de 30 años hidrológicos, denominados en lo sucesivo periodos de impacto (PI), con respecto al periodo de control (PC) 1961-2000 (octubre de 1961 a septiembre de 2000<sup>1</sup>). Los 3 PI son los siguientes:

- PI1: 2010-2040 (octubre de 2010 a septiembre de 2040).
- PI2: 2040-2070 (octubre de 2040 a septiembre de 2070).
- PI3: 2070-2100 (octubre de 2070 a septiembre de 2100).

La consideración de periodos de 30 años como mínimo viene motivada por el hecho de que el tiempo meteorológico es cambiante. El clima es el conjunto de características meteorológicas de una zona y tiene una alta variabilidad natural. Un año concreto puede ser inusualmente cálido o frío, o seco o húmedo, y por lo tanto no sería un punto de referencia para medir el clima. Por ello, la determinación del clima precisa conocer la variación meteorológica durante un periodo suficientemente dilatado, no inferior a 30 años, tal como indica la Organización Meteorológica Mundial (Trewin 2007).

La extracción del PF en esos 3 PI se ha realizado teniendo en cuenta la información de los datos de partida y con objeto de que fueran los mismos que se utilizaron en el anterior estudio (CEDEX 2010) para poder comparar los resultados. Se ha adoptado un periodo de control lo más amplio posible, abarcando al máximo los valores disponibles, para reflejar mejor las características climáticas de referencia.

En consecuencia, el impacto evaluado en este estudio se ha expresado como cambios de propiedades estadísticas medias de periodos futuros de 30 años con relación a un periodo de control de 39 años.

---

<sup>1</sup> En lo sucesivo en este informe, los periodos corresponden a años hidrológicos y se indican con el primer y último año natural, por lo que 1961-2000 abarcaría desde el 1 de octubre de 1960 al 30 de septiembre de 2000, lo que equivaldría a la notación habitual 1960/61-1999/00. Como excepción, el PC utilizado para el contraste se refiere a años naturales y abarca desde el 1 de enero de 1960 al 31 de diciembre de 2000.

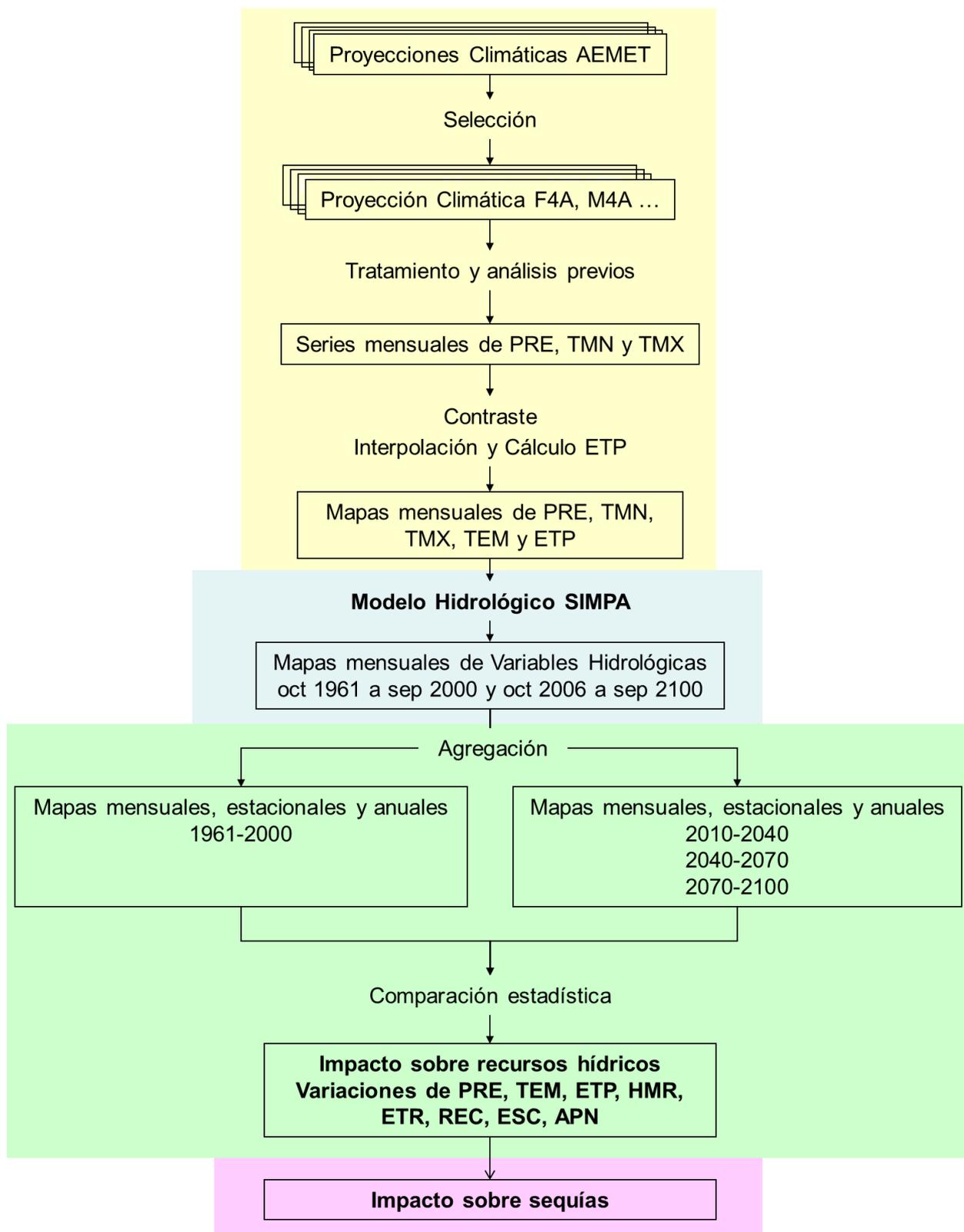


Figura 7. Metodología del trabajo. Ver capítulo Abreviaciones.

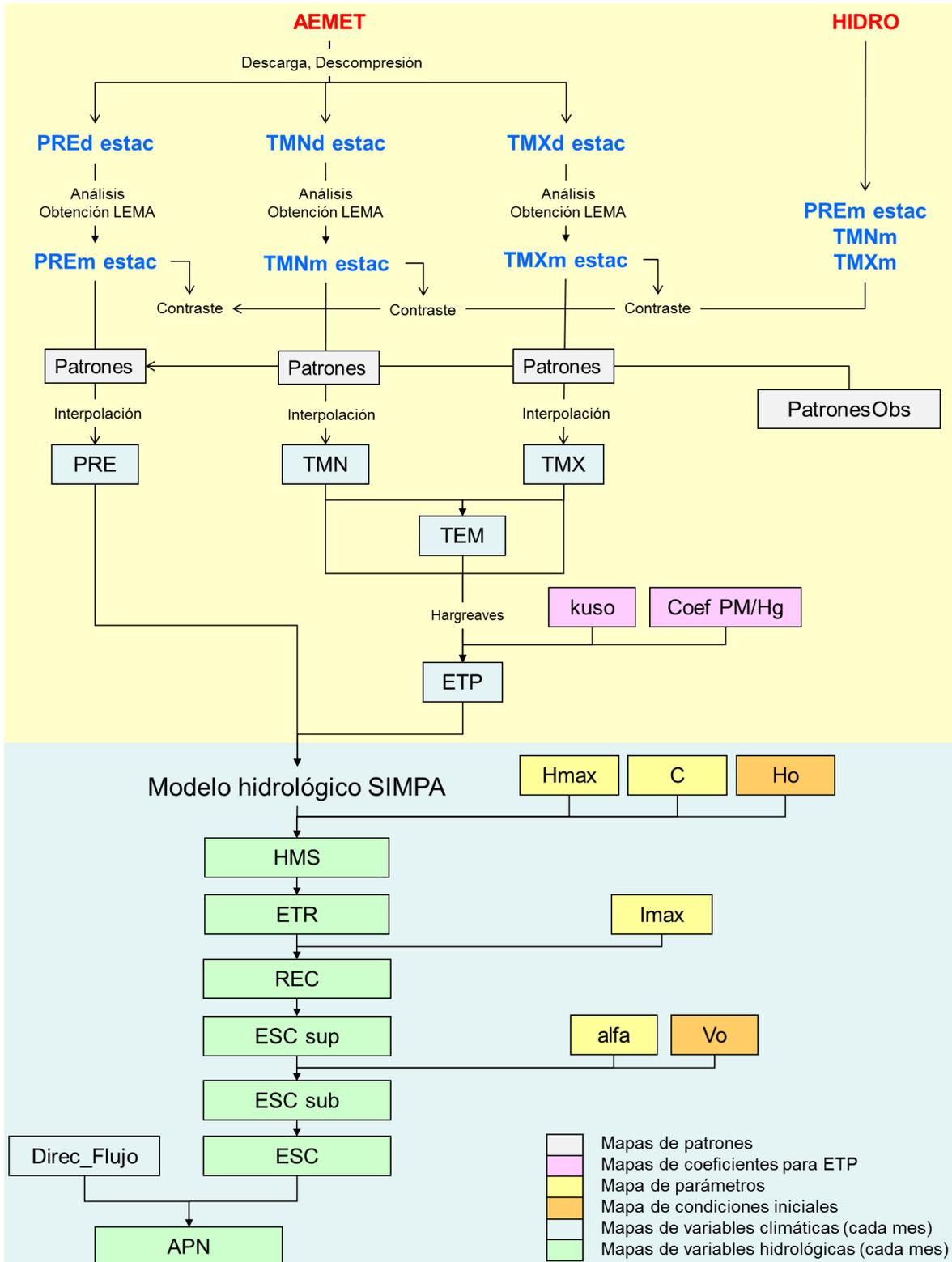


Figura 8. Metodología del trabajo para la obtención de los diferentes mapas mensuales del impacto sobre RRHH. En letra azul se indican los ficheros de texto con valores en estaciones, diarios (d) o los LEMA mensuales (m). Ver capítulo Abreviaciones.



El trabajo parte de cada proyección climática elegida. A partir de ahí, los pasos seguidos se presentan de manera resumida a continuación. La metodología se desarrolla con mayor detalle en los capítulos posteriores.

### 1. Preparación de los mapas mensuales de PRE y ETP

- Tratamiento y análisis de la proyección.
  - Descarga desde la página web de AEMET de todos los ficheros de la proyección elegida.
  - Descompresión de los ficheros y carga en la base de datos.
  - Análisis de los valores diarios de PRE, TMN y TMX proyectados en estaciones.
- Obtención de ficheros en formato LEMA con valores mensuales de PRE, TMN y TMX proyectados en estaciones.
- Contraste de la proyección en el PC.
  - Extracción de datos en formato LEMA de la base de datos HIDRO del Centro de Estudios Hidrográficos (CEH) (Quintas 1996).
  - Selección de las estaciones comunes donde hay valores mensuales y datos observados.
  - Contraste de las series mensuales de PRE, TMN y TMX en cada estación meteorológica, en cada DH y en España.
- Obtención de mapas de las variables climáticas.
  - Elaboración de patrones para la proyección elegida.
  - Interpolación mediante patrones. Obtención de mapas de las variables PRE, TMN y TMX para cada mes con valores simulados.
  - Obtención de mapas de temperaturas medias (TEM) a partir de los mapas de TMN y TMX.
  - Cálculo de la ETP.

### 2. Modelización hidrológica.

- Simulación del ciclo hidrológico en régimen natural mediante el modelo hidrológico SIMPA. Obtención de mapas mensuales para cada variable hidrológica. El detalle de la metodología está en el apartado 7.1 de este informe.
- Acumulación de la ESC según las direcciones de flujo para obtener las APN en la red de drenaje.

### 3. Evaluación del impacto sobre los RRHH.

- Agregación de mapas de cada variable hidroclimática. Se obtuvieron:
  - mapas anuales (suma de 12 mensuales).
  - mapas trimestrales para cada año (suma de 3 mensuales).



- mapas anuales para todo un periodo: para el PC y cada PI (promedio de los 39 o 30 mapas anuales).
- mapas mensuales para todo un periodo (media de los 39 o 30 mapas mensuales de cada año).
- mapas trimestrales para todo un periodo (media de los 39 o 30 mapas trimestrales de cada año).
- Elaboración de mapas de variación o cambio ( $\Delta$ ) de cada variable hidrológica para cada PI respecto al PC y para cada una de las 12 proyecciones analizadas en este trabajo. Se obtuvieron básicamente dos tipos de mapas de impacto:
  - Mapas de  $\Delta(\%)$  de valores anuales, elaborados como diferencia porcentual entre los mapas anuales para todo PI respecto a los mapas anuales para todo el PC.
  - Mapas de  $\Delta(\%)$  de estacionalidad, elaborados como diferencia porcentual entre los mapas de cada estación climática (trimestrales) para todo PI respecto a los mapas de cada estación para todo el PC. Estación climática: el otoño abarca octubre, noviembre y diciembre y así sucesivamente.
- Comparación estadística. Los resultados que resumen el impacto son tablas y gráficos que muestran el cambio en las propiedades estadísticas de cada variable hidrológica de interés en cada uno de los tres PI con respecto al PC para cada proyección y cada ámbito territorial, tanto de España como de las Demarcaciones Hidrográficas (DDHH). La propiedad estadística cuyos cambios se han analizado exhaustivamente es la media anual, si bien también se han analizado los cambios en su variabilidad.
- Elaboración de gráficos de tendencias de evolución anual para cada ámbito territorial y cada proyección, que muestran las variaciones año a año de los valores de las variables hidroclimáticas del periodo 2010-2100 con relación a los valores estadísticos medios del PC.
- Elaboración de gráficos de cambios en el ciclo anual (distribución mensual o estacional) de las variables hidroclimáticas para cada uno de los PI con relación al PC según cada proyección.
- Asignación de un único valor de impacto al conjunto de las proyecciones. Se ha calculado promediando los porcentajes de cambio dados por las seis proyecciones de cada RCP<sup>1</sup>. Esta media es más representativa cuanto mayor es el territorio y mayor el valor de la variable, por lo que sólo se ha obtenido así para el conjunto de España o de cada DDHH. Sin embargo, la media de porcentajes es una medida que pierde validez en zonas pequeñas y con valores bajos, susceptibles de fuertes diferencias porcentuales en los resultados

---

<sup>1</sup> No se ha calculado el porcentaje a partir de la media de los valores absolutos de las proyecciones debido a las diferencias entre los valores absolutos del PC de las proyecciones con el de los datos observados, síntoma del sesgo de los valores de partida y por lo tanto de la incertidumbre.



aportados por distintas proyecciones. Es por ello que los mapas promedio, con porcentajes de cambio en cada celda de 1 km de lado, se han obtenido como cambio de las sumas de las medias de los valores absolutos de las 6 proyecciones durante cada PI respecto a las del PC.

4. Evaluación del impacto sobre el régimen de sequías. El impacto se ha reflejado como cambio en el periodo de retorno de las sequías de 2 y 5 años de duración susceptibles de ocurrir en el conjunto de España y en cada DH en cada uno de los PI con respecto al PC según cada una de las proyecciones. El detalle de la metodología está en el apartado 9.1 de este informe. De manera breve, los pasos seguidos han sido los siguientes:

- Generación de series sintéticas de ESC mensuales mediante modelos ARIMA.
- Identificación de sequías en las series sintéticas.
- Ajuste de la función de distribución de probabilidad bivariada (duración y déficit) a las series de sequías.

Para llevar a cabo este trabajo se han utilizado principalmente dos paquetes informáticos de libre difusión: el programa estadístico R (R Development Core Team 2015) y el sistema de información geográfica GRASS (GRASS Development Team 2015).

Las tendencias de las series temporales, tanto para el contraste como para la caracterización del impacto se han analizado mediante el test de Mann-Kendall (Kendall 1975). El test se ha efectuado en R con el comando MannKendall del paquete estadístico denominado KENDALL, que permite obtener el p-valor de la muestra. Este comando sólo permite la aplicación bilateral; no obstante, se ha aplicado unilateralmente aceptando tendencias crecientes cuando  $p\text{-valor} > 0.10$  y  $z > 0$ , lo que correspondería a un p-valor de 0.05 si se aplicara unilateralmente (más detalle de su aplicación se puede obtener en CEDEX 2010). Además, también se ha contemplado la pendiente de la serie original, obtenida mediante regresión lineal por mínimos cuadrados. Al ser un test paramétrico, los resultados de su aplicación no difieren si se aplican a series de valores absolutos de un PI o a series de cambios para el PI respecto a un valor medio del PC puesto que el test opera con la posición en las series ordenadas y no con valores absolutos.

Los mapas se han generado con GRASS, un SIG gratuito de libre difusión diseñado para trabajar con mapas en formato ráster. En este trabajo se han hecho unos 300000 mapas de resolución 1 km, salvo los mapas de APN cuyas celdas son de 0.5 km de lado. De ese modo, capa mapa resultado contiene aproximadamente unas 500000 celdas de 1 km<sup>2</sup> o unas 2000000 celdas de 0.25 km<sup>2</sup>.

## 5 ANÁLISIS Y CONTRASTE DE LAS PROYECCIONES CLIMÁTICAS

### 5.1 TRATAMIENTO Y ANÁLISIS

Los datos de partida que caracterizan cada proyección climática consisten en 6138 ficheros en formato ASCII que se han descargado de la página web de AEMET<sup>1</sup>. Los valores de PRE están expresados en décimas de mm/día y los de TMN y TMX en décimas de °C. Se han simulado valores acordes con el número de días de cada mes, si bien hay algunos desajustes, como que los febreros tienen 28 valores (uno por día), incluso en años bisiestos (proyección NA). La proyección FA simula en todos los días, incluyendo los 29 de febreros. Los valores del PC permiten valorar el grado de ajuste de la simulación climática a los datos observados; los de los PI, evaluar el impacto del cambio climático por comparación de los valores simulados del PI con los valores simulados del PC.

La distribución espacial de las estaciones donde se ha simulado se muestra en la Figura 9. La Tabla 4 muestra la densidad de series simuladas disponibles de PRE y TMN o TMX en cada una de las DDHH donde se elaboran planes hidrológicos de cuenca. La densidad se mide dividiendo la superficie de un ámbito (S) entre el número de estaciones ( $N^{\circ}$ ), dando el  $n^{\circ}$  de km<sup>2</sup> por estación ( $S/N^{\circ}$ ).

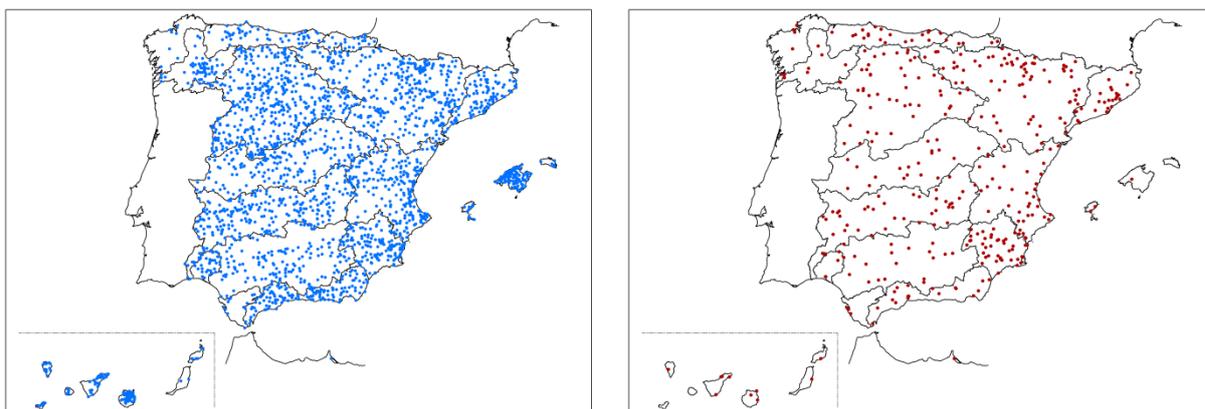


Figura 9. Localización de las 2321 y 374 estaciones donde se han simulado respectivamente la PRE (izda) y las TMN y TMX (dcha) según cada proyección climática.

<sup>1</sup> Así por ejemplo, el fichero tmax.9041.MPI-ESM-MR.RCP 85.2006-2100.ANALOGOS.dat contiene la TMX simulada en la estación meteorológica con código AEMET 9041 para todos los días comprendidos entre el 1 de enero de 2006 y el 31 de diciembre de 2100, según la proyección M8A (el MCG MPI-ESM-MR, forzados con el RCP 8.5 y regionalizado por análogos por AEMET).



Tabla 4. Distribución y densidad por ámbito de estaciones meteorológicas donde se han simulado las PRE y las temperaturas (TMN y TMX).

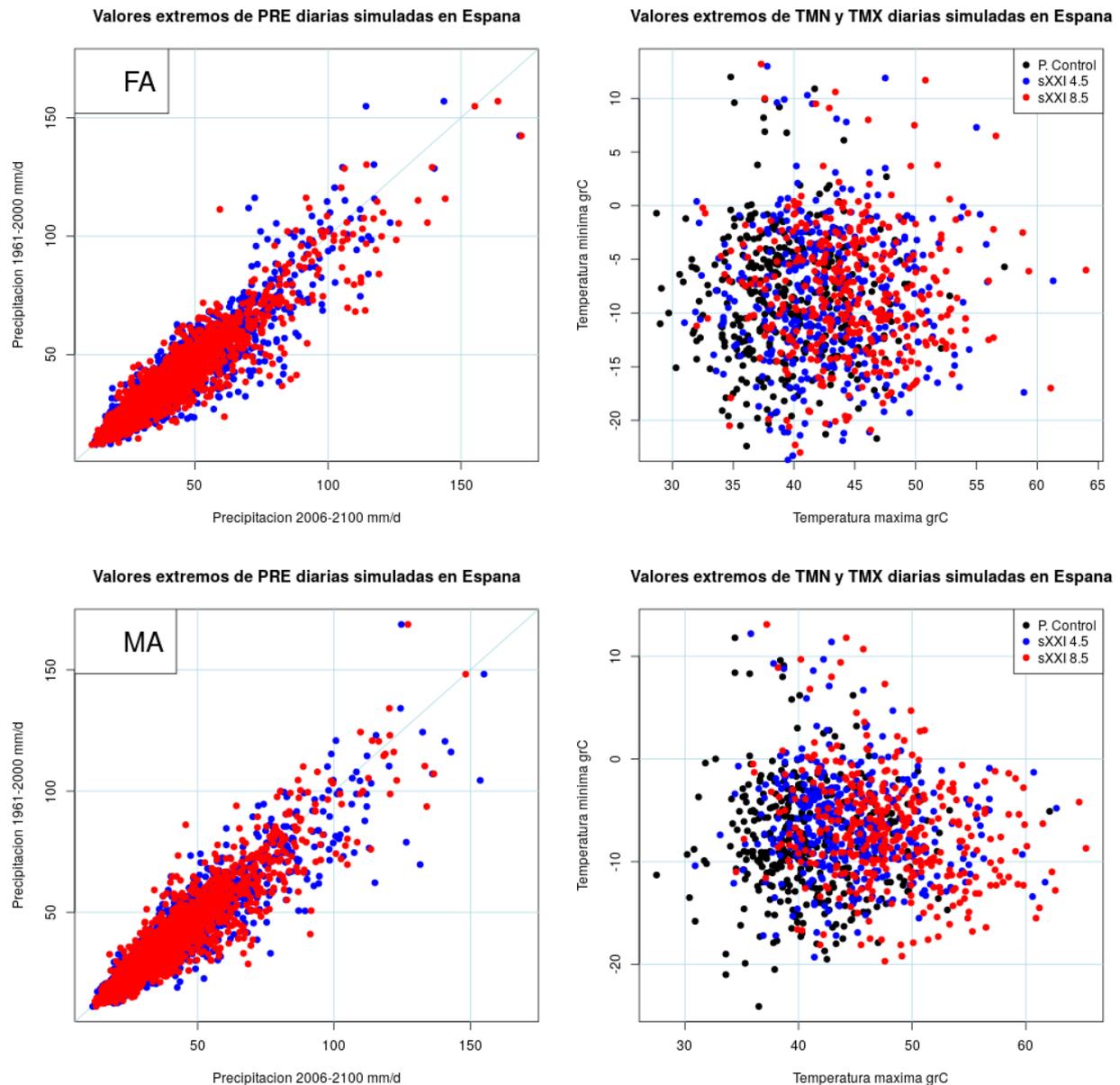
DH	S (km <sup>2</sup> ) <sup>1</sup>	Nº PRE	S/Nº PRE	Nº TMN/X	S/Nº TMN/X
<b>España</b>	506159	2321	218	374	1353
<b>Galicia Costa</b>	13072	8	1634	6	2179
<b>Miño-Sil</b>	17616	54	326	6	2936
<b>Cantábrico Occidental</b>	17421	52	335	19	917
<b>Cantábrico Oriental</b>	5796	21	276	5	1159
<b>Duero</b>	78889	429	183	49	1610
<b>Tajo</b>	55781	176	317	19	2936
<b>Guadiana</b>	55512	247	225	38	1461
<b>Tinto, Odiel y Piedras</b>	4755	32	149	6	793
<b>Guadalquivir</b>	57182	137	417	18	3177
<b>Guadalete y Barbate</b>	5954	11	541	3	1985
<b>Cuencas Mediterráneas Andaluzas</b>	17941	140	128	18	997
<b>Segura</b>	19022	130	146	41	464
<b>Júcar</b>	42725	214	200	37	1155
<b>Ebro</b>	85556	338	253	70	1222
<b>Cuencas Internas de Cataluña</b>	16493	100	165	25	660
<b>Islas Baleares</b>	5019	119	42	3	1673
<b>Islas Canarias</b>	4987	112	45	10	499
<b>Gran Canaria</b>	1554	52	30	3	518
<b>Fuerteventura</b>	1651	2	826	1	1651
<b>Lanzarote</b>	843	6	141	1	843
<b>Tenerife</b>	2034	28	73	4	509
<b>La Palma</b>	704	13	54	1	704
<b>Gomera</b>	370	5	74	0	
<b>Hierro</b>	269	6	45	0	
<b>Ceuta</b>	22	1	22	1	22
<b>Melilla</b>	14	0		0	

La densidad media en España es de 218 km<sup>2</sup>/serie de PRE y 1353 km<sup>2</sup>/serie de TMN o TMX. Sin embargo, este índice se eleva hasta los 1634 km<sup>2</sup>/serie de PRE en Galicia Costa y hasta 3177 km<sup>2</sup>/serie de TMN o TMX en Guadalquivir. Es de destacar también el reducido número de series de TMN y TMX existentes en las DDHH Islas Baleares, Guadalete y Barbate o las de las Islas Canarias.

Con objeto de detectar posibles anomalías en las series diarias de partida, se han elaborado dos tipos de gráficos para cada una de las proyecciones. Primero, se han elaborado diagramas de dispersión de los valores extremos diarios de PRE y de TMN y TMX simulados que están en cada serie del PC y del PF (tanto RCP 4.5 como RCP 8.5); los valores extremos analizados son el más alto de PRE y TMX y el más bajo de TMN, tanto para cada serie del PC como del PF. Segundo, se han elaborado diagramas de cajas de algunas series representativas tanto para el PC como para el PF.

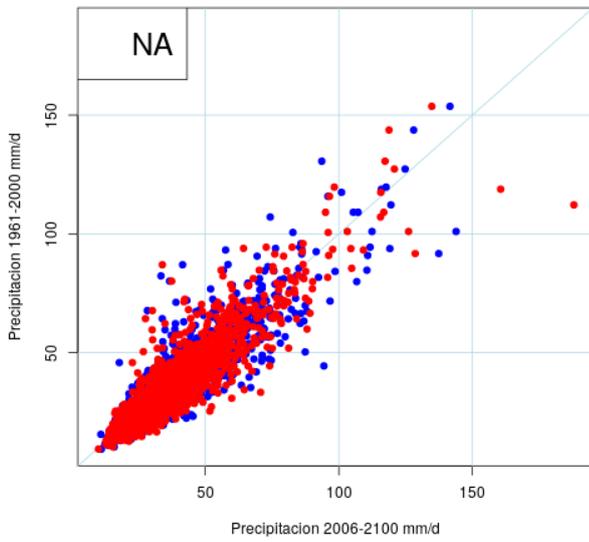
<sup>1</sup> La superficie (S) se ha obtenido a partir del mapa ráster de DDHH a escala 1:100000.

En los diagramas de dispersión se observa que las PRE extremas de ambos RCP se alinean a lo largo de la bisectriz del diagrama, si bien hay una ligera tendencia a situarse por debajo de la misma (Figura 10), lo que podría sugerir un incremento de PRE máximas en el PF. Los valores más extremos (200 mm/d) los dan las proyecciones QA en el RCP 4.5 y RA en el RCP 8.5. No se detectan valores simulados anómalos, si bien son menores que los máximos observados.

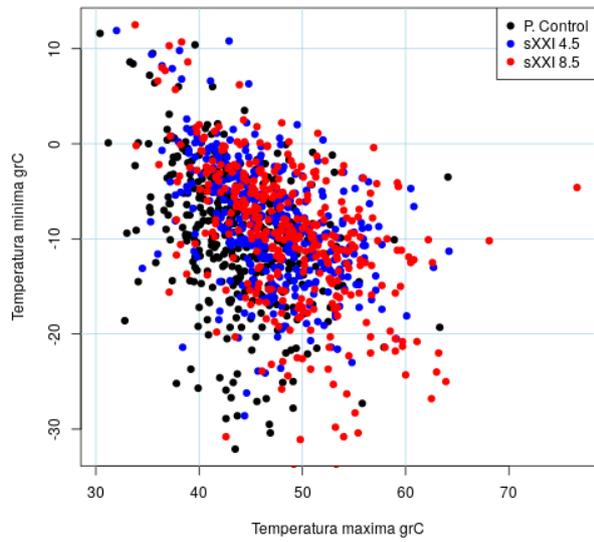




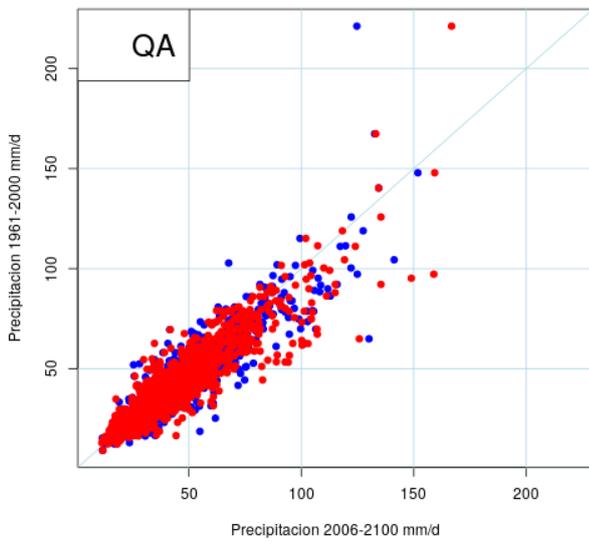
Valores extremos de PRE diarias simuladas en España



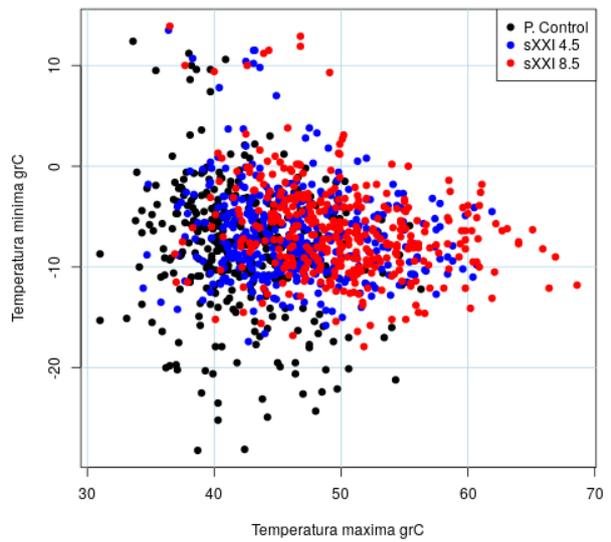
Valores extremos de TMN y TMX diarias simuladas en España



Valores extremos de PRE diarias simuladas en España



Valores extremos de TMN y TMX diarias simuladas en España



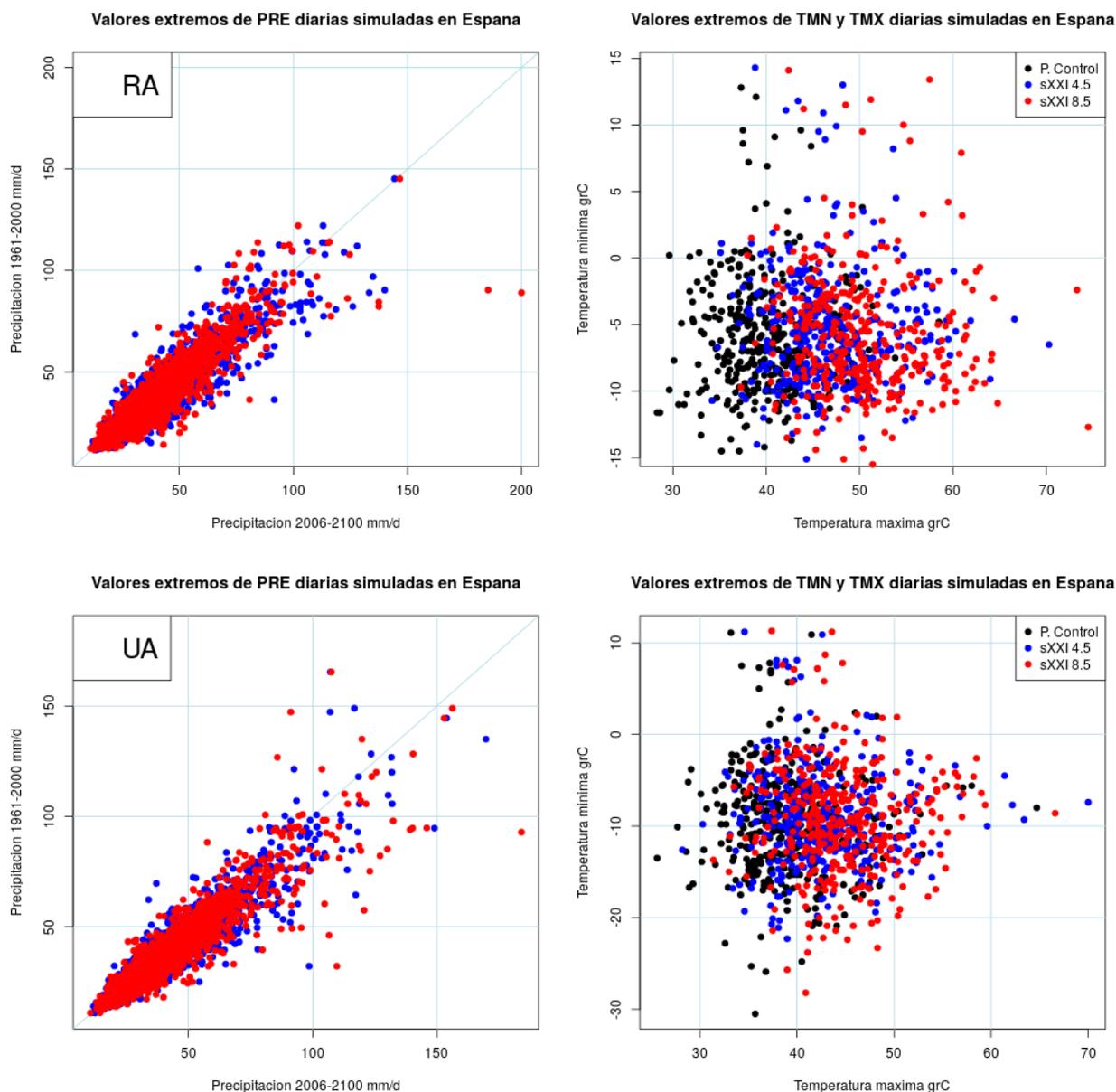


Figura 10. Dispersión de valores más altos de PRE o TMX y más bajos de TMN durante el PC y el PF (RCP 4.5 y RCP 8.5) por estación meteorológica, según cada proyección.

Con relación a las temperaturas, se detectan anomalías en todas las proyecciones ya que tienen valores simulados de TMX que llegan a sobrepasar los 60 °C e incluso los 70 °C en el caso de N8A y R8A, valores excesivamente altos (Figura 10). La nube de puntos de TMN y TMX en el PC es similar a las del PF, pero las nubes del PF están desplazadas hacia la derecha en todas las proyecciones, más la del RCP 8.5 que la del RCP 4.5, lo que sugiere un aumento uniforme en la escala de las TMX en el PF, siendo por tanto remarcable el aumento de los valores extremos de TMX en el PF y más en el RCP 8.5 que en el RCP 4.5. También se aprecia un leve desplazamiento hacia arriba de las nubes del PF con relación a las del PC, evidente el caso de la proyección N8A, lo que indica un aumento también de las TMN en el PF respecto al PC.



Para elaborar los diagramas de cajas, se han tomado como representativas aquellas series de PRE que cubren zonas de alta pluviometría del NO (1428), de pluviometría mediterránea (6342) y de baja pluviometría de Canarias (C2491). Además, se han tomado aquellas otras series de PRE, TMN y TMX que contienen datos muy extremos identificados en los diagramas de dispersión de la Figura 10. Para el caso de la PRE, son las estaciones 2818E en DH Duero y 8058A en DH Júcar para FA y NA, las estaciones 2818E en DH Duero y 8288E en DH Júcar para MA, QA y RA y las estaciones 8058A y 8274U en DH Júcar para UA. De manera similar, para analizar los extremos de TMN y TMX se han seleccionado estaciones que dan extremos según la Figura 10. Son las estaciones con mínimos de las TMN en las estaciones 9736 y 9219I en DH Ebro y máximas de las TMX en la estación 4532 en DH Guadiana y 9495F en DH Ebro para FA, las estaciones con mínimos de las TMN en las estaciones 9657 y 9741 en DH Ebro y máximas de las TMX en la estación 1075E en DH Cantábrico Oriental y 4532 en DH Guadiana para MA, las estaciones con mínimos de las TMN en las estaciones 9736 y 9237I en DH Ebro y máximas de las TMX en la estación 3531 en DH Tajo y 4532 en DH Guadiana para NA, las estaciones con mínimos de las TMN en las estaciones 9745 y 9736 en DH Ebro y máximas de las TMX en la estación 9729A en DH Ebro y 4532 en DH Guadiana para QA, las estaciones con mínimos de las TMN en las estaciones 9736 y 9470K en DH Ebro y máximas de las TMX en la estación 4532 en DH Guadiana y 5562O en Guadalquivir para RA y las estaciones con mínimos de las TMN en las estaciones 9657 y 9745 en DH Ebro y máximas de las TMX en las estaciones 4532 y 4558 en DH Guadiana para UA (Figura 11, Figura 12, Figura 13, Figura 14, Figura 15 y Figura 16).

Del análisis de estos diagramas de cajas se desprende que no hay valores umbrales ni de PRE máxima diaria ni de TMN diaria o TMX diaria. Además, se observa el alto número de días con baja PRE y que no se alcanzan valores de PRE extremadamente altos; los valores simulados no exceden el valor de 230 mm/día. Por otro lado, sí que hay valores diarios irreales en las temperaturas simuladas, especialmente temperaturas demasiado altas. Todas las proyecciones dan valores que superan los 60 °C en alguna estación para el RCP 8.5, e incluso se llegan a alcanzar los 77 °C, como en la proyección NA para el RCP 8.5 (estación 4532). Las TMN más bajas simuladas están alrededor de los -30 °C y corresponden a la proyección NA. Las TMX extremas simuladas aumentan del PC al PF del RCP 4.5 y de éste al PF del RCP 8.5 según todas las proyecciones. Esta tendencia no está tan clara con las TMN y no se observa con las PRE.

En algunos casos se han encontrado inconsistencias en los valores, como por ejemplo que la TMN diaria es mayor que la TMX diaria, como por ejemplo el día 14 de enero de 1961 en la estación 0001 (código AEMET) según la proyección MA, con un valor de 6.2 de TMX y de 6.5 de TMN.

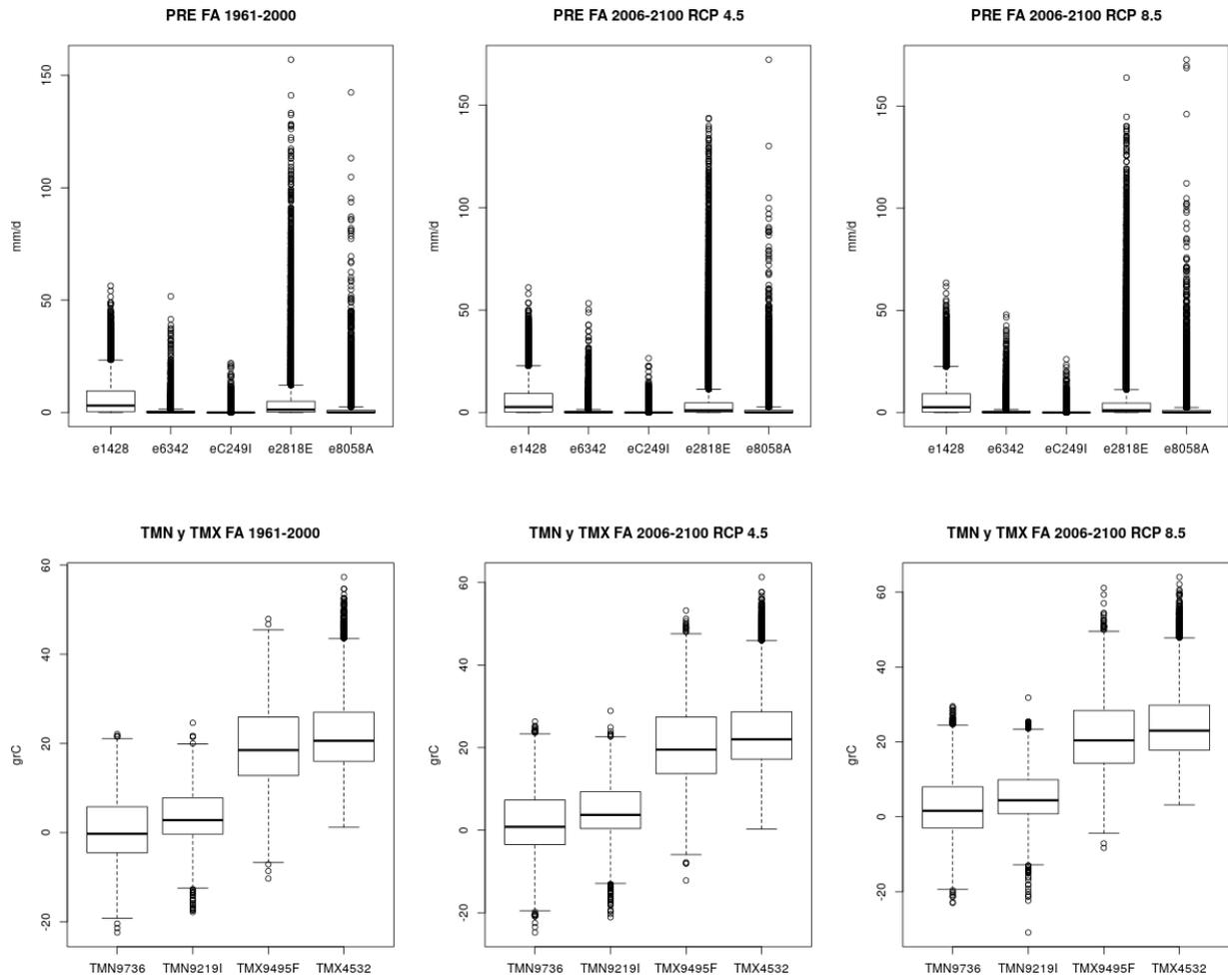


Figura 11. Diagramas de cajas de una selección de series simuladas para el PC y el PF en estaciones AEMET, según las proyecciones FA.

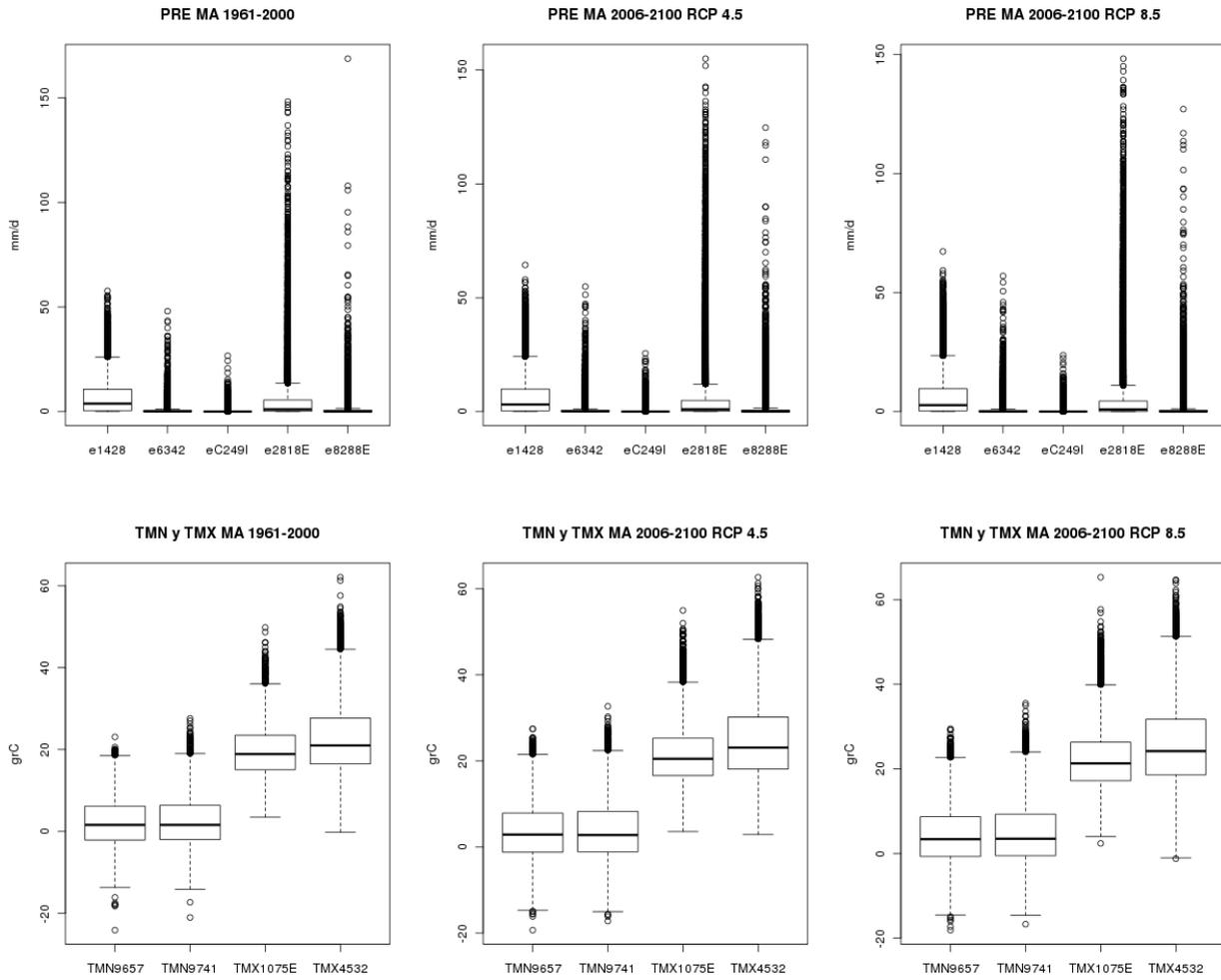


Figura 12. Diagramas de cajas de una selección de series simuladas para el PC y el PF en estaciones AEMET, según las proyecciones MA.

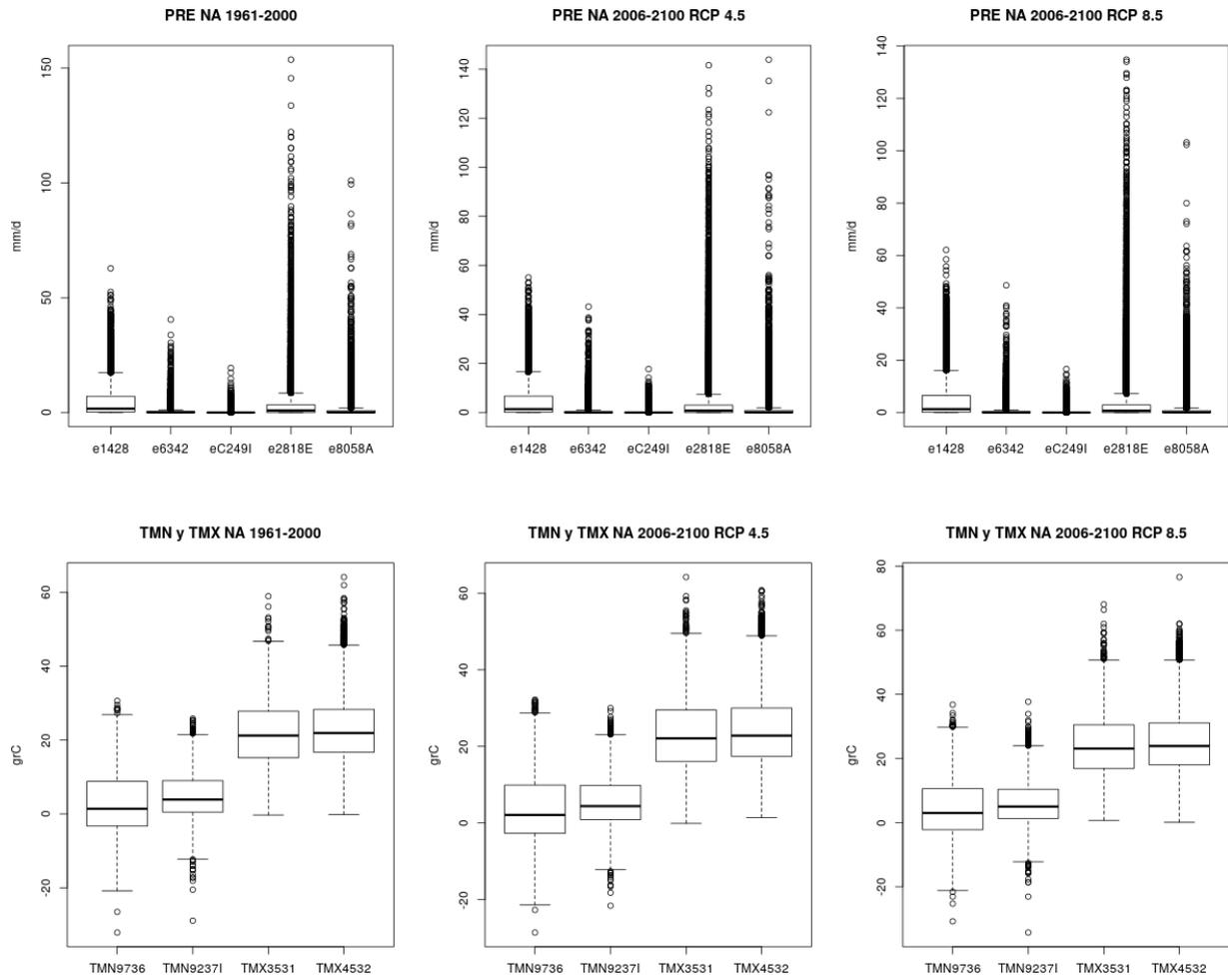


Figura 13. Diagramas de cajas de una selección de series simuladas para el PC y el PF en estaciones AEMET, según las proyecciones NA.

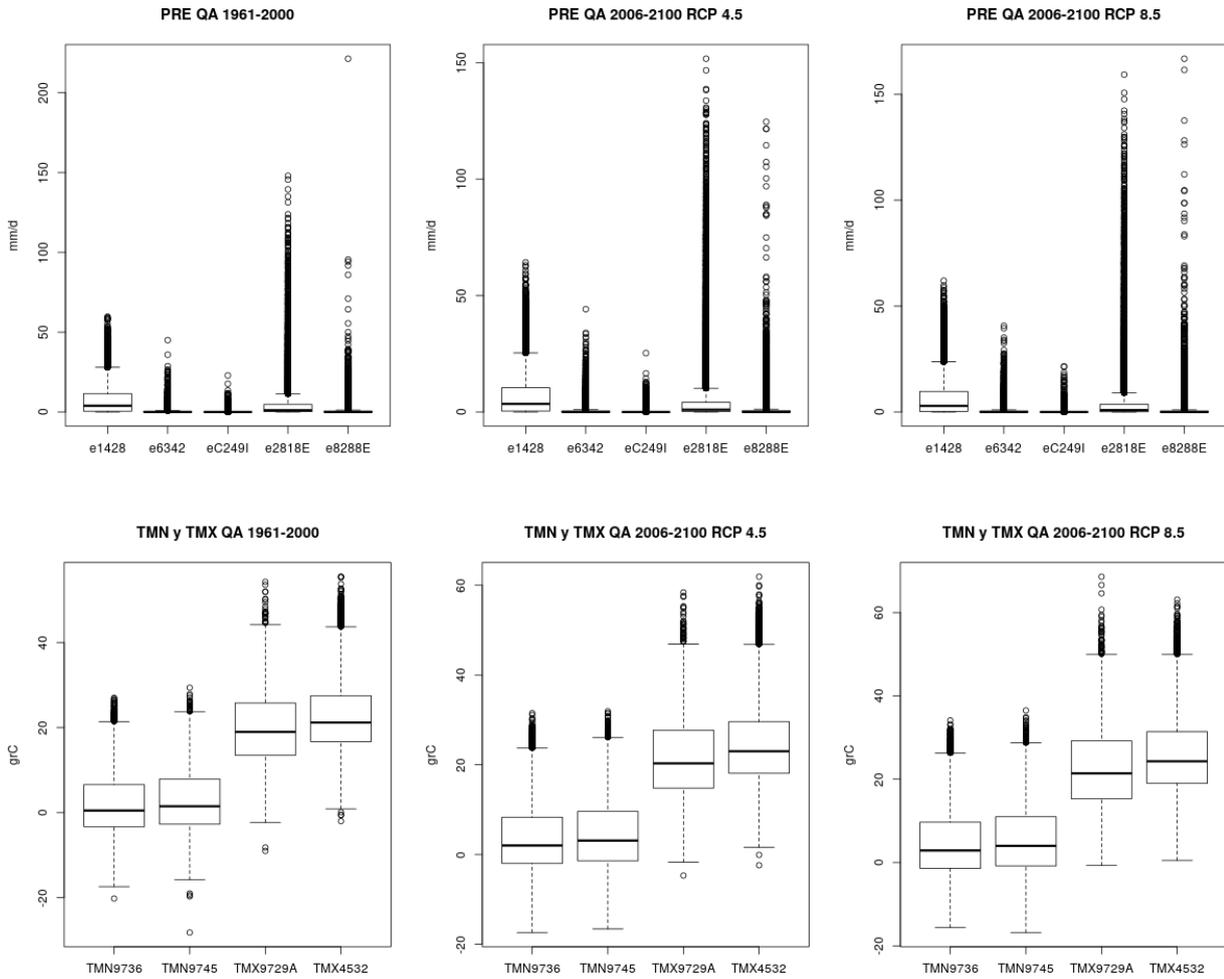


Figura 14. Diagramas de cajas de una selección de series simuladas para el PC y el PF en estaciones AEMET, según las proyecciones QA.

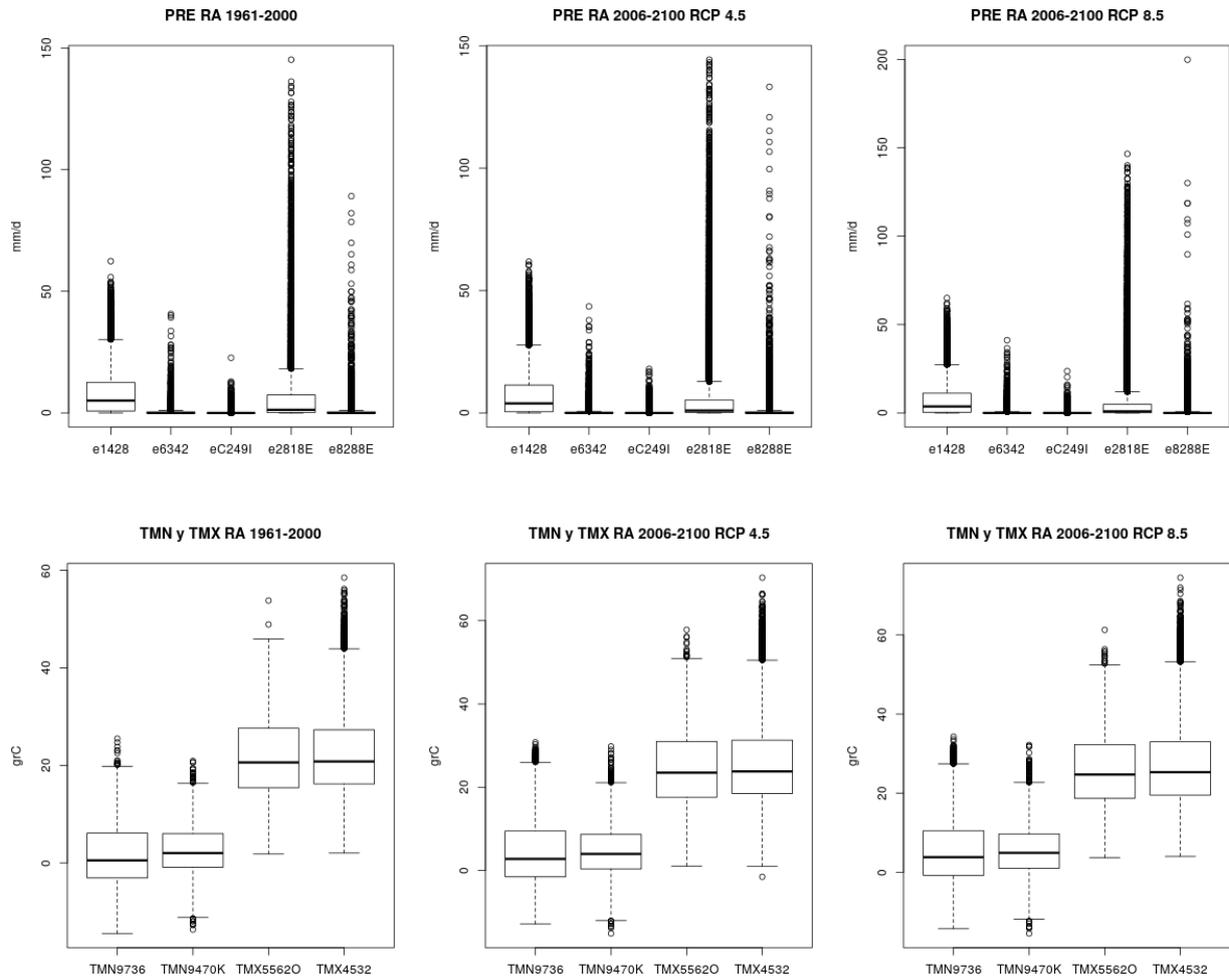


Figura 15. Diagramas de cajas de una selección de series simuladas para el PC y el PF en estaciones AEMET, según las proyecciones RA.

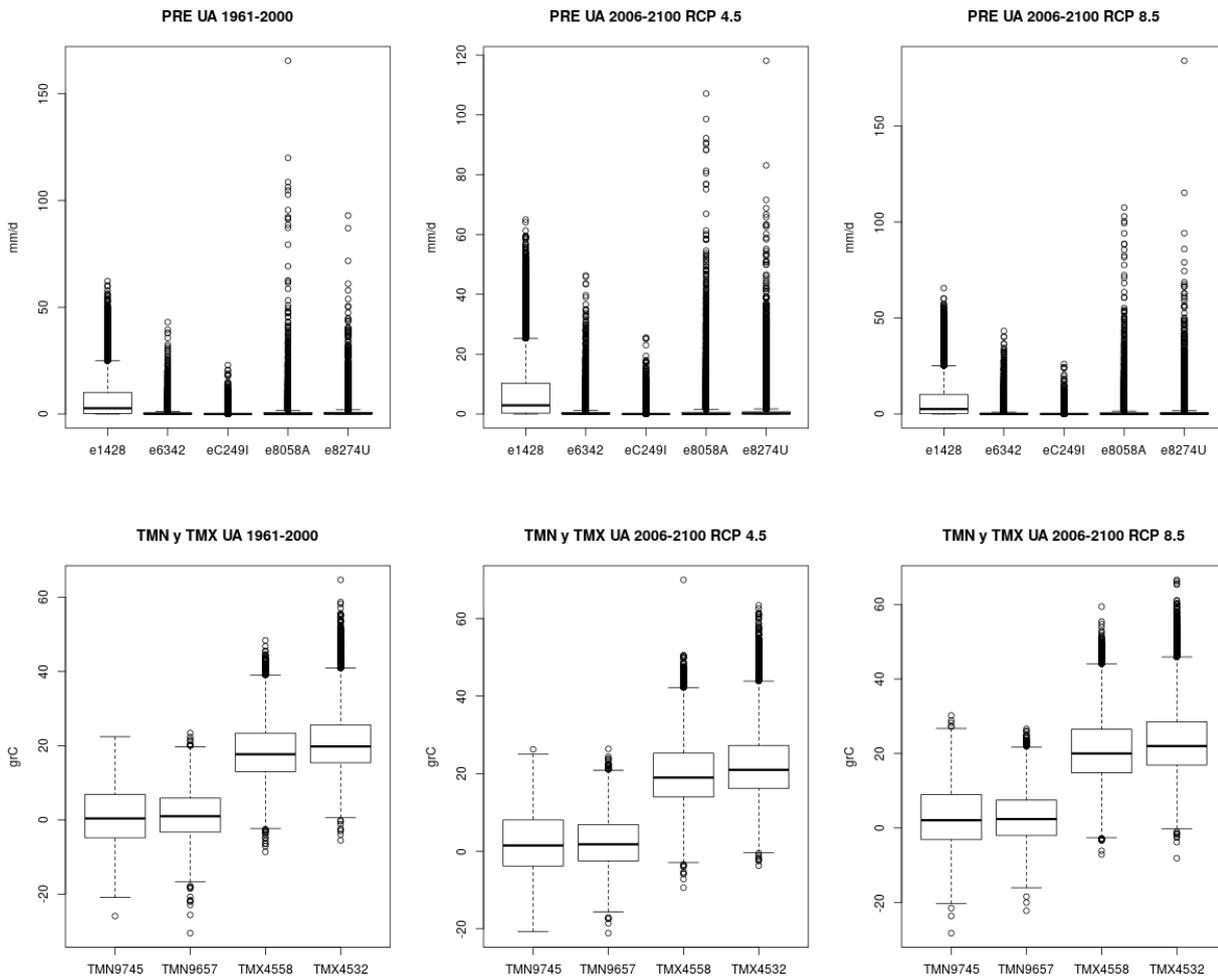


Figura 16. Diagramas de cajas de una selección de series simuladas para el PC y el PF en estaciones AEMET, según las proyecciones UA.

## 5.2 CONTRASTE

### 5.2.1 Metodología

Se ha realizado el contraste de las series de las proyecciones comparándolas con las series observadas en las mismas estaciones durante el PC. Hay que tener presente que los valores del PC son los mismos para el RCP 8.5 y el RCP 4.5; así por ejemplo, las proyecciones M8A y M4A tienen los mismos valores en el PC, por lo que se ha denominado MA. El objetivo de la realización de este contraste es analizar el desajuste o sesgo de las series simuladas y valorar su repercusión en la incertidumbre de los resultados.

Para el estudio del impacto en los RRHH se realizó un procesamiento previo de los valores de las proyecciones climáticas para adaptarlos a los formatos LEMA (Quintas 1996), formato necesario para el tratamiento posterior de la información y la introducción de los valores climáticos en el modelo hidrológico de SIMPA.



Los ficheros con formato LEMA guardan las series temporales mensuales de variables climáticas e hidrológicas en formato ASCII (Figura 17). Se indican: las coordenadas del punto de medida en las dos primeras columnas, el código de la estación de medida en la tercera columna, el tipo de variable medida en la cuarta columna, el año hidrológico en la quinta columna, los valores mensuales registrados en las columnas 6 (octubre) a la 17 (septiembre) y el valor anual en la columna 18. La cifra -100 indica la ausencia de datos.

617699	4794375	01001	PRE 2071-72	204.0	165.0	116.0	82.0	286.0	239.0	106.0	211.0	189.0	27.0	56.0	19.0	1700.0
617699	4794375	01001	PRE 2072-73	174.0	78.0	25.0	99.0	208.0	159.0	114.0	274.0	259.0	160.0	56.0	72.0	1678.0
617699	4794375	01001	PRE 2073-74	233.0	22.0	114.0	116.0	189.0	49.0	129.0	246.0	198.0	57.0	26.0	131.0	1510.0
617699	4794375	01001	PRE 2074-75	99.0	244.0	214.0	180.0	213.0	386.0	100.0	85.0	218.0	32.0	155.0	138.0	2064.0
617699	4794375	01001	PRE 2075-76	101.0	95.0	15.0	298.0	87.0	170.0	152.0	199.0	132.0	128.0	133.0	55.0	1565.0
617699	4794375	01001	PRE 2076-77	186.0	51.0	43.0	20.0	245.0	234.0	82.0	198.0	114.0	169.0	52.0	16.0	1410.0
617699	4794375	01001	PRE 2077-78	95.0	173.0	253.0	186.0	57.0	97.0	110.0	82.0	50.0	71.0	132.0	160.0	1466.0
617699	4794375	01001	PRE 2078-79	112.0	193.0	89.0	185.0	173.0	198.0	211.0	125.0	165.0	25.0	31.0	39.0	1546.0
617699	4794375	01001	PRE 2079-80	64.0	182.0	128.0	78.0	62.0	24.0	158.0	173.0	196.0	138.0	101.0	7.0	1311.0
617699	4794375	01001	PRE 2080-81	139.0	54.0	95.0	19.0	182.0	100.0	62.0	226.0	57.0	39.0	194.0	11.0	1178.0
617699	4794375	01001	PRE 2081-82	138.0	56.0	230.0	43.0	339.0	318.0	67.0	96.0	59.0	240.0	48.0	58.0	1692.0
617699	4794375	01001	PRE 2082-83	271.0	37.0	76.0	61.0	172.0	73.0	145.0	197.0	229.0	35.0	8.0	162.0	1466.0
617699	4794375	01001	PRE 2083-84	92.0	197.0	65.0	113.0	81.0	85.0	272.0	112.0	110.0	10.0	94.0	189.0	1420.0
617699	4794375	01001	PRE 2084-85	8.0	91.0	99.0	78.0	41.0	228.0	152.0	119.0	49.0	222.0	5.0	101.0	1193.0
617699	4794375	01001	PRE 2085-86	149.0	5.0	101.0	230.0	51.0	36.0	165.0	171.0	253.0	67.0	68.0	32.0	1328.0
617699	4794375	01001	PRE 2086-87	20.0	256.0	100.0	25.0	233.0	72.0	125.0	172.0	88.0	185.0	60.0	95.0	1431.0
617699	4794375	01001	PRE 2087-88	49.0	251.0	232.0	263.0	128.0	155.0	164.0	114.0	197.0	112.0	139.0	146.0	1950.0
617699	4794375	01001	PRE 2088-89	74.0	202.0	127.0	110.0	226.0	244.0	73.0	103.0	46.0	163.0	177.0	9.0	1554.0
617699	4794375	01001	PRE 2089-90	280.0	128.0	118.0	130.0	2.0	262.0	114.0	76.0	223.0	209.0	69.0	136.0	1747.0
617699	4794375	01001	PRE 2090-91	27.0	58.0	146.0	157.0	279.0	181.0	86.0	224.0	147.0	95.0	110.0	67.0	1577.0
617699	4794375	01001	PRE 2091-92	137.0	117.0	155.0	219.0	183.0	244.0	229.0	39.0	185.0	117.0	139.0	38.0	1802.0
617699	4794375	01001	PRE 2092-93	85.0	133.0	125.0	355.0	81.0	184.0	137.0	128.0	244.0	97.0	14.0	29.0	1612.0

Figura 17. Ejemplo de fichero con formato LEMA.

Los valores diarios de PRE, TMN y TMX de la proyección climática se transformaron en series mensuales LEMA mediante la suma de los valores diarios, en el caso de las PRE, y mediante la media de los valores diarios, en los casos de las TMN y TMX. Se asignaron las coordenadas UTM en el huso 30 de las estaciones meteorológicas, obteniéndose al final los ficheros LEMA. De ese modo se han obtenido tanto valores de PRE total mensual y anual, como medias mensuales y anuales de TMN y TMX. Así por ejemplo, el valor de TMN de un mes concreto es el promedio de los datos diarios de TMN de ese mes.

Los datos mensuales observados de PRE, TMN y TMX registrados en las estaciones donde hay datos simulados de las proyecciones fueron extraídos de la base de datos HIDRO del CEDEX (Quintas 1996), donde se almacena la información climática observada en las estaciones de AEMET.

Los ficheros LEMA de datos observados tienen lagunas durante el PC, al contrario que los de las proyecciones que están completos. Por lo tanto, se seleccionaron aquellas estaciones que tienen al menos 35 años completos de datos observados de PRE, TMN y TMX en el PC. Con objeto de conseguir un número significativo de estaciones, las series de TMN y TMX de HIDRO se han completado previamente mediante un modelo de regresión bivariada con estacionarización previa. De ese modo, el contraste de la PRE se ha llevado a cabo en 621 estaciones y el de las TMN y TMX en 229 estaciones (Figura 18).

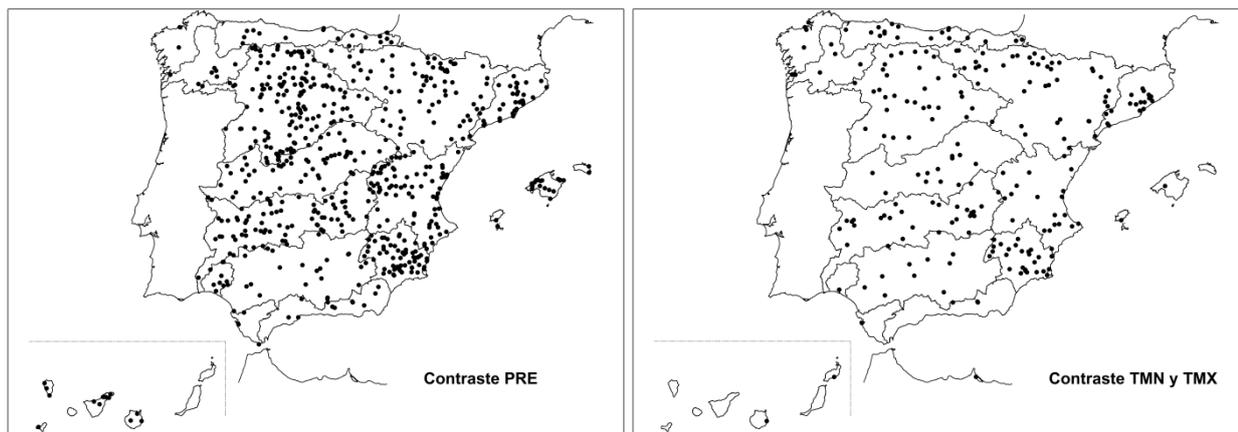


Figura 18. Localización de las 621 y 229 estaciones donde se ha realizado el contraste de la PRE (izda) y las TMN y TMX (dcha) según cada proyección climática.

Tras haber realizado esta selección, se han calculado las series mensuales y anuales de PRE, TMN y TMX de datos observados y de cada una de las proyecciones promediando los valores de las estaciones de cada uno de los principales ámbitos hidrográficos de España, incluyendo el conjunto de España. De estas series se calculan asimismo su valor medio y la desviación típica mensual y anual.

Para realizar el contraste, se han agrupado las DDHH de las Islas Canarias en un único conjunto. Además, las series de Ceuta y Melilla se han incorporado a la DH de C. Mediterráneas de Andalucía.

### 5.2.2 Temperatura mínima

En general, las proyecciones ajustan bien la TMN media para España y su variabilidad anual (Figura 19). La media se infravalora por 5 proyecciones entre 0.4 °C y 1.6 °C y se sobrevalora por NA en 0.4 °C. La desviación típica (DT) se infravalora por todas las proyecciones en menos de 0.3 °C. Cinco de las proyecciones reproducen la tendencia positiva significativa que dan los datos observados, tal como se ve en el p-valor del test de MannKendall, bilateral inferior a 10% y por tanto significativamente creciente (por su pendiente positiva). Las proyecciones UA y NA son las que peor ajustan, ya son las que más se desvían de los valores medios observados; además NA da un p-valor de 24%, por lo que no reproduce la tendencia creciente observada.

### Evolución de la TMN anual España

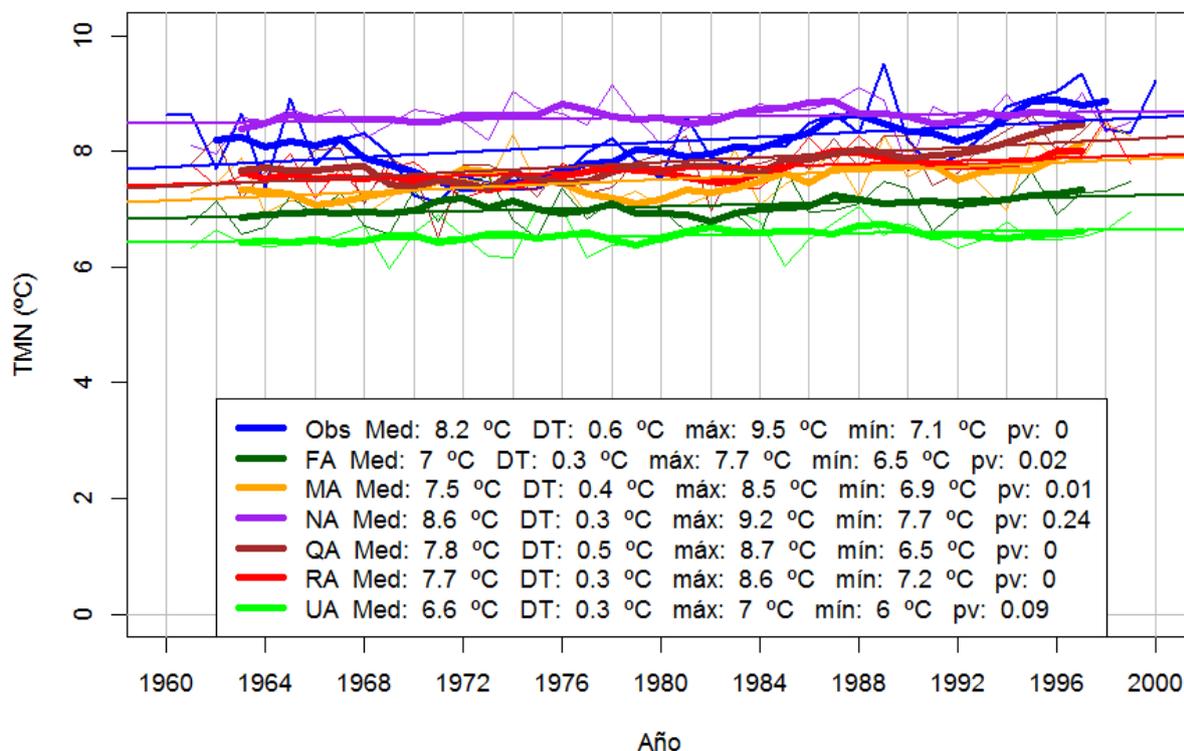


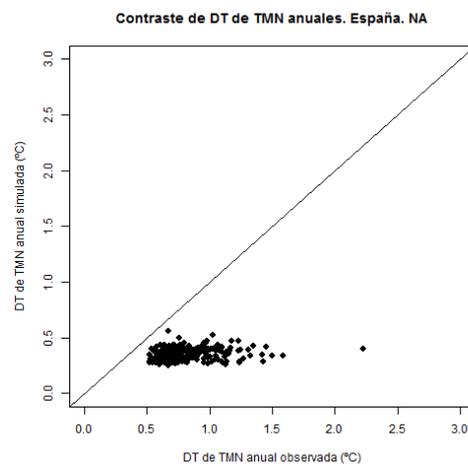
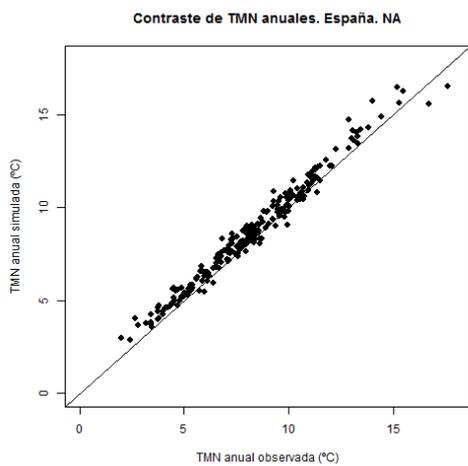
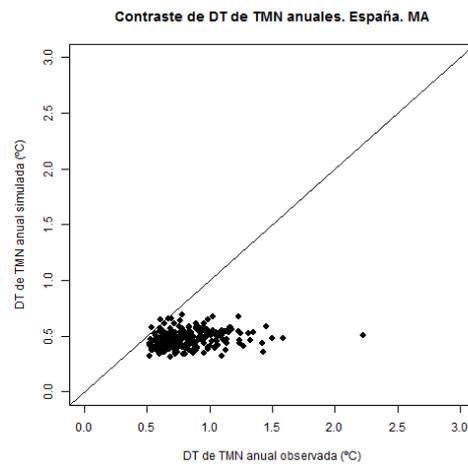
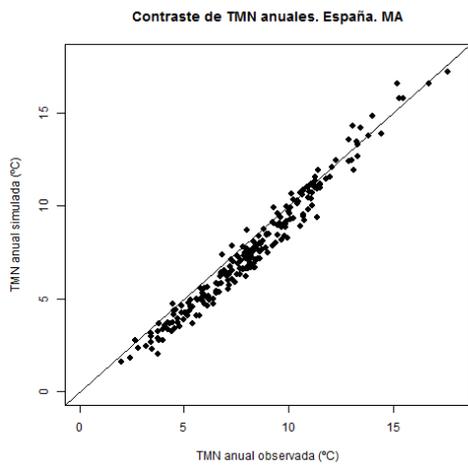
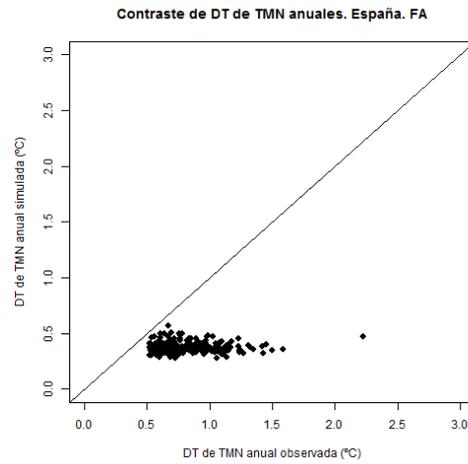
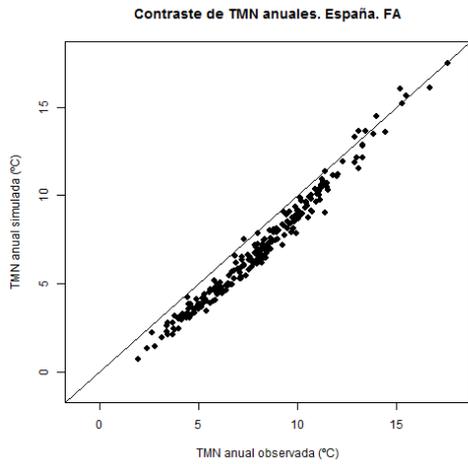
Figura 19. Evolución de la TMN anual para España para el PC según los datos observados (Obs) y los valores simulados en las 229 estaciones de contraste. También se muestran los estadísticos de cada serie para todo el periodo: medias (Med), desviación típica (DT), valores máximos (máx) y mínimos (mín) y p-valor obtenido con el test de Mann-Kendall (pv).

En los diagramas de dispersión para los valores medios anuales observados y simulados en cada estación y promediados para todos los años del PC se aprecia cómo QA y RA ajustan bien las medias observadas, NA las sobrevalora ligeramente, MA las infravalora ligeramente, especialmente para TMN bajas, y FA y UA las infravaloran claramente. (Figura 20). Por el contrario, ninguna proyección reproduce bien la variabilidad ya que dan una DT con valores similares alrededor de 0.4 °C, mientras que la DT observada tiene un mayor margen de variación. Este desajuste de DT entre datos observados y valores simulados en estaciones desentona con lo mostrado en la Figura 19 ya que la variabilidad espacial de valores anuales observados es muy alta y no se refleja en los valores anuales para el conjunto de España.



CEDEX

Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España



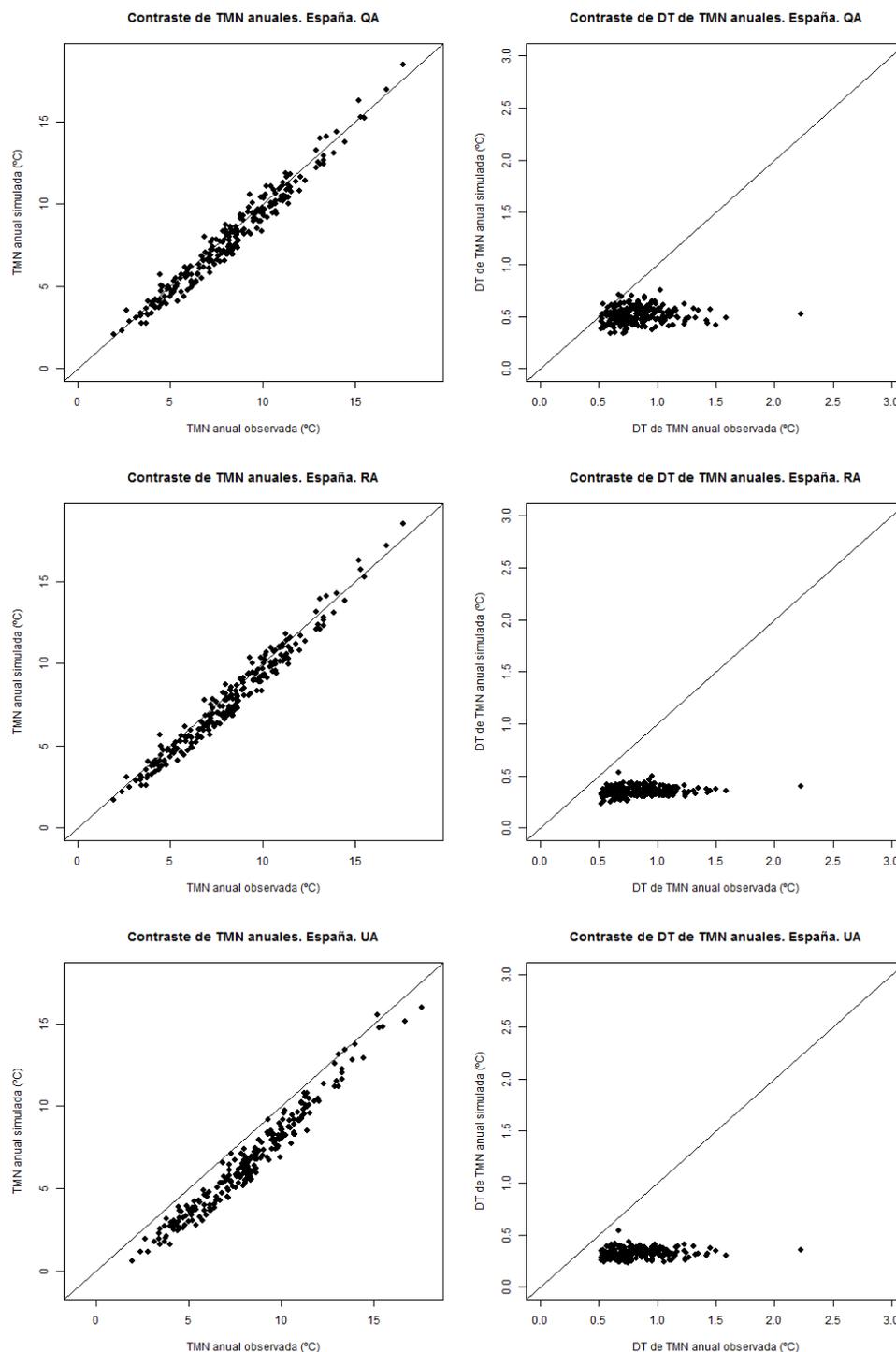
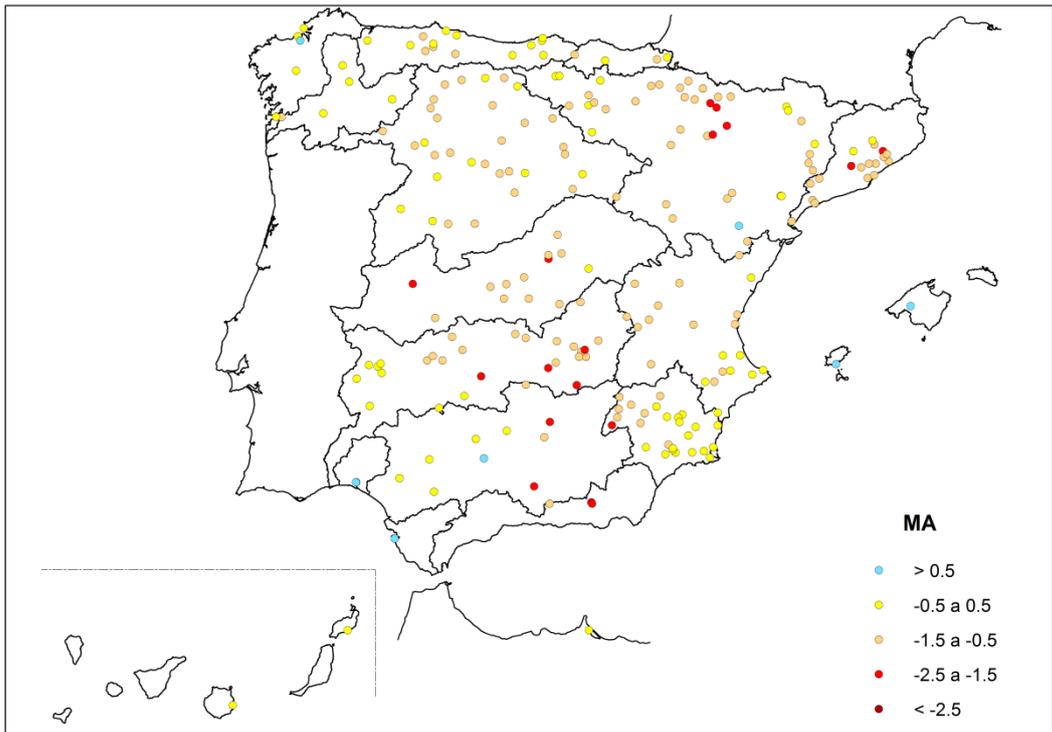
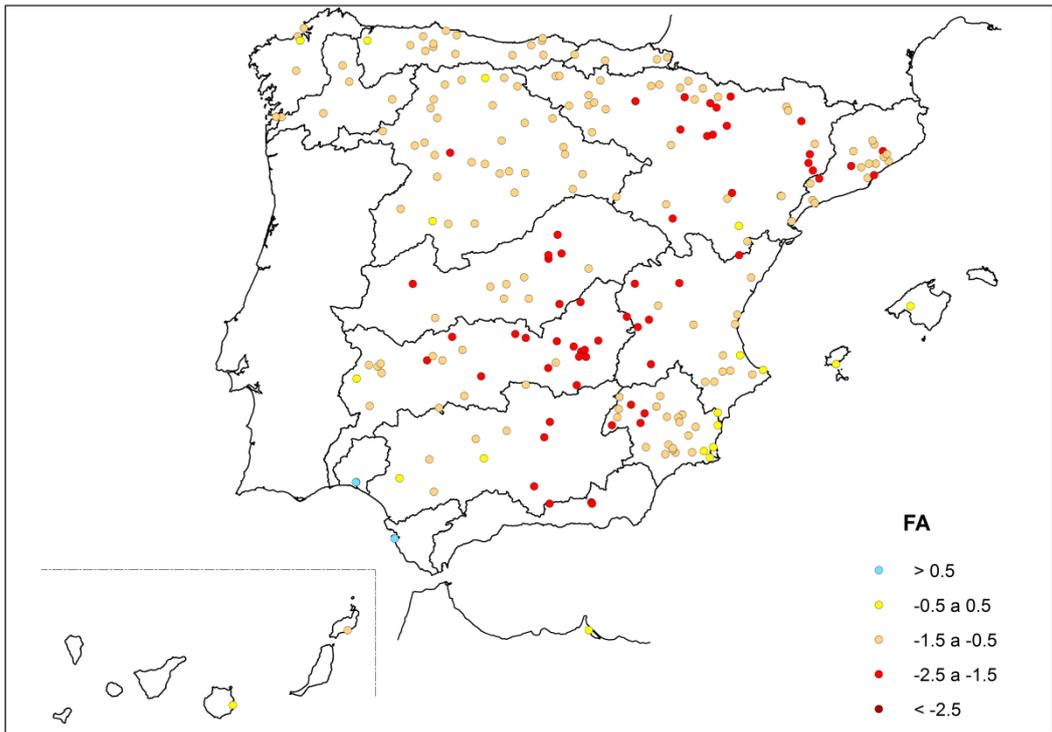


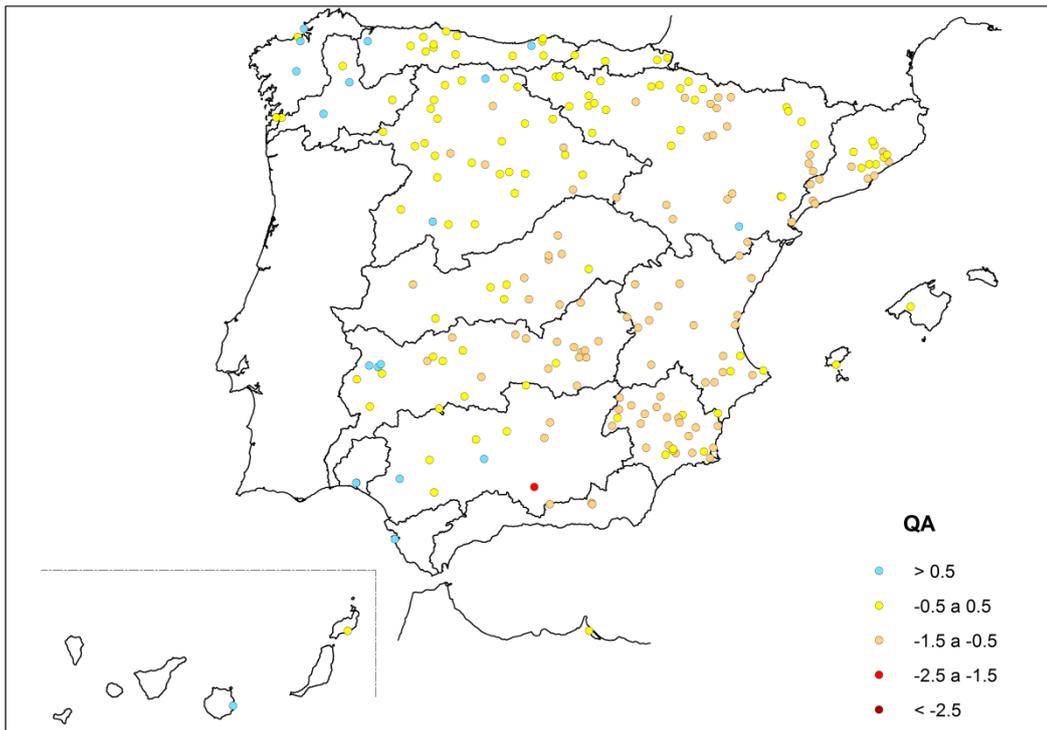
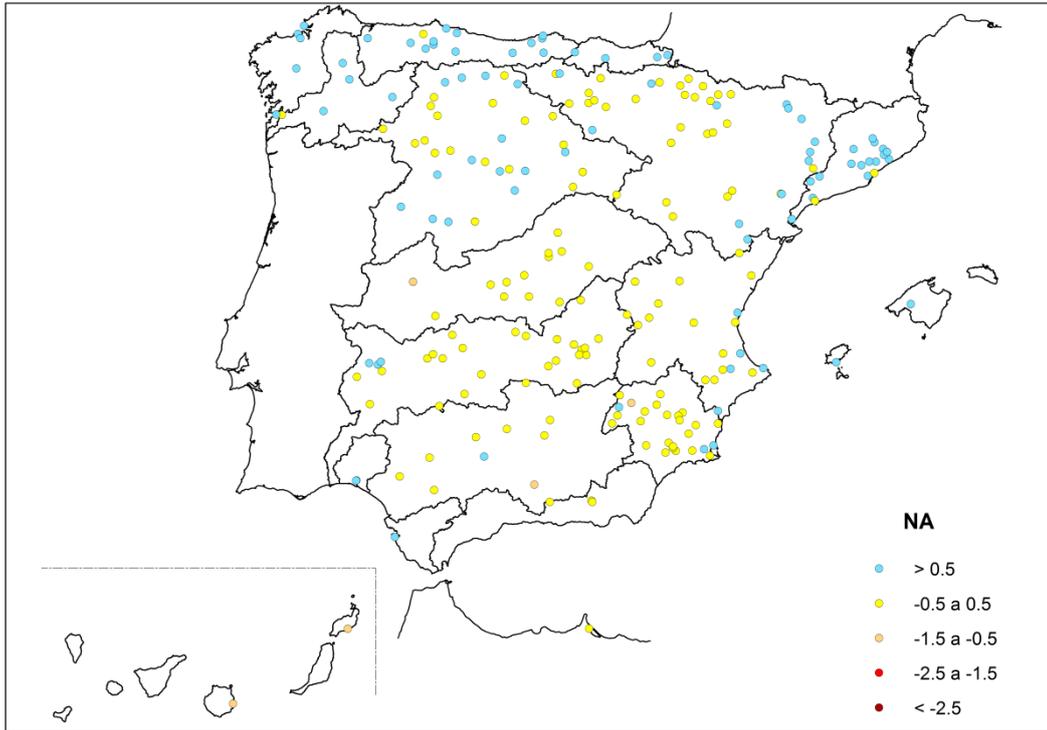
Figura 20. Diagramas de dispersión de la TMN observada frente a la TMN simulada en cada estación meteorológica promediada en el PC. Izquierda: TMN anual; derecha: DT de la TMN anual.

El sesgo espacial de los valores anuales de la TMN se muestra en la Figura 21. Se representa la diferencia de los valores simulados menos los datos observados. Los resultados son coherentes con los expuestos anteriormente. Las series simuladas en estaciones dan, en general, TMN algo menores que las de las series observadas. Esta



infravaloración se observa sobre todo en el centro peninsular y es muy marcada en la proyección UA, con muchas estaciones donde se han simulado TMN 1.5 °C menores que las observadas en muchas estaciones. La proyección FA también infravalora las TMN, pero en menor grado. Por el contrario, la proyección NA sobreestima las TMN, sobre todo hacia la costa y norte de la Península. El resto de proyecciones ajustan bien, con una ligera infravaloración de TMN.





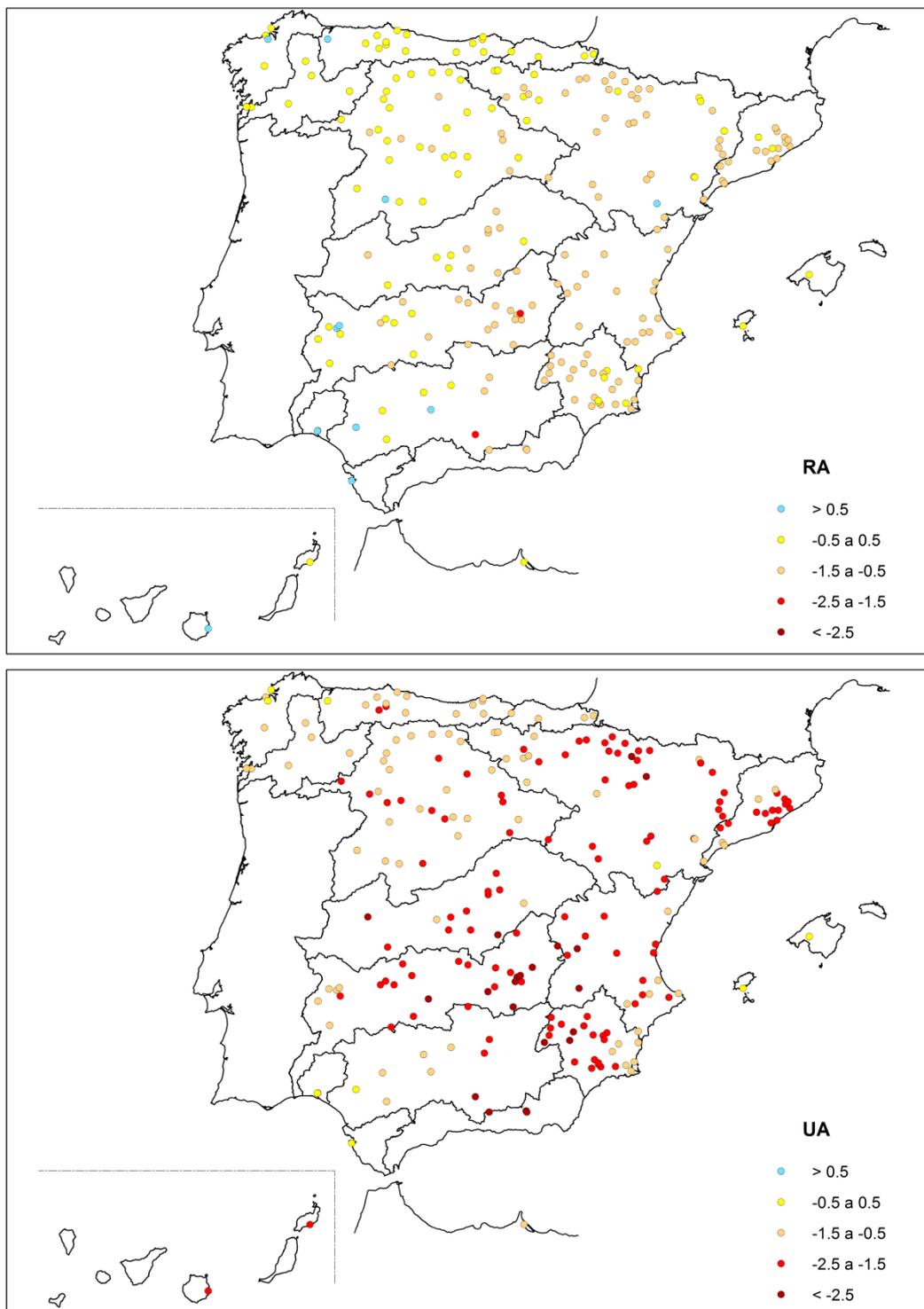


Figura 21. Mapas con las diferencias según las distintas proyecciones entre la TMN anual simulada y observada en las 229 estaciones meteorológicas donde se ha realizado el contraste.

Con relación al contraste de la estacionalidad, las proyecciones reproducen razonablemente bien el ciclo estacional observado para el conjunto de España (Figura 22). El ajuste es peor en verano ya que se simula menos TMN que la de los datos observados. De ese modo, se produce una ligera suavización de la estacionalidad de la

TMN. UA es la que peor ajusta ya que infravalora la TMN en hasta 2.5 °C en los meses de verano.

### Contraste de TMN mensuales. España

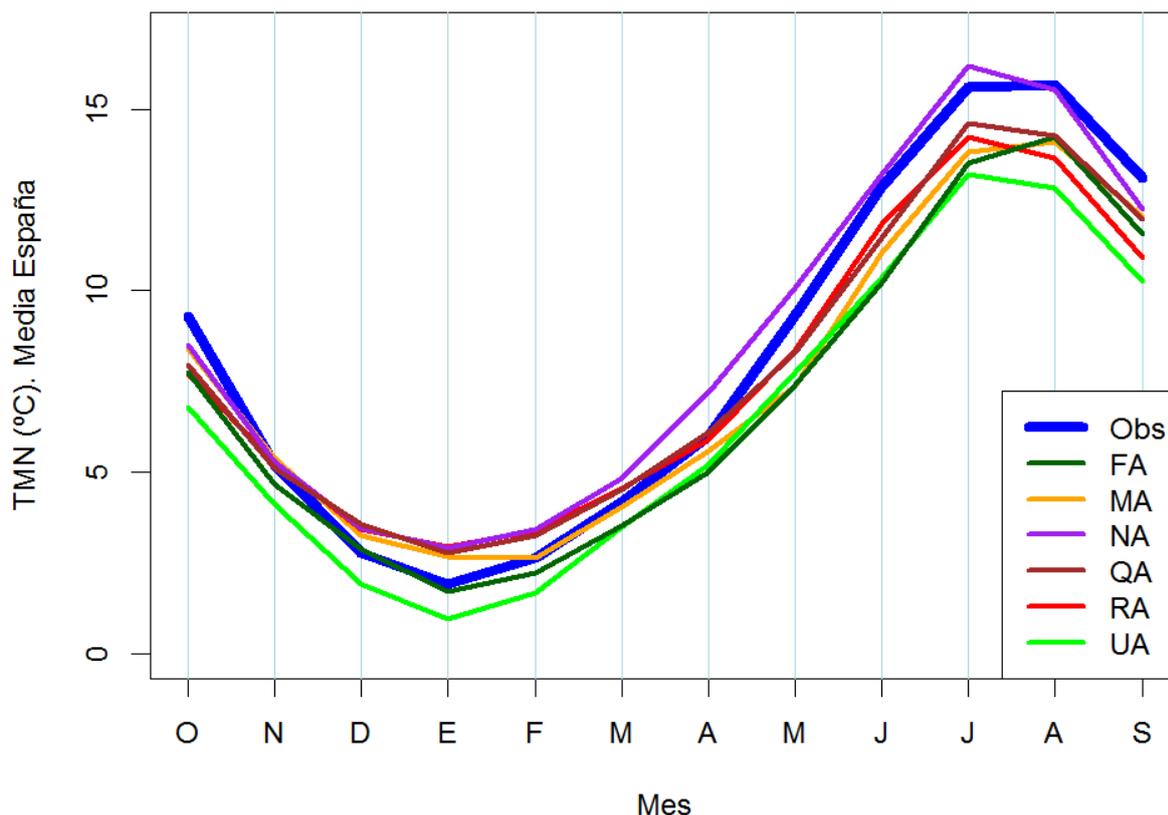


Figura 22. Distribución mensual de la TMN observada y simulada para el conjunto de España según valores en estaciones.

Similares resultados se reconocen cuando se contrasta la estacionalidad de la TMN en todas las DDHH (Figura 23), con las siguientes particularidades:

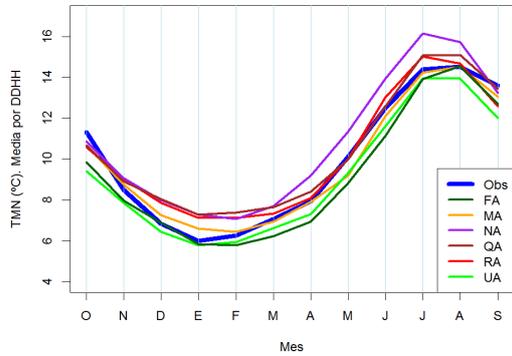
- El ajuste es mejor en las DDHH del norte de España, salvo la proyección NA que sobrevalora la TMN.
- La infravaloración de los valores de verano es notable en las DDHH del centro y sur peninsular, llegando a ser de unos 5 °C en las CC. Mediterráneas Andaluzas.
- En las DDHH de Tinto, Odiel y Piedras y de Guadalete y Barbate se ajustan bien los meses de verano, pero se sobrevalora ligeramente la TMN en los meses de invierno.
- El ajuste es peor en Canarias, MA y FA ajustan muy bien, RA y QA sobrevaloran la TMN en verano, NA suaviza el ciclo e infravalora la TMN en verano y UA la infravalora de manera homogénea todo el año.



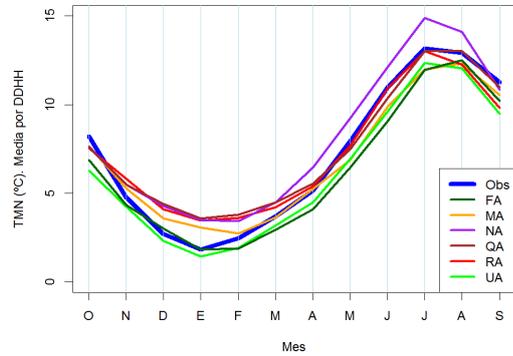
CEDEX

# Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España

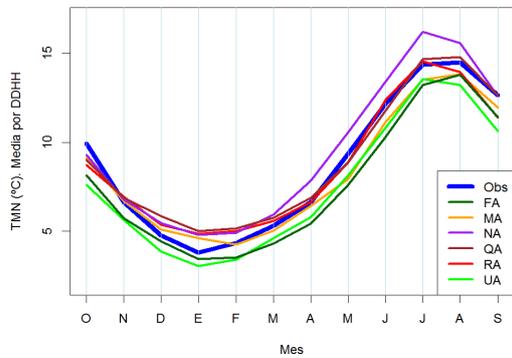
Contraste de TMN mensuales. Galicia Costa



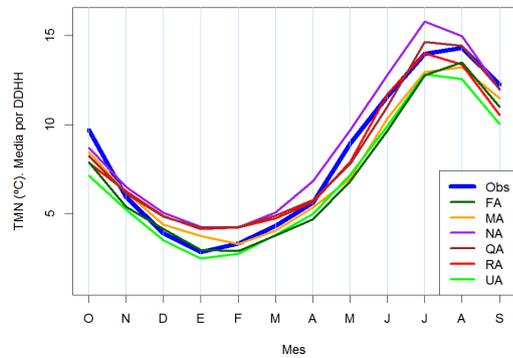
Contraste de TMN mensuales. Miño-Sil



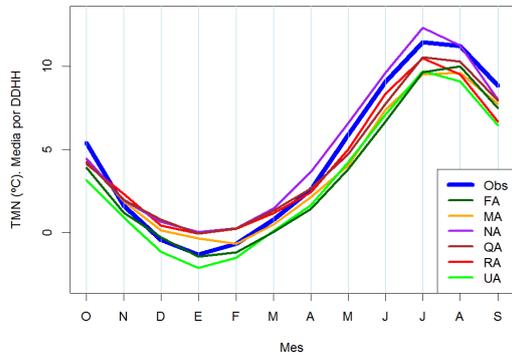
Contraste de TMN mensuales. Cantábrico Occidental



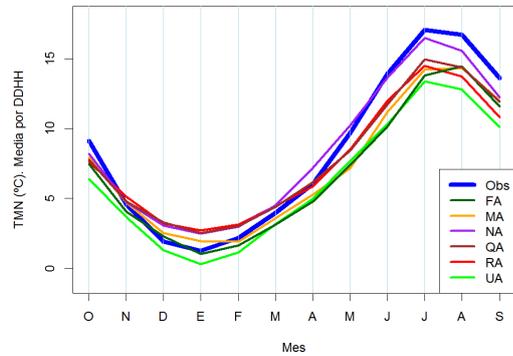
Contraste de TMN mensuales. Cantábrico Oriental



Contraste de TMN mensuales. Duero

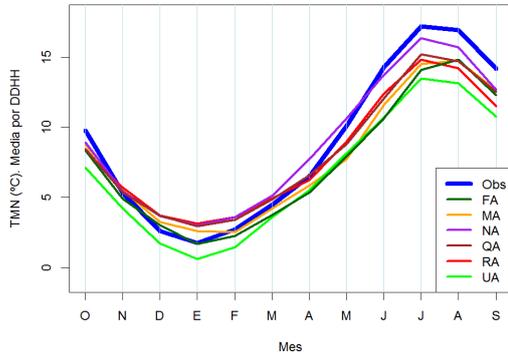


Contraste de TMN mensuales. Tajo

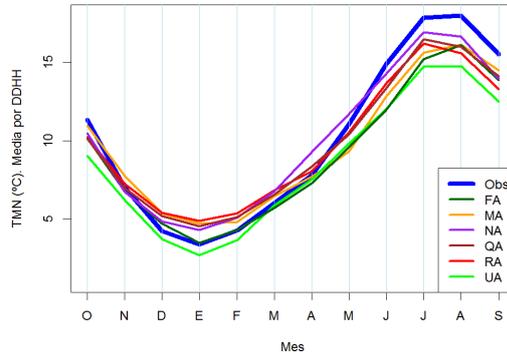




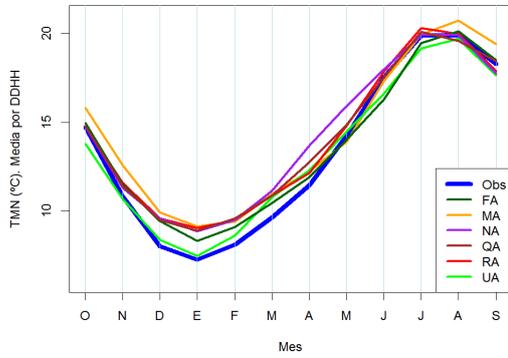
Contraste de TMN mensuales. Gadiana



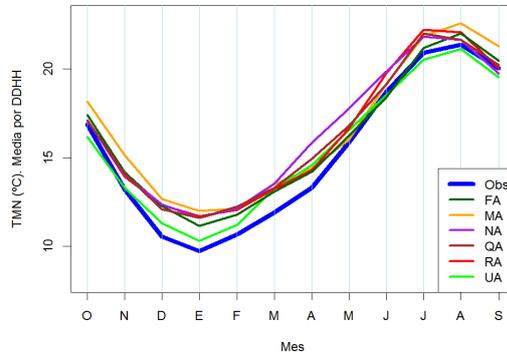
Contraste de TMN mensuales. Guadalquivir



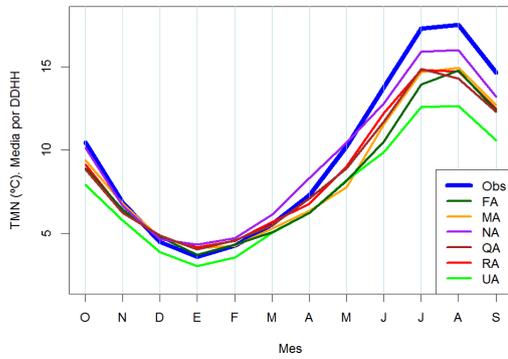
Contraste de TMN mensuales. Tinto, Odiel y Piedras



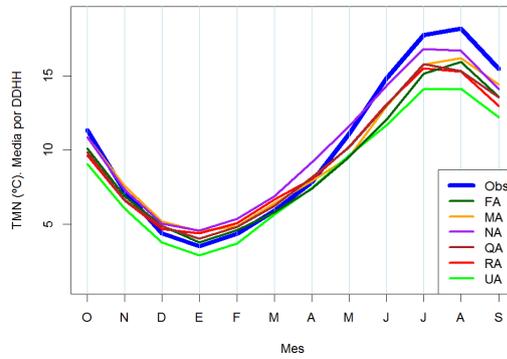
Contraste de TMN mensuales. Guadalete y Barbate



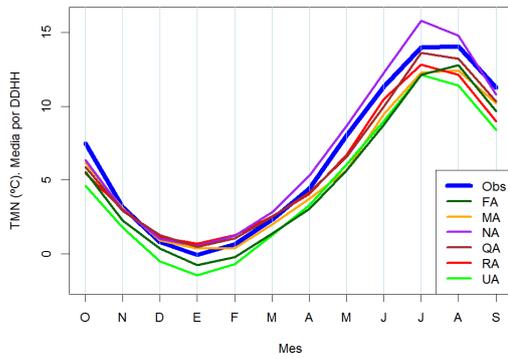
Contraste de TMN mensuales. CC. Mediterráneas Andaluzas



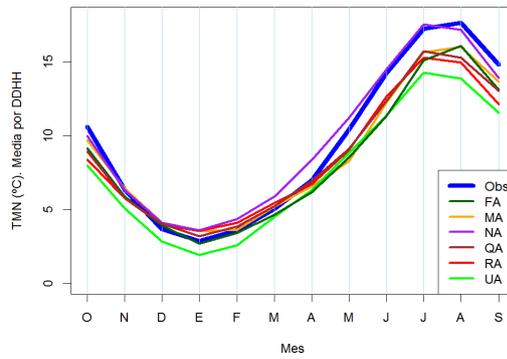
Contraste de TMN mensuales. Segura



Contraste de TMN mensuales. Ebro



Contraste de TMN mensuales. Júcar





CEDEX

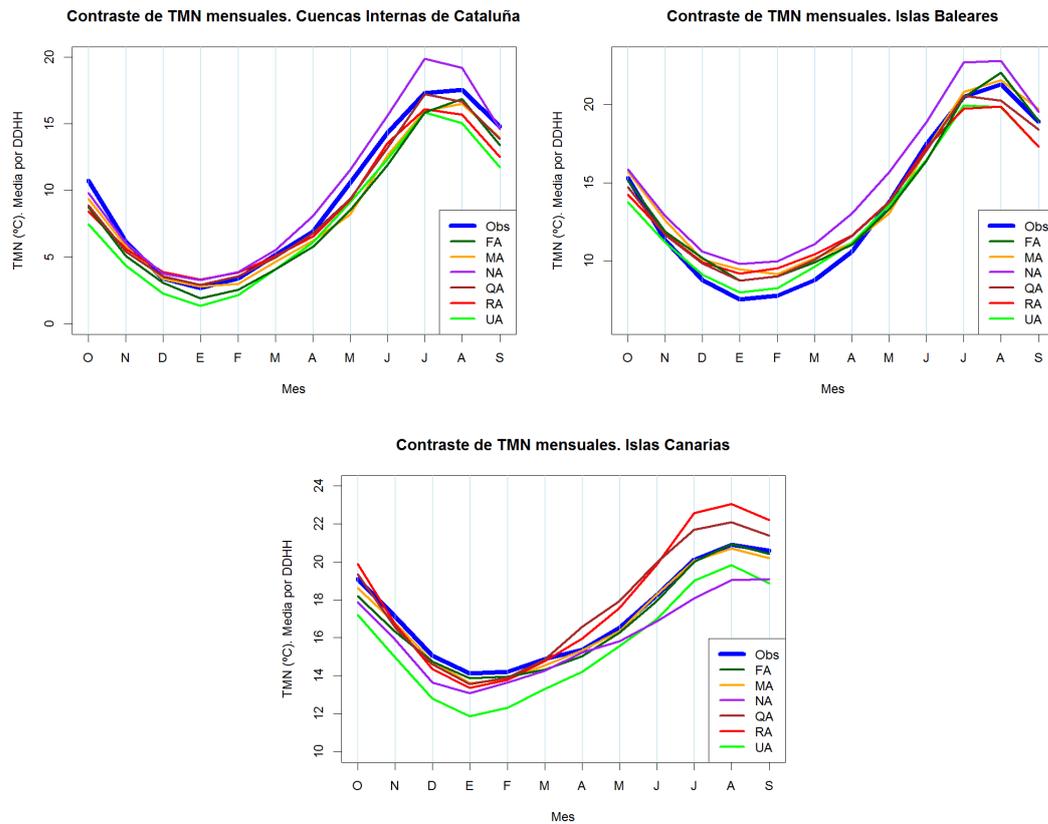


Figura 23. Distribución mensual de la TMN observada y la simulada para cada DH según valores en estaciones.

### 5.2.3 Temperatura máxima

Las proyecciones climáticas infravaloran ligeramente la TMX anual media para España, desde 0.1 °C (NA) a 2.5 °C (UA), y ajustan bien la variabilidad (Figura 24). Además, FA, MA, QA y RA reproducen la tendencia positiva significativa que dan los datos observados, tal como se ve en el p-valor del test de MannKendall. Por el contrario, las proyecciones UA y NA no reproducen la tendencia, con p-valores de 15% y 30% respectivamente.

## Evolución de la TMX anual España

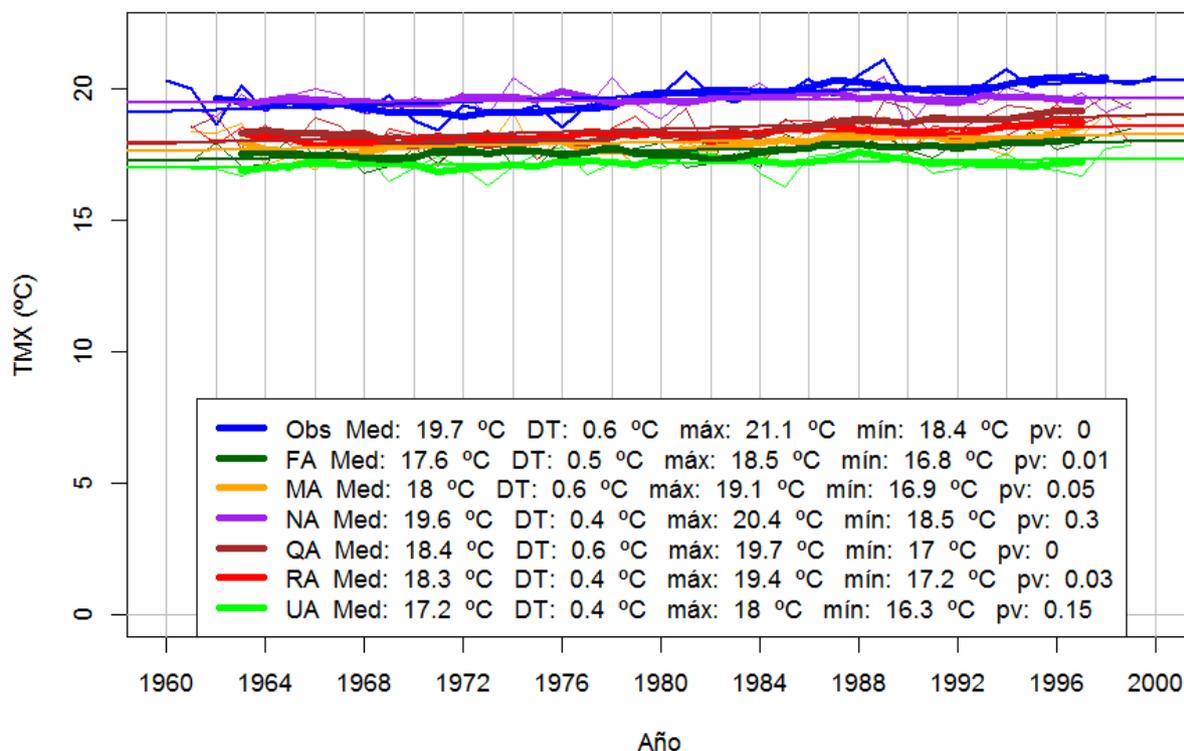
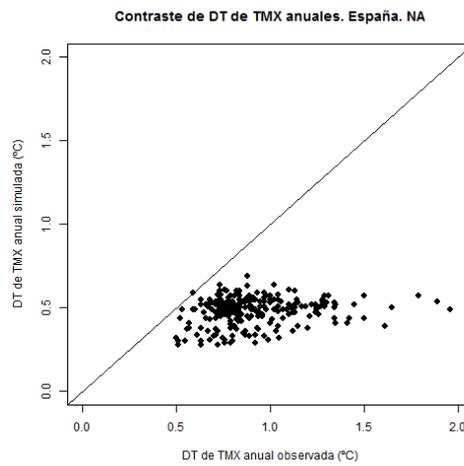
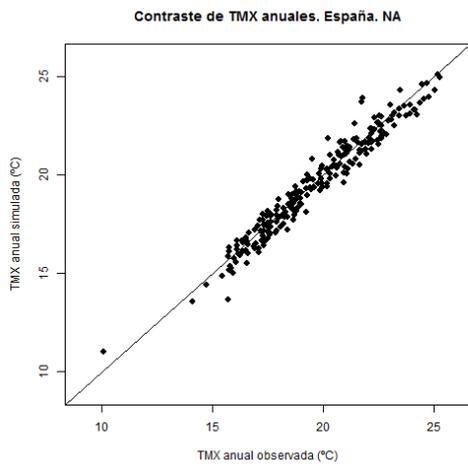
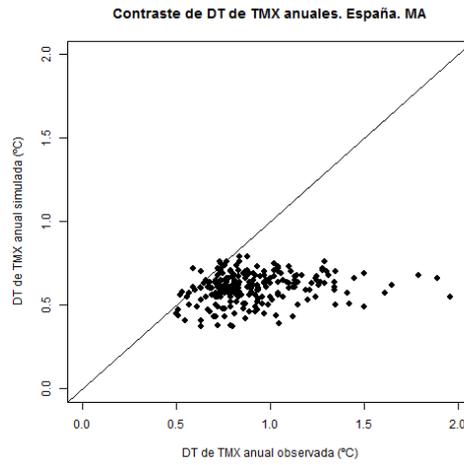
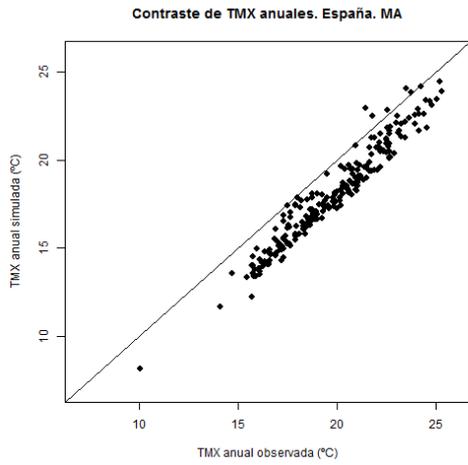
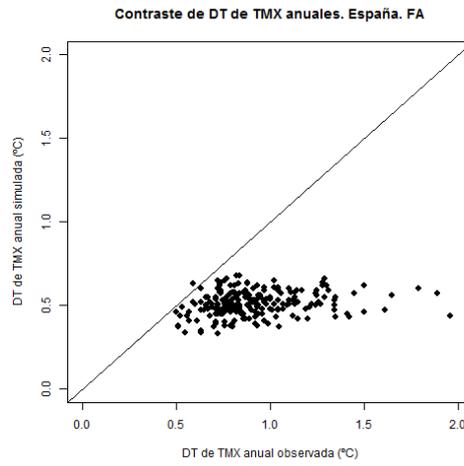
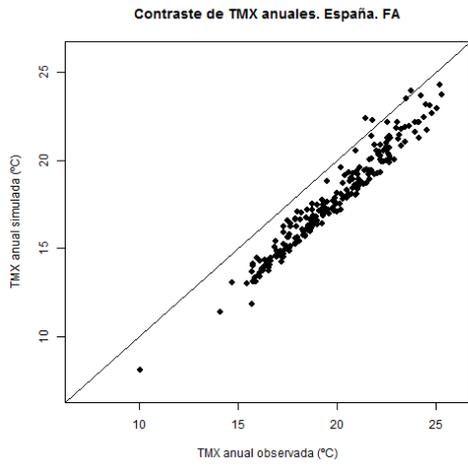


Figura 24. Evolución de la TMX anual para España para el PC según los datos observados (Obs) y los valores simulados en las 229 estaciones de contraste. También se muestran los estadísticos de cada serie para todo el periodo: medias (Med), desviación típica (DT), valores máximos (máx) y mínimos (mín) y p-valor obtenido con el test de Mann-Kendall (pv).

En los diagramas de dispersión para las series observadas y simuladas en cada estación se aprecia cómo los puntos que representan las medias de TMX están próximos a la bisectriz de  $45^\circ$ , si bien todas las proyecciones, salvo NA, infravaloran ligeramente las medias observadas, siendo más notable en las proyecciones FA y UA (Figura 25). Por otro lado, al igual que pasaba con la TMN, hay un desajuste de DT entre datos observados y valores simulados en estaciones ya que los valores simulados no recogen el rango de variación de los datos observados. Este desajuste discrepa con los valores de DT de la Figura 24 debido a que los de ésta se refiere a valores para toda España y no recoge la variabilidad espacial de la TMX observada entre estaciones.



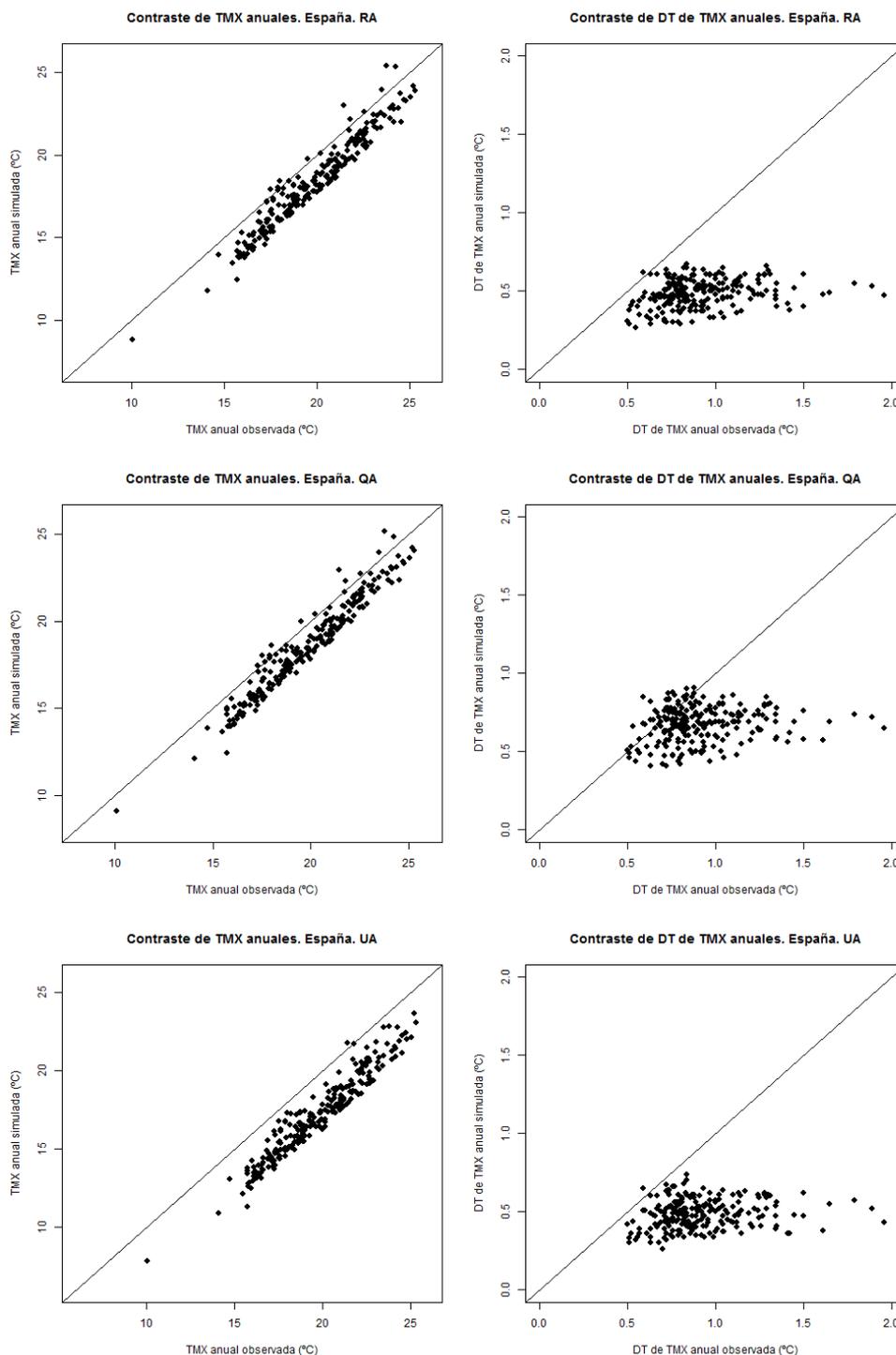
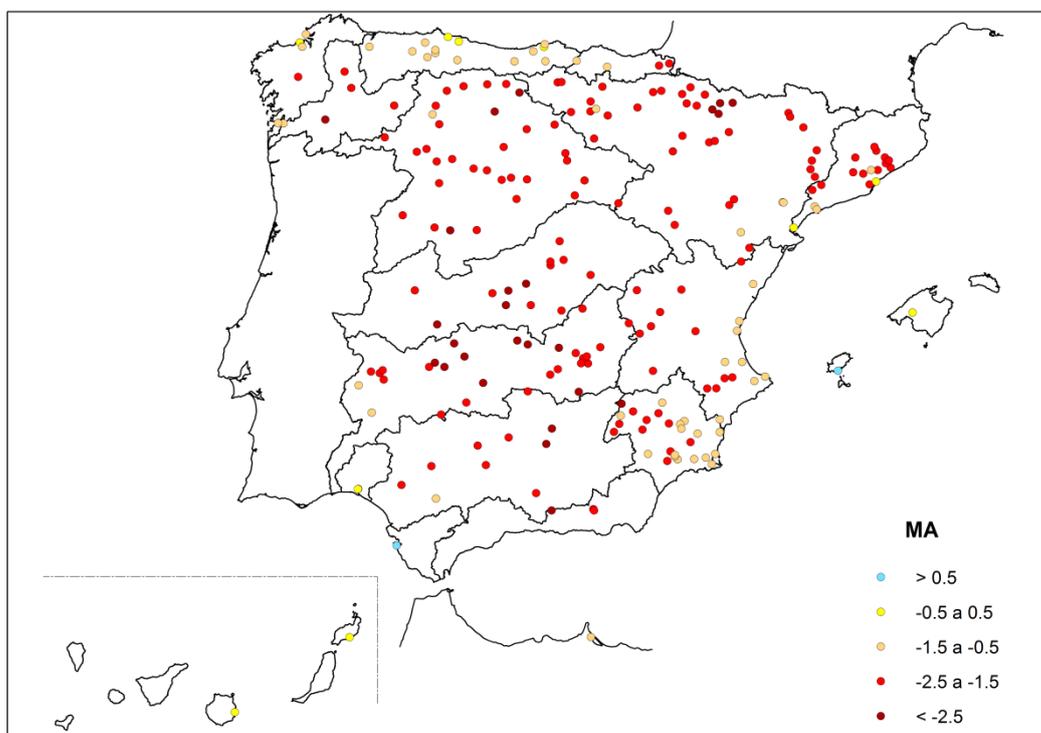
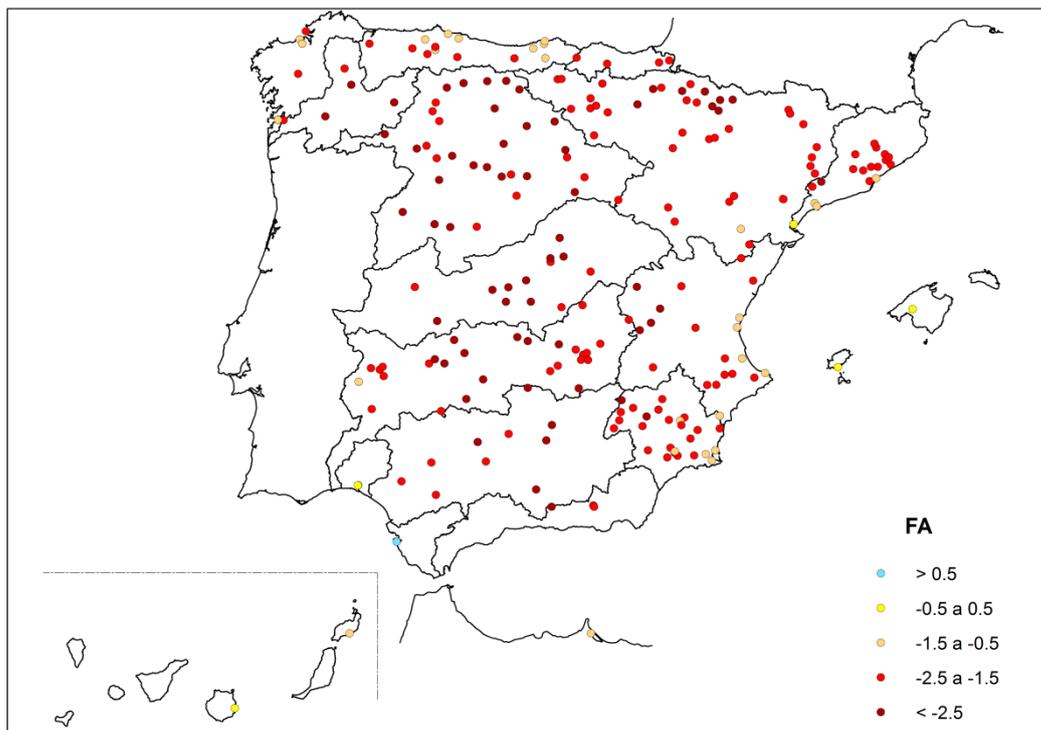


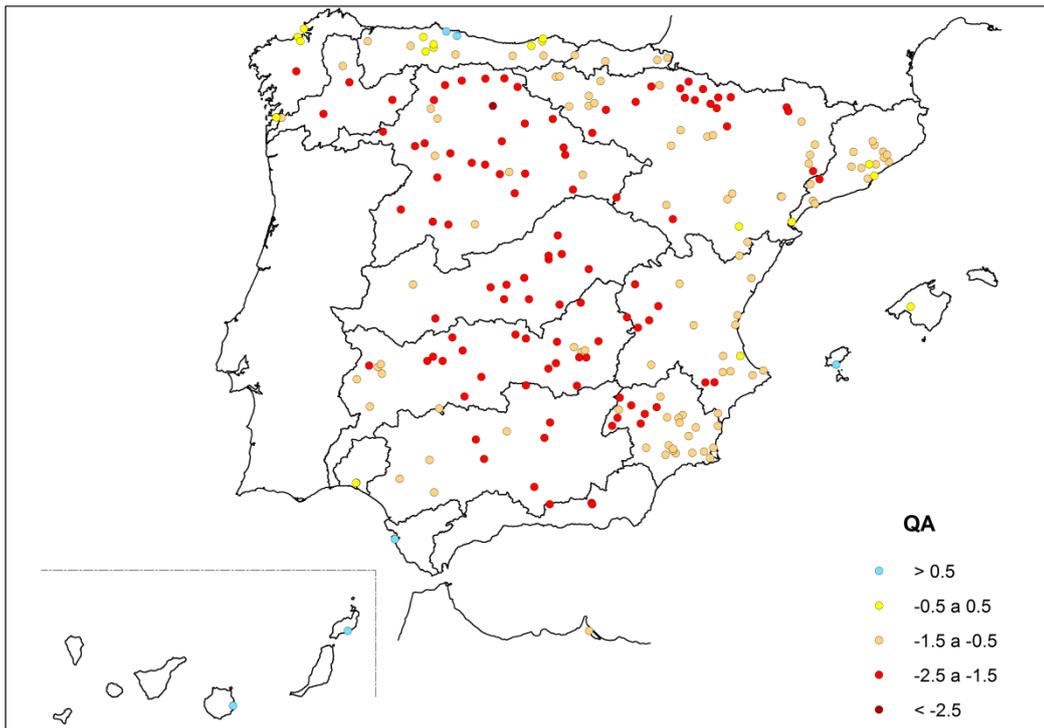
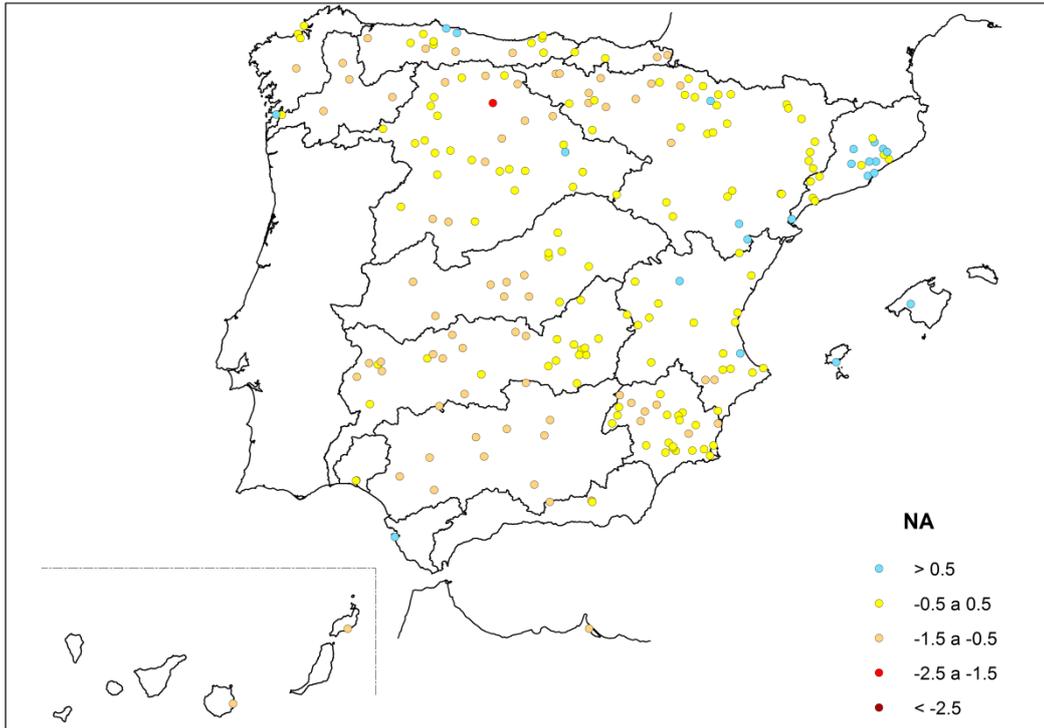
Figura 25. Diagramas de dispersión de la TMX observada frente a la TMX simulada en cada estación meteorológica. Izquierda: TMX media anual en el PC; derecha: DT de la TMX anual en el PC.

El sesgo espacial de los valores anuales de la TMX se muestra en la Figura 26. Se representa la diferencia de los valores simulados menos los datos observados. Las series simuladas en estaciones dan, en general, TMX menores que las de las series observadas. Con carácter general, la proyección NA es la que tiene menos sesgo. La



infravaloración es más notable en el centro peninsular, donde el desajuste supera los 2.5 °C, llegando a ser la diferencia de -4.4 °C en una estación del Duero según la proyección UA. Por otro lado, apenas hay estaciones en las que la simulación dé más TMX; la sobrevaloración máxima es de 2.12 °C y la da la proyección NA en las Islas Baleares.





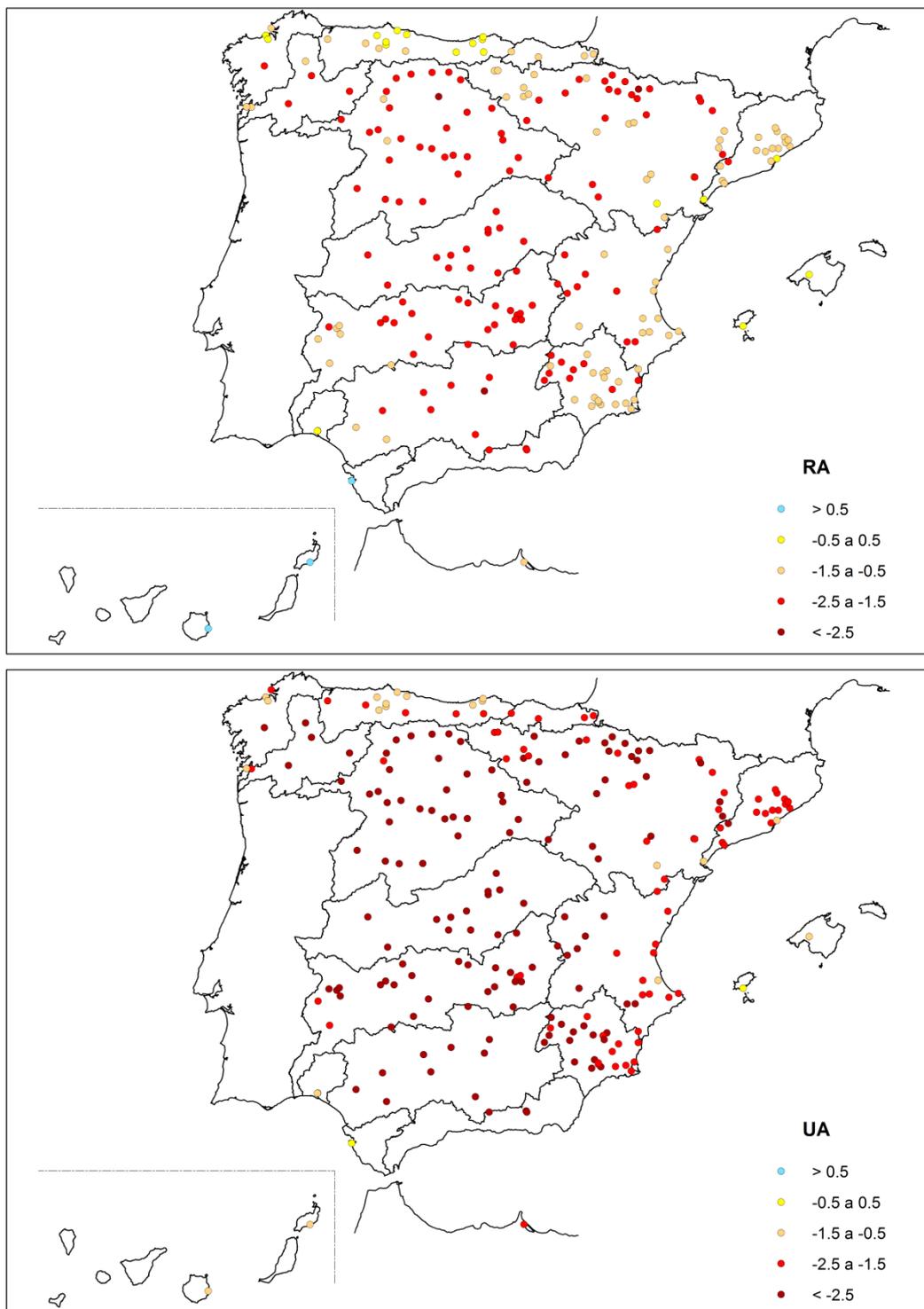


Figura 26. Mapas con las diferencias según las distintas proyecciones entre la TMX anual simulada y observada en las 229 estaciones meteorológicas donde se ha realizado el contraste.

Con relación al contraste de la estacionalidad, las proyecciones reproducen razonablemente bien el ciclo estacional observado para el conjunto de España (Figura 27). El ajuste es peor en verano ya que se simula menos TMX que la de los datos observados. De ese modo, se produce una ligera suavización de la estacionalidad de la

TMX, de manera similar a como ocurre con las TMN. UA es la que peor ajusta ya que infravalora la TMX en hasta 5 °C en los meses de verano.

### Contraste de TMX mensuales. España

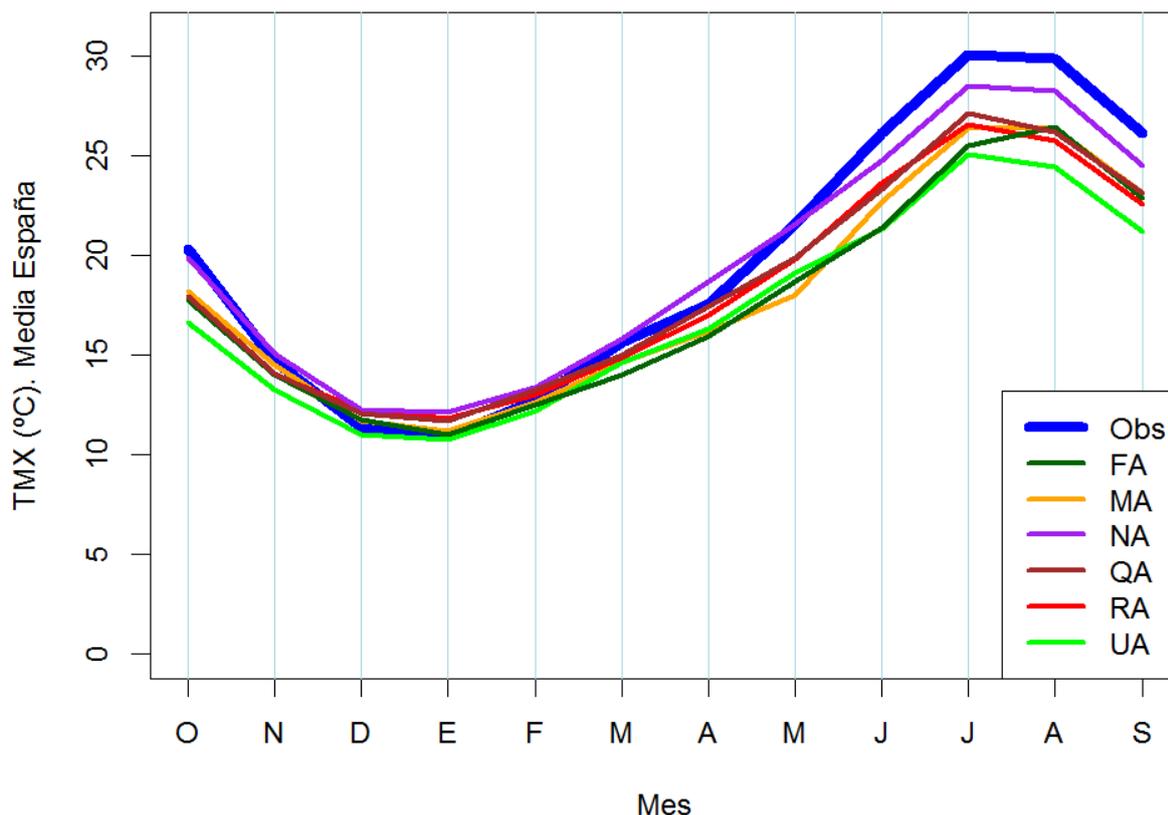


Figura 27. Distribución mensual de la TMX observada y simulada para el conjunto de España según valores en estaciones.

Similares resultados se observan cuando se contrasta la estacionalidad de la TMX en todas las DDHH (Figura 28), con las siguientes particularidades:

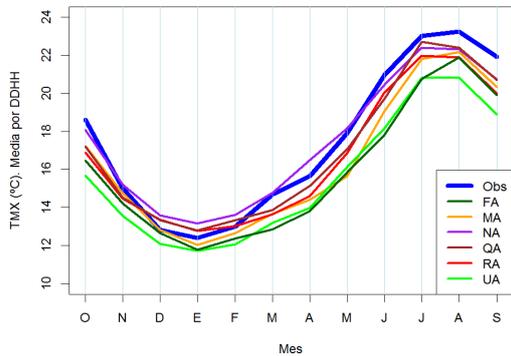
- En verano, se simulan menos TMX. Este hecho es más acusado en las DDHH de las grandes cuencas atlánticas y en la proyección UA. Llega a ser de unos 8 °C en las CC. Mediterráneas Andaluzas.
- La proyección NA es la que mejor ajusta los meses de verano.
- Se ajustan bien los valores de invierno, tan sólo destacan las sobrevaloraciones de las TMX de invierno en Guadalete y Barbate y Tinto, Odiel y Piedras.
- De manera parecida que en el caso de las TMN, en Canarias, FA y MA ajustan muy bien, RA y QA sobrevaloran la TMN en verano y UA y NA la infravaloran sobre todo en invierno, suavizando esta última el ciclo anual.



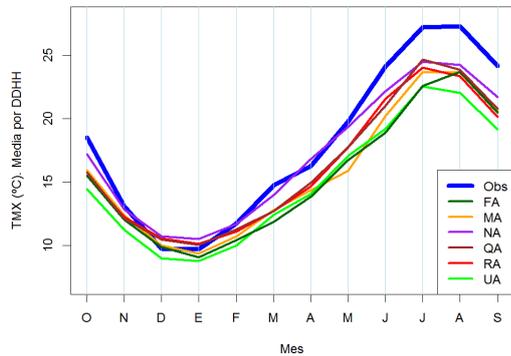
CEDEX

### Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España

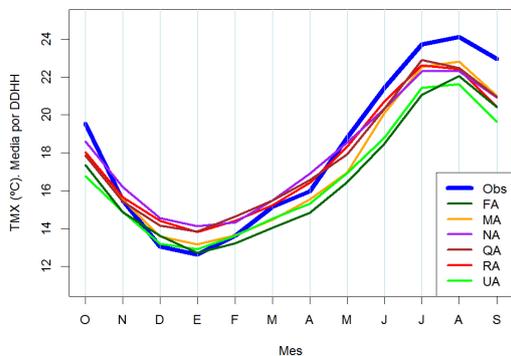
Contraste de TMX mensuales. Galicia Costa



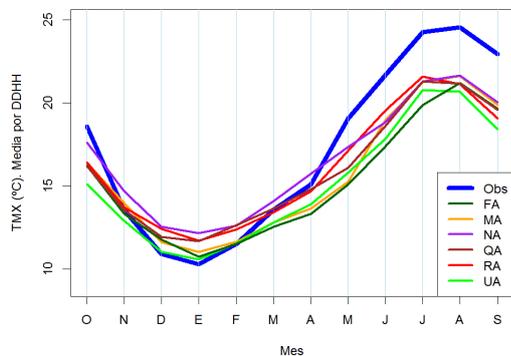
Contraste de TMX mensuales. Miño-Sil



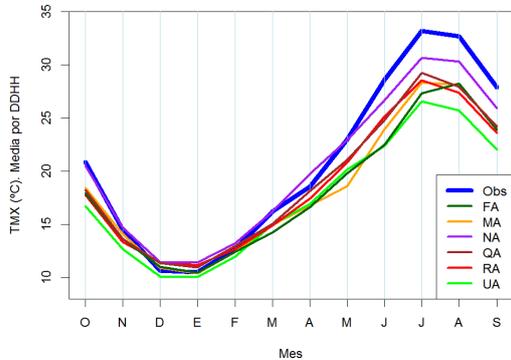
Contraste de TMX mensuales. Cantábrico Occidental



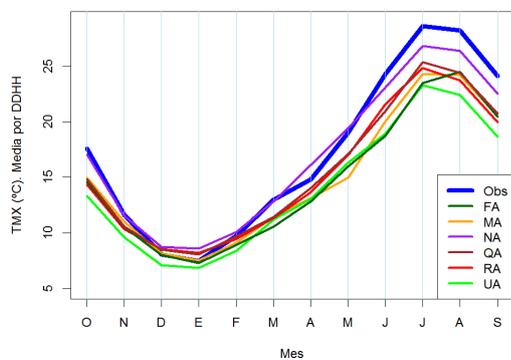
Contraste de TMX mensuales. Cantábrico Oriental



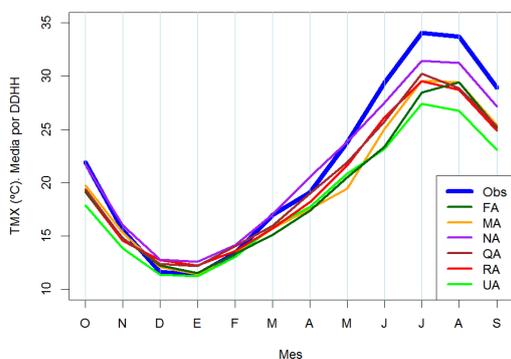
Contraste de TMX mensuales. Tajo



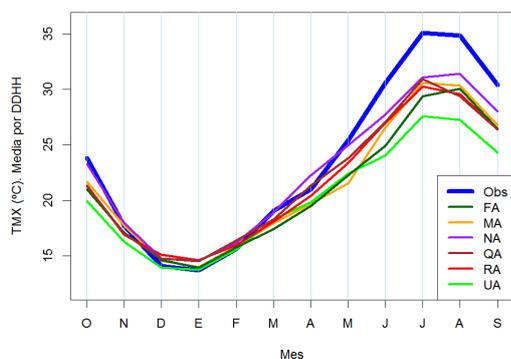
Contraste de TMX mensuales. Duero



Contraste de TMX mensuales. Guadiana

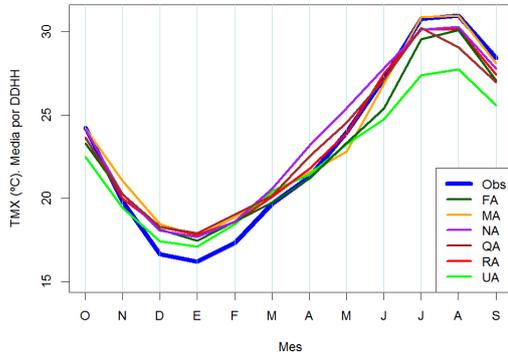


Contraste de TMX mensuales. Guadalquivir

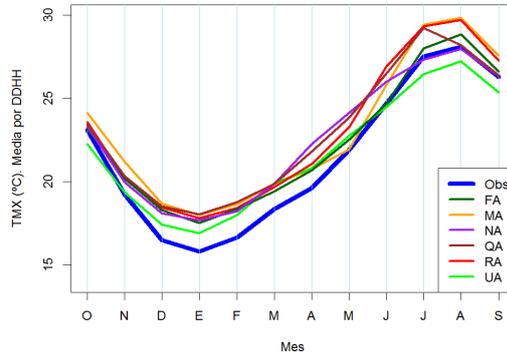




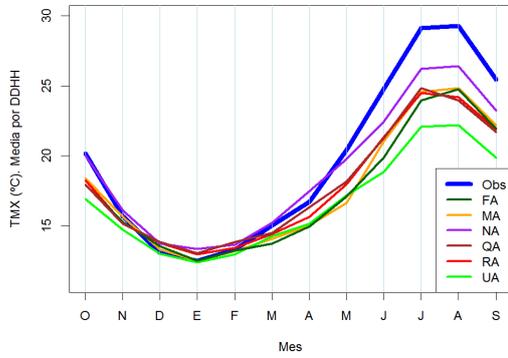
Contraste de TMX mensuales. Tinto, Odiel y Piedras



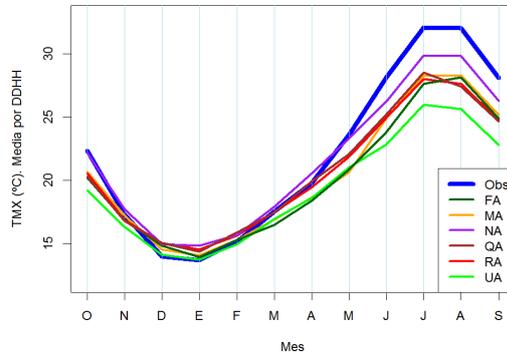
Contraste de TMX mensuales. Guadalete y Barbate



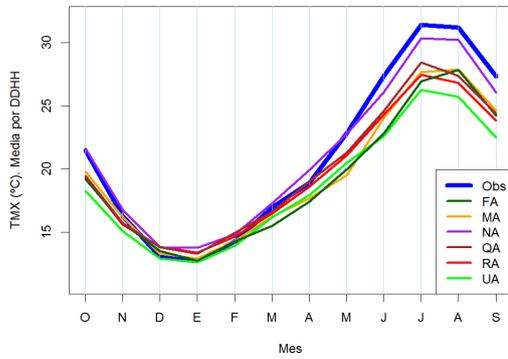
Contraste de TMX mensuales. CC. Mediterráneas Andaluzas



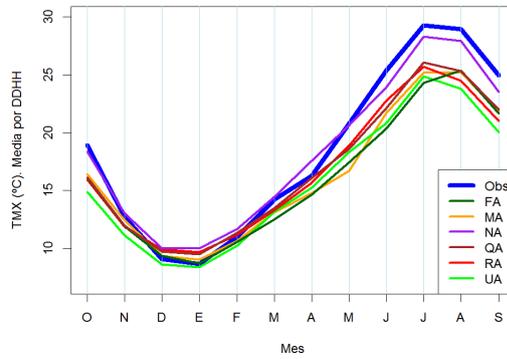
Contraste de TMX mensuales. Segura



Contraste de TMX mensuales. Júcar



Contraste de TMX mensuales. Ebro





CEDEX

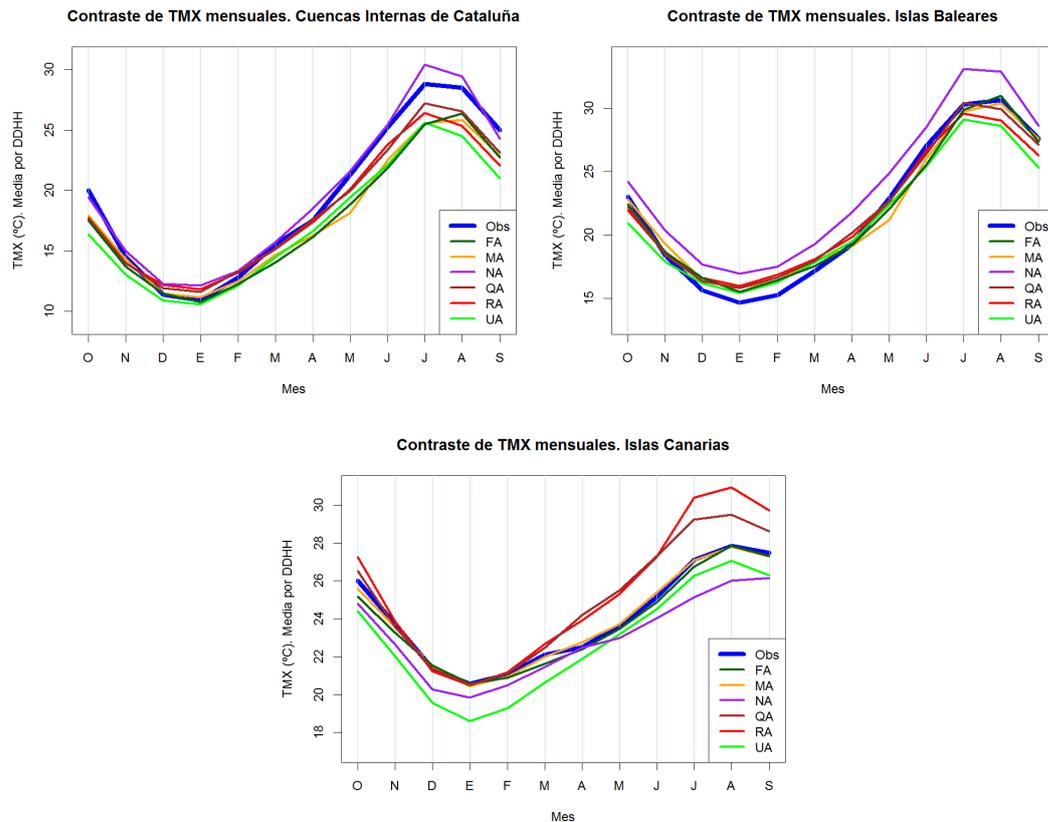


Figura 28. Distribución mensual de la TMX observada y la simulada para cada DH según valores en estaciones.

### 5.2.4 Precipitación

En la Figura 29 se muestra el resultado del contraste de PRE durante el PC. Hay que tener en cuenta que los valores de dicha figura se han obtenido promediando los valores de PRE simulados u observados en las 621 estaciones donde se ha realizado el contraste. Estas medias son inferiores a las que se obtendrían de una mapa continuo puesto que esas estaciones no recogen la PRE de las zonas más montañosas, donde más llueve, y además no están repartidas de manera representativa por el territorio ya que hay pocas estaciones donde más llueve (NO) (Figura 18).

Las proyecciones climáticas FA, MA y QA ajustan bastante bien la PRE media observada para España ya que la sobrevaloran en menos del 4 %, mientras que RA la sobrevalora un 16 %, UA la infravalora un 8% y NA la infravalora en un 17% (Figura 29). Algo similar ocurre con la variabilidad anual y los valores máximos y mínimos; RA y NA son las que más se alejan de los valores observados, RA da la mayor variabilidad y mayores valores y NA los da menores. Por otro lado, ninguna proyección reproduce la tendencia negativa significativa que dan los datos observados, tal como se ve en el p-valor del test de MannKendall, que es inferior a 10% y por tanto significativamente decreciente para los datos observados; al contrario que todas las proyecciones, que tienen p-valores del 31% al 85% y que, por lo tanto, no muestran ningún tipo de tendencia.

Por tanto, las proyecciones no captan la reducción de PRE que indican los datos observados a partir de los años 80, como por ejemplo la sequía que ocurrió alrededor del año 1992. El hecho de que no se capte esa tendencia negativa con esa disminución de PRE puede tener una importante repercusión a la hora de elegir el periodo de las series observadas a las que aplicar los porcentajes de impacto del cambio climático, como se comentará en capítulos posteriores de este informe.

### Evolution de la PRE anual España

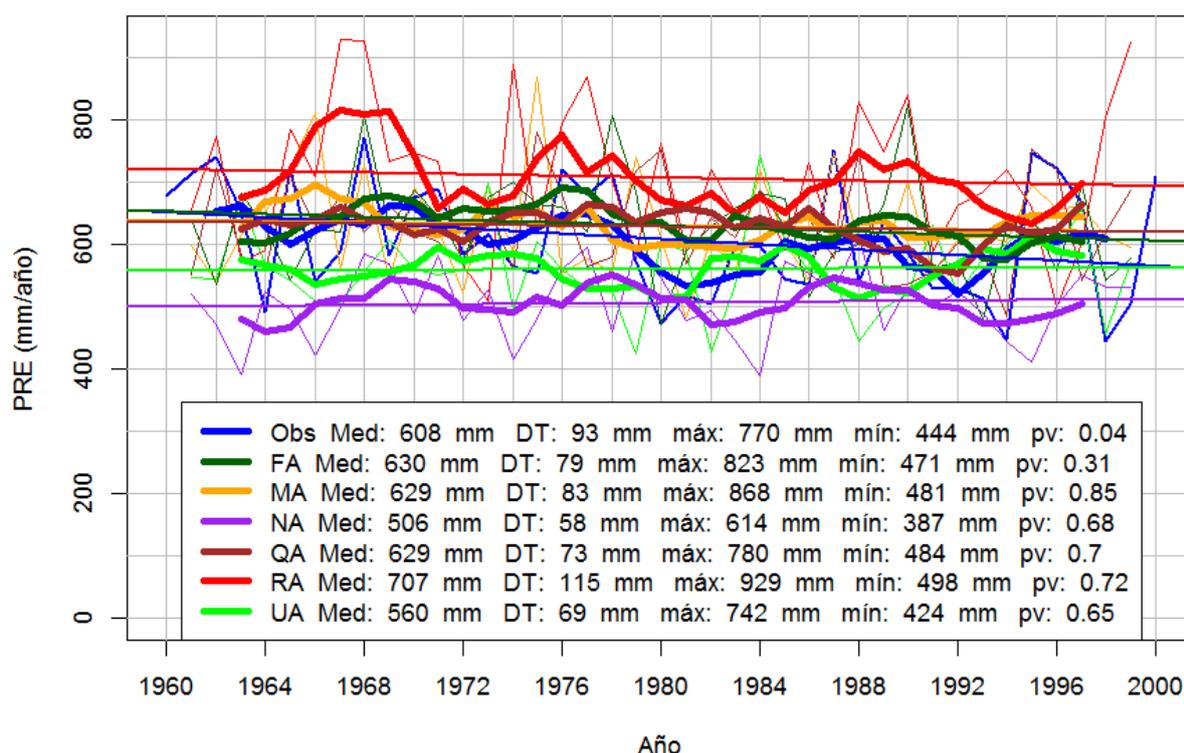
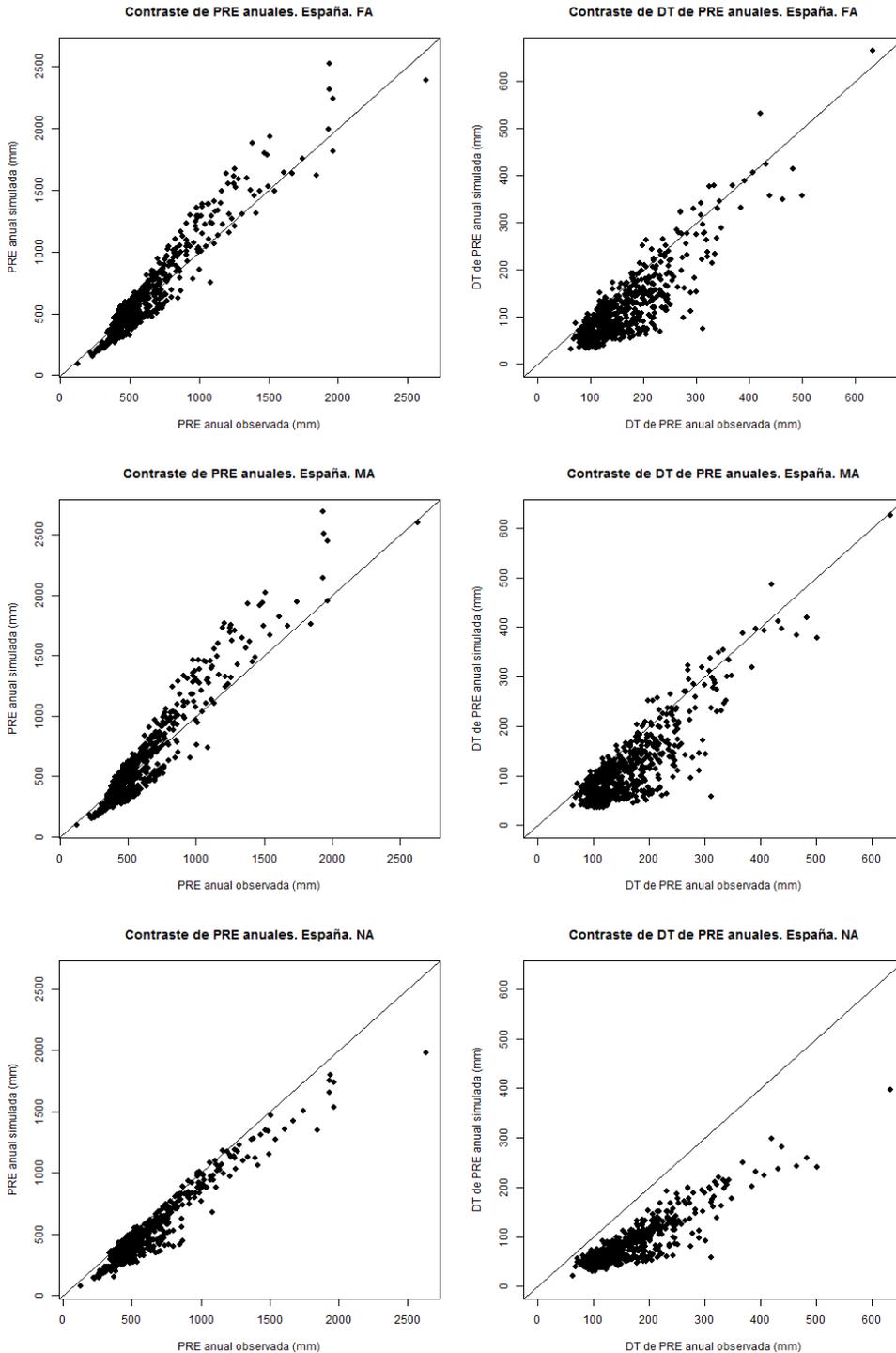


Figura 29. Evolución de la PRE media anual para España para el PC según los datos observados (Obs) y los valores simulados en las 621 estaciones de contraste. También se muestran los estadísticos de cada serie para todo el periodo: medias (Med), desviación típica (DT), valores máximos (máx) y mínimos (mín) y p-valor obtenido con el test de Mann-Kendall (pv).

En los diagramas de dispersión para las series observadas y simuladas en cada estación se aprecian desviaciones de los puntos respecto a la bisectriz (Figura 30). Destaca la existencia de dos nubes de puntos para las medias anuales en FA, MA, QA y RA y nubes menos diferenciadas en NA y UA. Estas nubes reflejarían la existencia de dos grupos de estaciones. Una primera nube estaría por debajo de la bisectriz y sus valores estarían por debajo de unos 1000 mm/año; corresponde a las estaciones de las cuencas mediterráneas. La segunda nube abarcaría todo el rango de valores, estaría por encima de la bisectriz y tendría mayor pendiente que ésta, lo que indica que esas proyecciones tienden a sobrevalorar los valores más altos. Esta segunda nube corresponde a las estaciones de las cuencas atlánticas. Las estaciones de Canarias dan puntos entre ambas nubes y con bajos valores. Dicho de otro modo, se infravalora la PRE en las cuencas mediterráneas y se sobrevalora en las atlánticas. Por otra parte,



la DT de valores anuales de PRE en cada estación es menor según FA, MA, QA, UA y, sobre todo NA, que según los datos observados. Esta menor variabilidad de valores anuales simulados en estaciones está en consonancia con la menor variabilidad de valores anuales simulados en España mostrada en la figura anterior.



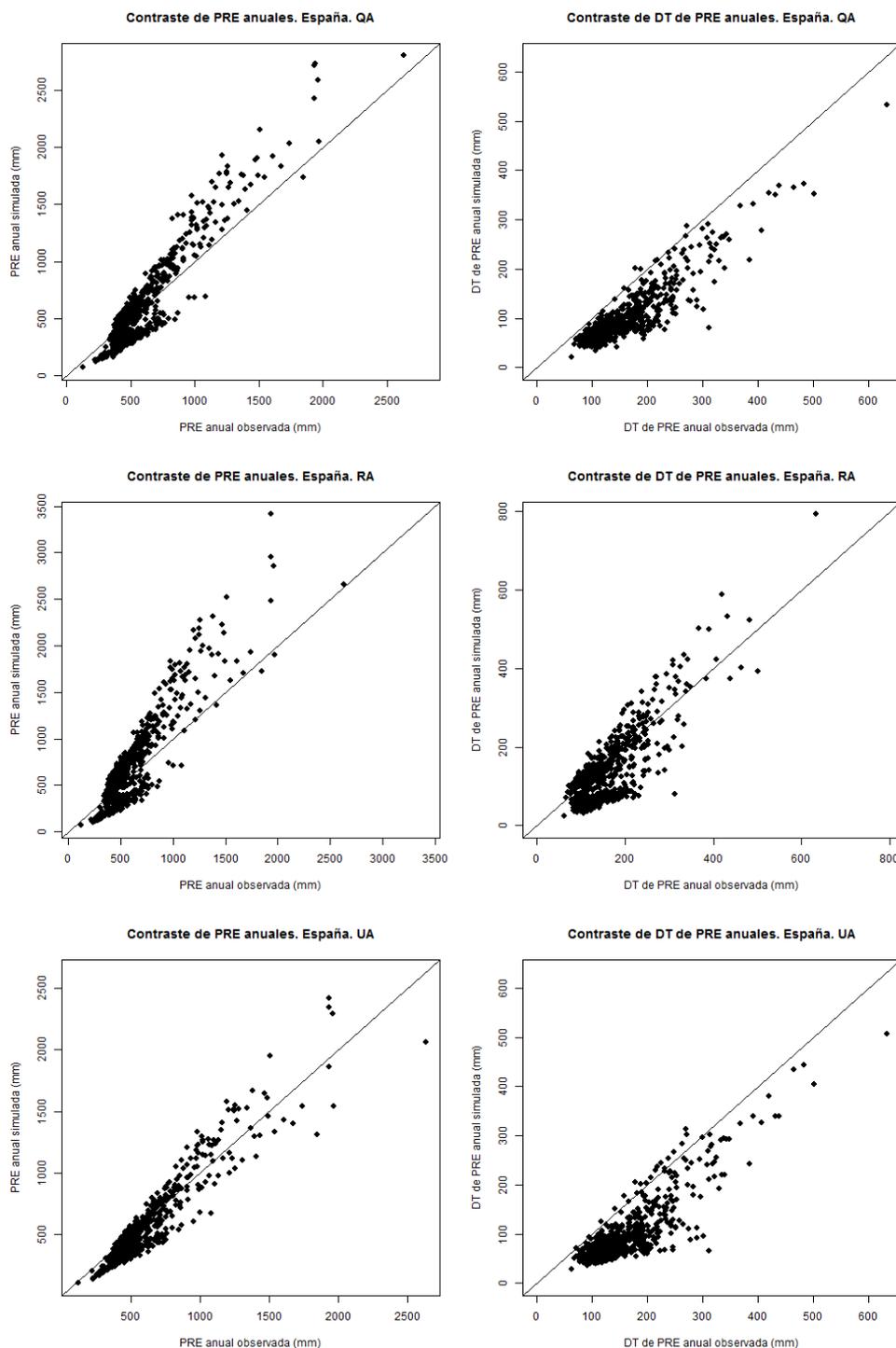
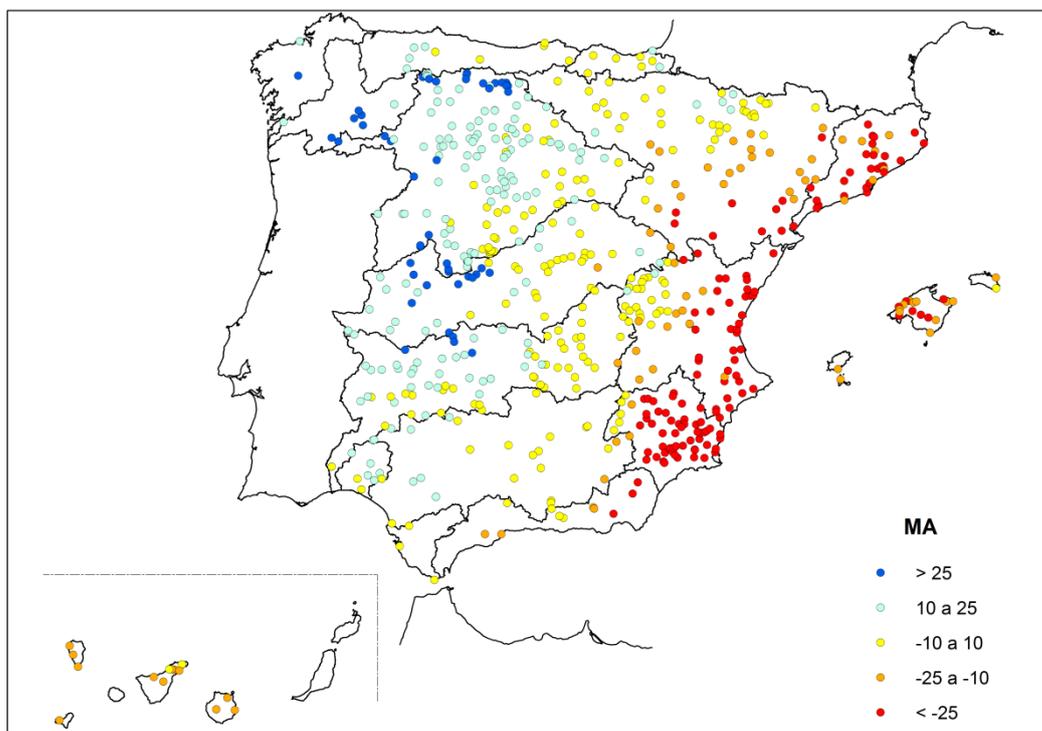
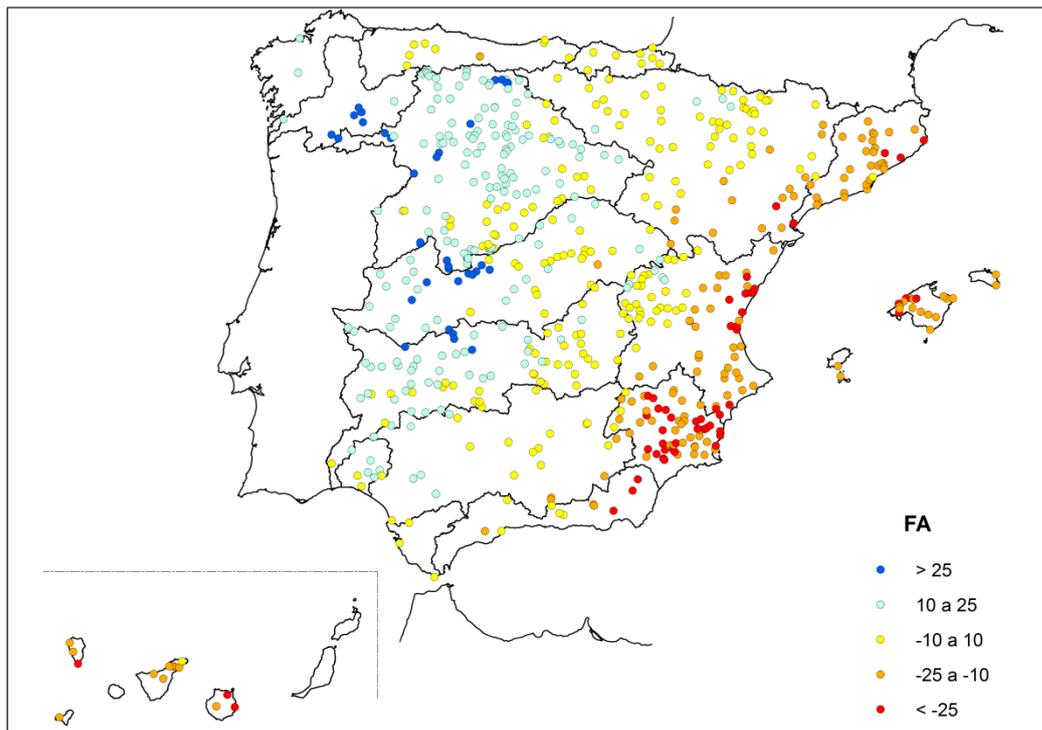


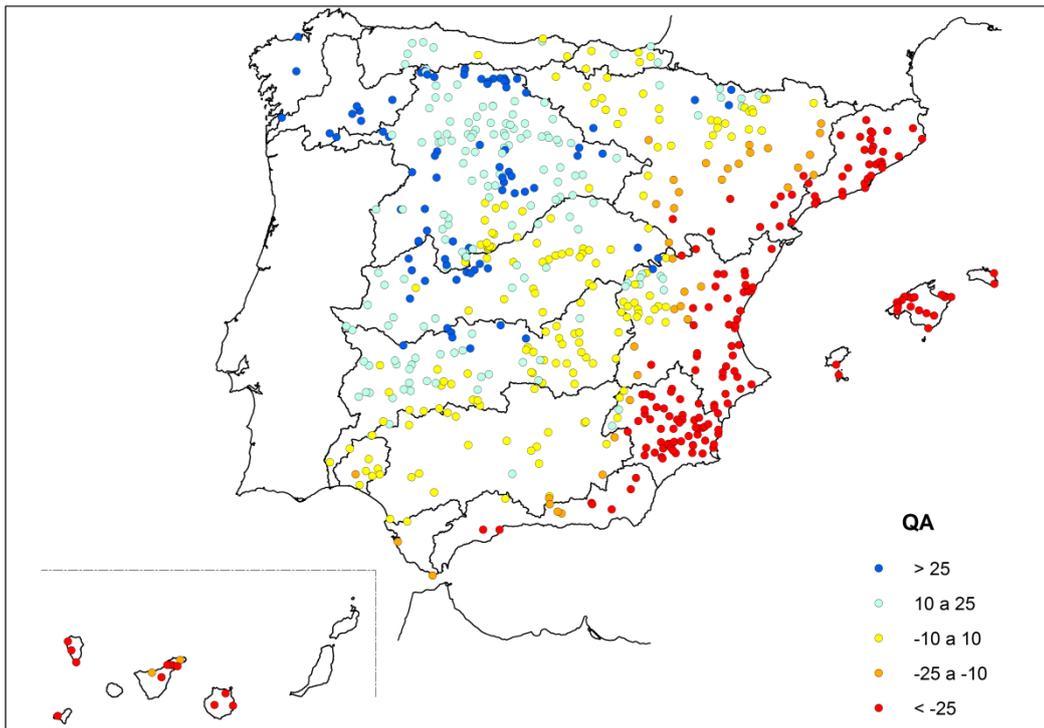
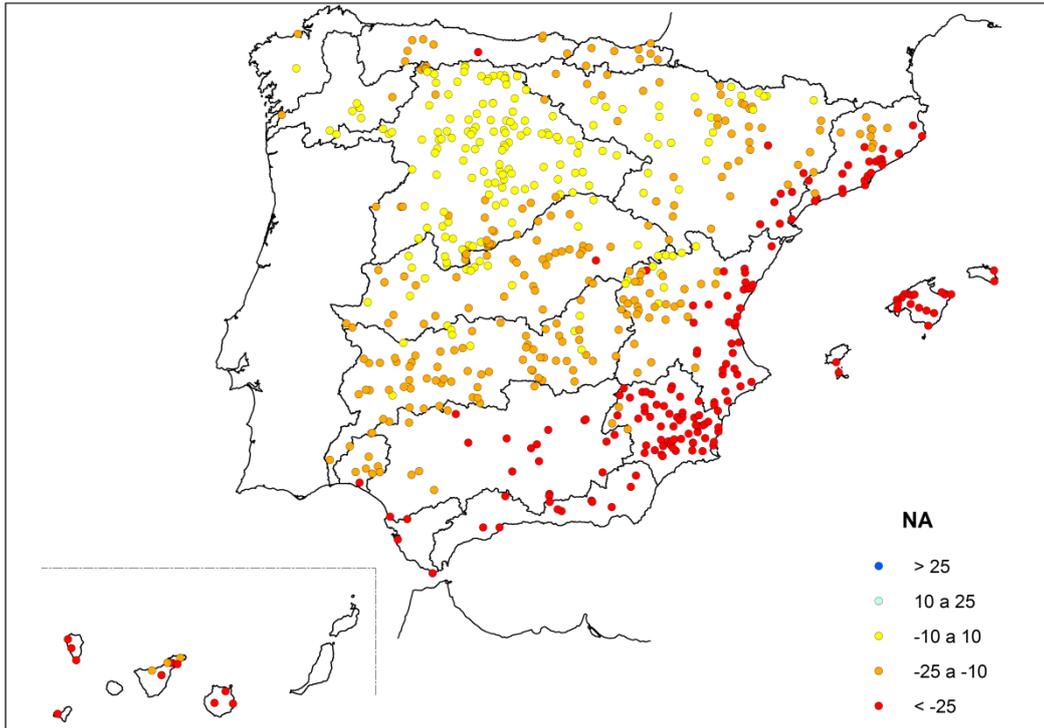
Figura 30. Diagramas de dispersión de la PRE observada frente a la PRE simulada en cada estación meteorológica. Izquierda: PRE media anual en el PC; derecha: desviación típica de la PRE anual en el PC.

El sesgo espacial de los valores anuales de la PRE se muestra en la Figura 31. Se representa el error medio relativo (EMR), o diferencia porcentual de los valores simulados menos los datos observados. Los valores de ese EMR están en el rango



entre -59% y + 86%. Todas las proyecciones presentan un sesgo con un patrón E-O. Infravaloran la PRE hacia el este y Baleares y simulan más PRE (o al menos la igualan, como NA) hacia el oeste peninsular. Este patrón de sesgo es más marcado en RA, con EMR inferiores a -25 % en muchos puntos de las cuencas mediterráneas y superiores al 25 % en muchos puntos de algunas cuencas atlánticas. Todas las proyecciones infravaloran las PRE en Canarias, especialmente NA, QA y RA.





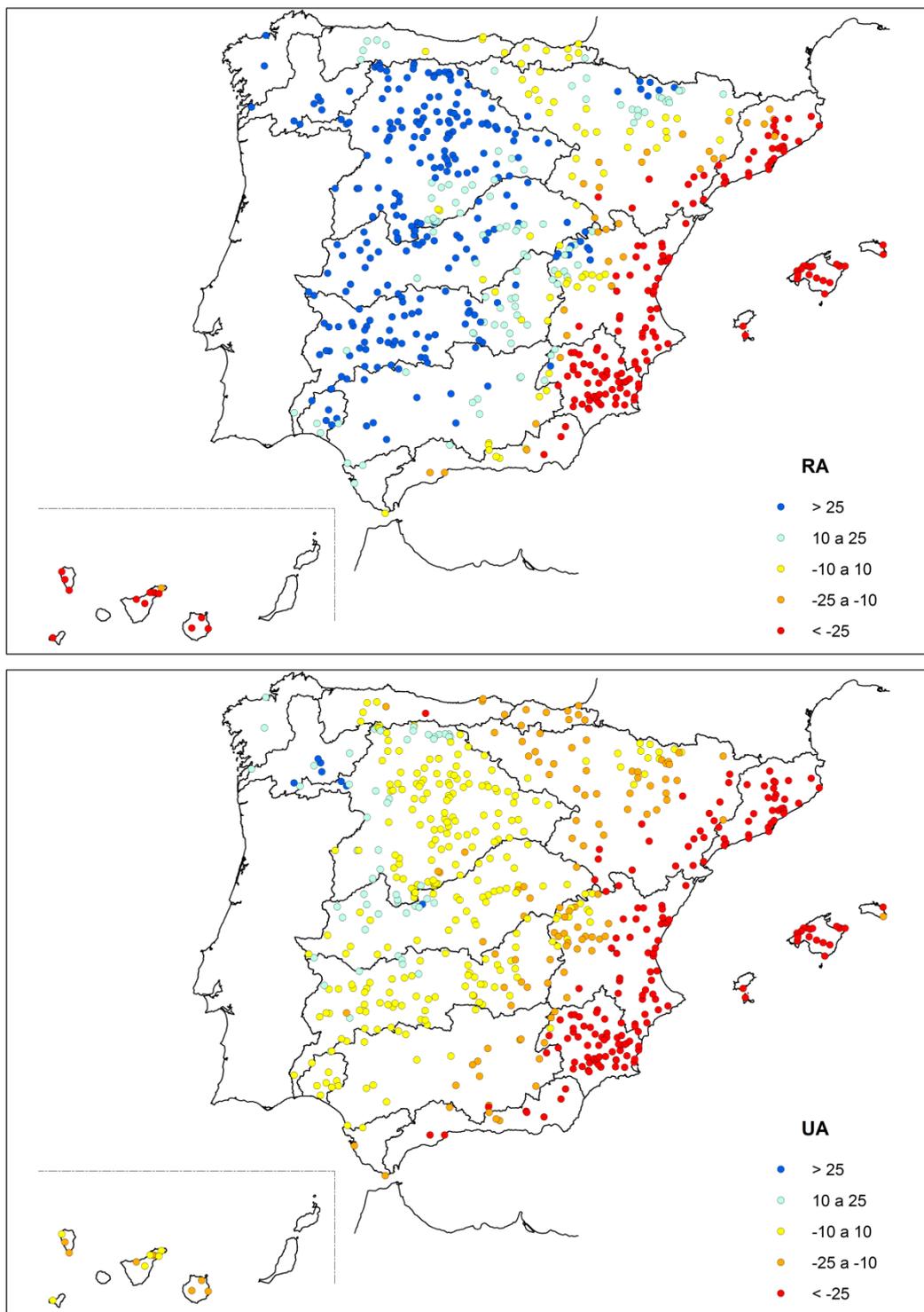


Figura 31. Mapa con los EMR (%) de la PRE anual simulada según las distintas proyecciones en las 621 estaciones meteorológicas donde se ha realizado el contraste.

Se han promediado los valores de PRE en las estaciones de contraste que caen en cada DH y se ha calculado el EMR de los valores simulados por las proyecciones en el PC (Tabla 5). Se ve claramente la diferencia de ajuste entre proyecciones y según el ámbito territorial. La proyección NA es la única que infravalora la PRE en todos los

ámbitos territoriales. La mayoría de las proyecciones sobrevalora la PRE en las DDHH del oeste peninsular (desde Galicia a Tinto, Odiel y Piedras), con EMR muy altos en el NO. Por el contrario, todas las proyecciones infravaloran la PRE en las DDHH del este peninsular, desde las Cuencas Internas (CCII) de Cataluña a las CC. Med. Andaluzas y en los archipiélagos. Este sesgo de la PRE simulada tiene unas importantes connotaciones en la evaluación de los RRHH por la relación no lineal que existe entre la PRE y la ESC. La influencia en los resultados de impacto es menor en las zonas donde se sobrestima la PRE ya que coincide con una mayor PRE y por lo tanto donde la relación entre la PRE y la ESC es más lineal. No ocurre lo mismo con las zonas donde se infravalora la PRE, ya que son zonas donde además hay una baja PRE, por lo que una hipotética reducción de PRE en los PI respecto al PC supondría una reducción más acusada de ESC, tanto más acusada cuanto más se infravalorara la PRE. Así pues, este sesgo añade más incertidumbre a los resultados de impacto obtenidos en las zonas del este peninsular y en los archipiélagos.

Tabla 5. Valores de PRE anual observados (OBS) y simulados durante el PC en diferentes DDHH. Se han obtenido como promedio de los valores en las estaciones de contraste que caen en cada DH. También se indica el EMR para cada una de las 6 proyecciones.

	PRE (mm/año)							EMR (%)					
	OBS	FA	MA	NA	QA	RA	UA	FA	MA	NA	QA	RA	UA
Miño-Sil	921	1210	1327	908	1428	1595	1170	31	44	-1	55	73	27
Galicia Costa	1641	1900	2078	1475	2205	2412	1951	16	27	-10	34	47	19
Cantábrico Oriental	1687	1618	1764	1366	1850	1744	1402	-4	5	-19	10	3	-17
Cantábrico Occidental	1318	1301	1429	1059	1451	1441	1135	-1	8	-20	10	9	-14
Duero	620	732	743	588	769	894	663	18	20	-5	24	44	7
Tajo	692	813	829	610	828	1012	739	17	20	-12	20	46	7
Guadiana	535	603	605	457	604	728	538	13	13	-15	13	36	1
Guadalquivir	559	569	588	407	568	681	502	2	5	-27	2	22	-10
CC Med Andaluzas	492	437	432	297	360	433	364	-11	-12	-40	-27	-12	-26
Guadalete y Barbate	625	647	658	425	553	703	548	4	5	-32	-12	12	-12
Tinto, Odiel y Piedras	631	713	699	505	616	801	645	13	11	-20	-2	27	2
Segura	362	285	269	243	243	228	250	-21	-26	-33	-33	-37	-31
Júcar	519	470	433	399	435	453	405	-9	-17	-23	-16	-13	-22
Ebro	654	650	627	578	662	711	559	-1	-4	-12	1	9	-14
CCII de Cataluña	681	545	489	485	447	470	439	-20	-28	-29	-34	-31	-36
Islas Baleares	589	461	455	317	359	350	396	-22	-23	-46	-39	-41	-33
Canarias	432	355	367	285	273	286	390	-18	-15	-34	-37	-34	-10

Con relación a la estacionalidad, UA reproduce bien el ciclo anual; FA, MA, QA y RA dan un exceso de PRE en los meses de invierno y, RA en primavera, con lo que acentúan el ciclo anual (Figura 32). Los altos valores de RA en esos meses motivan altos valores anuales, en consonancia con los de la Figura 29. Por otro lado, NA infravalora mucho la PRE de otoño y de primavera lo que también está en consonancia con los de baja PRE de la Figura 29.



### Contraste de PRE mensuales. España

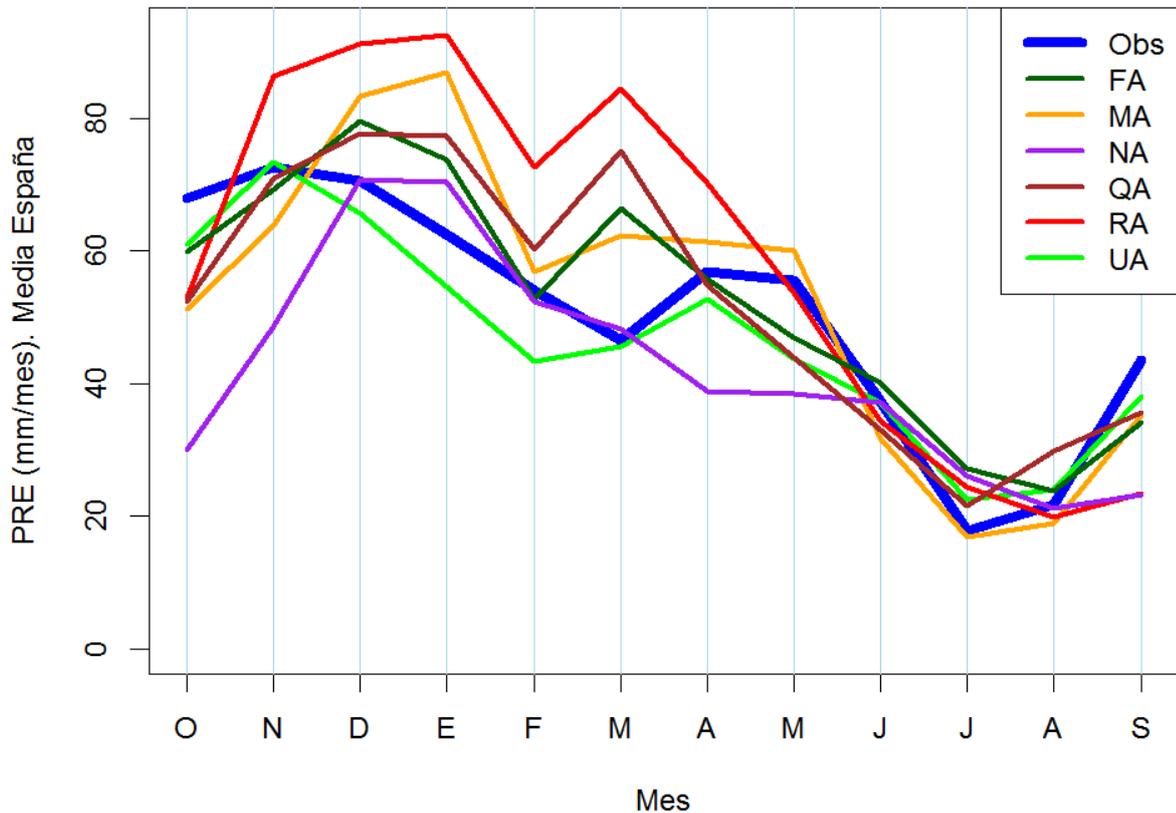
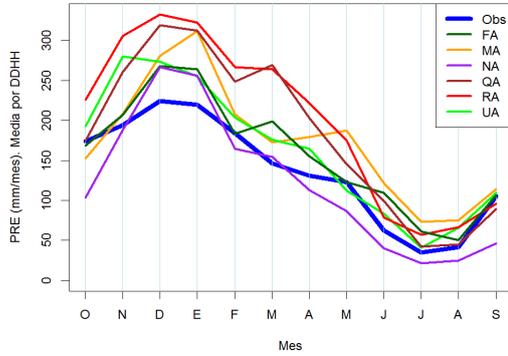


Figura 32. Distribución mensual de la PRE observada y la simulada según las distintas proyecciones para el conjunto de España según valores en estaciones.

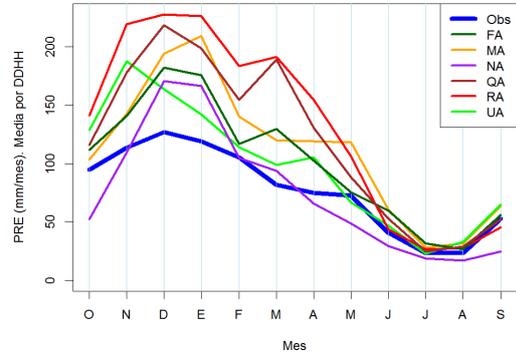
Se extraen las siguientes conclusiones respecto al ajuste del ciclo anual en las diferentes DDHH (Figura 33):

- El patrón del ciclo anual para el conjunto de España coincide con el de las grandes cuencas atlánticas; de hecho, son éstas las que determinan en gran medida el del conjunto de España.
- RA acentúa mucho los valores de marzo y abril.
- Hay un menor desajuste general en las DDHH del Cantábrico.
- En Tinto, Odiel y Piedras y Guadalete y Barbate, hay un menor desajuste en invierno y persiste acentuado el de inicios de primavera.
- No se capta bien el ciclo anual en las DDHH mediterráneas ya que no se recogen bien los máximos otoñales y hay dificultades para recoger el de primavera.
- En Canarias, todas las proyecciones suavizan el ciclo anual ya que dan menos PRE en otoño e invierno.

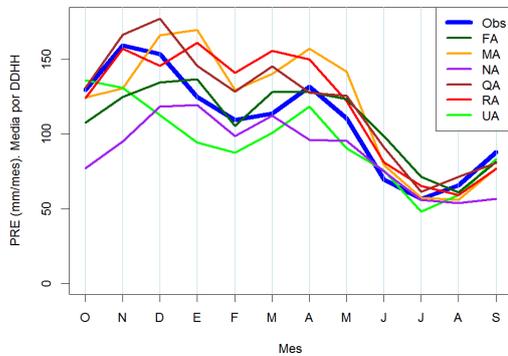
Contraste de PRE mensuales. Galicia Costa



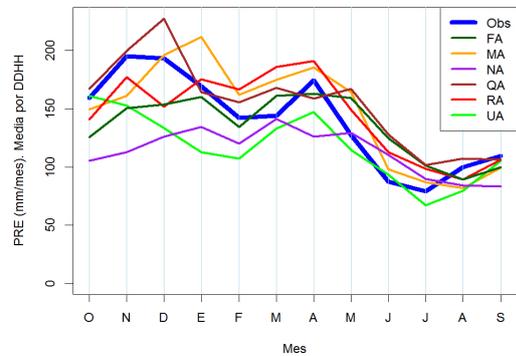
Contraste de PRE mensuales. Miño-Sil



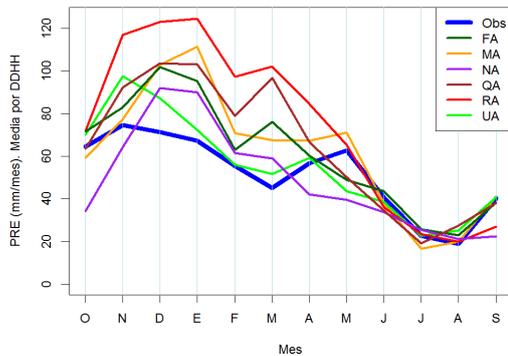
Contraste de PRE mensuales. Cantábrico Occidental



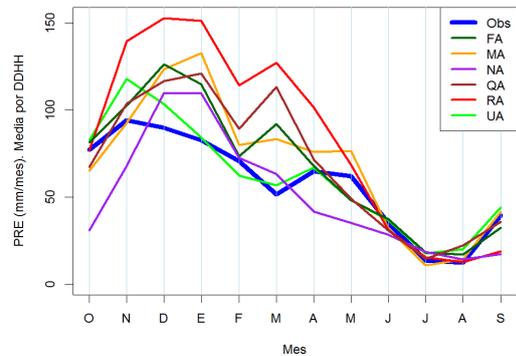
Contraste de PRE mensuales. Cantábrico Oriental



Contraste de PRE mensuales. Duero



Contraste de PRE mensuales. Tajo

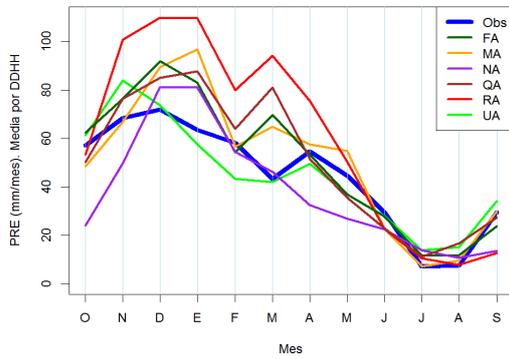




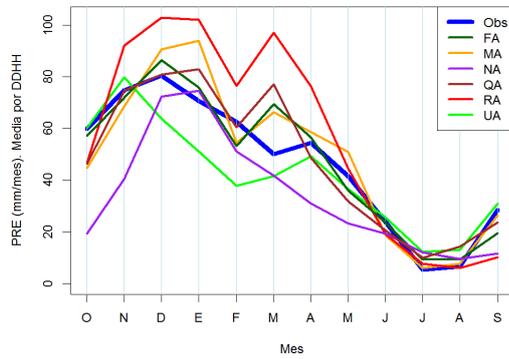
CEDEX

# Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España

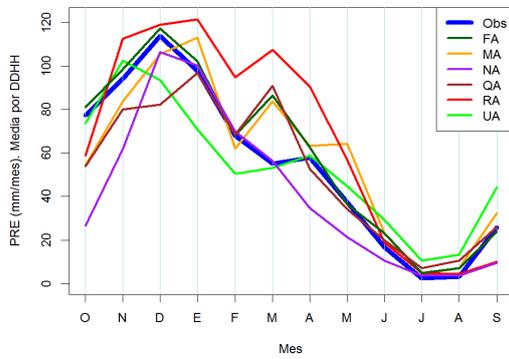
Contraste de PRE mensuales. Guadiana



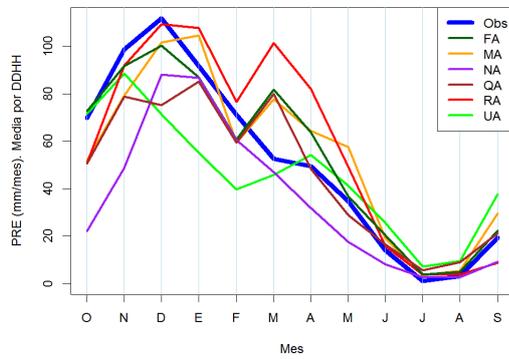
Contraste de PRE mensuales. Guadalquivir



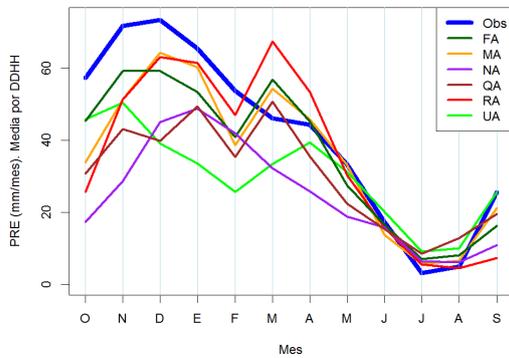
Contraste de PRE mensuales. Tinto, Odiel y Piedras



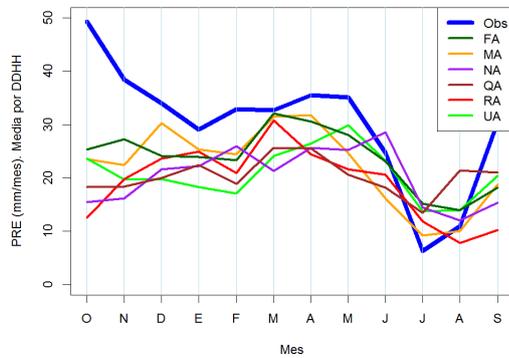
Contraste de PRE mensuales. Guadalete y Barbate



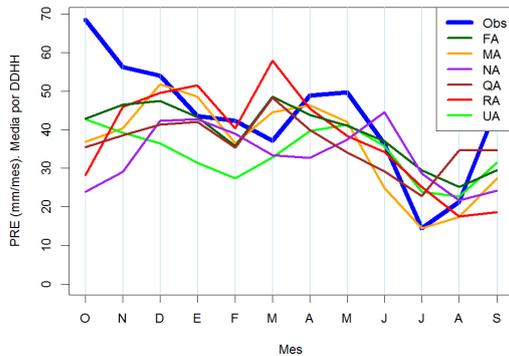
Contraste de PRE mensuales. CC. Mediterráneas Andaluzas



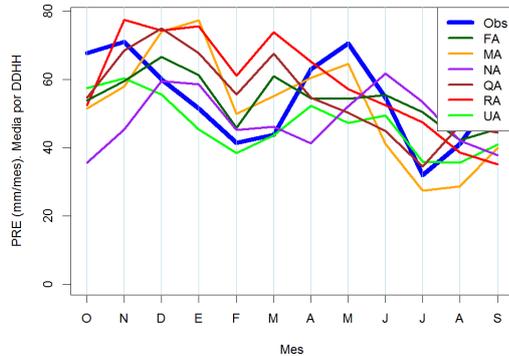
Contraste de PRE mensuales. Segura



Contraste de PRE mensuales. Júcar



Contraste de PRE mensuales. Ebro



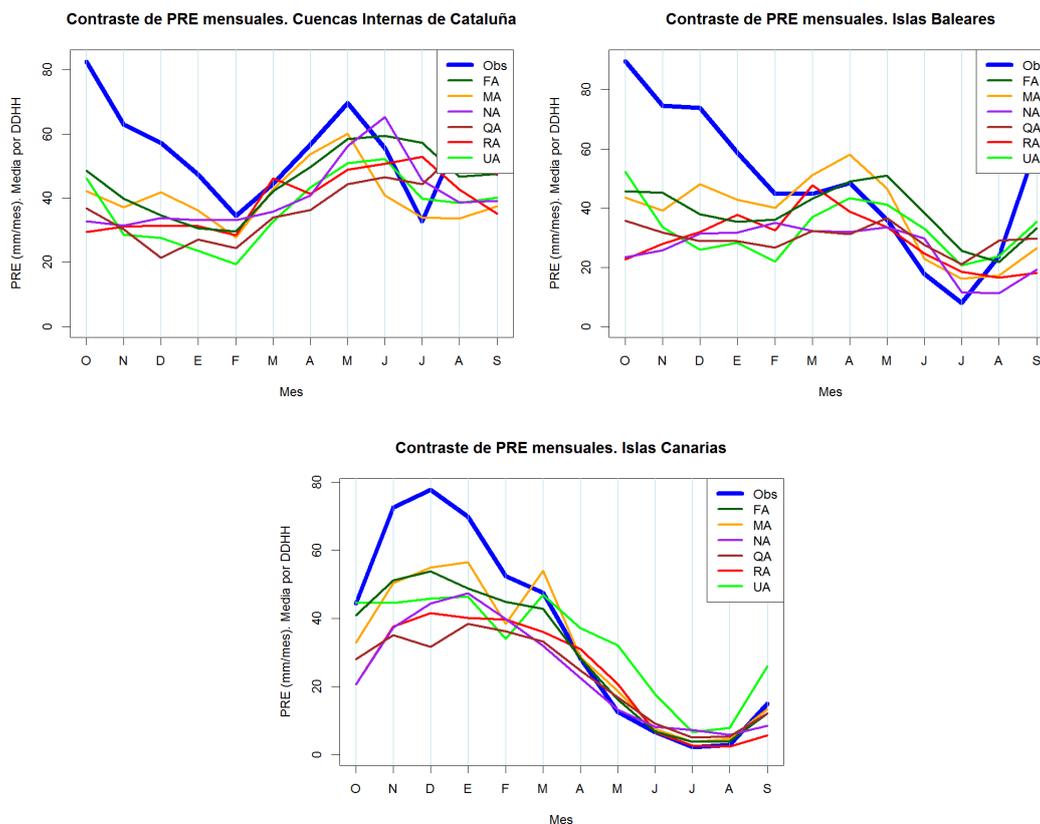


Figura 33. Distribución mensual de la PRE observada y la simulada según las distintas proyecciones para cada DH según valores en estaciones.

### 5.2.5 Valoración del contraste y del sesgo

Las proyecciones reproducen razonablemente bien los valores medios anuales de las TMN y TMX observadas, así como su distribución espacial y estacional.

El sesgo es más notable en el caso de las PRE. El ajuste de los valores medios y la variabilidad para el conjunto de España es aceptable en líneas generales, si bien ninguna proyección reproduce la tendencia negativa observada. Sin embargo, el sesgo de valores medios está polarizado espacialmente, de este a oeste, con notables diferencias entre zonas. Se sobreestima mucho la PRE en las grandes cuencas atlánticas en los meses invernales, cuando más llueve, lo que va a implicar un aumento general de los valores simulados, mientras que todas las proyecciones infravaloran la PRE en el este peninsular y en los archipiélagos. Finalmente, el patrón del ciclo anual se recoge a grandes rasgos, salvo en las cuencas mediterráneas, donde las proyecciones tienen más dificultades.

Este desajuste, o sesgo, condiciona en gran medida la simulación hidrológica y, por lo tanto, la evaluación del impacto.

Hay diferencias con relación a los resultados de contraste obtenidos en el informe CEDEX (2010) (Figura 32 y Figura 34). Es cierto que las proyecciones son diferentes. Hay también que indicar que las diferencias de los valores observados entre ambos estudios se deben a que el PC y las estaciones de comparación son diferentes. A priori,



los valores para el PC de la proyección MA podrían compararse con los de la proyección ECHAM4-FIC del informe CEDEX (2010), puesto que el MCG es del mismo centro (Max Planck de Hamburgo), aunque mejorado posteriormente, y ambas se regionalizaron por análogos, si bien con diferentes procedimientos. La proyección MA sobreestima la PRE observada mientras que la versión anterior ECHAM4-FIC la subestimaba. Cuatro de las seis proyecciones de este trabajo tienden a sobreestimar la PRE del PC mientras que todas las proyecciones del informe anterior la subestimaban.

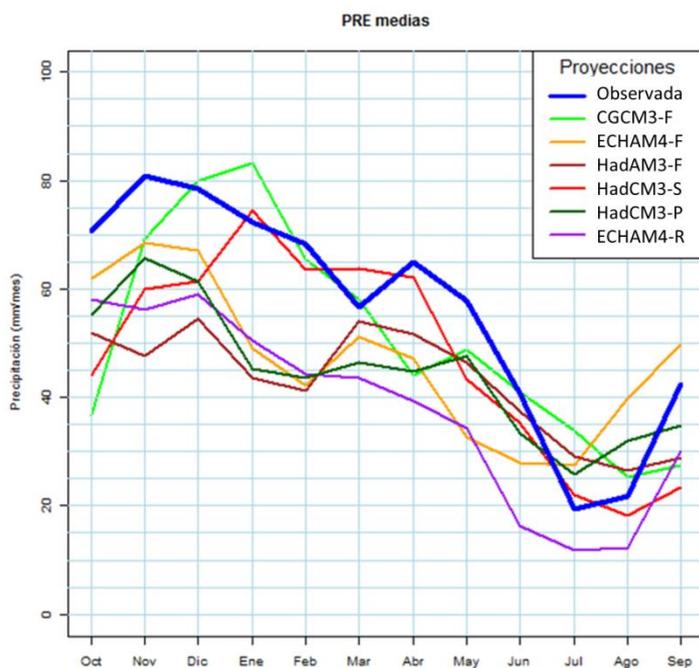


Figura 34. Distribución mensual de la PRE observada y la simulada de las proyecciones regionalizadas que se utilizaron en el informe CEDEX (2010). Medias de España de valores en estaciones para 1961-1990.

Con relación al contraste en las DDHH, al igual que se han encontrado desajustes en las proyecciones de este trabajo, también se encontraron en las proyecciones del informe CEDEX (2010) (Figura 35). En general, las proyecciones de este trabajo ajustan mejor la estacionalidad en las cuencas atlánticas que en el trabajo anterior. En ambos casos, las proyecciones tienen problemas en ajustar la distribución mensual de la PRE en las DDHH mediterráneas.

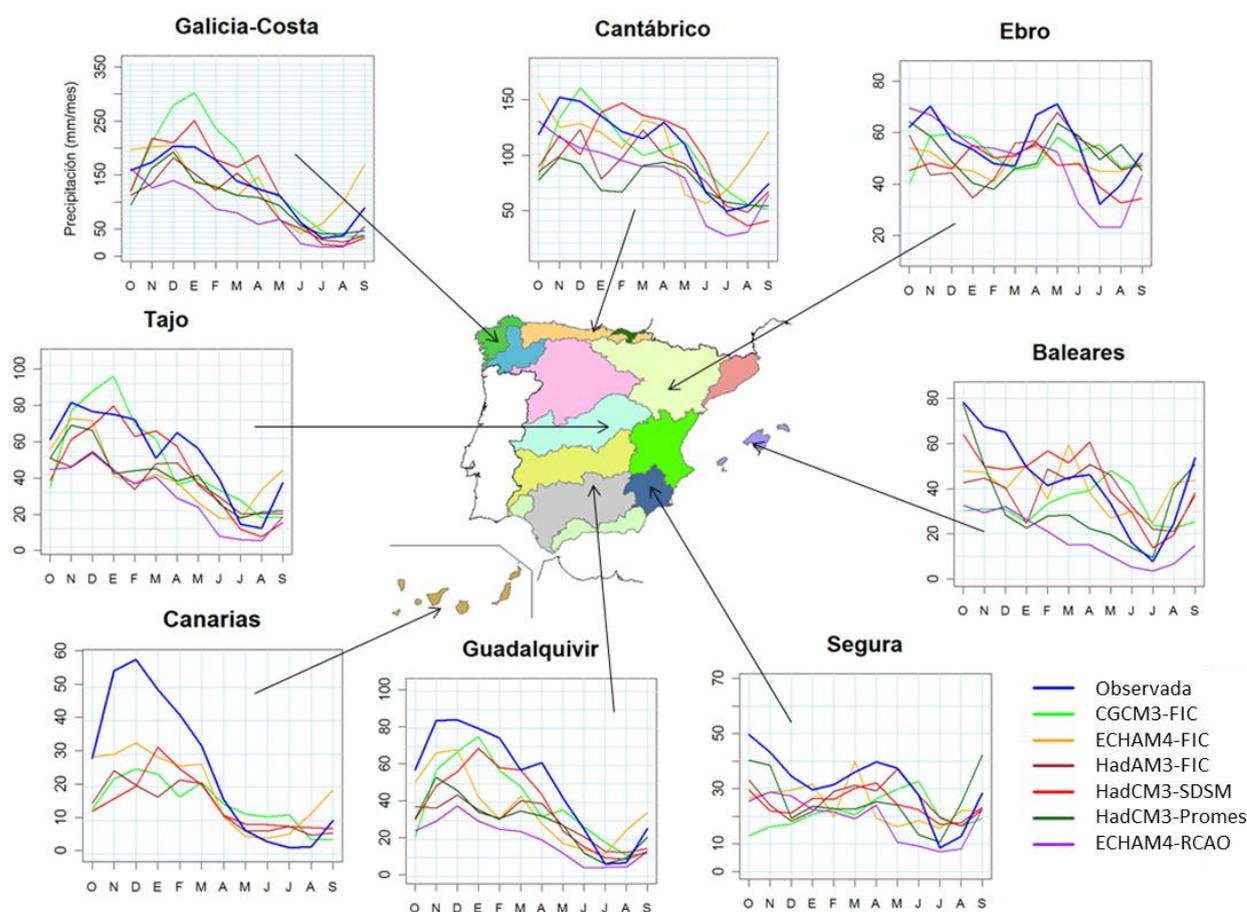


Figura 35. Distribución mensual de la PRE observada y la simulada de las proyecciones utilizadas en el informe CEDEX (2010). Medias de algunas DDHH con valores interpolados.

Es habitual encontrar sesgos en las proyecciones climáticas, especialmente en el caso de la PRE. Este hecho se debe a que, tal como indica el IPCC, los MCG simulan bien la temperatura global, pero tienen más dificultades en simular bien la PRE. Además, los MCG no suelen contemplar las incertidumbres naturales, lo que puede afectar a su credibilidad (Koutsoyiannis 2013). Estos sesgos pueden invalidar el uso del método directo, que consiste en comparar los resultados de alimentar el modelo hidrológico con valores climáticos futuros simulados y con datos climáticos observados. Con objeto de evitar los problemas hidrológicos derivados de utilizar los valores de la simulación, se han propuesto diferentes métodos de corregir ese sesgo, desde simples correcciones lineales a otras más sofisticadas que están basadas en las distribuciones de frecuencias (Leander et al. 2008, Berg et al. 2012, Teutschbein y Seibert 2012). No obstante, la corrección del sesgo puede tener una fuerte influencia en la estimación de los cambios hidrológicos, ya que modifica la señal de cambio al alterar la consistencia espacio-temporal del MCG. Las correcciones según el factor delta o escalado directo son habituales en evaluaciones del impacto del cambio climático en los RRHH. Éstas realizan correcciones mensuales de los valores climáticos que pueden alterar los resultados de manera artificial y no representar la influencia de la señal climática (Barranco 2011). Además, no está claro que los métodos de corrección del sesgo sean estacionarios en el tiempo en un marco de cambio de las condiciones climáticas (Ehret et al. 2012).



Por lo tanto, no se ha llevado a cabo ninguna modificación de los valores de la proyección climática en este trabajo. Así, el impacto del cambio climático en los RRHH y sequías en España se ha evaluado calculando los cambios entre los resultados de alimentar el modelo hidrológico con valores climáticos simulados en los PI y con valores climáticos simulados en el PC. Este método ha sido aplicado en estudios previos (Milly et al. 2005, Gardner 2009, CEDEX 2010, Álvarez-Rodríguez et al 2012, Sperna Weiland et al. 2012, Bozkurt y Sen 2013, Barranco et al. 2014, Alfieri et al. 2015). Con este método, se asume que el sesgo de la proyección climática es similar en el PC y en los PI y por tanto que se compensa al comparar ambos periodos. De ese modo, las diferencias entre el PC y los PI podrán ser asociadas sólo a la señal de cambio inherente a la proyección y no a las técnicas de corrección del sesgo.

Los sesgos encontrados, especialmente en la PRE, son un indicativo de la incertidumbre de los resultados. El hecho de que una proyección climática no se ajuste en el PC a los datos observados añade incertidumbre, pero eso no implica que una proyección sea fiable si reproduce bien los datos del PC. De ese modo, a tenor del contraste realizado, la evaluación del impacto del cambio climático en los RRHH elaborada en este trabajo será más incierta en las DDHH mediterráneas que en el resto de España.



## 6 OBTENCIÓN DE MAPAS DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS

### 6.1 INTERPOLACIÓN DE LOS VALORES CLIMÁTICOS DE PARTIDA

Las proyecciones climáticas de partida tienen valores de PRE y TMN y TMX en una serie de estaciones. Para utilizar el modelo hidrológico de evaluación de RRHH se han de interpolar esos valores para disponerlos en celdas de 1 km<sup>2</sup>, que es la resolución adoptada por el modelo hidrológico que se utiliza en este trabajo para el cálculo de los RRHH.

Se ha llevado a cabo la interpolación por el método de residuos basados en patrones mensuales de PRE y temperaturas (Álvarez-Rodríguez 2011). La interpolación por residuos pretende solucionar el problema de la mala representatividad de los valores climáticos en algunas áreas sin medidas registradas, especialmente en altas cotas. Si se interpolaran los valores registrados en estaciones meteorológicas directamente, por inverso de la distancia al cuadrado por ejemplo, no se tendrían en cuenta las variaciones en las condiciones orográficas, de orientación, etc. La PRE es la variable que presenta el caso más paradigmático. Así por ejemplo, en áreas montañosas, las estaciones meteorológicas suelen estar en los valles (de más fácil acceso), pero es en las zonas altas donde más llueve. La interpolación directa entre dos estaciones en valles separadas por una montaña, daría en esa montaña una PRE más baja de la real.

Los patrones mensuales son mapas que representan la distribución espacial de la variable (PRE, TMN o TMX) en cada uno de los 12 meses del año. Los estadísticos representados son dos: media y DT. Son los mapas característicos para enero, febrero, etc. Los valores observados en estaciones meteorológicas en un mes concreto son la combinación de dos factores: el patrón común de ese mes (valores supuestamente estables) y las peculiaridades meteorológicas durante ese mes de un año concreto. Son estas peculiaridades de ese mes las que se interpolan. En el CEH se elaboraron para anteriores trabajos los patrones correspondientes a datos observados en estaciones meteorológicas de España. Su interpolación se llevó a cabo mediante ecuaciones de regresión e incorporaron la influencia de factores locales como la orografía o la orientación.

A partir de esos patrones de datos observados y de los valores estadísticos de los datos observados y de la proyección climática se obtuvieron los patrones correspondientes a cada proyección climática. Los patrones se obtuvieron siguiendo el siguiente proceso:

- Obtención de medias y DT para el PC. A partir de los valores mensuales simulados se obtuvieron los valores medios y las DT de la variable mensual simulada en cada estación para cada proyección climática.
- Identificación de las estaciones comunes en cada proyección climática y en las series observadas. Se seleccionaron aquéllas estaciones que tenían al menos 35 años hidrológicos completos en las series observadas. Con objeto de conseguir un número significativo de estaciones, las series observadas de PRE, TMN y TMX se completaron previamente mediante un modelo de regresión bivariada con estacionarización previa. De ese modo, se seleccionaron 2193 estaciones comunes para la PRE, 248 para la TMN y 283 para la TMX.

- Cálculo de relaciones para el PC. En las estaciones comunes se obtuvieron los cocientes entre PRE simuladas (para cada proyección climática) y PRE observadas en el PC. Del mismo modo que para los valores medios, se obtuvieron esos cocientes para las DT. En el caso de las TMN y TMX, se calcularon las diferencias absolutas entre los valores medios simulados y los valores observados.
- Interpolación de esas relaciones por el método del inverso de la distancia al cuadrado.
- Los mapas de cocientes de PRE resultantes se multiplicaron por los patrones previamente establecidos en el CEH con los datos observados. De modo similar, los mapas de diferencias de TMN y TMX se sumaron a los patrones respectivos. De ese modo, se obtuvieron mapas patrones de PRE, TMN y TMX de cada proyección para cada uno de los 12 meses (Figura 36 a Figura 39).

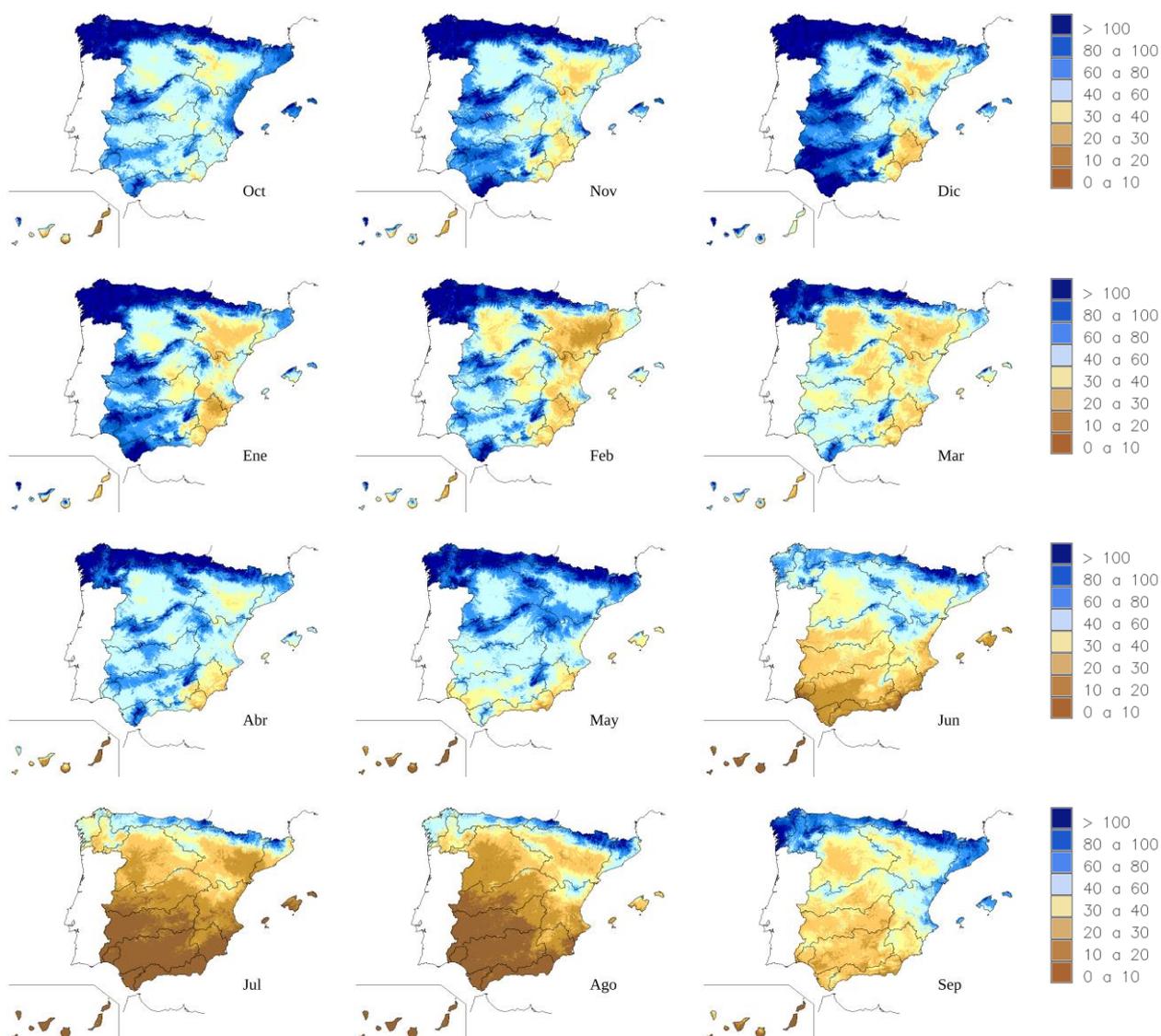


Figura 36. Mapas patrones de medias de PRE según las proyecciones MA.

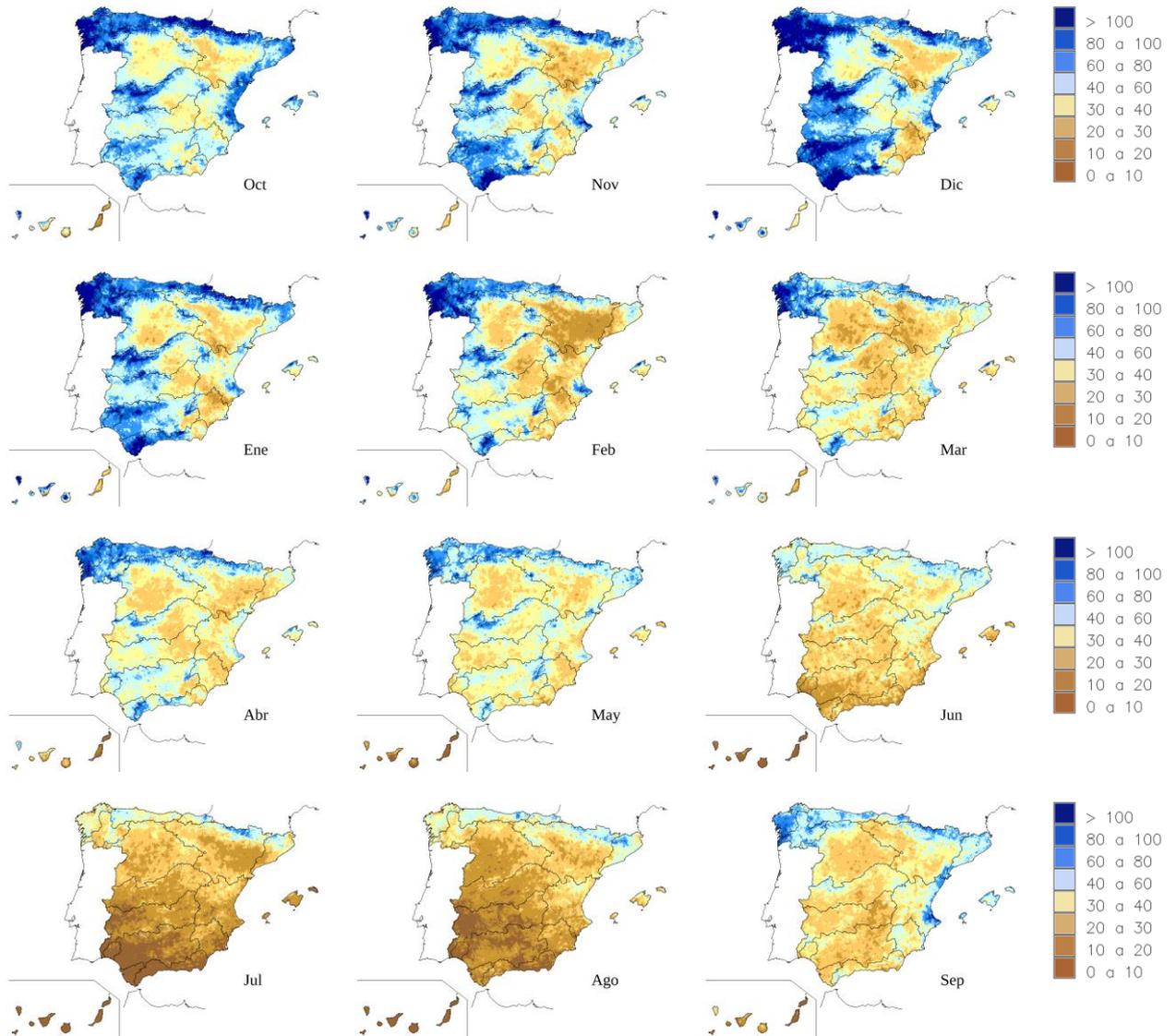


Figura 37. Mapas patrones de DT de PRE según las proyecciones MA.



CEDEX

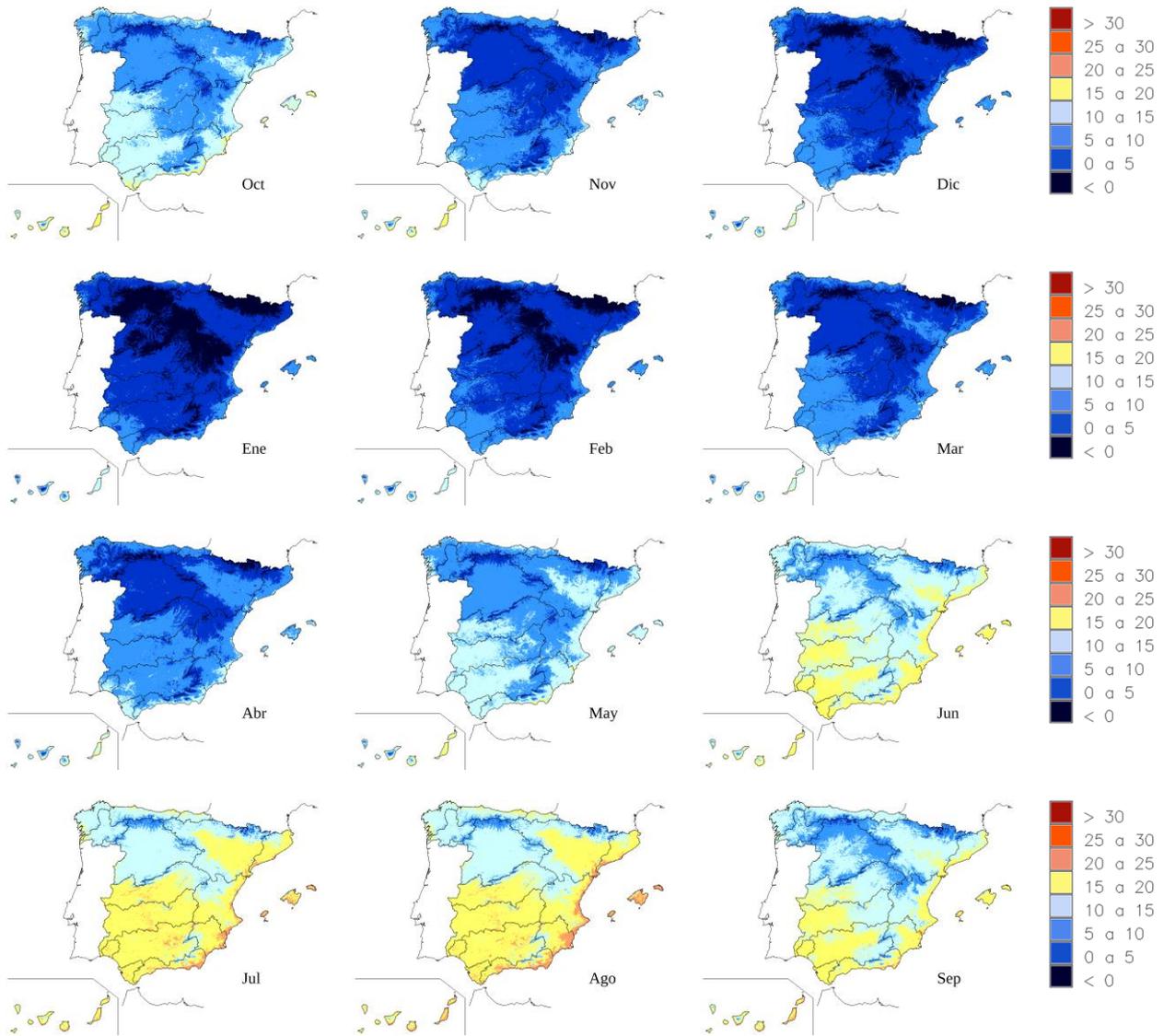


Figura 38. Mapas patrones de medias de TMN según las proyecciones MA.

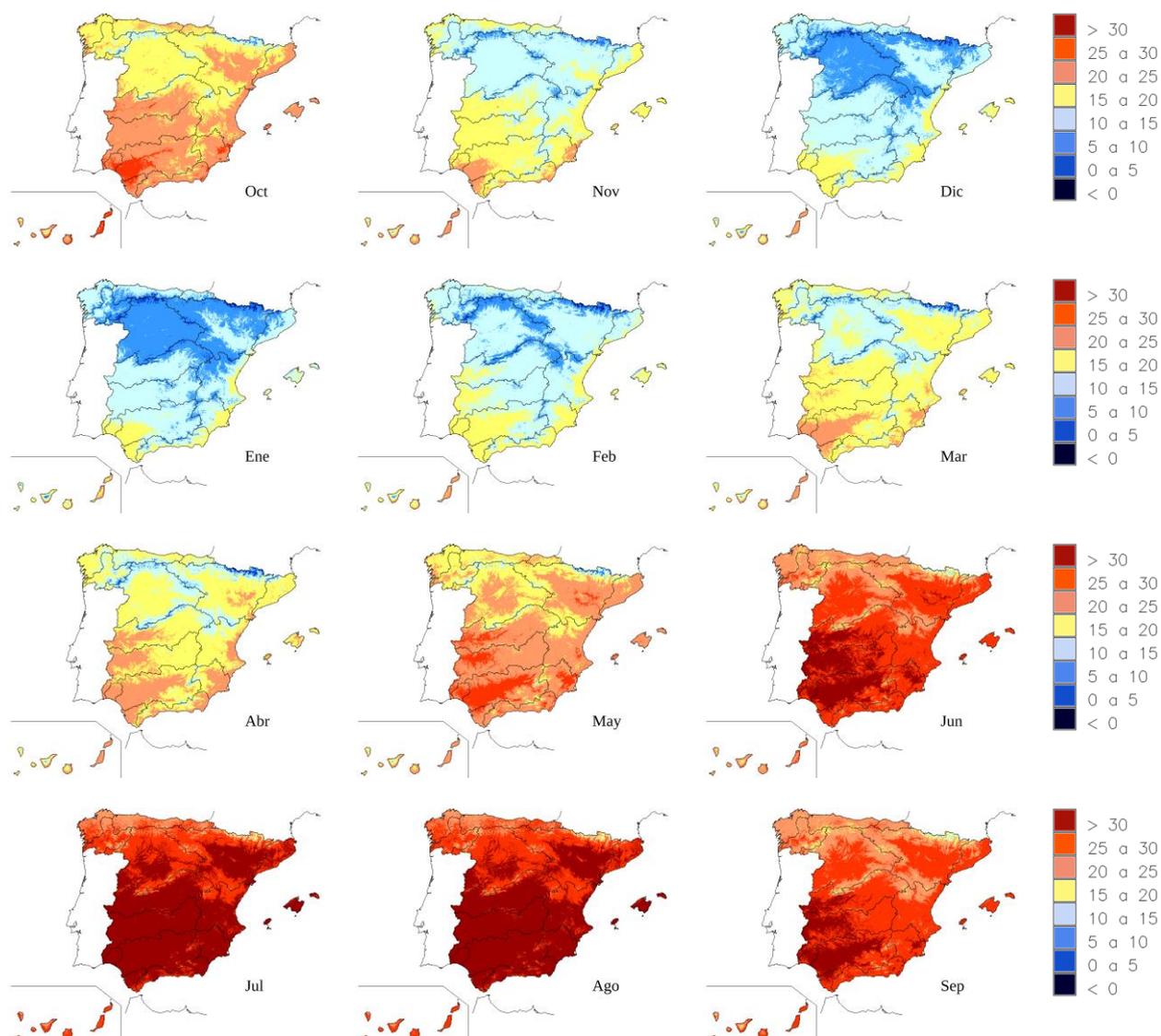


Figura 39. Mapas patrones de medias de TMX según las proyecciones MA.

Posteriormente, los ficheros LEMA con los valores de las variables climáticas de cada proyección se interpolaron por el método de residuos normalizados con los patrones obtenidos en las fases anteriores y un mapa con valores unidad como patrón único de desviaciones estándar para las temperaturas. De ese modo, se obtuvieron finalmente mapas mensuales con valores de PRE, TMN y TMX para cada mes de los años hidrológicos del PC y del PF; en total 4788 mapas para cada proyección climática, desde octubre de 1961 a septiembre de 2000 y de octubre de 2006 a septiembre de 2100<sup>1</sup>. En la Figura 40 se muestran a modo de ejemplo los mapas de PRE, TMN y TMX para abril de 1995 y de 2095 según la proyección M8A.

<sup>1</sup> Se empezó en 2006 aunque el PI1 empieza en 2010 ya que había valores disponibles desde 2006 y así se ajustaban mejor los parámetros iniciales del modelo hidrológico.

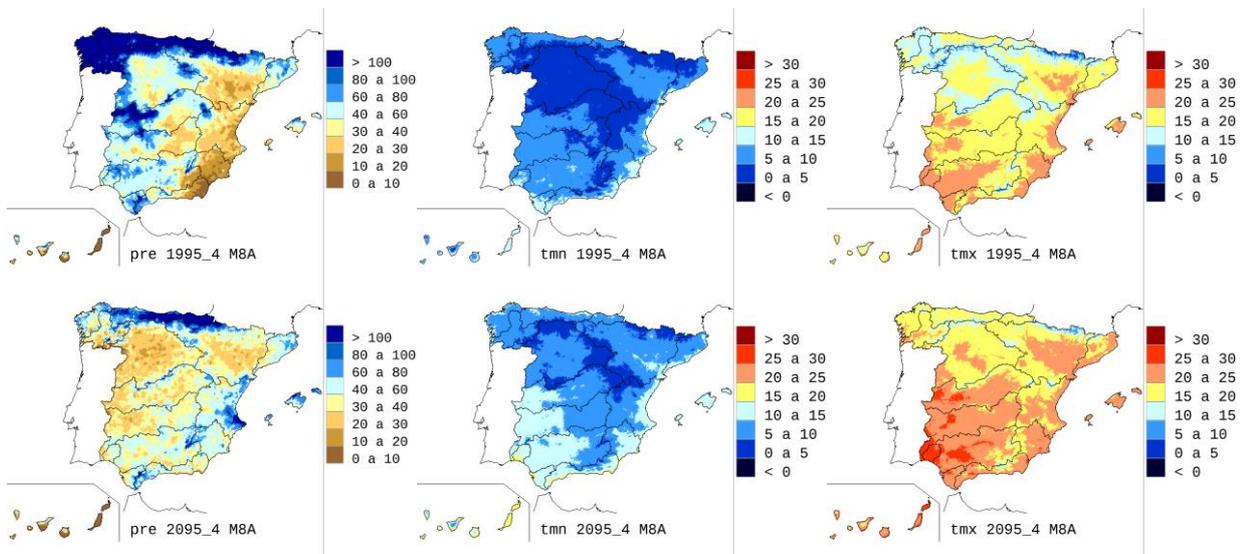


Figura 40. Mapas de PRE (izquierda), TMN (centro) y TMX (derecha) para abril de 1995 (arriba) y de 2095 (abajo) según la proyección M8A.

## 6.2 OBTENCIÓN DE MAPAS DE TEMPERATURAS MEDIAS

A partir de los mapas de TMN y TMX para cada mes se obtienen, como semisuma de los anteriores, los correspondientes mapas de TEM para cada mes y cada proyección climática. De ese modo, se obtienen otros 1596 mapas mensuales de TEM (desde octubre de 1961 a septiembre de 2000 y de octubre de 2006 a septiembre de 2100). En la Figura 41 se muestran a modo de ejemplo los mapas de TEM para abril de 1995 y de 2095 según la proyección M8A.

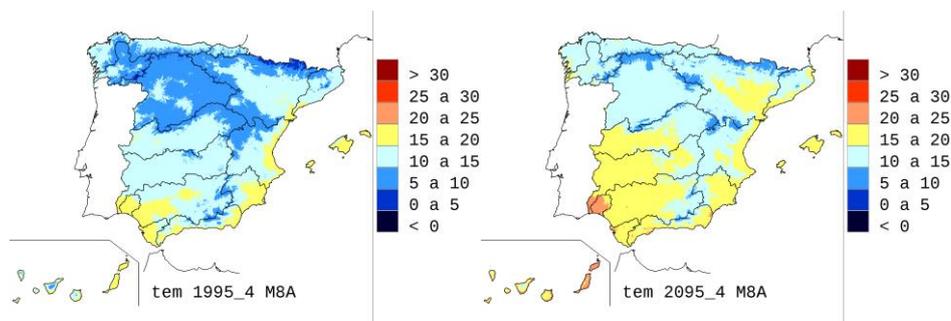


Figura 41. Mapas de TEM para abril de 1995 (izquierda) y de 2095 (derecha) según la proyección M8A.

## 6.3 CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

La ETP se ha calculado utilizando de manera combinada los métodos de Hargreaves y de Penman Monteith.

El método de Penman Monteith (Allen et al. 2006) es un método físicamente basado, que realiza un balance de términos energéticos y aerodinámicos, que aporta buenos resultados y que está recomendado por la FAO. Está adaptado a un cultivo de referencia que maximiza el consumo de agua. El método de Penman Monteith define la

evapotranspiración de referencia como la de un cultivo hipotético con una altura de 12 cm, con una resistencia de la superficie de 70 s/m y un albedo de 0.23, lo que asemeja a la evaporación que ocurre en una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y bien regada (Ecuación 1).

Ecuación 1

$$ETP_r = \frac{0.408 \cdot P \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{t + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{P + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)}$$

Siendo,

- $ETP_r$ : ETP del cultivo de referencia (mm/d)
- $P$ : Pendiente de la curva de presión de vapor (KPa/°C)
- $R_n$ : Radiación neta (MJ/m<sup>2</sup>d)
- $G$ : Densidad de flujo de calor en el suelo (MJ/m<sup>2</sup>d)
- $\gamma$ : Constante psicométrica (KPa/°C)
- $t$ : Temperatura media diaria a 2 m de altura (°C)
- $u_2$ : Velocidad de viento a 2 m de altura (m/s)
- $e_s$ : Presión de vapor de saturación (kPa)
- $e_a$ : Presión de vapor existente (kPa)

A pesar de sus buenos resultados, el método de Penman Monteith tiene la limitación de precisar numerosos datos que sólo están disponibles en escasas estaciones; de hecho, únicamente 125 estaciones meteorológicas españolas cuentan con registros mensuales de radiación total mensual y medias mensuales de la temperatura media diaria, humedad relativa diaria y velocidad del viento diaria.

Por el contrario, el método de Hargreaves (Hargreaves y Allen 2003) es de fácil obtención ya que calcula la ETP a partir de las temperaturas medias ( $TEM$ ), máximas ( $TMX$ ) y mínimas ( $TMN$ ) y de la radiación solar extraterrestre ( $R_A$ ) en la estación de medición (ésta se obtiene de las coordenadas geográficas) (Ecuación 2). Se ha utilizado el método de Hargreaves ya que es un método experimental recomendado por la FAO en zonas de alta variabilidad climática (Allen et al. 2006) y es de fácil aplicación ya que es función de variables que se pueden tener en la mayoría de la estaciones.

Ecuación 2

$$ETP_r = 0,0023 \cdot (TEM + 17,8) \cdot (TMX - TMN)^{0,5} \cdot R_A$$

No obstante, el método de Hargreaves es experimental, por lo que conviene analizar su validez. De hecho, la FAO advierte que la ecuación anterior tiende a subestimar la ETP bajo condiciones de viento fuerte y a sobreestimarla con condiciones de humedad relativa altas. Por ello, la FAO recomienda la utilización de ecuaciones de regresión usando como referencia los resultados de Penman Monteith.

Siguiendo la recomendación anterior, el proceso para calcular la ETP en este trabajo ha sido el siguiente:



- Se ha calculado la ETP por el método de Hargreaves en cada celda de España a partir de los mapas de temperaturas interpolados en el paso anterior.
- Cada mapa anterior de ETP según Hargreaves se multiplica por los mapas de coeficientes de corrección Penman-Monteith/Hargreaves. Estos mapas fueron elaborados por el CEH para anteriores estudios. Son 12 mapas mensuales de relación entre las ETP calculadas por ambos métodos en las mismas estaciones (Figura 42). De ese modo se obtiene un mapa para cada mes con la ETP obtenida por aplicación del método de Hargreaves corregido respecto al de Penman Monteith. La consideración mensual ajusta bien las zonas costeras, especialmente del norte de España, con mayor humedad y vientos más fuertes.

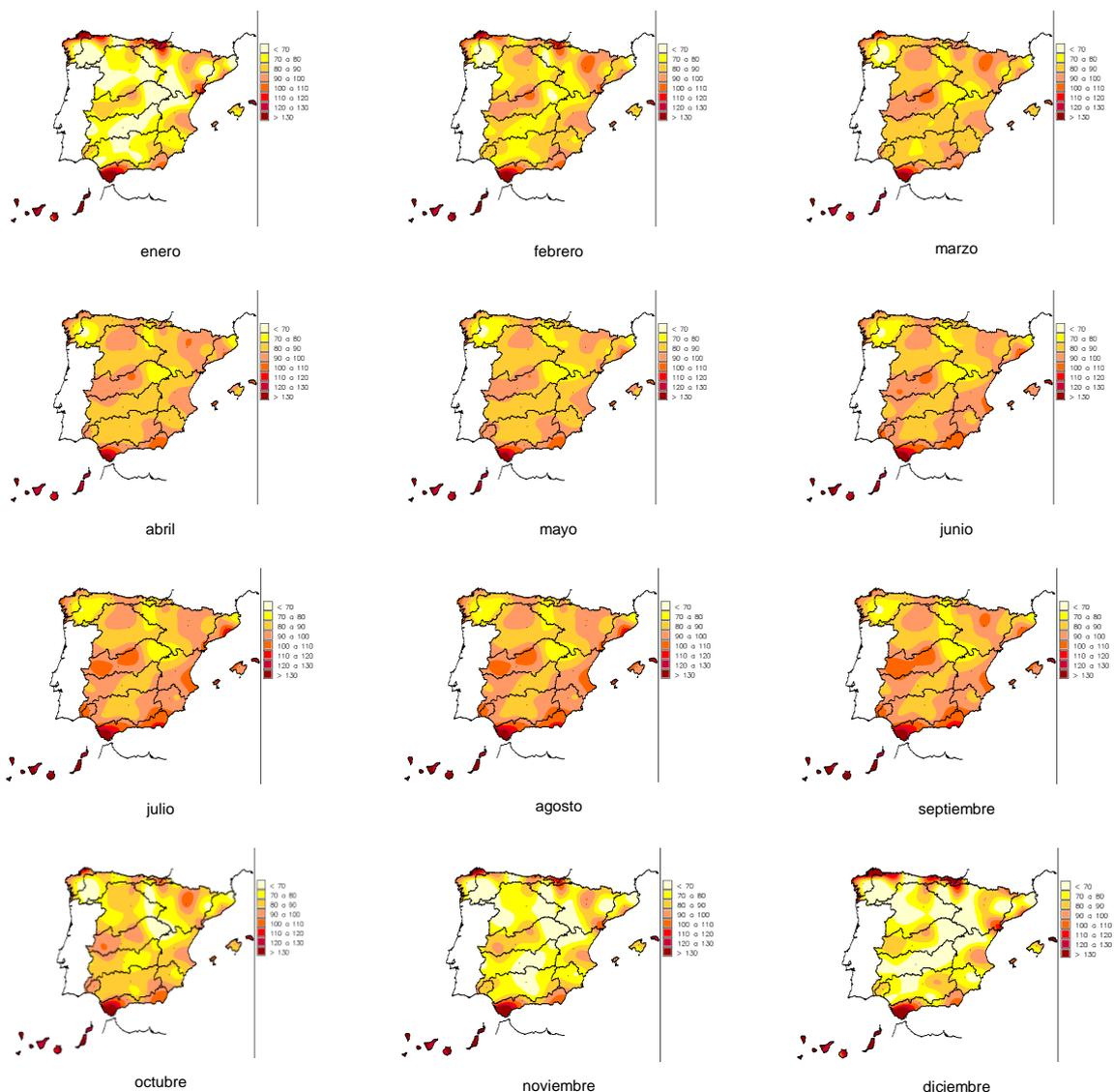


Figura 42. Mapas correctores Penman Monteith / Hargreaves (%) (tomado de CEDEX 2010).

- Los mapas mensuales obtenidos dan la ETP para el cultivo de referencia ( $ETP_r$ ). Estos mapas de  $ETP_r$  se multiplicaron por un mapa de coeficientes de cultivo ( $K_{uso}$ ) para dar finalmente la ETP del cultivo real (Ecuación 3). El mapa  $K_{uso}$  fue elaborado por el CEH para anteriores estudios mediante una reclasificación de los usos del suelo del CORINE LAND COVER (IGN 2000) (Figura 43).

Ecuación 3

$$ETP = K_{uso} \times ETP_r$$

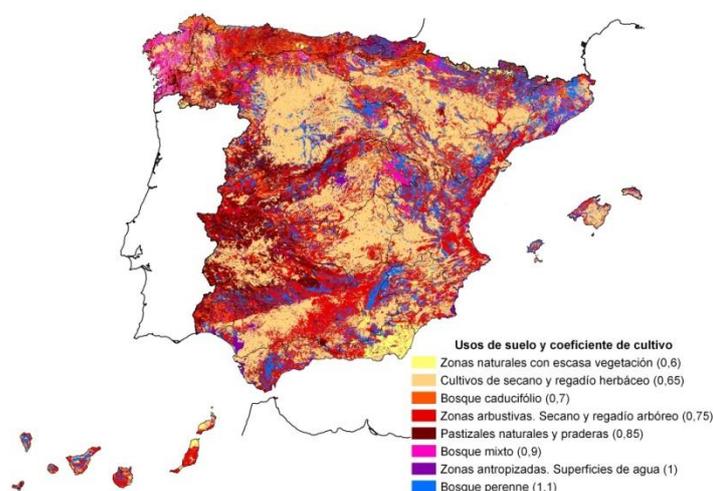


Figura 43. Coeficiente de cultivo en España para el cálculo de la ETP (tomado de CEDEX 2010).

El resultado final fueron 1.596 mapas mensuales de ETP para cada proyección climática, abarcando desde octubre de 1961 a septiembre de 2000 y de octubre de 2006 a septiembre de 2100. En la Figura 44 se muestran a modo de ejemplo los mapas de ETP para abril de 1995 y de 2095 según la proyección M8A.

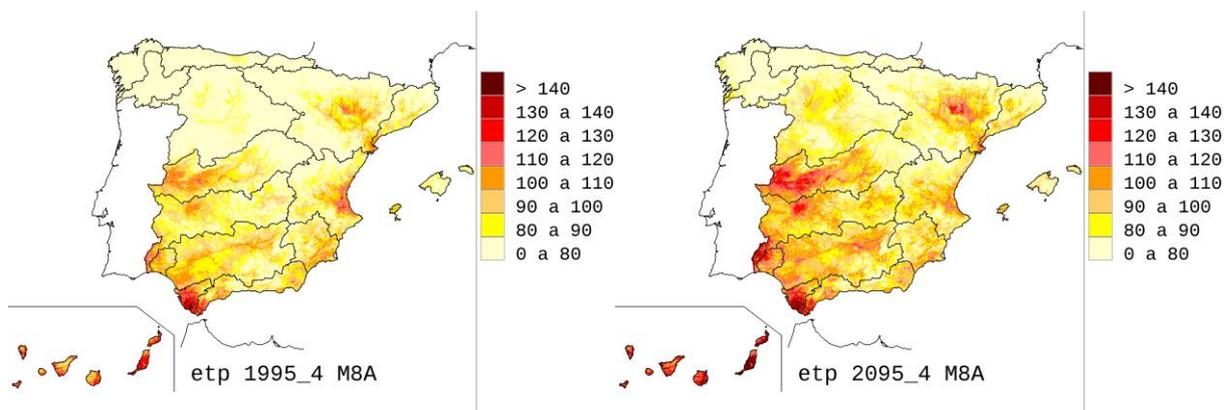


Figura 44. Mapas de ETP para abril de 1995 (izquierda) y de 2095 (derecha) según la proyección M8A.

## 6.4 CAMBIOS DE PRECIPITACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

A continuación se presentan los resultados del impacto del cambio climático sobre las dos variables climáticas que se utilizan como valores de entrada en el modelo hidrológico: PRE y ETP.

### 6.4.1 Precipitación

#### 6.4.1.1 Cambios anuales para el conjunto de España

Los cambios en la PRE anual estimada para el conjunto de España durante el periodo 2010-2100 revelan una tendencia decreciente según el conjunto de las proyecciones para ambos RCP (Figura 45). Un aspecto a destacar es la incertidumbre de resultados que se hace patente por la anchura de la banda de cambios según las diferentes proyecciones. La tendencia decreciente es sólo estadísticamente significativa (nivel de significación del 5%) para una proyección del RCP 4.5 (R4A) y para cuatro del RCP 8.5 (F8A, M8A, Q8A y R8A) (ver anexo 1). Sin embargo, el promedio de cambios de las proyecciones da una tendencia decreciente significativa para ambos RCP; la proyección R4A determina la tendencia del promedio para RCP 4.5. La pendiente de ese promedio de cambios es mayor en el RCP 8.5 que en el RCP 4.5, indicando un mayor descenso de PRE cuando se considera el RCP 8.5.

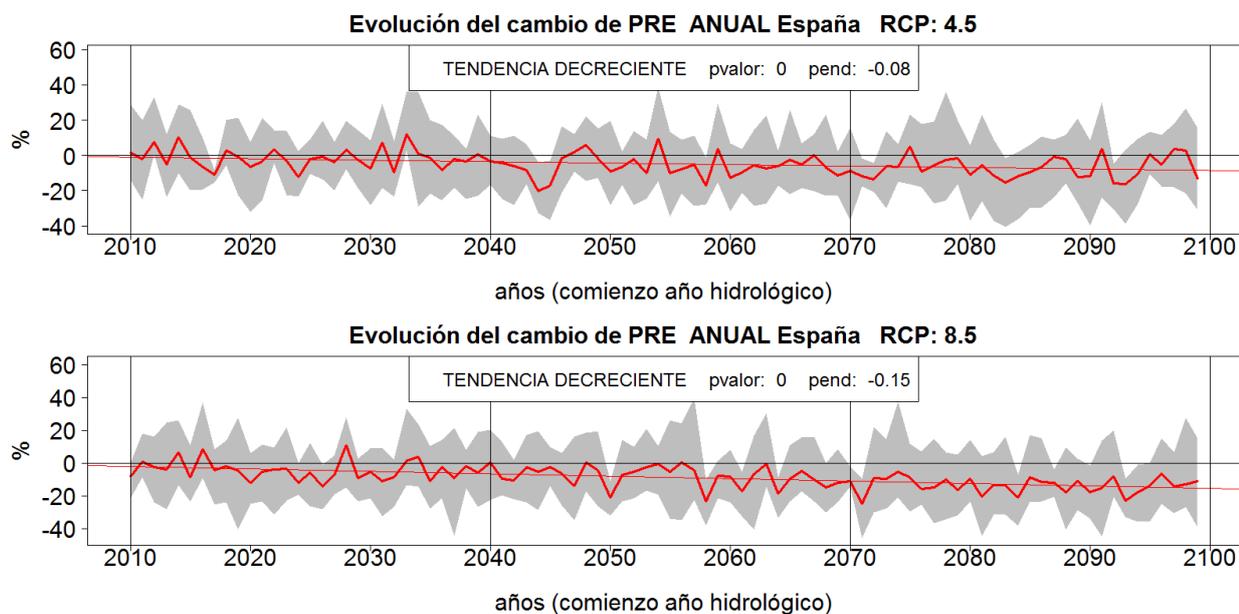


Figura 45. Tendencia del  $\Delta$  (%) PRE del año 2010 al 2099 para los RCP 4.5 (arriba) y 8.5 (abajo) para el conjunto de España. La banda gris indica el rango de resultados de las proyecciones. La línea gruesa indica su promedio y la recta delgada su pendiente. Se indica su p-valor según el test de Mann Kendall; negra: sin tendencia, roja: decreciente, azul: creciente.

Los cambios de PRE para cada uno de los tres PI muestran en primer lugar las diferencias en los resultados de cada proyección (Tabla 6 y Figura 46 izquierda). Así por ejemplo, para el periodo 2010-2040 y el RCP 4.5, el rango de cambios va desde un aumento de la PRE del 9% (U4A) a una disminución del 8% (R4A). La proyección RA es la que suele dar las mayores disminuciones y la UA los mayores aumentos o menores descensos. Promediando los resultados de las proyecciones, se estiman

siempre descensos de PRE, superiores en RCP 8.5 que en RCP 4.5 y mayores cuanto más avanza el siglo XXI. La diferencia entre ambos RCP se hace patente para el último PI del siglo XXI. Los cambios medios para ambos RCP son del -2% y -4% para 2010-2040, -6% y -8% para 2040-2070 y -7% y -14% para 2070-2100.

Tabla 6.  $\Delta$  (%) PRE en cada PI según cada proyección para el conjunto de España. Se indican los valores máximo (Mx), mínimo (Mn) y el promedio (Med) para cada RCP. Los colores reflejan la gradación del cambio.

PRE ESPAÑA $\Delta$ Anual (%)	RCP 4.5									RCP 8.5								
	F4A	M4A	N4A	Q4A	R4A	U4A	Mx	Med	Mn	F8A	M8A	N8A	Q8A	R8A	U8A	Mx	Med	Mn
2010-2040	1	-2	-5	-4	-8	9	9	-2	-8	1	-5	-6	-8	-7	-3	1	-4	-8
2040-2070	-4	-5	-5	-7	-13	-1	-1	-6	-13	-4	-11	-11	-9	-16	3	3	-8	-16
2070-2100	-2	-10	-9	-5	-17	1	1	-7	-17	-11	-17	-8	-19	-24	-2	-2	-14	-24

Los cambios de la variabilidad de PRE anual para España en cada PI se muestran de manera gráfica en la Figura 46 derecha. RA es la proyección que da los mayores descensos de PRE anual y es además la única que da un descenso de su variabilidad. El resto de proyecciones muestran mayor dispersión en los valores anuales de PRE durante el siglo XXI que en el PC.

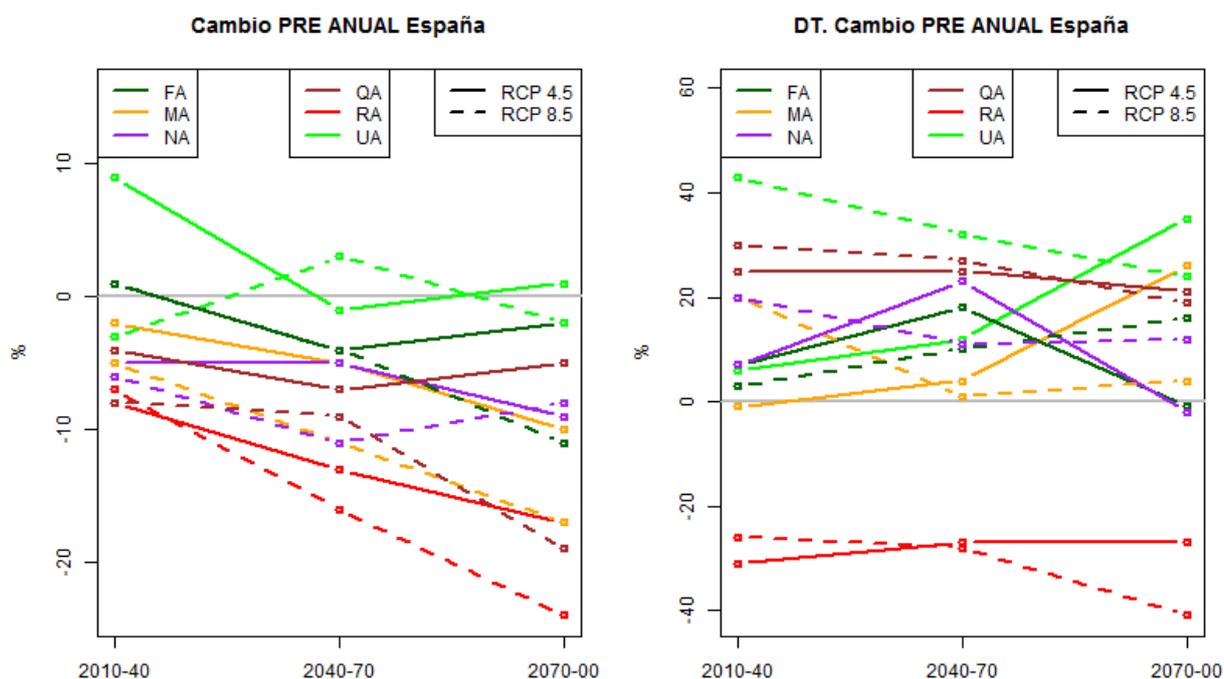


Figura 46.  $\Delta$  (%) PRE en cada PI. Izquierda: valores medios anuales. Derecha: DT de los valores anuales.

#### 6.4.1.2 Distribución espacial de los cambios anuales

Para el periodo 2010-2040 hay notables diferencias en la distribución espacial de los cambios de la PRE anual según la proyección climática (Figura 47 y Figura 48).



Predominan los descensos, si bien U4A da aumentos generalizados, más patentes en la mitad occidental. N4A y R4A dan descensos hacia el SO peninsular y Q4A en Galicia. F4A y M4A muestran pocos cambios. Para el RCP 8.5, U8A apenas muestra cambios, a diferencia con el RCP 4.5. M8A da ligeros descensos en el centro-sur, franja norte, NE y archipiélagos. R8A da notables descensos, más marcados hacia el SE de la Península y Canarias donde sobrepasan el 10%. N8A da reducciones hacia el SO, de manera similar a Q8A, si bien ésta da reducciones más notables en Galicia. F8A muestra aumentos leves en el centro peninsular y Canarias y descensos sólo en el País Vasco.

Para el periodo 2040-2070 hay una reducción de PRE según casi todas las proyecciones, salvo la U8A, que muestra una mayoría de zonas con aumentos de PRE (Figura 50 y Figura 51). Estos aumentos de U8A son más notables hacia el SO y en el NE peninsulares, así como en puntos de Canarias. La proyección U4A apenas muestra cambios, lo que contrasta con el notable aumento que estimaba para el periodo anterior P11. Las proyecciones R8A y R4A dan un patrón similar de cambios, con descensos de PRE superiores al 25% en los dos tercios occidentales de la Península. MA y NA dan un mayor descenso en RCP 8.5 que en RCP 4.5. Las proyecciones FA y QA dan un patrón de cambio intermedio entre RA y UA y similar entre RCP 8.5 y RCP 4.5, siendo el descenso de PRE más notable en el oeste peninsular y menor, incluso con aumentos hacia el NE.

Para el periodo 2070-2100 sigue la diferencia de resultados si bien casi todas las proyecciones dan reducción de PRE y es mayor que en el periodo anterior (Figura 51 y Figura 52). U4A es la excepción ya que muestra amplias zonas con aumentos, inferiores al 10%, localizadas en el oeste peninsular. En el otro extremo, R8A muestra fuertes descensos, del 25 al 50% en el cuarto SO peninsular y Canarias. F4A apenas presenta cambios. En general, hay un similar patrón de reducción, más intenso hacia el SO peninsular y en Canarias y menor reducción, o incluso aumento de PRE en algunas zonas del este peninsular. Por el contrario, U4A y U8A muestran un patrón contrario, con mayores descensos hacia el este.

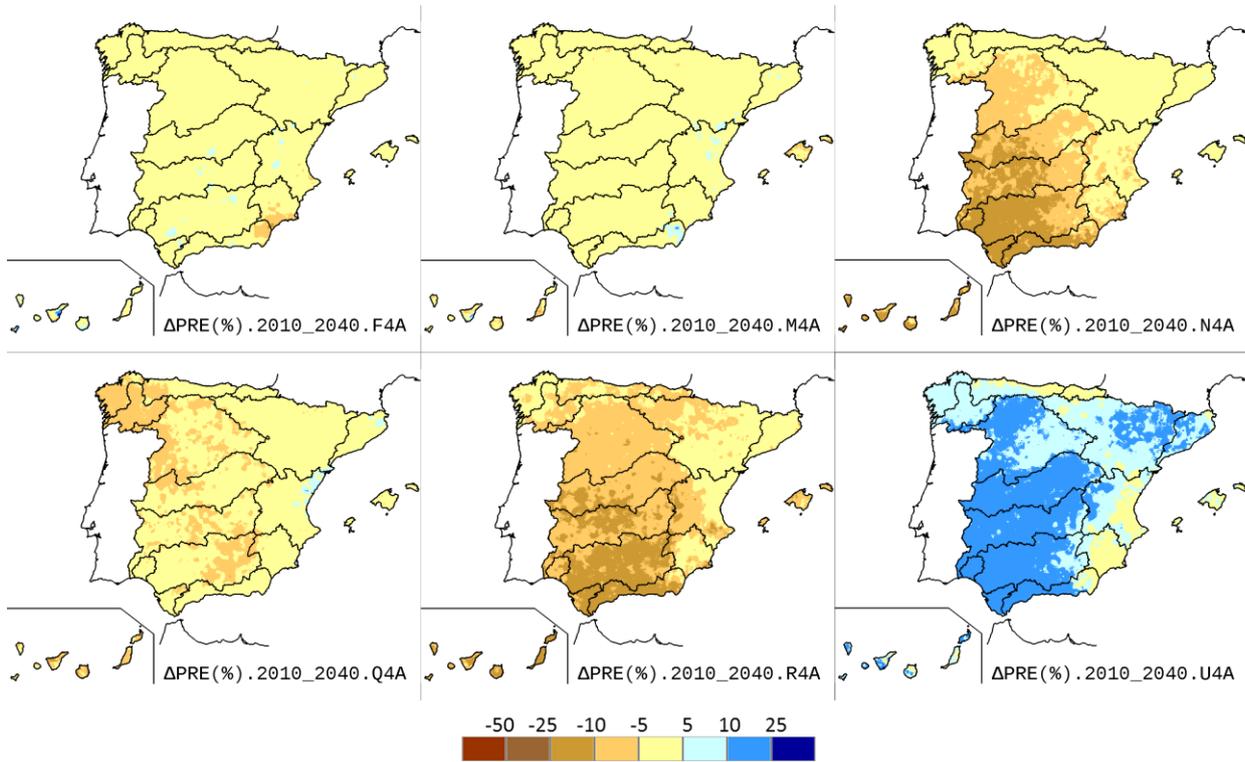


Figura 47.  $\Delta$  (%) PRE anual para 2010-2040 según las proyecciones RCP 4.5.

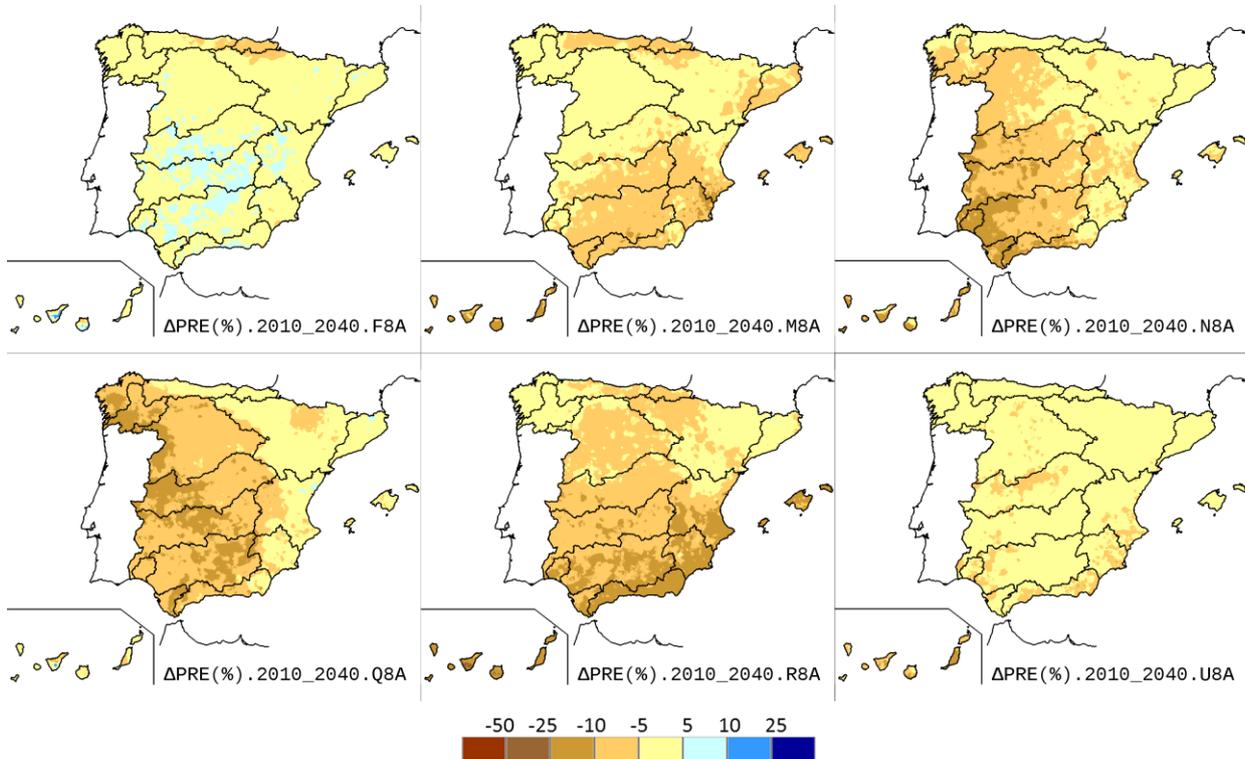


Figura 48.  $\Delta$  (%) PRE anual para 2010-2040 según las proyecciones RCP 8.5.

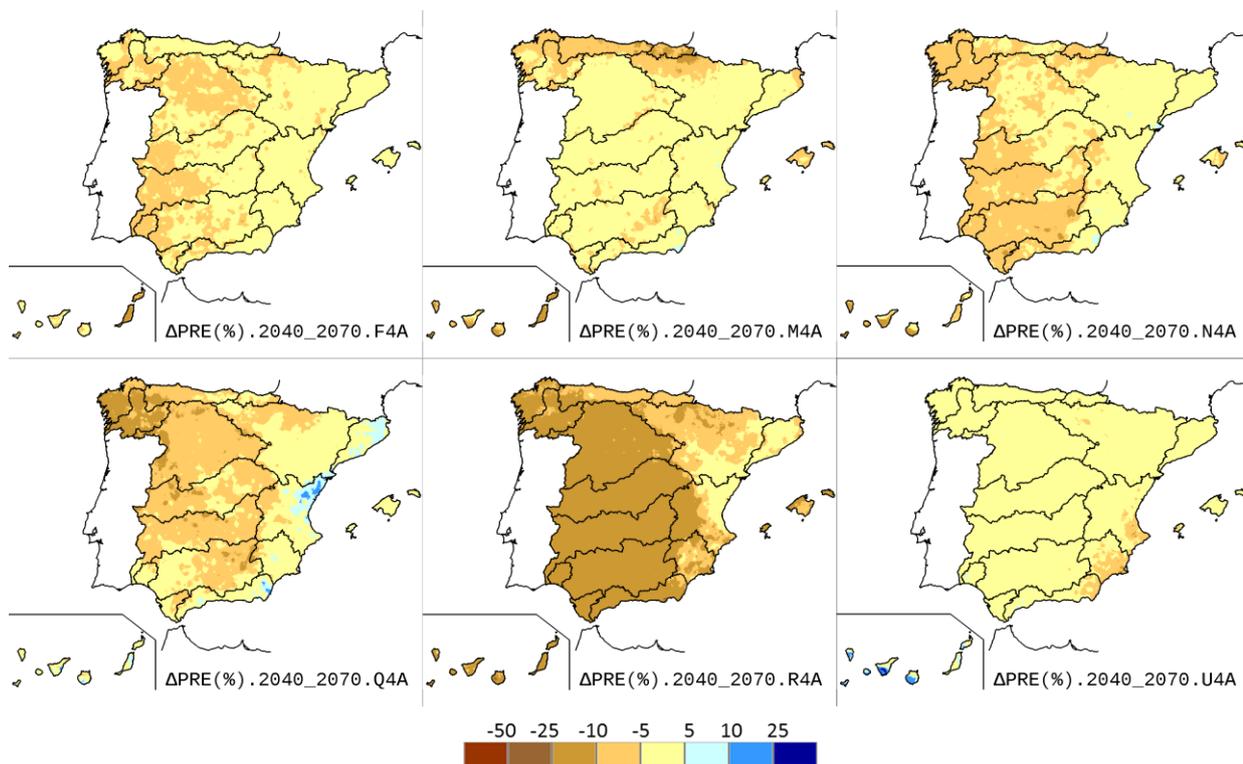


Figura 49.  $\Delta$  (%) PRE anual para 2040-2070 según las proyecciones RCP 4.5.

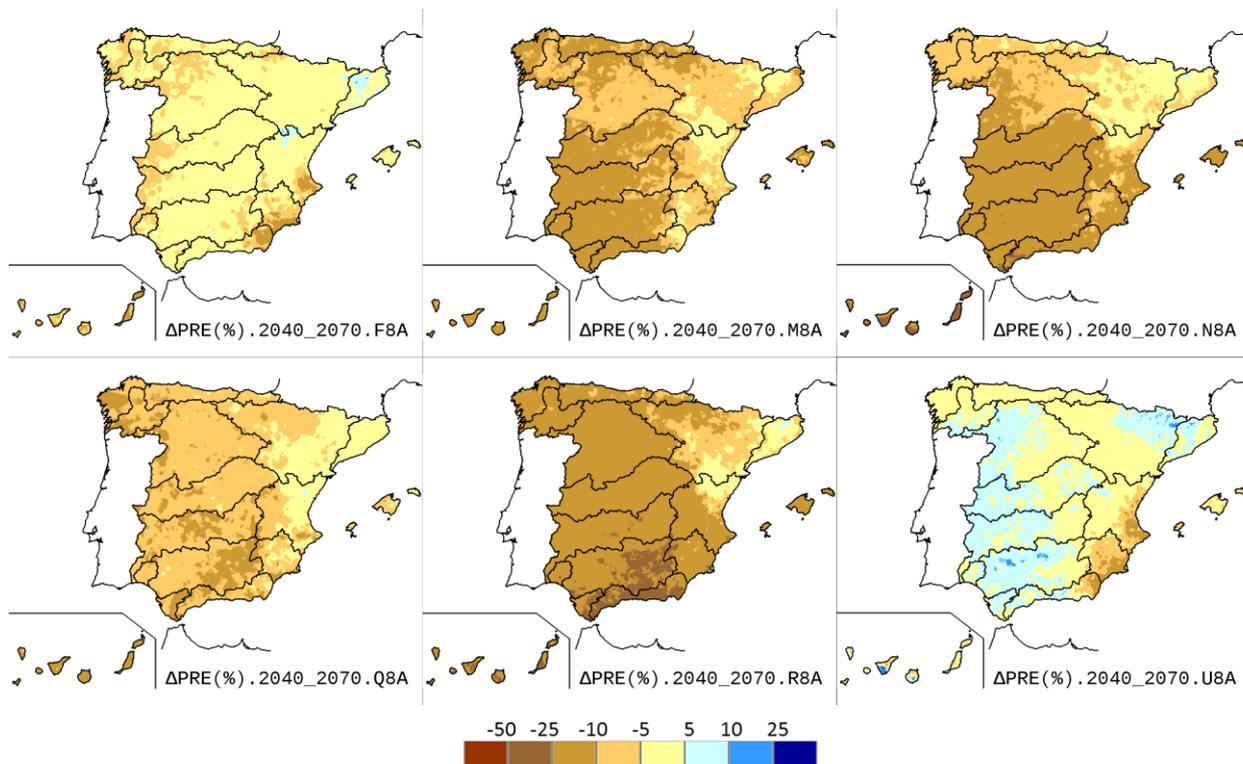


Figura 50.  $\Delta$  (%) PRE anual para 2040-2070 según las proyecciones RCP 8.5.

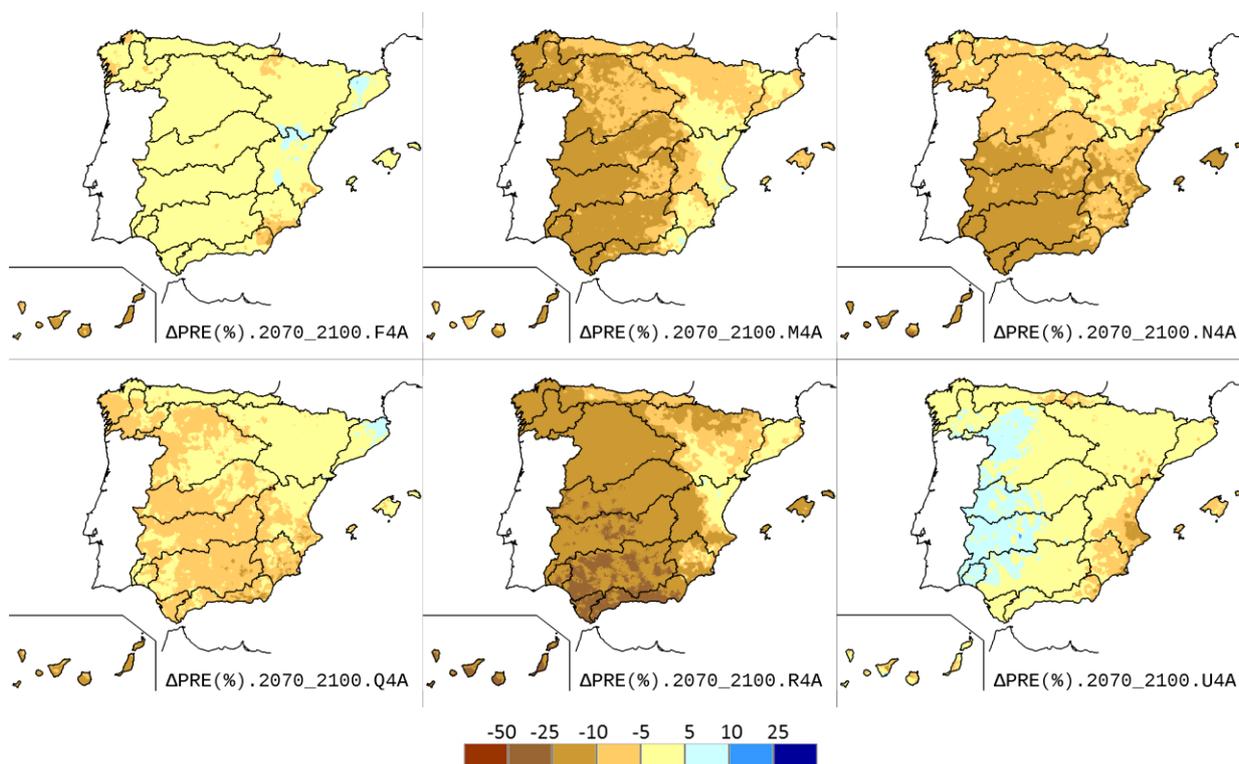


Figura 51.  $\Delta$  (%) PRE anual para 2070-2100 según las proyecciones RCP 4.5.

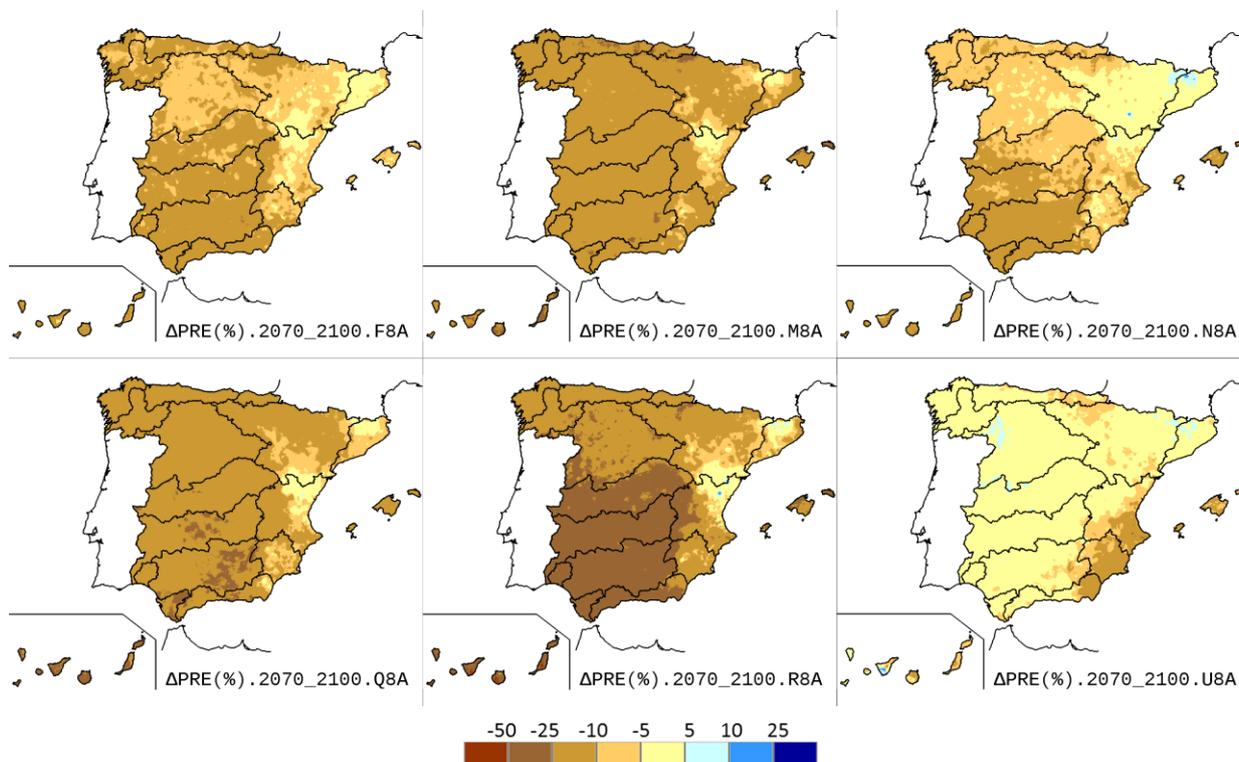


Figura 52.  $\Delta$  (%) PRE anual para 2070-2100 según las proyecciones RCP 8.5.

Las tendencias de la PRE anual de las DDHH durante el PF se muestran en el anexo 2. Al igual que pasa para el conjunto de España, la banda de variación de cambios es



amplia, síntoma de la incertidumbre, el promedio de las proyecciones para cada DH y RCP da tendencias decrecientes significativas y la pendiente de ese promedio de cambios es mayor en el RCP 8.5 que en el RCP 4.5, indicando un mayor descenso de PRE cuando se considera el RCP 8.5, con la única excepción de las CCII de Cataluña, que muestra similares p-valores y pendientes para ambos RCP.

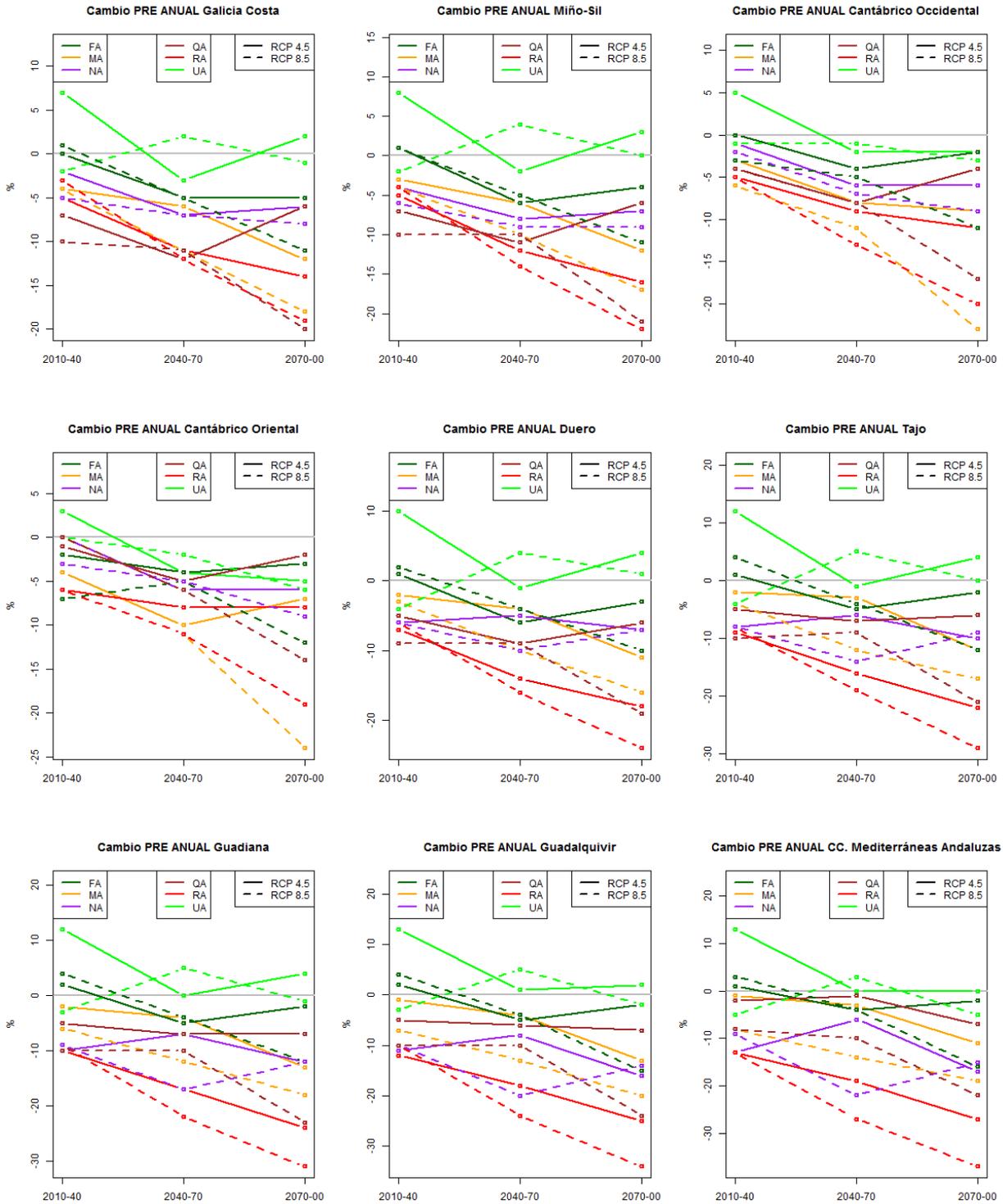
Los cambios de PRE para cada uno de los tres PI en cada DH muestran en primer lugar las diferencias en los resultados de cada proyección (Tabla 7 y Figura 53). El rango de variación es mayor en las DDHH del sur de la Península, en el RCP 8.5 y en los PI más lejanos, llegando a oscilar entre -4% a -37% en la DH de Guadalete y Barbate para el PI3 del RCP 8.5. Las proyecciones U4A, U8A y, en menor medida, F4A y F8A dan ascensos de PRE, mientras que R8A y R4A dan los mayores descensos. Los descensos son mayores para el RCP 8.5 que el RCP 4.5 y conforme se avanza en el siglo XXI. Así, los descensos son superiores al 30% en las DDHH del sur y Canarias para el PI3 según R8A. En contraposición, los aumentos de PRE son superiores al 10% en las DDHH del centro y sur peninsulares para el PI1 según U4A.

Con relación al promedio de  $\Delta$  de las proyecciones, para el PI1 y el RCP 4.5, muchas DDHH tienen un valor próximo al -2%, con el mayor descenso en Canarias (-4%) y el ascenso mayor en las CCII de Cataluña (+2%). Para el RCP 8.5, los valores oscilan entre el 1% (CCII de Cataluña) y el -8% (Canarias). Para el PI2 y el RCP 4.5, oscilan entre el 0% y el -7%, con los mínimos descensos hacia el este de España. Para el RCP 8.5, se nota una clara doble polaridad N-S y O-E, con valores de -7% en el norte, alrededor de -11% en el sur, 0% en las CCII de Cataluña y -14% en Canarias. Esa doble polaridad se aprecia también en el PI3; para el RCP 4.5, los  $\Delta$  oscilan entre -4% y el -13%, con los máximos descensos hacia el sur de la Península y Canarias; para el RCP 8.5, los descensos rondan el 13% en el norte, el 18% en el sur, el 21% en Canarias, el 15% en Baleares y el Segura, el 10% en el Ebro y Júcar y el 4% en las CCII de Cataluña.



Tabla 7. Δ (%) PRE en cada DH y PI según cada proyección. Se indican los valores máximo (Mx), mínimo (Mn) y el promedio (Med) para cada RCP. Los colores reflejan la gradación del cambio.

PRE Δ Anual (%)		RCP 4.5									RCP 8.5								
		F4A	M4A	N4A	Q4A	R4A	U4A	Mx	Med	Mn	F8A	M8A	N8A	Q8A	R8A	U8A	Mx	Med	Mn
Miño-Sil	2010-2040	1	-3	-4	-7	-5	8	8	-2	-7	1	-4	-6	-10	-4	-2	1	-4	-10
	2040-2070	-6	-6	-8	-11	-12	-2	-2	-7	-12	-5	-10	-9	-10	-14	4	4	-7	-14
	2070-2100	-4	-12	-7	-6	-16	3	3	-7	-16	-11	-17	-9	-21	-22	0	0	-13	-22
Galicia Costa	2010-2040	0	-4	-2	-7	-5	7	7	-2	-7	1	-4	-5	-10	-3	-2	1	-4	-10
	2040-2070	-5	-6	-7	-12	-11	-3	-3	-7	-12	-5	-11	-7	-11	-12	2	2	-7	-12
	2070-2100	-5	-12	-6	-6	-14	2	2	-7	-14	-11	-18	-8	-20	-19	-1	-1	-13	-20
Cantábrico Oriental	2010-2040	-2	-4	0	-1	-6	3	3	-2	-6	-7	-6	-3	0	-6	0	0	-4	-7
	2040-2070	-4	-10	-6	-5	-8	-4	-4	-6	-10	-5	-11	-5	-6	-11	-2	-2	-7	-11
	2070-2100	-3	-7	-6	-2	-8	-5	-2	-5	-8	-12	-24	-9	-14	-19	-6	-6	-14	-24
Cantábrico Occidental	2010-2040	0	-3	-1	-4	-5	5	5	-1	-5	-3	-6	-2	-4	-5	-1	-1	-4	-6
	2040-2070	-4	-8	-6	-8	-9	-2	-2	-6	-9	-5	-11	-7	-8	-13	-1	-1	-7	-13
	2070-2100	-2	-9	-6	-4	-11	-2	-2	-6	-11	-11	-23	-9	-17	-20	-3	-3	-14	-23
Duero	2010-2040	1	-2	-6	-5	-7	10	10	-2	-7	2	-3	-6	-9	-6	-4	2	-4	-9
	2040-2070	-6	-4	-5	-9	-14	-1	-1	-6	-14	-4	-10	-10	-9	-16	4	4	-8	-16
	2070-2100	-3	-11	-7	-6	-18	4	4	-7	-18	-10	-16	-7	-19	-24	1	1	-12	-24
Tajo	2010-2040	1	-2	-8	-5	-9	12	12	-2	-9	4	-4	-8	-10	-8	-4	4	-5	-10
	2040-2070	-5	-3	-6	-7	-16	-1	-1	-6	-16	-4	-12	-14	-9	-19	5	5	-9	-19
	2070-2100	-2	-12	-10	-6	-22	4	4	-8	-22	-12	-17	-9	-21	-29	0	0	-15	-29
Guadiana	2010-2040	2	-2	-10	-5	-10	12	12	-2	-10	4	-6	-9	-10	-9	-3	4	-6	-10
	2040-2070	-5	-4	-7	-7	-17	0	0	-7	-17	-4	-12	-17	-10	-22	5	5	-10	-22
	2070-2100	-2	-13	-12	-7	-24	4	4	-9	-24	-12	-18	-12	-23	-31	-1	-1	-16	-31
Guadalquivir	2010-2040	2	-1	-11	-5	-12	13	13	-2	-12	4	-7	-10	-10	-10	-3	4	-6	-10
	2040-2070	-5	-4	-8	-6	-18	1	1	-7	-18	-4	-13	-20	-10	-24	5	5	-11	-24
	2070-2100	-2	-13	-16	-7	-25	2	2	-10	-25	-15	-20	-14	-24	-34	-2	-2	-18	-34
Cuencas Mediterráneas Andaluzas	2010-2040	1	-1	-13	-2	-13	13	13	-2	-13	3	-8	-9	-8	-13	-5	3	-7	-13
	2040-2070	-4	-3	-6	-1	-19	0	0	-5	-19	-4	-14	-22	-10	-27	3	3	-12	-27
	2070-2100	-2	-11	-17	-7	-27	0	0	-11	-27	-16	-19	-15	-22	-37	-5	-5	-19	-37
Guadalete y Barbate	2010-2040	3	-3	-13	-4	-12	12	12	-3	-13	3	-8	-11	-10	-10	-3	3	-7	-11
	2040-2070	-5	-4	-8	-5	-19	1	1	-7	-19	-4	-15	-23	-11	-25	5	5	-12	-25
	2070-2100	-2	-15	-19	-7	-27	2	2	-11	-27	-16	-22	-17	-26	-37	-4	-4	-20	-37
Tinto, Odiel y Piedras	2010-2040	0	-1	-12	-4	-10	13	13	-2	-12	4	-5	-12	-9	-10	-5	4	-6	-12
	2040-2070	-7	-4	-8	-4	-18	2	2	-6	-18	-5	-14	-21	-9	-23	5	5	-11	-23
	2070-2100	-2	-13	-16	-5	-25	6	6	-9	-25	-12	-19	-15	-22	-33	0	0	-17	-33
Segura	2010-2040	-2	0	-5	-3	-7	4	4	-2	-7	0	-8	-5	-6	-11	-3	0	-5	-11
	2040-2070	-2	-2	-2	-4	-13	-4	-2	-4	-13	-6	-8	-12	-9	-20	-7	-6	-10	-20
	2070-2100	-3	-6	-10	-7	-15	-5	-3	-8	-15	-11	-14	-8	-15	-23	-11	-8	-14	-23
Júcar	2010-2040	1	1	-4	-1	-7	6	6	-1	-7	2	-6	-5	-5	-9	-2	2	-4	-9
	2040-2070	-2	-1	-2	-1	-10	-2	-1	-3	-10	-2	-7	-10	-6	-15	-3	-2	-7	-15
	2070-2100	0	-4	-9	-4	-12	-5	0	-6	-12	-8	-12	-6	-13	-19	-7	-6	-11	-19
Ebro	2010-2040	0	-1	-1	-2	-5	8	8	0	-5	-1	-4	-3	-3	-4	-1	-1	-3	-4
	2040-2070	-3	-5	-3	-4	-8	-2	-2	-4	-8	-1	-8	-4	-6	-9	2	2	-5	-9
	2070-2100	-1	-6	-4	-3	-9	-1	-1	-4	-9	-8	-15	-3	-14	-16	-2	-2	-10	-16
Cuencas Internas de Cataluña	2010-2040	2	1	1	2	-2	9	9	2	-2	2	-6	-1	1	-1	-1	2	-1	-6
	2040-2070	0	-3	0	4	-3	0	4	0	-3	4	-6	-3	1	-2	4	4	0	-6
	2070-2100	3	-5	-4	3	-3	-1	3	-1	-5	-3	-10	1	-7	-6	1	1	-4	-10
Islas Baleares	2010-2040	-1	-5	0	-2	-8	4	4	-2	-8	-3	-9	-5	-4	-13	-2	-2	-6	-13
	2040-2070	0	-7	-5	-1	-11	-3	0	-5	-11	-4	-11	-14	-6	-19	-5	-4	-10	-19
	2070-2100	-1	-8	-13	-4	-16	-7	-1	-8	-16	-8	-24	-12	-16	-26	-11	-8	-16	-26
Canarias	2010-2040	2	-4	-11	-7	-11	8	8	-4	-11	0	-11	-10	-4	-17	-8	0	-8	-17
	2040-2070	-5	-9	-8	-1	-14	5	5	-5	-14	-9	-14	-25	-15	-23	0	0	-14	-25
	2070-2100	-10	-10	-17	-11	-23	-5	-5	-13	-23	-16	-24	-17	-27	-37	-4	-4	-21	-37



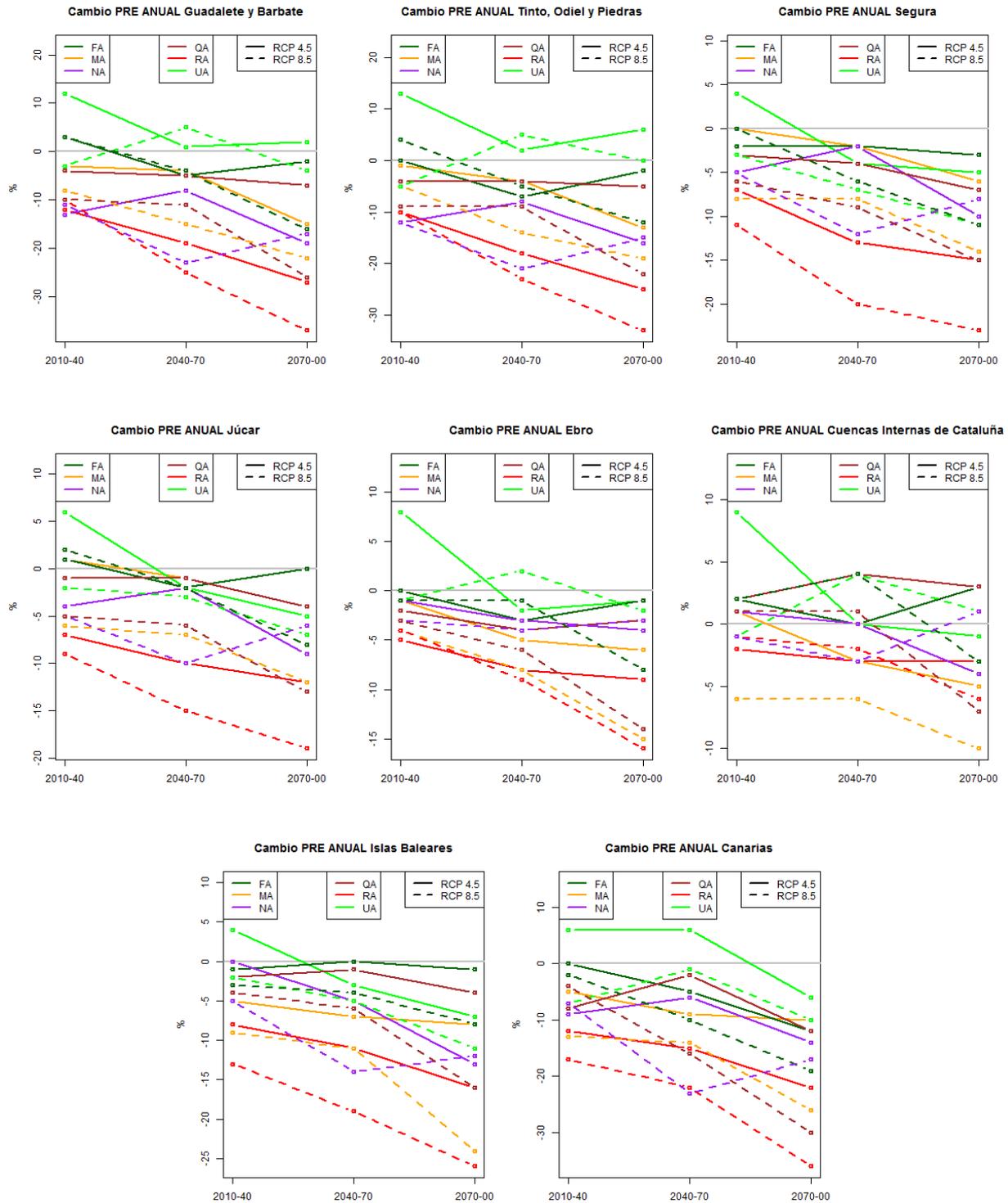


Figura 53.  $\Delta$  (%) PRE de valores medios anuales en cada DH y PI.



#### 6.4.1.3 Cambios en el ciclo anual

La apreciación de los cambios en el ciclo anual está enmascarada por la falta de ajuste de las proyecciones al ciclo observado, de las que se ha hecho mención en el apartado 5.2.4. No se observan unos claros patrones de cambio en el ciclo anual ya que los resultados varían mucho según la proyección climática (Figura 54). No obstante, lo más destacado es la tendencia a concentrarse la PRE de España en febrero en todos los PI y RCP, en contraposición con una reducción al final del verano. Hacia finales de siglo y el RCP 8.5 se hace más patente la reducción en mayo-junio y sobre todo en septiembre-octubre. La media de las proyecciones da para los dos RCP y los tres PI un aumento notable de la PRE en febrero y en menor grado en marzo, y una disminución en junio y septiembre.

Estacionalmente (Tabla 8), se observa que los menores descensos porcentuales, o incluso ascensos, se dan en invierno, mientras que se observan descensos bastante homogéneos cuando se comparan el resto de estaciones. También se observa en dicha tabla la gran disparidad de resultados según las proyecciones.

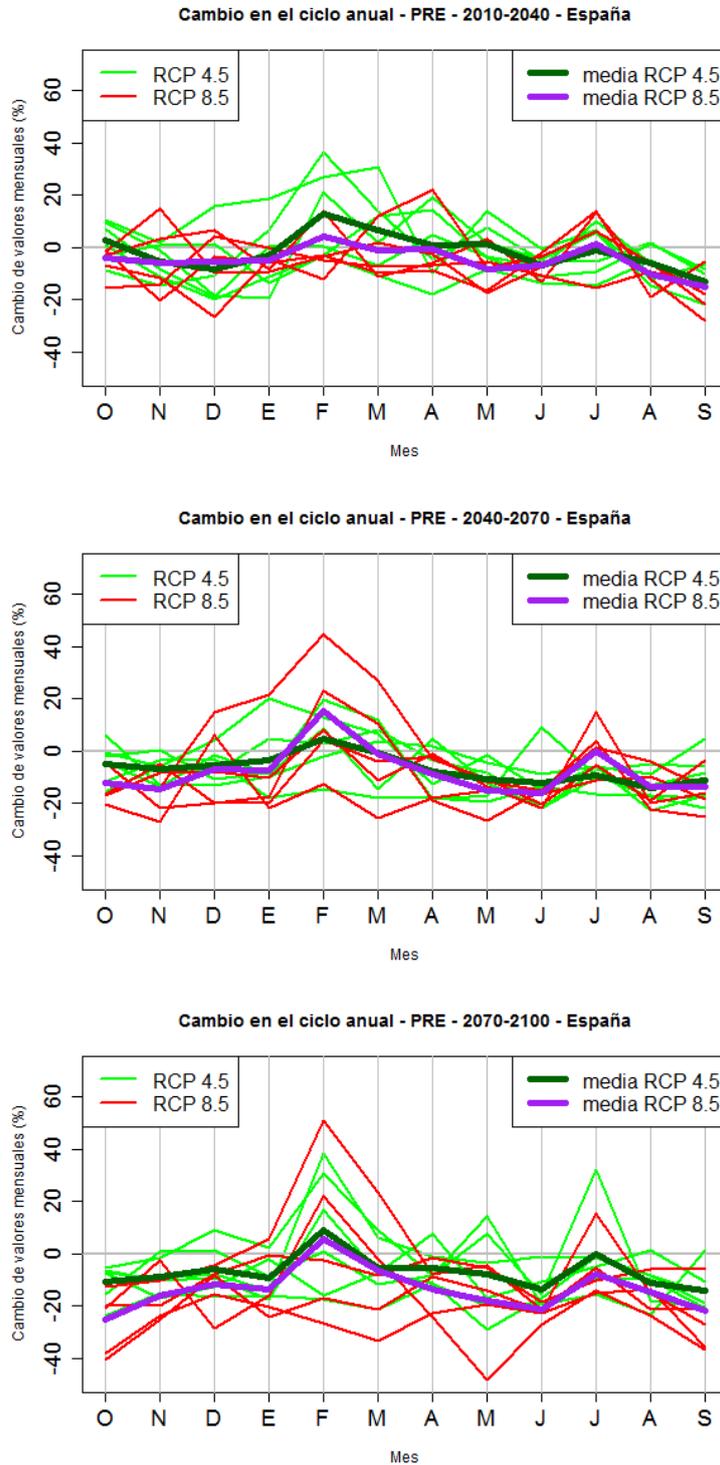


Figura 54. Cambios (%) en el ciclo anual de PRE para cada PI respecto al PC para el conjunto de España según las distintas proyecciones y sus valores medios para cada RCP.



Tabla 8. Δ (%) PRE estacional en España para cada PI y proyección. Se indican los valores máximo (Mx), mínimo (Mn) y el promedio (Med) para cada RCP. Los colores reflejan la gradación del cambio.

PRE ESPAÑA Δ (%)		RCP 4.5									RCP 8.5								
		F4A	M4A	N4A	Q4A	R4A	U4A	Mx	Med	Mn	F8A	M8A	N8A	Q8A	R8A	U8A	Mx	Med	Mn
OND	2010-2040	-11	-6	-13	-9	0	9	9	-5	-13	-2	0	-18	-9	-7	3	3	-5	-18
	2040-2070	-10	-5	-9	-6	-5	-1	-1	-6	-10	-9	-14	-17	-10	-12	-4	-4	-11	-17
	2070-2100	-8	-9	-13	-3	-18	1	1	-8	-18	-12	-18	-14	-22	-24	-9	-9	-17	-24
EFM	2010-2040	17	-2	-2	-2	-9	25	25	4	-9	12	-4	-2	-6	-4	-2	12	-1	-6
	2040-2070	5	6	-4	-6	-17	14	14	0	-17	7	2	-8	-5	-20	30	30	1	-20
	2070-2100	7	-5	-8	-7	-18	13	13	-3	-18	-8	-1	-3	-21	-27	25	25	-6	-27
AMJ	2010-2040	-1	7	0	-1	-14	0	7	-1	-14	-4	-9	4	-10	-7	-5	4	-5	-10
	2040-2070	-10	-12	-3	-7	-17	-10	-3	-10	-17	-10	-21	-9	-10	-17	-10	-9	-13	-21
	2070-2100	-2	-19	-6	-5	-16	-4	-2	-9	-19	-15	-34	-8	-14	-22	-10	-8	-17	-34
JAS	2010-2040	-5	-13	-5	-5	-13	-5	-5	-8	-13	-7	-12	-5	-5	-13	-13	-5	-9	-13
	2040-2070	-6	-17	-3	-10	-17	-16	-3	-12	-17	-5	-17	-5	-9	-13	-8	-5	-10	-17
	2070-2100	-10	-10	-5	-6	-13	-10	-5	-9	-13	-9	-28	-7	-12	-22	-17	-7	-16	-28

La disparidad de resultados se muestra patente desde la Figura 55 a la Figura 60. El caso más claro es el patrón de cambios estacionales de las proyecciones RA y UA. Las proyecciones RA dan una destacada polaridad este-oeste; concentran la PRE en Levante durante la primavera en detrimento del invierno, mientras que en el resto peninsular es al revés. Por el contrario, las UA concentran de manera acusada la PRE en invierno en casi toda la Península, salvo en el Levante que tiene un comportamiento opuesto. Esos patrones se acentúan conforme avanza el siglo XXI. El resto de proyecciones muestra comportamientos intermedios menos definidos. El incremento de la PRE en invierno según RA determina el incremento de su media anual.

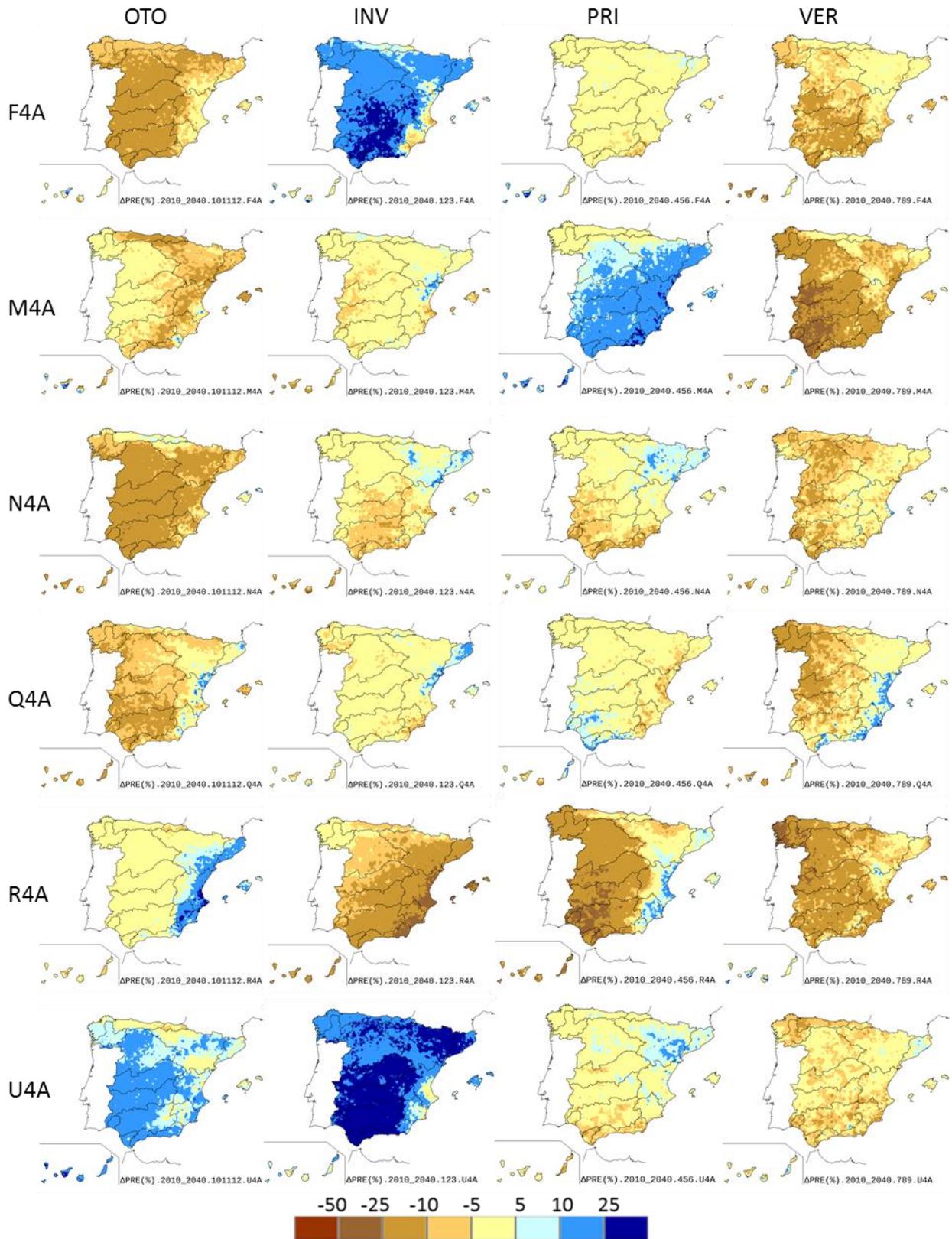


Figura 55.  $\Delta$  (%) PRE estacional para 2010-2040 RCP 4.5

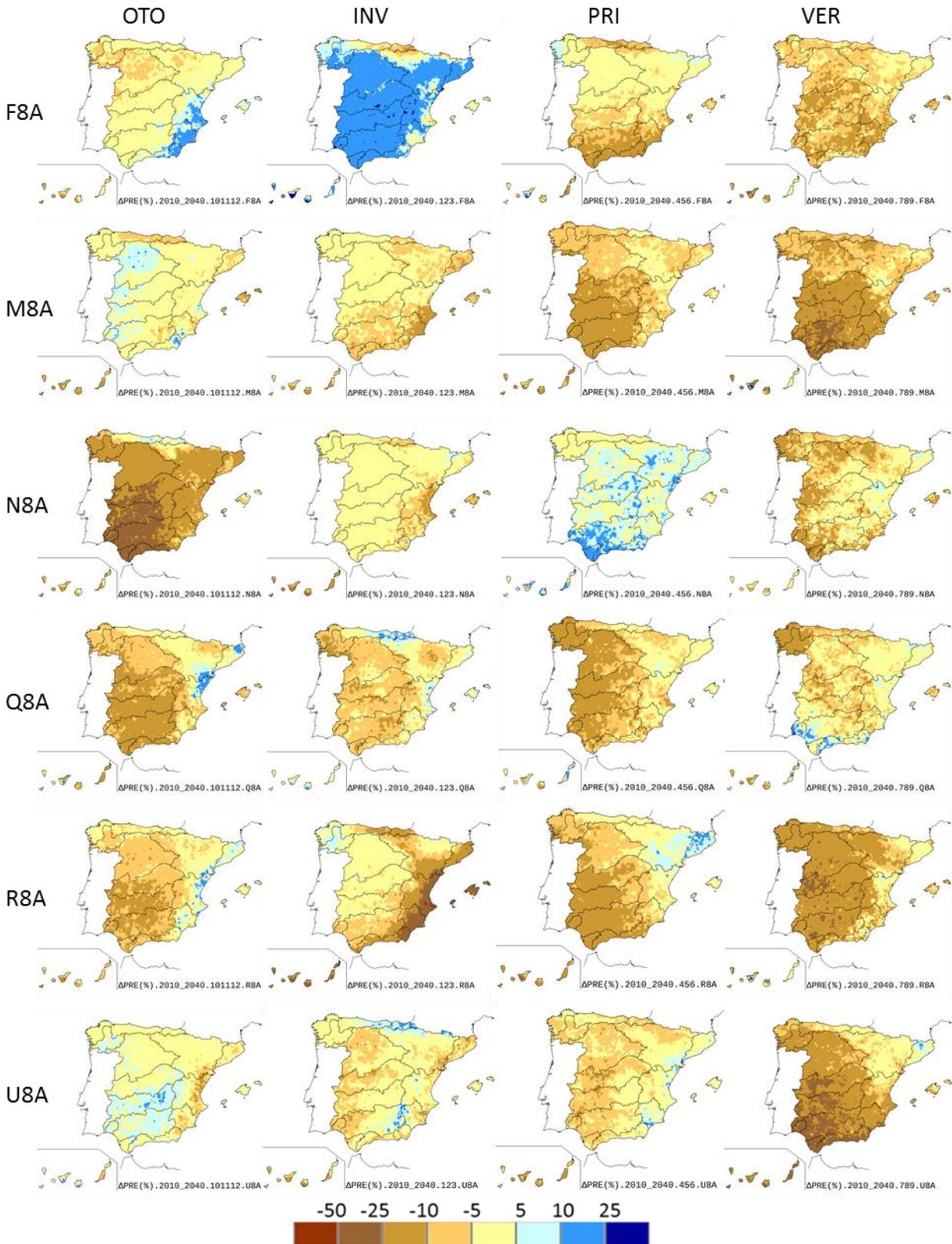


Figura 56.  $\Delta$  (%) PRE estacional para 2010-2040 RCP 8.5

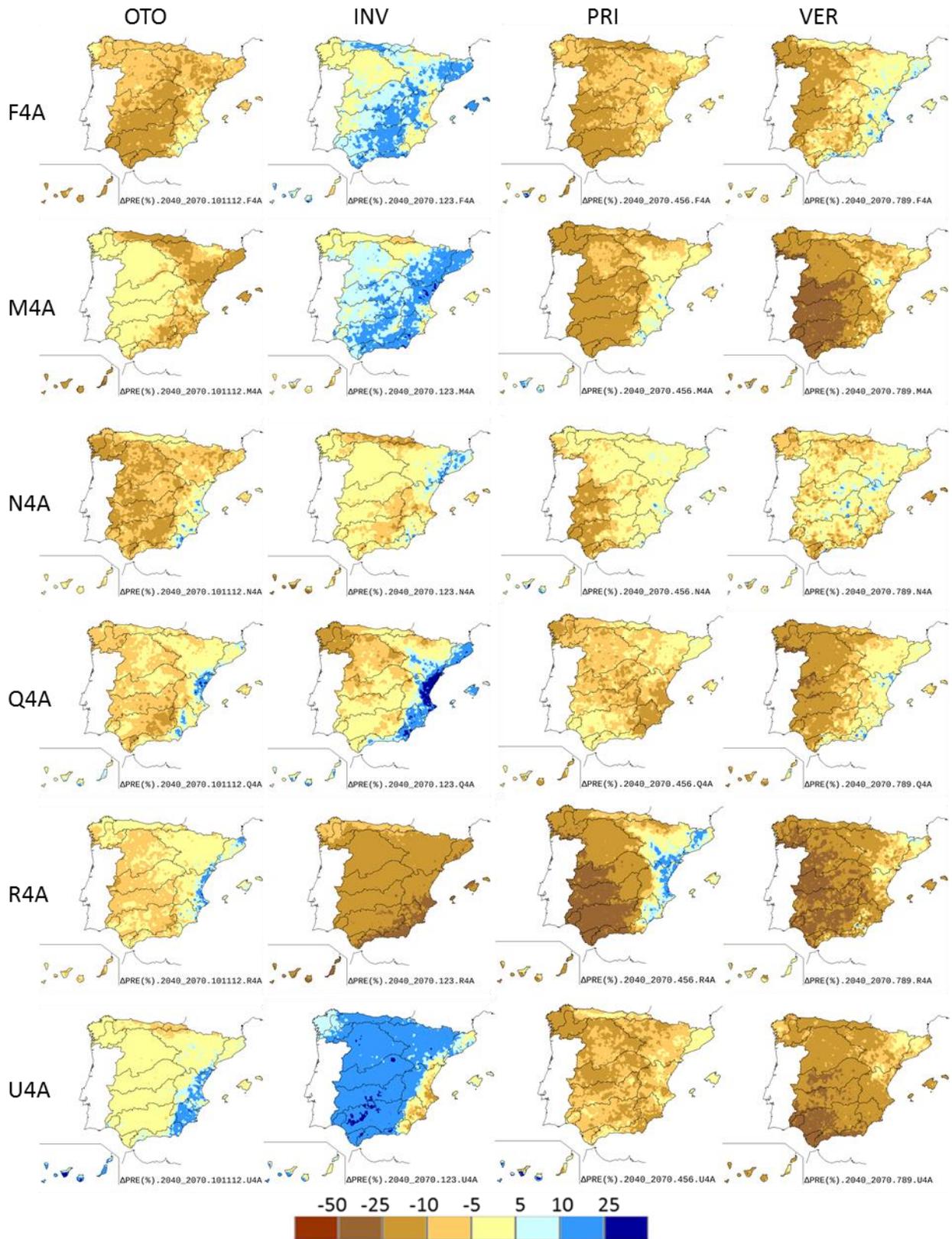


Figura 57.  $\Delta$  (%) PRE estacional para 2040-2070 RCP 4.5

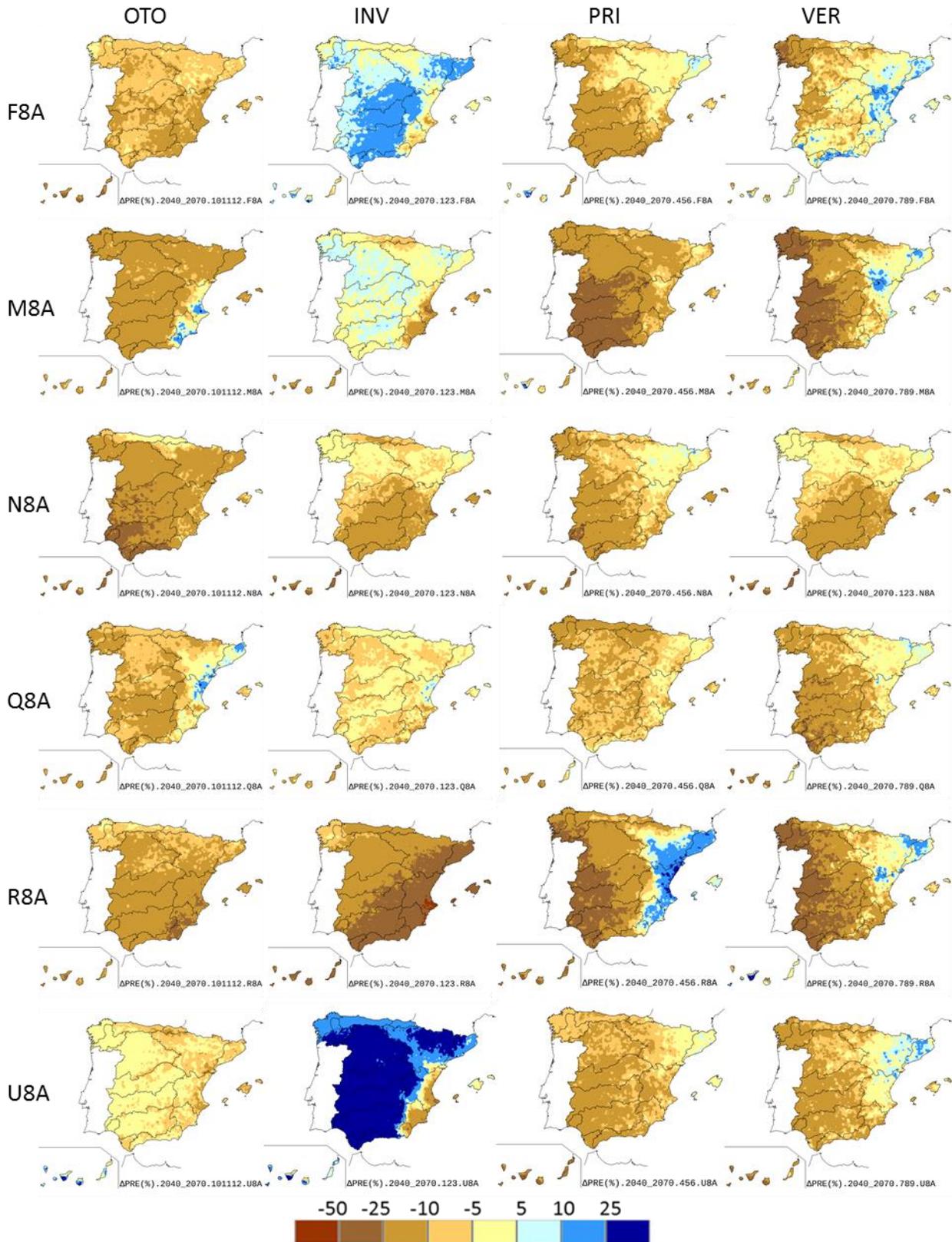


Figura 58.  $\Delta$  (%) PRE estacional para 2040-2070 RCP 8.5

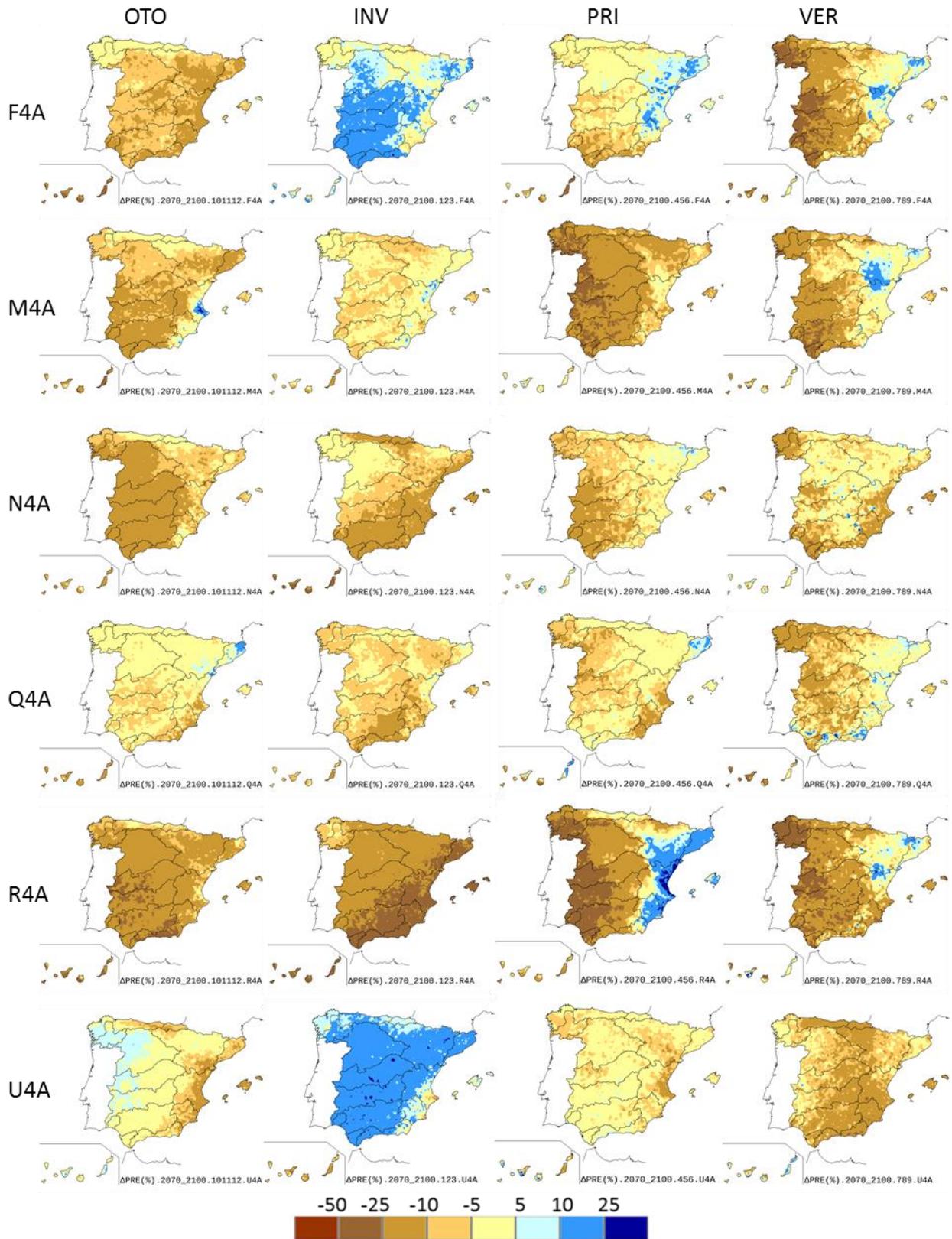


Figura 59.  $\Delta$  (%) PRE estacional para 2070-2100 RCP 4.5

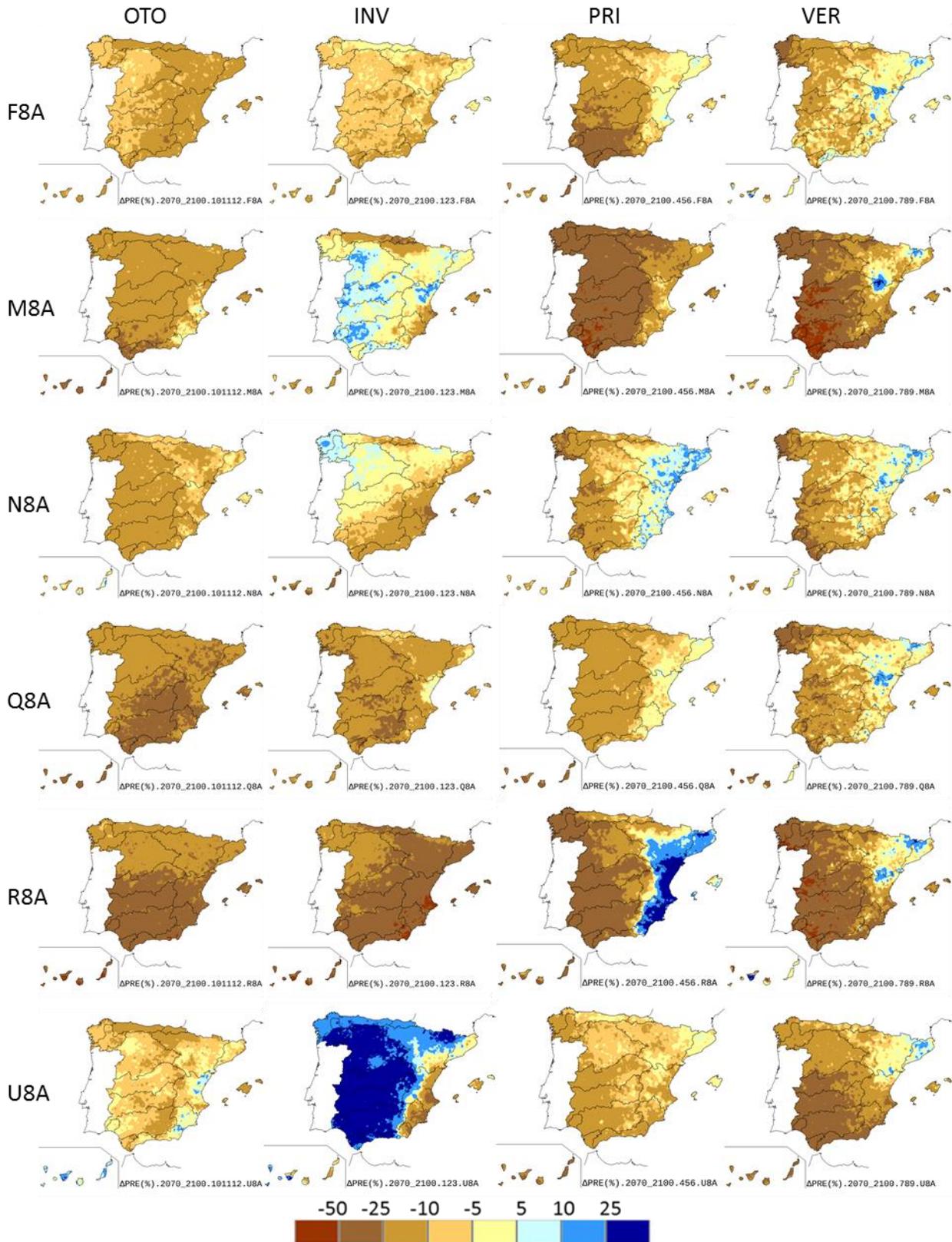


Figura 60.  $\Delta$  (%) PRE estacional para 2070-2100 RCP 8.5

## 6.4.2 Evapotranspiración potencial

### 6.4.2.1 Cambios anuales para el conjunto de España

Como se ha comentado en la metodología, la ETP se calcula a partir de las temperaturas. Tanto las TEM, como las TMN y las TMX aumentan en cada PI con relación al PC según todas las proyecciones (Tabla 9). El aumento es mayor cuanto más nos acercamos al final del siglo XXI, es mayor en el RCP 8.5 que en el RCP 4.5 y es mayor en las TMX que en las TMN, llegando la media de las proyecciones a sobrepasar los 4 °C para las TMX en el PI3 y el RCP 8.5. La proyección RA da los mayores aumentos, especialmente en el RCP 8.5. En el lado opuesto, la proyección NA marca los menores aumentos de temperaturas.

Tabla 9.  $\Delta$  (°C) TEM, TMN y TMX en cada PI según cada proyección para el conjunto de España. Se indican los valores máximo (Mx), mínimo (Mn) y el promedio (Med) para cada RCP. Los colores reflejan la graduación del cambio.

		RCP 4.5									RCP 8.5								
		F	M	N	Q	R	U	Mn	Med	Mx	F	M	N	Q	R	U	Mn	Med	Mx
TEM	PI1	0.71	1.13	0.44	1.01	1.52	0.44	0.44	<b>0.88</b>	1.52	0.68	1.23	0.54	1.38	1.64	0.79	0.54	<b>1.04</b>	1.64
	PI2	1.36	1.85	0.89	1.77	2.63	1.33	0.89	<b>1.64</b>	2.63	1.96	2.53	1.70	2.40	3.38	1.81	1.70	<b>2.30</b>	3.38
	PI3	1.73	2.21	1.52	1.91	3.23	1.67	1.52	<b>2.04</b>	3.23	3.40	4.24	2.79	3.99	5.59	3.17	2.79	<b>3.86</b>	5.59
TMN	PI1	0.67	1.04	0.37	0.91	1.41	0.53	0.37	<b>0.82</b>	1.41	0.68	1.13	0.43	1.21	1.51	0.72	0.43	<b>0.94</b>	1.51
	PI2	1.21	1.70	0.75	1.59	2.41	1.22	0.75	<b>1.48</b>	2.41	1.80	2.28	1.47	2.16	3.05	1.73	1.47	<b>2.08</b>	3.05
	PI3	1.59	1.99	1.30	1.76	2.93	1.63	1.30	<b>1.87</b>	2.93	3.07	3.83	2.48	3.54	5.08	3.00	2.48	<b>3.50</b>	5.08
TMX	PI1	0.76	1.22	0.50	1.12	1.64	0.35	0.35	<b>0.93</b>	1.64	0.69	1.32	0.65	1.55	1.77	0.86	0.65	<b>1.14</b>	1.77
	PI2	1.50	2.00	1.04	1.94	2.84	1.43	1.04	<b>1.79</b>	2.84	2.12	2.78	1.94	2.64	3.70	1.90	1.90	<b>2.51</b>	3.70
	PI3	1.88	2.43	1.73	2.06	3.53	1.70	1.70	<b>2.22</b>	3.53	3.73	4.64	3.10	4.44	6.11	3.35	3.10	<b>4.23</b>	6.11

Los cambios en la ETP anual estimada para el conjunto de España durante el periodo 2010-2100 revelan una tendencia creciente según todas las proyecciones y en ambos escenarios de emisiones RCP (Figura 61). El rango de variabilidad entre proyecciones, que se muestra en la banda sombreada de gris indica una incertidumbre que no va más allá de cinco puntos porcentuales arriba o abajo. La tendencia creciente se puede considerar estadísticamente significativa (nivel de significación del 5%) para ambas proyecciones y ambos RCP; la proyección R4A determina la tendencia del promedio para RCP 4.5. Como se aprecia en la figura 60, la pendiente del promedio de cambios es mayor en el RCP 8.5 que en el RCP 4.5.

Una pendiente del 0.2% quiere decir que cada año aumenta la ETP un 0.2% respecto a la ETP media del PC. Si suponemos que la ETP del PC de la media de las proyecciones es similar a la ETP observada en 1940-2006 en España, que es de 893 mm/año, se tendría un aumento de 1.8 mm/año entre 2010 y 2099, unos 162 mm en el total de ese periodo, hasta unos 1055 mm/año.

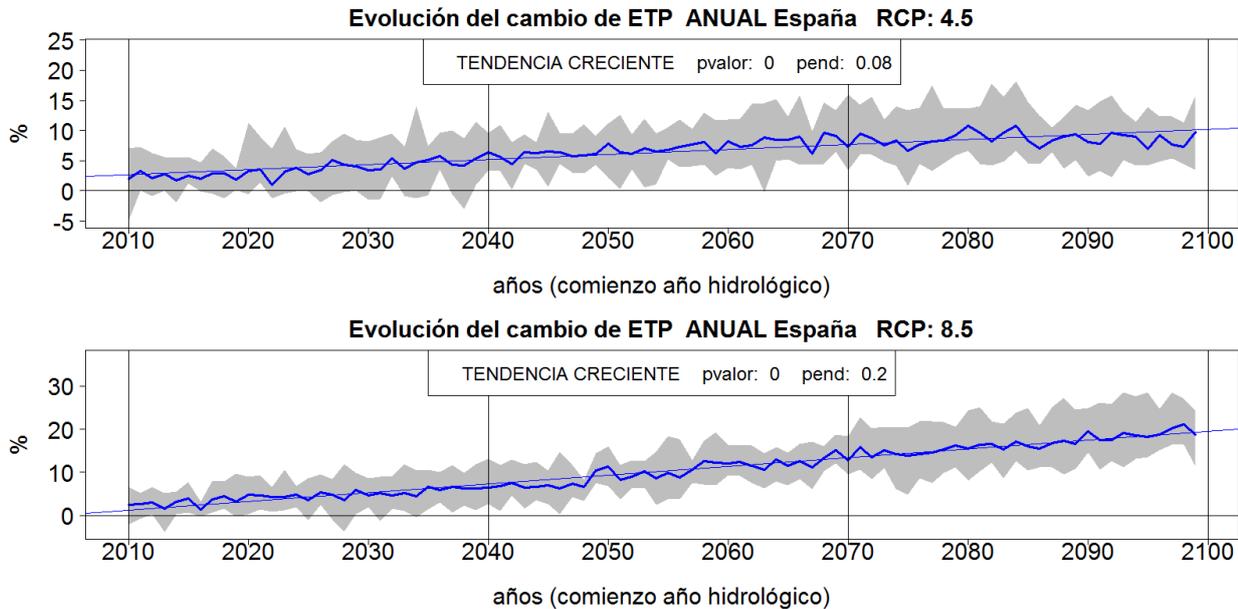


Figura 61. Tendencia del  $\Delta$  (%) ETP del año 2010 al 2099 para los RCP 4.5 (arriba) y 8.5 (abajo) para el conjunto de España. La banda gris indica el rango de resultados de las proyecciones. La línea gruesa indica su promedio y la recta delgada su pendiente. Se indica su p-valor según el test de Mann Kendall; negra: sin tendencia, roja: decreciente, azul: creciente.

Los cambios de ETP para cada uno de los tres PI muestran aumentos en consonancia con los aumentos de temperaturas (Tabla 10 y Figura 62 izquierda). A modo de ejemplo, para el periodo 2010-2040, el rango de cambios va desde un mínimo aumento del 1% en U4A a un 7% en R8A. La proyección RA es la que da los mayores aumentos tanto en RCP 4.5 como en RCP 8.5, mientras que UA, NA y FA dan los menores. Promediando los resultados de las proyecciones, se estiman siempre superiores aumentos de ETP en RCP 8.5 que en RCP 4.5. La diferencia entre ambos RCP sólo es importante en el último PI del siglo XXI; así, la media de los cambios para los RCP 4.5 y 8.5 son respectivamente del 3% y 4% para 2010-2040, 7% y 10% para 2040-2070 y 9% y 17% para 2070-2100.

Tabla 10.  $\Delta$  (%) ETP en cada PI según cada proyección para el conjunto de España. Se indican los valores máximo (Mx), mínimo (Mn) y el promedio (Med) para cada RCP. Los colores reflejan la gradación del cambio.

ETP ESPAÑA $\Delta$ Anual (%)	RCP 4.5									RCP 8.5								
	F4A	M4A	N4A	Q4A	R4A	U4A	Mx	Med	Mn	F8A	M8A	N8A	Q8A	R8A	U8A	Mx	Med	Mn
2010-2040	2	4	2	4	6	1	6	3	1	2	5	2	6	7	4	7	4	2
2040-2070	6	8	4	8	11	6	11	7	4	8	11	8	11	14	8	14	10	8
2070-2100	7	10	7	8	14	6	14	9	6	14	19	12	18	24	13	24	17	12

Los cambios de la variabilidad de ETP anual para España en cada PI se muestran de manera gráfica en la Figura 62 derecha. Hay mayoritariamente un aumento de variabilidad en cada uno de los tres PI con relación al PC. La variabilidad aumenta más en las proyecciones del RCP 8.5 que en las del RCP 4.5; de hecho, la proyección Q4A es la única en la que la variabilidad disminuye en todos los PI. Por otro lado, no se observa una tendencia temporal de cambio en el siglo XXI; hay algunas proyecciones

que aumentan la variabilidad conforme avanza el siglo XXI (F8A), otras la disminuyen (F4A), pero la mayoría no tienen un patrón de tendencia de cambio definido.

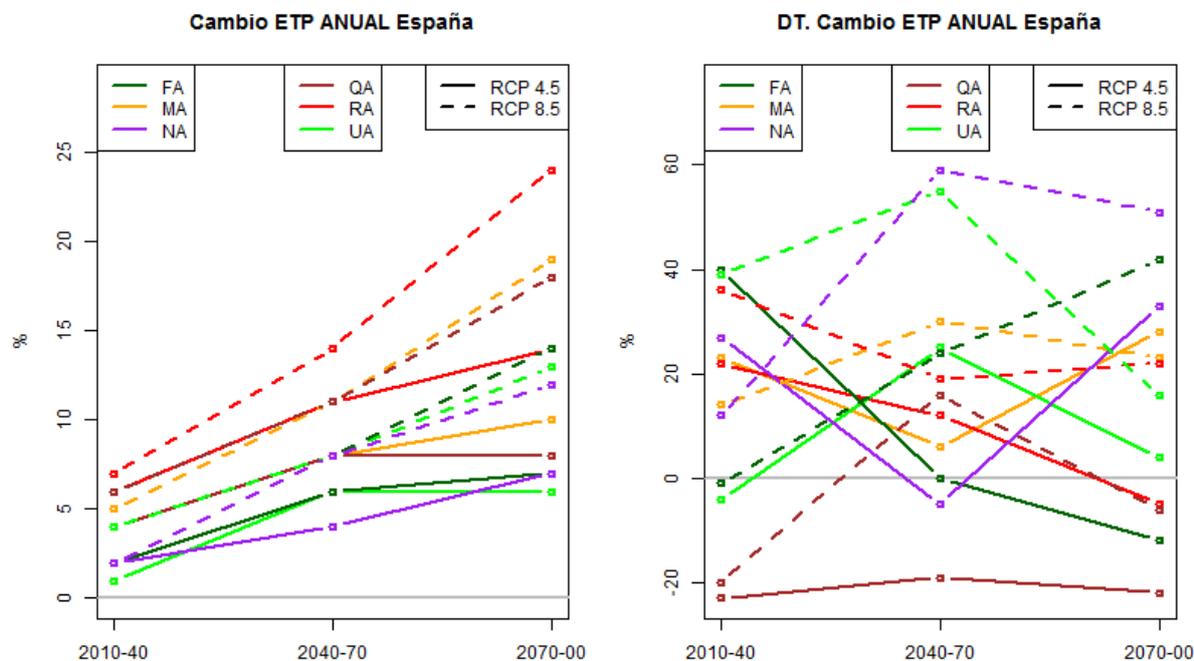


Figura 62.  $\Delta$  (%) ETP en cada PI. Izquierda: valores medios anuales. Derecha: DT de los valores anuales.

#### 6.4.2.2 Distribución espacial de los cambios anuales.

La variación de ETP responde sobre todo a la variación de temperaturas. La ETP sube en todos los periodos y en todas las zonas según todas las proyecciones (Figura 63 a Figura 68). Esa subida es inferior al 10% en el PI1 y va siendo mayor conforme avanza el siglo XXI.

Las proyecciones del RCP 8.5 dan mayores subidas de ETP que las respectivas del RCP 4.5.

El incremento es, en general, mayor en las zonas interiores que en las zonas costeras. Destacan los altos incrementos que se dan en general en las divisorias de aguas de las grandes cuencas hidrográficas, lo que va a implicar un aumento de la evapotranspiración real (ETR) allí donde hay más disponibilidad de agua y, por lo tanto, una previsible reducción de RRHH en esas zonas.

La proyección que sugiere mayor incremento de ETP es R8A, llegando a pasar del 25% en amplias zonas del centro de España para el PI3. Por el contrario, U4A es la que da un menor incremento de ETP, inferior al 10% en casi todas las partes de España para el P3.

Con carácter general, los mapas de variaciones de PRE y ETP muestran un descenso de la PRE y un aumento de la ETP. Por lo tanto, se espera una reducción de RRHH. Estas características se van acentuando conforme avanza el siglo XXI.



Como puede apreciarse en la Figura 63 y Figura 64, para el periodo 2010-2040 no hay diferencias notables en los cambios de la ETP anual según la proyección climática. La mayoría se muestran en el rango +/- 5%. Las proyecciones RA, QA y MA son las que dan más aumento de ETP, superior al 5 % en gran parte del territorio, sobre todo del centro peninsular y superior al 10% en zonas de cabecera de las cuencas del Duero, Ebro y Tajo. Las proyecciones MA y QA muestran unos aumentos de ETP ligeramente superiores en el escenario RCP 8.5 a los del RCP 4.5, afectando principalmente a las áreas centro-sur y orientales. U8A da aumentos patentes respecto a U4A en las cabeceras de cuencas. Todas las proyecciones muestran de manera consistente la insignificante variación de la ETP en la cornisa Cantábrica y el NO de Galicia. El SE de Galicia sin embargo sí aparece afectado en las proyecciones MA, QA y RA. La proyección RA es la única que muestra aumentos significativos en los archipiélagos Canario y Balear para ambos RCP.

Para el periodo 2040-2070 hay un aumento de ETP por encima del 5% según casi todas las proyecciones, salvo la N4A, que muestra una mayoría de zonas con variación todavía poco notable (Figura 65 y Figura 66). La cornisa cantábrica y Galicia NO continúan con poca afección según todas las proyecciones y escenarios. Los aumentos empiezan a ser más significativos en los bordes de la cuenca, como la del Duero, según ambos escenarios RCP. Las proyecciones FA, NA y UA sólo muestran rangos de variación por encima del 10% en el escenario RCP 8.5. La proyección R8A es la que da un mayor incremento, superior al 15% en amplias zonas del centro peninsular. Se detecta un claro patrón de cambios, con aumentos de ETP más significativos en las zonas limítrofes de los límites de las cuencas del interior peninsular, debido a su orografía y situación de lejanía al mar. En las zonas más costeras e insulares en general se dan las menores variaciones de ETP.

Para el periodo 2070-2100 (Figura 67 y Figura 68) continúa la tendencia de aumento de ETP generalizada. Hay ya una clara distinción entre ambos RCP, siendo los aumentos mucho mayores en el RCP 8.5 que en el RCP 4.5. Las proyecciones RA, y en menor medida MA, pronostican los mayores incremento de ETP, superándose el 25 % en amplias zonas del interior peninsular según R8A. Se observa el mismo patrón de cambio espacial que en el anterior periodo, afectando más a las áreas del interior peninsular y en menor medida a la cornisa cantábrica y zonas del levante septentrional. Ambos archipiélagos sólo se muestran afectados de manera notable en las proyecciones MA, QA y RA del escenario RCP 8.5.

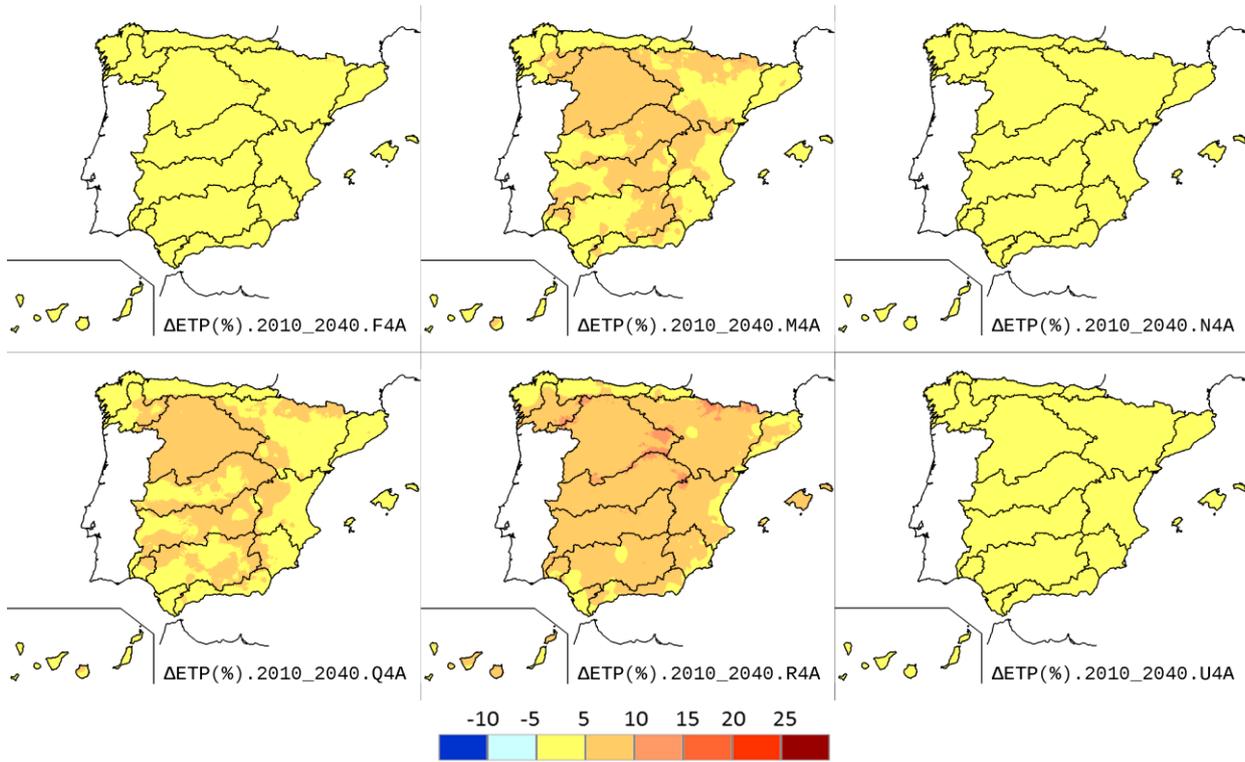


Figura 63.  $\Delta$  (%) ETP anual para 2010-2040 según las proyecciones RCP 4.5.

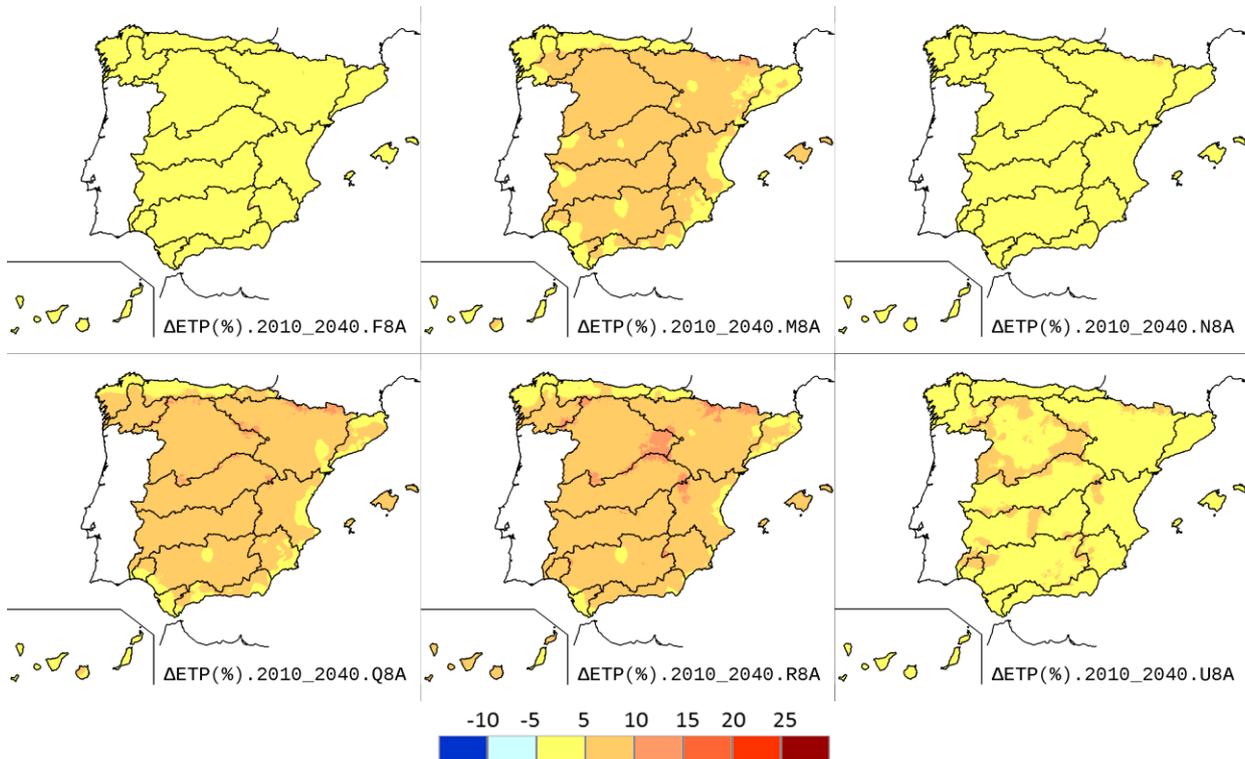


Figura 64.  $\Delta$  (%) ETP anual para 2010-2040 según las proyecciones RCP 8.5.

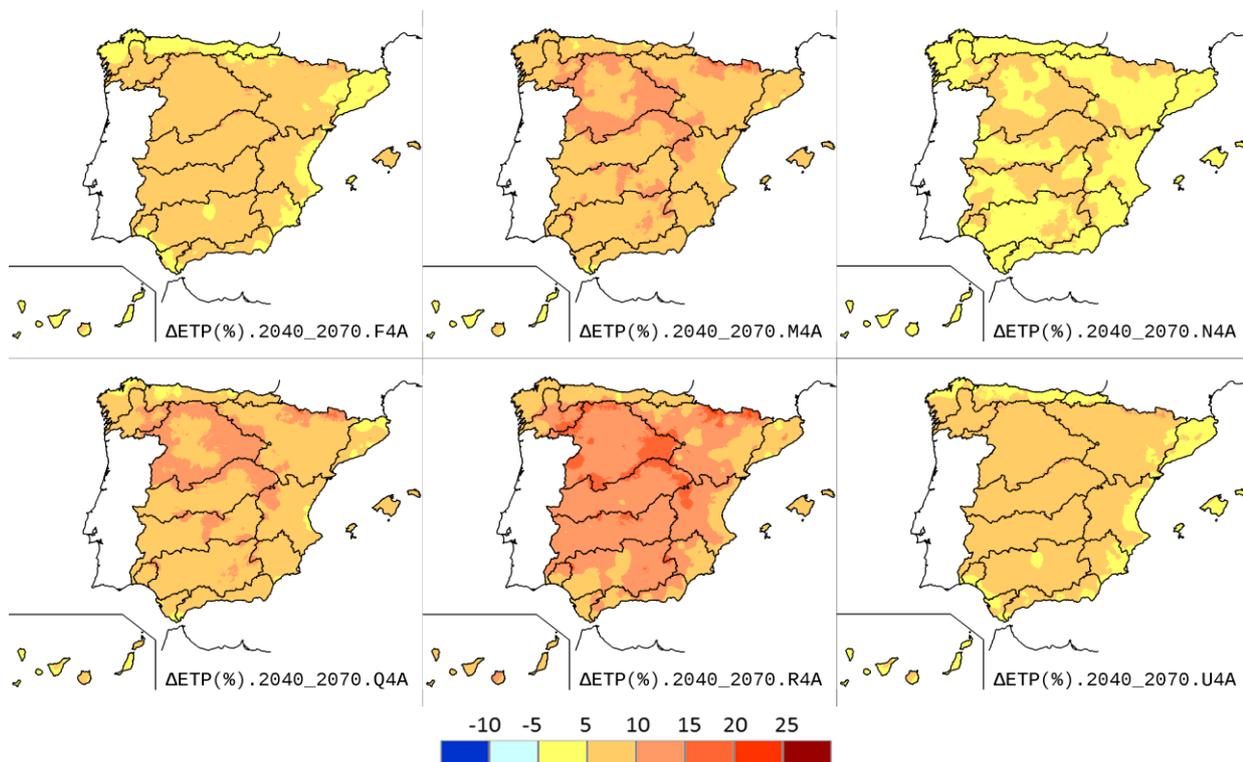


Figura 65.  $\Delta$  (%) ETP anual para 2040-2070 según las proyecciones RCP 4.5.

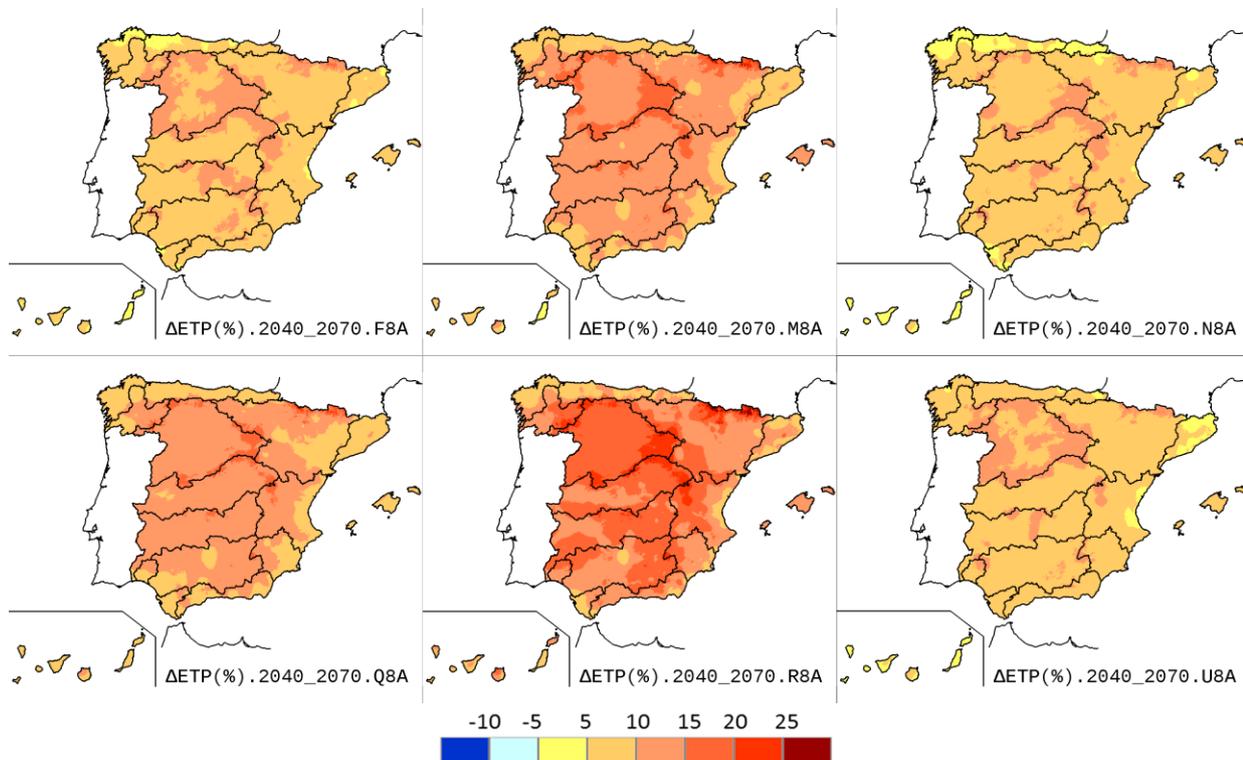


Figura 66.  $\Delta$  (%) ETP anual para 2040-2070 según las proyecciones RCP 8.5.

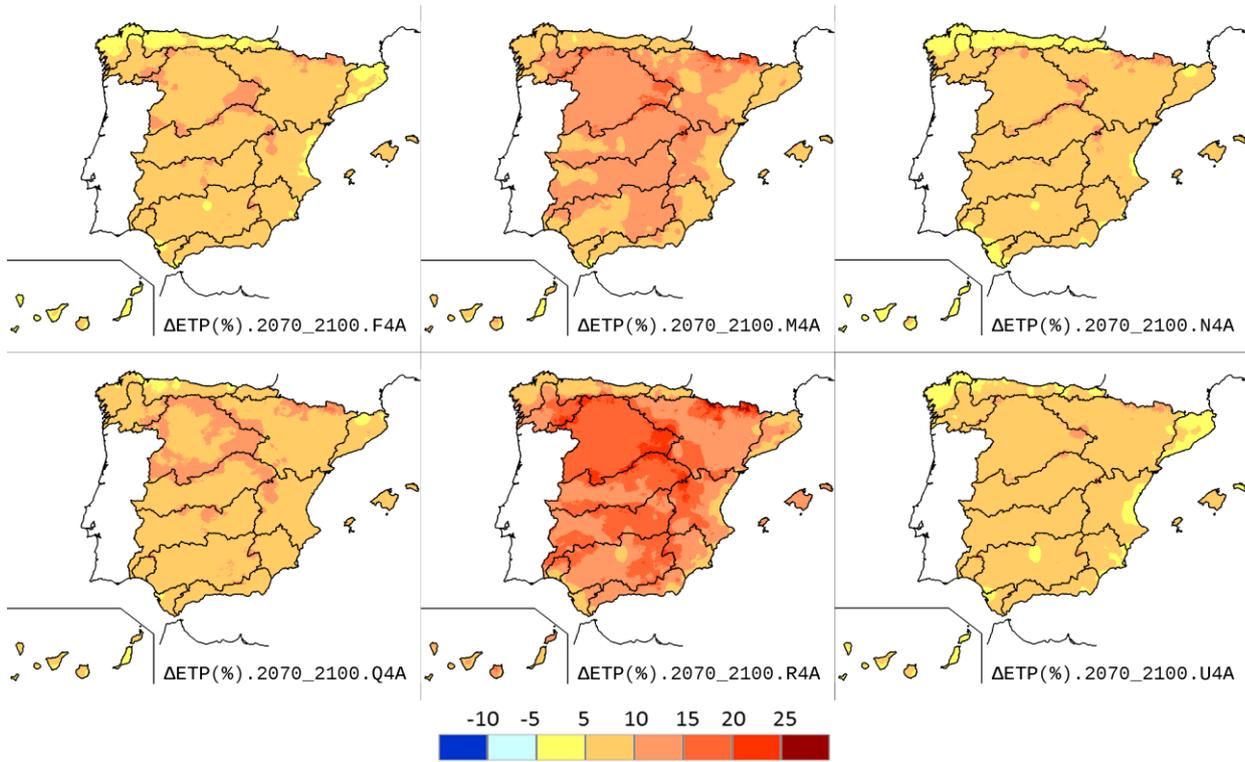


Figura 67.  $\Delta$  (%) ETP anual para 2000-2100 según las proyecciones RCP 4.5.

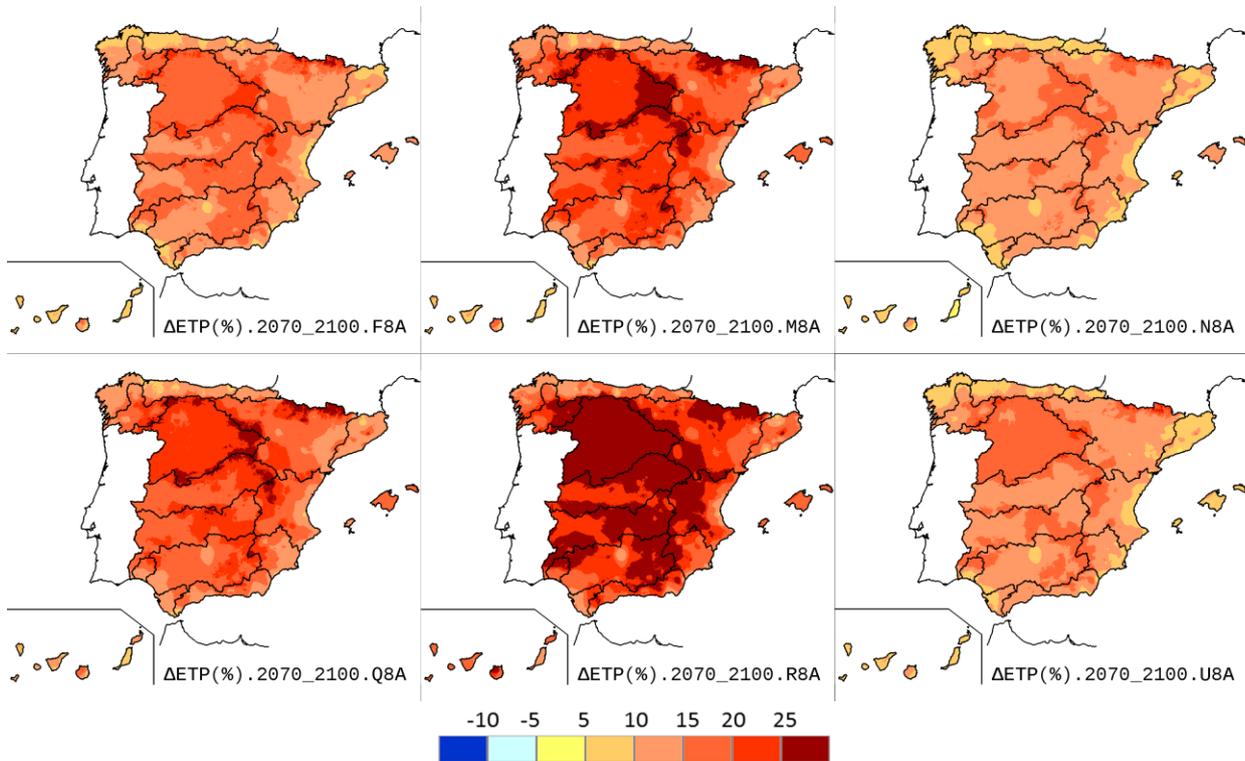


Figura 68.  $\Delta$  (%) ETP anual para 2070-2100 según las proyecciones RCP 8.5.



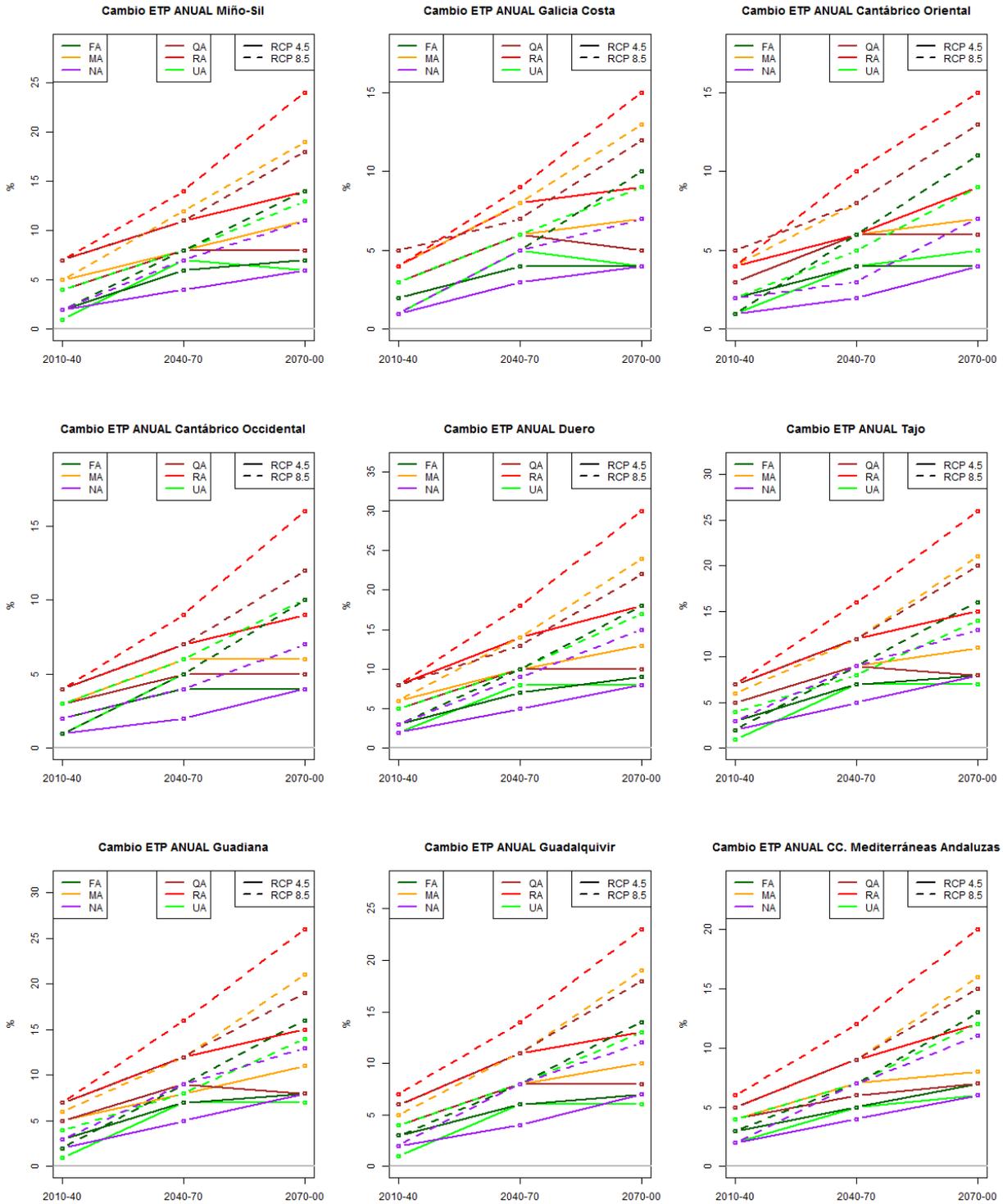
En el anexo 2 se incluyen las gráficas de las tendencias de la ETP anual de las DDHH durante el siglo XXI. Los resultados son similares a los obtenidos para el conjunto de España. La banda de variación de cambios, representada por el sombreado gris, corresponde a la incertidumbre, que de manera consistente en todo el territorio es menor para el escenario RCP 8.5 en los primeros años del siglo XXI y con tendencia a aumentar con el tiempo (más fiable en el PI1 que en el PI3). El promedio de las proyecciones para cada DH y RCP da tendencias crecientes muy marcadas y la pendiente de ese promedio de cambios es siempre mayor en el RCP 8.5 que en el RCP 4.5, indicando un mayor aumento de ETP cuando se considera el RCP 8.5.

La Tabla 11 contiene los resultados de los cambios de ETP para cada uno de los tres PI en cada DH y por cada proyección. La variación media anual de ETP para el RCP 4.5 oscila entre el 2% y el 11%, siendo siempre mayor en el PI más lejano. En el RCP 8.5 esta variación es mayor, oscila entre 3% y 21%. Las cuencas del interior son las más afectadas, en especial las del Duero, Tajo y Guadiana (proyecciones RA, QA y MA).

Las imágenes de la Figura 69 muestran de manera más evidente la diferente pendiente del aumento de ETP en cada proyección, mucho menor en la RCP 4.5 que en la RCP 8.5 y cómo la dispersión de resultados (incertidumbre) va en aumento con el tiempo.

Tabla 11.  $\Delta$  (%) ETP en cada DH y PI según cada proyección. Se indican los valores máximo (Mx), mínimo (Mn) y el promedio (Med) para cada RCP. Los colores reflejan la gradación del cambio.

ETP $\Delta$ Anual (%)		RCP 4.5									RCP 8.5								
		F4A	M4A	N4A	Q4A	R4A	U4A	Mx	Med	Mn	F8A	M8A	N8A	Q8A	R8A	U8A	Mx	Med	Mn
Miño-Sil	2010-2040	2	5	2	4	7	1	7	3	1	2	5	2	7	7	4	7	4	2
	2040-2070	6	8	4	8	11	7	11	7	4	8	12	7	11	14	8	14	10	7
	2070-2100	7	11	6	8	14	6	14	9	6	14	19	11	18	24	13	24	17	11
Galicia Costa	2010-2040	2	3	1	3	4	1	4	2	1	1	4	1	5	4	3	5	3	1
	2040-2070	4	6	3	6	8	5	8	5	3	5	8	5	7	9	6	9	7	5
	2070-2100	4	7	4	5	9	4	9	6	4	10	13	7	12	15	9	15	11	7
Cantábrico Oriental	2010-2040	2	4	1	3	4	1	4	2	1	1	4	2	5	4	2	5	3	1
	2040-2070	4	6	2	6	6	4	6	5	2	6	8	3	8	10	5	10	7	3
	2070-2100	4	7	4	6	9	5	9	6	4	11	13	7	13	15	9	15	11	7
Cantábrico Occidental	2010-2040	2	3	1	3	4	1	4	2	1	1	4	2	4	4	3	4	3	1
	2040-2070	4	6	2	5	7	5	7	5	2	5	7	4	7	9	6	9	7	4
	2070-2100	4	6	4	5	9	5	9	6	4	10	12	7	12	16	10	16	11	7
Duero	2010-2040	3	6	2	5	8	2	8	4	2	3	6	3	8	8	5	8	5	3
	2040-2070	7	10	5	10	14	8	14	9	5	10	14	9	13	18	10	18	12	9
	2070-2100	9	13	8	10	18	8	18	11	8	18	24	15	22	30	17	30	21	15
Tajo	2010-2040	3	5	2	5	7	1	7	4	1	2	6	3	7	7	4	7	5	2
	2040-2070	7	9	5	9	12	7	12	8	5	9	12	9	12	16	8	16	11	8
	2070-2100	8	11	8	8	15	7	15	9	7	16	21	13	20	26	14	26	18	13
Guadiana	2010-2040	3	5	2	5	7	1	7	4	1	2	6	3	7	7	4	7	5	2
	2040-2070	7	8	5	9	12	7	12	8	5	9	12	9	12	16	8	16	11	8
	2070-2100	8	11	8	8	15	7	15	9	7	16	21	13	19	26	14	26	18	13
Guadalquivir	2010-2040	3	4	2	4	6	1	6	4	1	3	5	2	6	7	4	7	4	2
	2040-2070	6	8	4	8	11	6	11	7	4	8	11	8	11	14	8	14	10	8
	2070-2100	7	10	7	8	13	6	13	8	6	14	19	12	18	23	13	23	17	12
Cuencas Mediterráneas Andaluzas	2010-2040	3	4	2	4	5	2	5	3	2	3	5	2	5	6	4	6	4	2
	2040-2070	5	7	4	6	9	5	9	6	4	7	9	7	9	12	7	12	9	7
	2070-2100	7	8	6	7	12	6	12	8	6	13	16	11	15	20	12	20	15	11
Guadalete y Barbate	2010-2040	2	3	2	3	4	1	4	3	1	2	4	2	4	4	3	4	3	2
	2040-2070	5	5	3	5	7	5	7	5	3	6	8	5	8	10	6	10	7	5
	2070-2100	5	6	4	6	9	5	9	6	4	10	13	8	13	16	10	16	12	8
Tinto, Odiel y Piedras	2010-2040	2	4	2	4	6	1	6	3	1	2	5	2	5	6	4	6	4	2
	2040-2070	6	7	4	7	10	6	10	7	4	8	10	8	10	13	8	13	9	8
	2070-2100	7	8	6	7	13	6	13	8	6	13	16	11	16	22	13	22	15	11
Segura	2010-2040	3	4	2	4	6	1	6	3	1	3	5	2	5	6	3	6	4	2
	2040-2070	5	7	4	7	10	5	10	6	4	7	10	7	10	13	7	13	9	7
	2070-2100	6	8	6	7	12	6	12	8	6	13	16	11	16	21	12	21	15	11
Júcar	2010-2040	2	4	2	4	6	1	6	3	1	2	5	3	6	7	3	7	4	2
	2040-2070	6	8	4	7	11	5	11	7	4	8	11	8	10	14	7	14	10	7
	2070-2100	7	9	7	8	13	6	13	8	6	14	18	12	18	23	12	23	16	12
Ebro	2010-2040	2	5	2	4	6	1	6	3	1	2	6	2	6	7	3	7	4	2
	2040-2070	6	8	4	8	11	6	11	7	4	8	11	8	11	14	7	14	10	7
	2070-2100	7	10	7	8	14	6	14	9	6	15	20	13	18	24	12	24	17	12
Cuencas Internas de Cataluña	2010-2040	1	4	1	3	4	1	4	2	1	1	4	2	4	4	2	4	3	1
	2040-2070	4	5	3	5	7	4	7	5	3	5	8	6	7	10	4	10	7	4
	2070-2100	4	7	6	5	9	4	9	6	4	10	13	9	13	15	8	15	11	8
Islas Baleares	2010-2040	2	4	2	3	5	1	5	3	1	2	5	2	5	5	2	5	4	2
	2040-2070	5	7	4	6	8	4	8	6	4	6	10	7	9	11	5	11	8	5
	2070-2100	5	9	6	7	11	5	11	7	5	11	16	10	15	18	9	18	13	9
Canarias	2010-2040	2	3	0	3	5	1	5	2	0	2	3	1	3	5	2	5	3	1
	2040-2070	3	4	2	5	8	4	8	4	2	5	6	3	6	9	4	9	5	3
	2070-2100	4	5	3	5	9	4	9	5	3	8	9	6	10	16	8	16	9	6



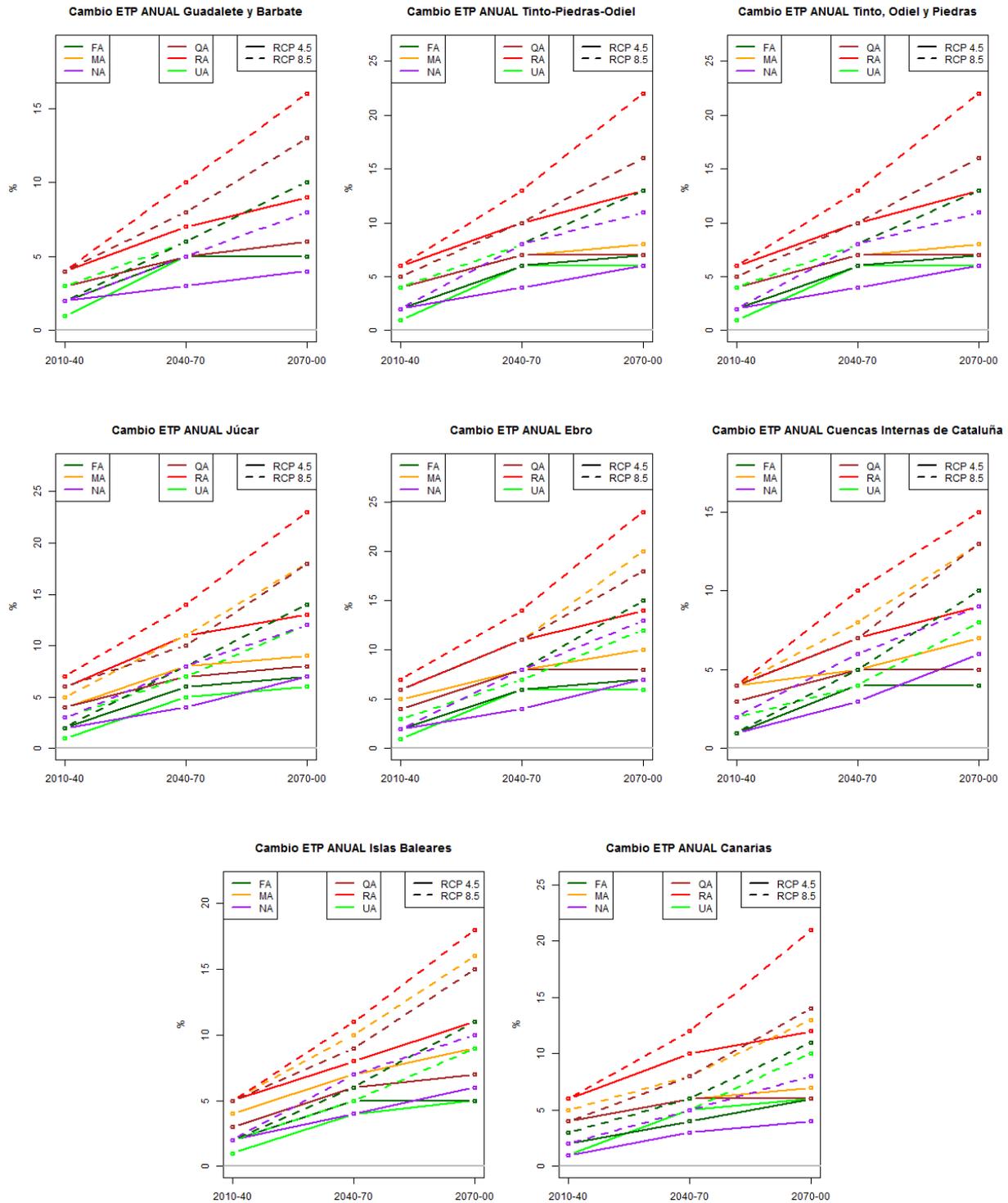


Figura 69. Δ (%) ETP de valores medios anuales en cada DH y PI.



### 6.4.2.3 Cambios en el ciclo anual

Para el período 2010-2040 las medias de los cambios del ciclo anual en cada RCP se muestran bastante planas a lo largo del año, sin que haya un marcado cambio en la estacionalidad. Se aprecia un menor incremento en los meses de primavera, más patente en el RCP 4.5, y un mayor incremento en los meses de invierno y, sobre todo, en los meses de verano. Los valores mínimo y máximo oscilan entre un ligero descenso (-2%) en los meses de invierno-primavera del RCP 4.5 y un aumento (10%) en los meses de verano del RCP 8.5.

A medida que aumenta el PI se nota la clara dispersión de resultados como ya se vio en el análisis de las temperaturas; sigue sin mostrarse demasiado patente la estacionalidad, se aprecia un mínimo en febrero en el PI2 y desde febrero a abril en el PI3 y un máximo en junio en los dos escenarios y en los dos últimos PI, pero poco marcados. La incertidumbre en el período 2070-2100 es muy alta, oscilando por ejemplo el rango de cambio entre el 1% y el 25% para el mes de mayo.

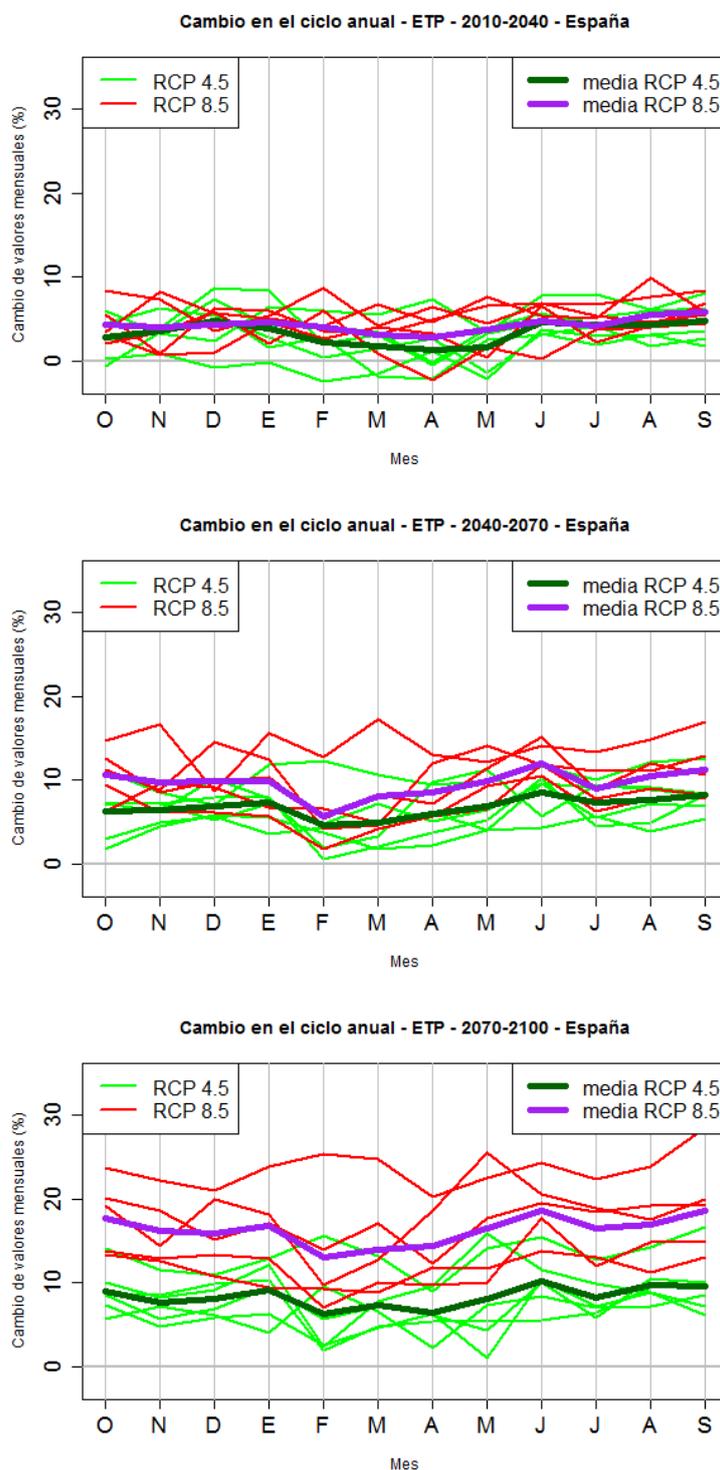


Figura 70. Cambios (%) en el ciclo anual de ETP para cada PI respecto al PC para el conjunto de España según las distintas proyecciones y sus valores medios para cada RCP.

La Tabla 12 muestra que no hay cambios reseñables en la estacionalidad de la ETP puesto que los cambios estimados son similares en las 4 estaciones. Tan sólo destacan dos casos: para el PI2 y el RCP 4.5 hay un aumento medio de la ETP del 5%



en invierno frente a un 8% en verano; y para el PI3 y el RCP 8.5 hay un aumento medio de la ETP del 14% en invierno frente a un 10% en el resto de estaciones. Por otro lado, se ve que los aumentos según el RCP 4.5 son menores que según el RCP 8.5, llegando incluso a haber un ligero descenso en invierno según la U4A. El escenario 8.5 da importantes valores de aumentos en todas las proyecciones y estaciones.

Tabla 12. Δ (%) ETP estacional en España para cada PI y proyección. Se indican los valores máximo (Mx), mínimo (Mn) y el promedio (Med) para cada RCP. Los colores reflejan la gradación del cambio.

ETP ESPAÑA Δ (%)		RCP 4.5									RCP 8.5								
		F4A	M4A	N4A	Q4A	R4A	U4A	Mx	Med	Mn	F8A	M8A	N8A	Q8A	R8A	U8A	Mx	Med	Mn
OND	2010-2040	5	5	2	4	4	0	5	3	0	3	4	3	5	7	2	7	4	2
	2040-2070	7	8	3	7	10	4	10	6	3	10	11	8	11	14	8	14	10	8
	2070-2100	9	9	6	7	13	6	13	8	6	16	18	13	19	23	13	23	17	13
EFM	2010-2040	1	4	0	4	6	-2	6	2	-2	1	4	3	6	6	4	6	4	1
	2040-2070	3	4	3	6	11	4	11	5	3	7	6	6	8	15	4	15	8	4
	2070-2100	5	7	7	7	14	4	14	7	4	13	13	9	16	25	10	25	14	9
AMJ	2010-2040	2	3	2	4	6	1	6	3	1	2	6	0	6	6	4	6	4	0
	2040-2070	7	8	4	7	10	7	10	7	4	8	13	9	12	13	8	13	10	8
	2070-2100	5	12	6	7	13	6	13	8	5	14	22	13	17	23	13	23	17	13
JAS	2010-2040	3	6	3	5	7	3	7	4	3	3	5	4	7	8	4	8	5	3
	2040-2070	6	9	5	9	11	6	11	8	5	8	12	7	10	15	8	15	10	7
	2070-2100	8	9	7	9	14	7	14	9	7	15	19	12	19	24	14	24	17	12

Desde la Figura 71 a la Figura 76 se muestran los resultados de variación de ETP en todo el territorio, agrupados por estaciones. En los mapas tampoco se aprecia un claro patrón de cambio en la ETP según la estación climática. La única salvedad parece ser una menor subida de la ETP en invierno que en el resto de las estaciones según las proyecciones FA, MA y UA.

Ambos RCP muestran que el ligero aumento durante PI1 afecta de manera bastante homogénea a todo el territorio, siendo en general menor en invierno y mayor en verano, pero con diferencias según proyecciones. En PI2 y PI3 se hace más patente la influencia orográfica de cada DH. Hay una influencia estacional, con menores subidas en invierno en las proyecciones FA y MA, donde el aumento de ETP es poco destacable en ambos escenarios. Nuevamente la proyección RA es la que da mayores aumentos pero sin un marcado cambio de estacionalidad.

La mayoría de las proyecciones estiman una reducción más acusada de la PRE hacia el oeste y centro peninsular y Canarias, mientras que se estiman menores reducciones e incluso incrementos hacia el este peninsular. No obstante, en invierno se da el mayor aumento de la PRE (o menores descensos) junto con el menor incremento de la ETP. Es en esos meses cuando se dan las PRE de origen atlántico y, por tanto, sería previsible una atenuación en la reducción de RRHH, sobre todo hacia el oeste de España.

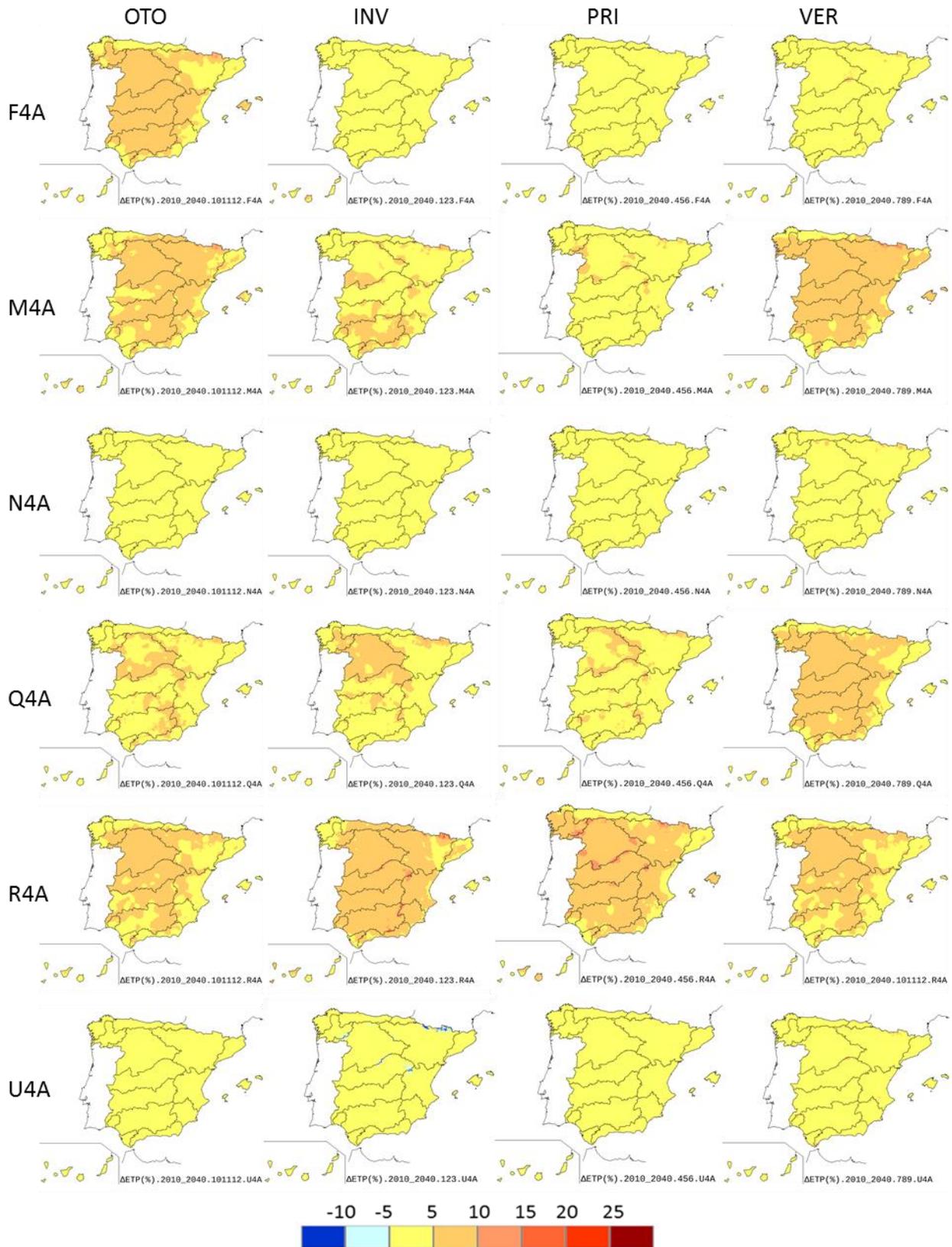


Figura 71.  $\Delta$  (%) ETP estacional para 2010-2040 RCP 4.5

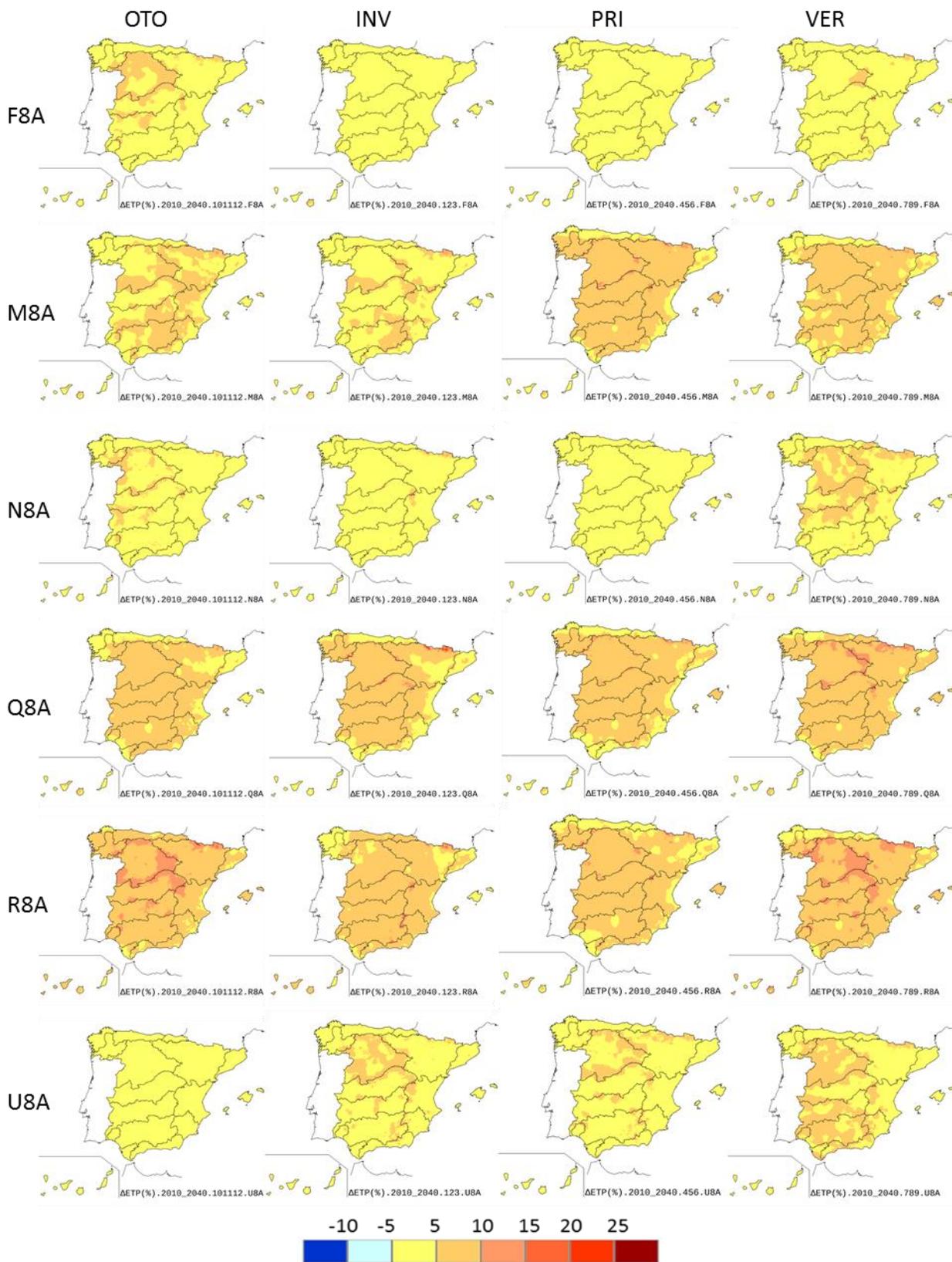


Figura 72.  $\Delta$  (%) ETP estacional para 2010-2040 RCP 8.5

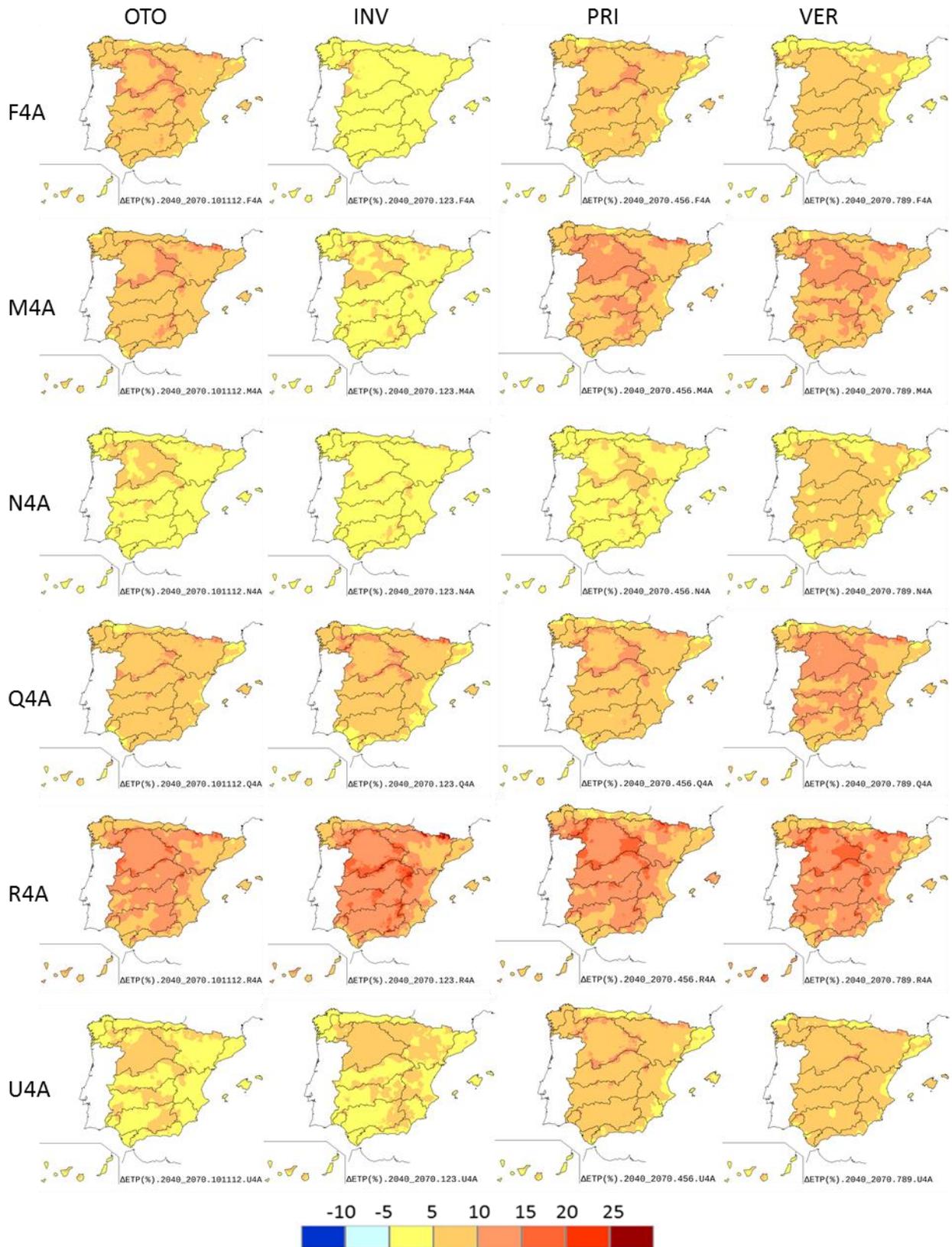


Figura 73.  $\Delta$  (%) ETP estacional para 2040-2070 RCP 4.5

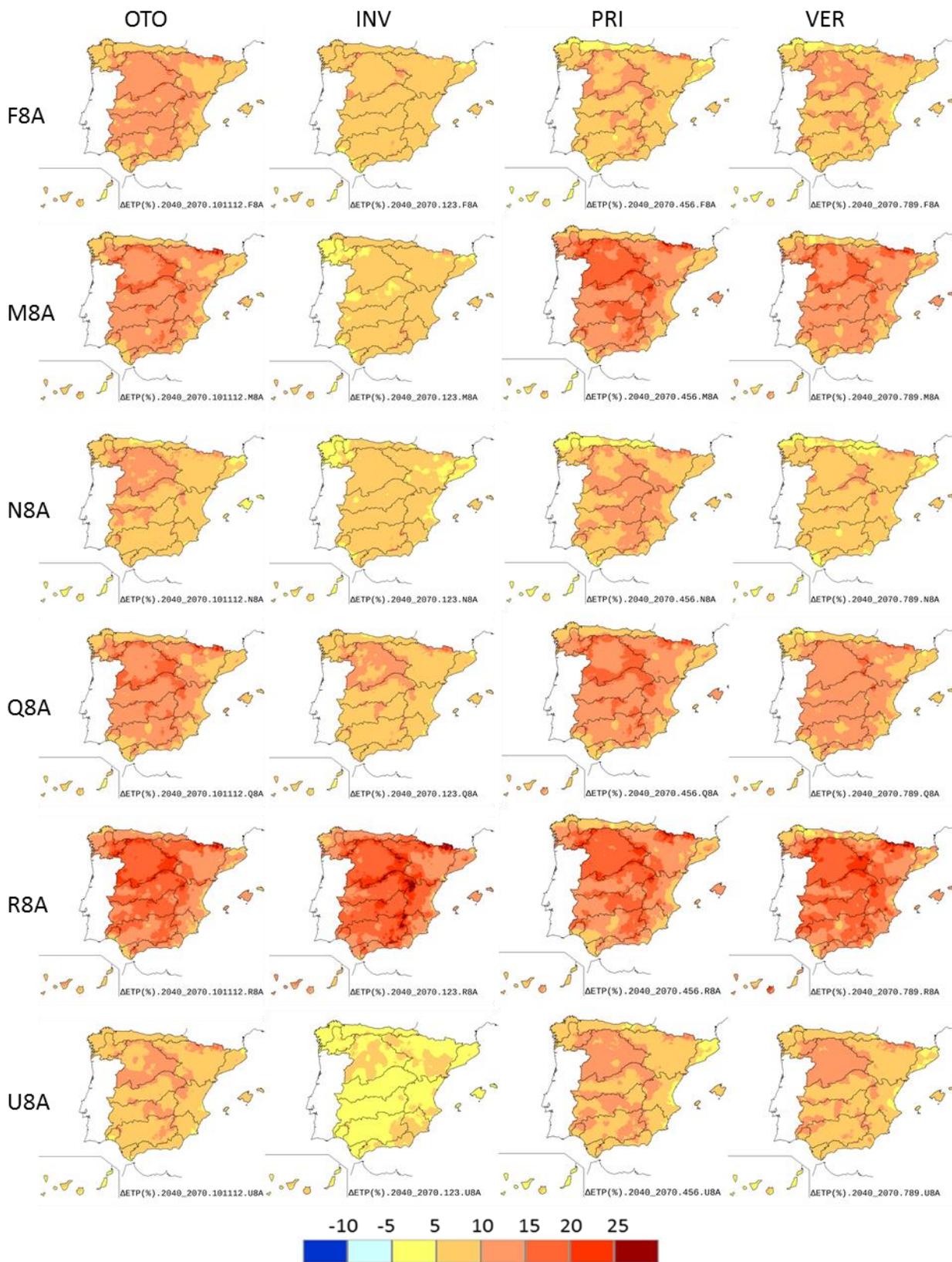


Figura 74.  $\Delta$  (%) ETP estacional para 2040-2070 RCP 8.5

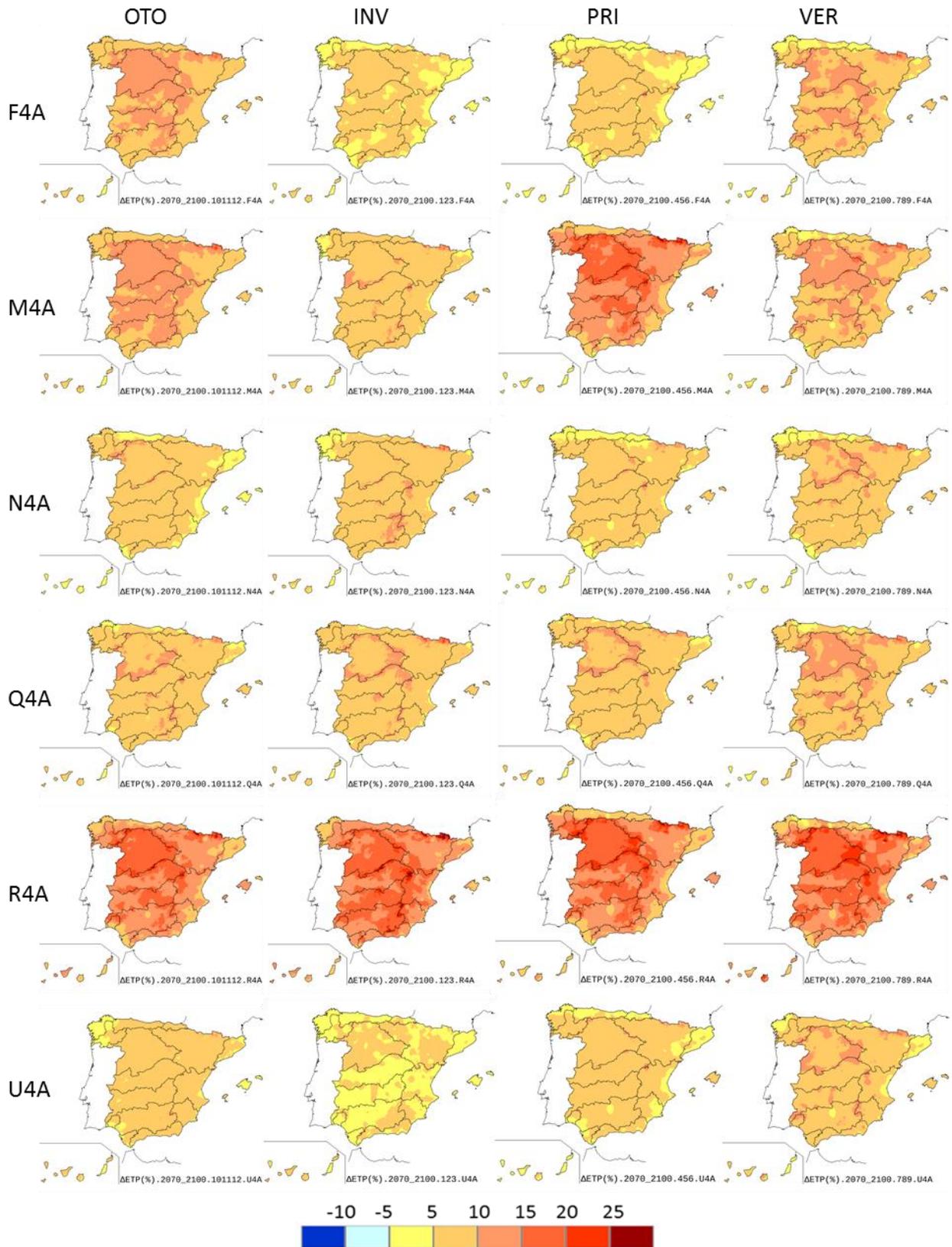


Figura 75.  $\Delta$  (%) ETP estacional para 2070-2100 RCP 4.5

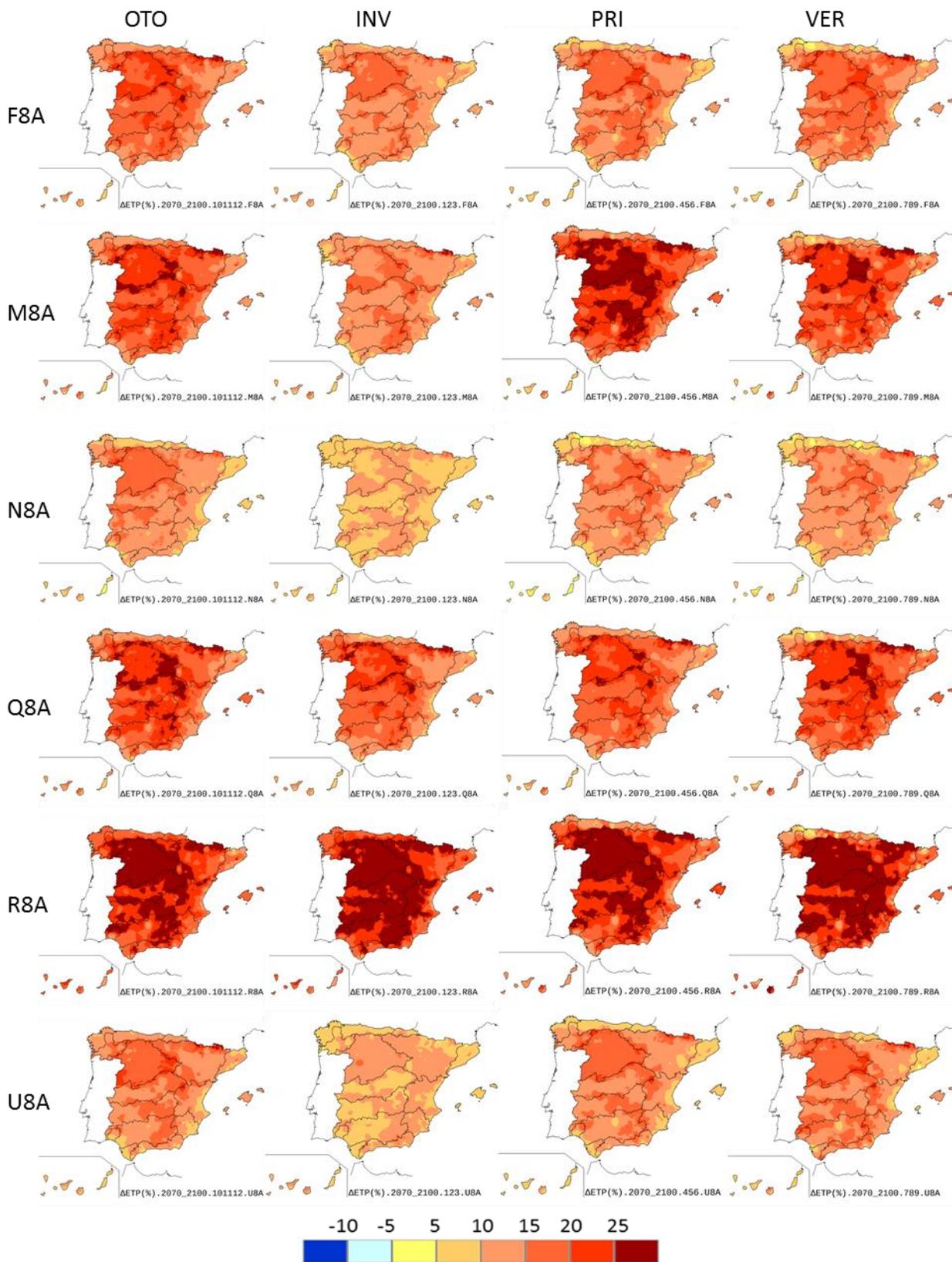


Figura 76.  $\Delta$  (%) ETP estacional para 2070-2100 RCP 8.5

## 7 SIMULACIÓN HIDROLÓGICA E IMPACTOS SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS

### 7.1 METODOLOGÍA

#### 7.1.1 Modelo hidrológico de SIMPA. Descripción

Los RRHH se han calculado mediante el modelo hidrológico integrado en SIMPA, desarrollado en el CEH (Estrela y Quintas 1996, Álvarez-Rodríguez et al. 2005). Se ha utilizado en la evaluación de recursos en España para el LBAE (Cabezas et al. 1999, Estrela et al. 1999, MIMAM 2000a) y el Plan Hidrológico Nacional (MIMAM 2000b), en la evaluación del impacto del cambio climático sobre los RRHH en España (CEDEX 2010), en la cuenca del Guadiana (Ruiz García 1999) y en la estimación de los RRHH en Honduras (Balairón et al. 2003), entre otros.

La simulación hidrológica con SIMPA se ha llevado a cabo en régimen natural, sin considerar las alteraciones antrópicas tales como tomas de agua de un río, extracciones de acuíferos, regulación en embalses, trasvases, etc.

Es un modelo hidrológico conceptual, de simulación continua de cuenca, cuasi distribuido, diseñado para evaluar los RRHH y basado conceptualmente en el modelo agregado de Témex (Témex 1977).

El modelo funciona realizando balances hídricos con paso mensual en cada celda en la que se divide el territorio (Figura 77).

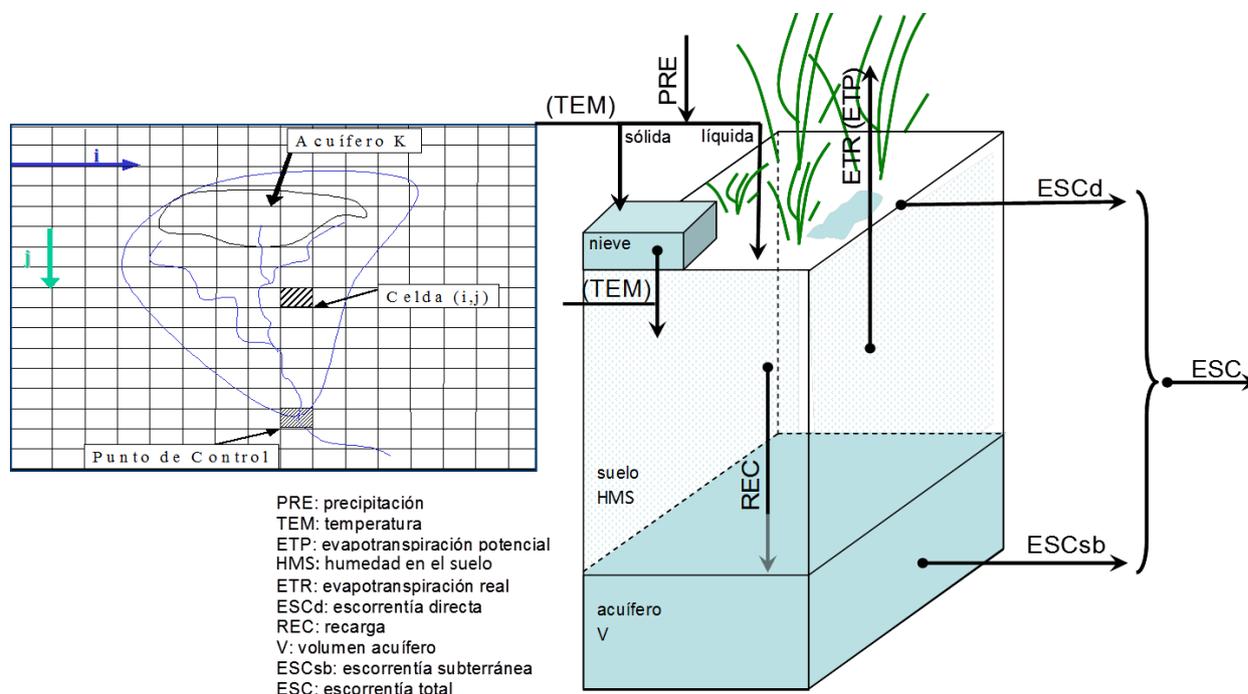


Figura 77. Esquema conceptual del módulo de evaluación de RRHH de SIMPA.

Para utilizar el modelo hidrológico en este trabajo, el territorio de España se ha reticulado en celdas de 1 km x 1 km, con lo que se han realizado balances hídricos en cada una de las aproximadamente 500000 celdas resultantes.

El balance hídrico se lleva a cabo mediante unas ecuaciones que de modo progresivo modelizan los procesos que tienen lugar en una cuenca desde que se produce la PRE hasta que se obtiene la ESC en el punto de desagüe de la cuenca (Figura 78).

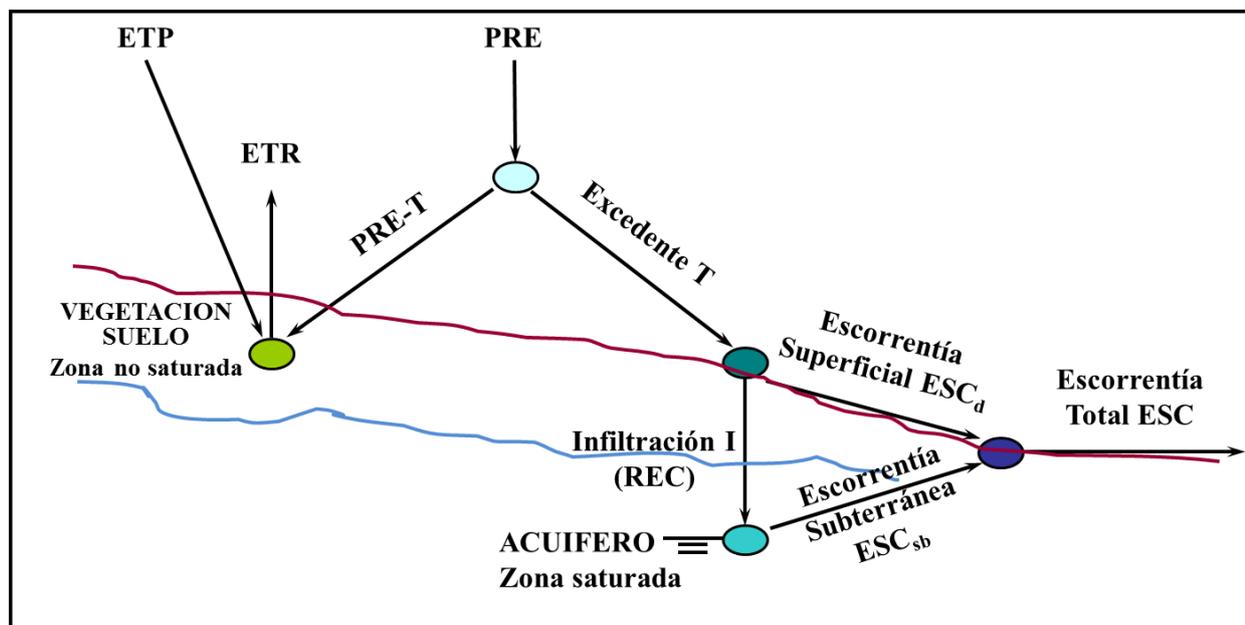


Figura 78. Esquema conceptual del balance hídrico del modelo hidrológico.

Los datos de entrada al modelo son las PRE y ETP de los meses para los que se va a realizar la simulación.

1) El primer paso es el cálculo del excedente (T), denominado así al agua de PRE que no se evaporará. De esa manera, lo primero que se calcula es el agua que se evaporará. El excedente se calcula mediante la fórmula experimental de la Ecuación 4 y cuya solución gráfica se muestra en la Figura 79:

Ecuación 4

$$T_i = \frac{(PRE_i - P_{oi})^2}{PRE_i + \delta_i - 2 \cdot P_{oi}} \quad T_i = 0 \text{ (para } PRE_i \leq P_{oi})$$

Siendo,

- $PRE_i$  la PRE en el mes  $i$  (mm) en el que se realiza el balance
- $P_{oi}$  es el umbral de PRE en el mes  $i$  (mm) a partir del cual se empieza a generar excedente (Ecuación 5):

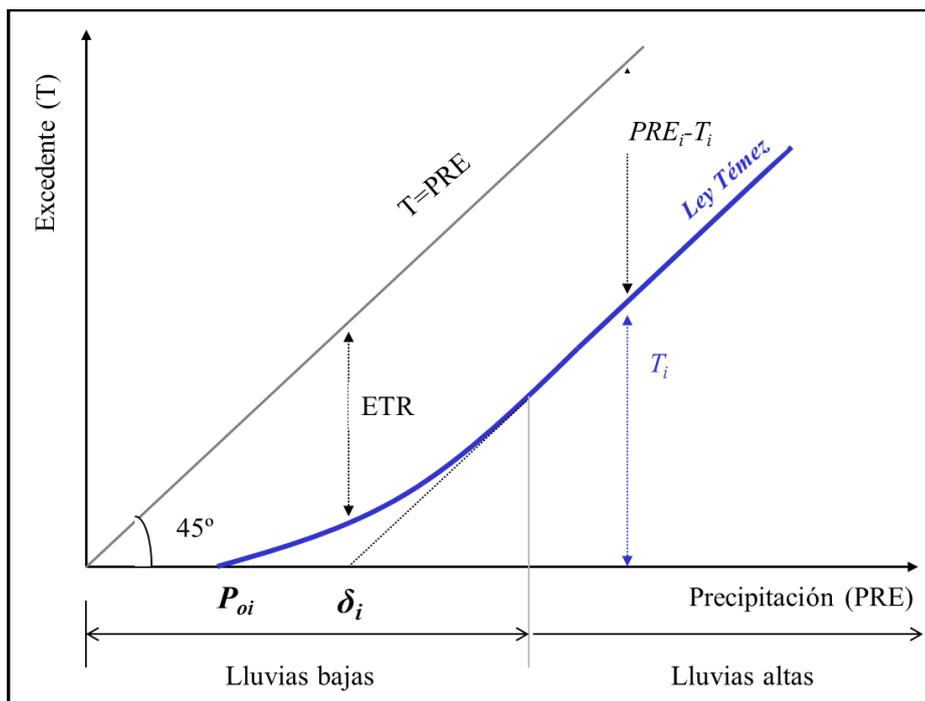


Figura 79. Cálculo del excedente según el modelo hidrológico (modificado de Témez, 1977).

Ecuación 5

$$P_{oi} = C \cdot (H_{m\acute{a}x} - H_{i-1})$$

Donde,

$C$  es el coeficiente de excedente

$H_{m\acute{a}x}$  es la humedad máxima del suelo (mm)

$H_{i-1}$  es la humedad del suelo en el mes anterior (mm)

- $\delta_i$  la máxima detracción de agua de la PRE en el mes  $i$  que podría darse (Ecuación 6):

Ecuación 6

$$\delta_i = H_{\max} - H_{i-1} + ETP_i$$

Donde,

$ETP_i$  es la ETP en el mes  $i$  de cálculo.

Se añade un elemento más respecto al modelo de Témez que se refiere al almacenamiento de nieve. El modelo simplificado almacena la lluvia en forma de nieve cuando la temperatura media mensual desciende por debajo de un umbral ( $0^{\circ}$  C) y se

**CEDEX**

fusiona cuando lo supera, siguiendo una ley de recesión equivalente a un tiempo de semivaciado de 90 días, modificándose así el valor de la PRE del mes.

De ese modo, para calcular el excedente en un mes se necesitan los siguientes valores: la PRE de ese mes, la ETP de ese mes,  $H_{max}$ ,  $H_{i-1}$  (o contenido de humedad del suelo a finales del mes anterior) y el parámetro  $C$ .

El parámetro  $C$  está relacionado con la facilidad de llenado del suelo y depende de la pendiente y del uso y la textura del suelo. Toma valores próximos a 0.35, si bien su valor final se obtiene por calibración.

La  $H_{max}$  sería el agua que como máximo puede contener un suelo y cuyo destino final será la evaporación, directa o a través de las plantas, parte en el mes de cálculo y el resto de manera diferida en los siguientes meses. Define la máxima humedad evapotranspirable en la zona no saturada. Depende de la textura, porosidad, pendiente y uso de suelo. La textura del suelo es un concepto muy utilizado en agronomía para caracterizar las posibilidades del suelo para poderse cultivar.

La  $H_{max}$  se podría definir como la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez multiplicado por el espesor del suelo (no contempla el agua gravífica y sí el agua capilar). Sus valores normales están entre 50 y 400 mm.

A partir de lo anterior, se obtiene la ETR. Para ello, se calcula previamente el contenido de humedad del suelo al final de ese mes que, como se ha visto antes, será la humedad antecedente del suelo en el balance que se realice el mes siguiente.

En cada mes  $i$  se puede evapotranspirar toda el agua disponible en el suelo con el límite superior de la  $ETP_i$ :

Agua disponible:  $H_{i-1} + P_i - T_i$

Balance para estimar la evapotranspiración real:

Ecuación 7

$$ETR_i = \text{mín}(H_{i-1} + P_i - T_i, ETP_i)$$

Balance de agua en el suelo a final de mes,  $H_i$

Ecuación 8

$$H_i = \text{Máx}(0, H_{i-1} + P_i - T_i - ETP_i)$$

2) El paso siguiente es calcular qué parte del excedente se infiltrará (Figura 80). El excedente que no se infiltra constituirá la escorrentía superficial. La infiltración dependerá del excedente y de la infiltración máxima ( $I_{max}$ ). El modelo simplifica la realidad considerando que la infiltración es igual a la recarga a los acuíferos (REC) y que el tiempo de paso por la zona no saturada no se considera al ser menor que el paso de simulación (mes). Se supone pues que en el plazo de un mes el agua

excedente de la PRE llegaría a los acuíferos independientemente de las características hidrogeológicas del subsuelo.

Ecuación 9

$$I_i = I_{m\acute{a}x} \cdot \frac{T_i}{I_{m\acute{a}x} + T_i}$$

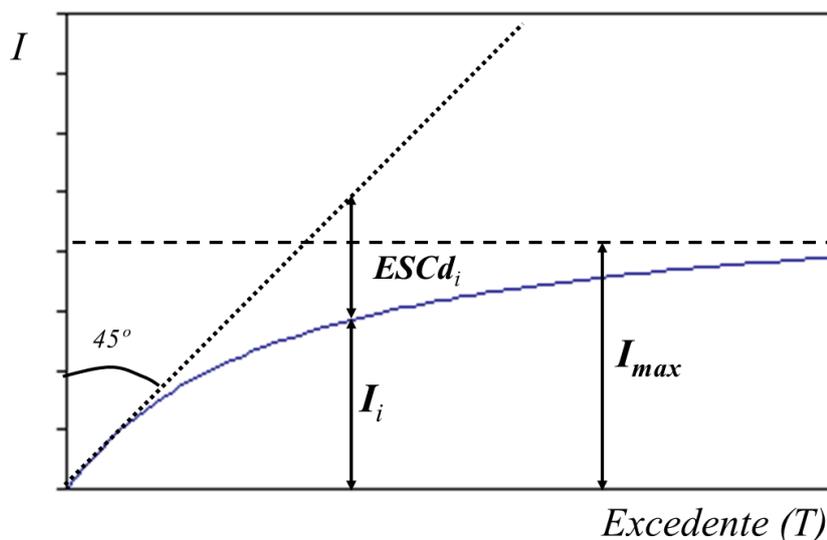


Figura 80. Cálculo de la infiltración según el modelo hidrológico (modificado de Témez, 1977).

El parámetro  $I_{m\acute{a}x}$  es función de las características del subsuelo (geología, edafología), del relieve y de la concentración temporal de las precipitaciones. Suele oscilar entre 40 mm (baja permeabilidad) a 1000 mm (alta permeabilidad), si bien, al igual que con los parámetros  $C$  y  $H_{m\acute{a}x}$ , su valor definitivo se obtiene por calibración.

3) El modelo asignará seguidamente como escorrentía superficial ( $ESC_d$ ) el agua excedente de cada mes que no se ha infiltrado.

4) A continuación, se simula la escorrentía subterránea. El agua de REC se almacena en el acuífero, de donde saldrá de manera diferida en el mes de cálculo y en los meses siguientes, en una proporción que dependerá del coeficiente de agotamiento del acuífero ( $\alpha$ ). La aportación subterránea en el mes de cálculo ( $ESC_{sb}$ ) dependerá de ese coeficiente, de la infiltración ( $I_i$ ) y del caudal base antecedente ( $Q_{i-1}$ ), tal como se indica en la Ecuación 10:

Ecuación 10

$$ESC_{sb} = \left( \frac{Q_{i-1}}{\alpha} \right) (1 - e^{-\alpha}) + \frac{I_i}{\alpha} (1 - e^{-\alpha})$$

La fase subterránea se simula en las denominadas unidades acuíferas mediante un modelo agregado de tanque, de manera que se calcula la descarga en toda la

extensión del acuífero y luego se divide ese valor entre todas las celdas donde se proyecta superficialmente. De ese modo, se le asigna a cada celda un valor de aportación subterránea. Este es el único proceso que se realiza de manera agregada, por lo que el modelo es considerado como un modelo hidrológico conceptual y cuasidistribuido.

5) Seguidamente, la escorrentía total ( $ESC$ ) se obtiene como suma de la escorrentía superficial ( $ESC_d$ ) y la subterránea ( $ESC_{sb}$ ):

Ecuación 11

$$ESC = ESC_d + ESC_{sb}$$

Hasta ahora se ha mostrado cómo el modelo hidrológico permite obtener en cada mes los valores de humedad del suelo, ETR, infiltración o REC, escorrentía superficial, subterránea y total generados en cada celda en las que se ha discretizado el territorio. Todos estos valores vienen expresados en mm.

6) Por último, el modelo hidrológico estima los caudales circulantes por cada celda del territorio integrando los datos de aquellas celdas que le vierten agua. Para ello, se utiliza un mapa de direcciones de flujo generado a partir del modelo digital del terreno. El método D8 es el más habitual para obtener las direcciones de flujo (Figura 81). Según este método, cada celda envía toda el agua a aquella de sus 8 vecinas con la que hay más pendiente, obteniéndose los caudales ( $m^3/s$ ) o las aportaciones hídricas (APN) ( $hm^3/mes$ ) que pasan por cada celda.

20	19	17
18	40	24
22	16	16

Figura 81. Modelo D8 de propagación de flujo a partir de un modelo digital del terreno.

Para este último paso, se ha aumentado el detalle hasta una resolución mayor de celda, de 500 x 500 m. De ese modo, se ha calculado la APN en unas 2500000 celdas en las que se ha reticulado el territorio español.

La resolución temporal que utiliza es el mes, por lo que puede obviarse la simulación de un gran número de almacenamientos intermedios y la propagación del flujo en la cuenca.

El modelo hidrológico utiliza el SIG GRASS 6.4 en modo comando y está integrado dentro del sistema SIMPA que dispone de otros módulos y utilidades hidrológicas (Figura 82).

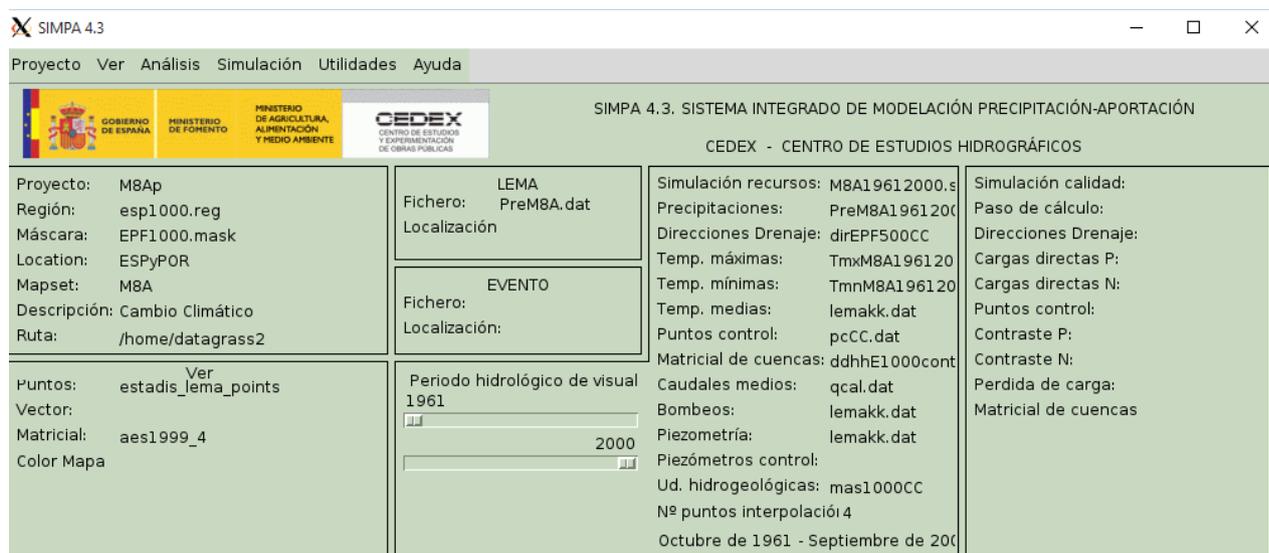


Figura 82. Pantalla del menú principal de SIMPA.

SIMPA se desarrolla sobre el sistema operativo LINUX Fedora Core 7 mediante shell scripts de comandos. Utiliza los compiladores FORTRAN para Linux v.8 y Gnu C. Todo el software utilizado para el modelo hidrológico es gratuito y de libre difusión. SIMPA contiene un shell script principal fuente en tcl/tk `simpa.tcl` (2500 líneas), 250 scripts auxiliares, 140 programas en Fortran, 5 programas en C y 150 ficheros de texto de configuración.

### 7.1.2 Modelo hidrológico de SIMPA. Parametrización

Como se ha comentado en el apartado anterior, los procesos del ciclo hidrológico simulados dependen de una serie de parámetros que se ajustan en función de las características fisiográficas del medio y del grado de ajuste entre los caudales observados y los simulados. Los cuatro parámetros del modelo de SIMPA tienen variabilidad espacial por lo que están representados por los cuatro mapas correspondientes. Los parámetros *coeficiente de excedente (C)* y *capacidad de almacenamiento en el suelo ( $H_{max}$ )* están relacionados con las características superficiales y del suelo, mientras que los parámetros *capacidad de infiltración ( $I_{max}$ )* y *coeficiente de agotamiento de los acuíferos ( $\alpha$ )* están relacionados con los parámetros hidrogeológicos.

Los mapas de parámetros utilizados en este estudio se muestran de la Figura 83 a la Figura 86. Estos mapas de parámetros son los que se obtuvieron en el proceso de actualización de la evaluación de RRHH en España hasta el año 2006 (CEDEX 2013) y en el anterior estudio sobre el impacto del cambio climático en los RRHH (CEDEX 2010). La asignación inicial de valores a los parámetros se basó en mapas e información topográfica, geológica, de vegetación, etc. Posteriormente, esos valores se acabaron de fijar en el proceso de calibración y, finalmente, en el de validación. También se parametrizó en las zonas limítrofes de Francia y en Portugal con objeto de simular en las zonas que vierten agua a España (no mostradas en la Figura 83 a la Figura 86).



El mapa con los valores de  $H_{max}$  se obtuvo inicialmente a partir de tres tipos de información que condicionan la humedad del suelo: granulometría de las formaciones superficiales (mapa de texturas), pendientes y usos del suelo. Los valores de texturas se obtuvieron del análisis de la información geológica de la base de datos "Propiedades Edafológicas de los Suelos Españoles" (CIEMAT 2000), de la información litológica del mapa hidrogeológico a escala 1:1000000 (IGME 2000) y de mapas geológicos de la serie MAGNA del IGME. Las pendientes se obtuvieron aplicando el comando correspondiente del SIG GRASS al modelo digital del terreno. El mapa de usos del suelos se elaboró a partir de una reclasificación de los usos del suelo del CORINE LAND COVER en su actualización al año 2000 (IGN 2000).

El valor de  $C$  se adoptó en función de la pendiente del terreno, las características litológicas y el índice de aridez. El parámetro  $C$  tiene valores entre 0.1 y 0.5, siendo 0.35 el valor habitual.

Los otros dos parámetros restantes,  $I_{max}$  y  $\alpha$ , se han calculado sólo en aquellas celdas donde hay identificadas unidades hidrogeológicas. Las 653 unidades hidrogeológicas consideradas en este trabajo se corresponden con la última delimitación de las masas de agua subterránea en España, definidas con carácter oficial en abril del 2006 con motivo del cumplimiento de la Directiva Marco del Agua. Los valores de los parámetros  $I_{max}$  y  $\alpha$  se recalcularon en este proceso de actualización para adaptarse a la nueva delimitación de las unidades hidrogeológicas.

Los valores distribuidos del parámetro  $I_{max}$  se obtuvieron inicialmente del análisis de la permeabilidad de las unidades reflejadas en el mapa hidrogeológico a escala 1:1000000 (IGME 2000).

Los valores de  $\alpha$  se obtuvieron mediante una adaptación de los obtenidos para la realización del LBAE a las nuevas unidades hidrogeológicas. El valor de  $\alpha$  en cada unidad se realizó a partir de balances y de estudios hidrogeológicos y de las curvas de agotamiento de hidrogramas para cada unidad hidrogeológica considerada.

Se ha supuesto que los parámetros son estacionarios y no cambian en el tiempo que dura la simulación, que abarca hasta finales del siglo XXI. Se ha adoptado esa suposición aun sabiendo que las características físicas del territorio que determinan los parámetros sufren permanentes cambios. No obstante, se han considerado estacionarios puesto que el objetivo de este trabajo es la evaluación del impacto del cambio climático sobre los RRHH y no de otros posibles cambios, como por ejemplo los de usos del suelo.

Al modelo hidrológico hay que suministrarle además los dos mapas con los valores del estado inicial del almacenamiento del agua en el suelo y en el acuífero en el mes de inicio de cada periodo de simulación. Estos mapas se han obtenido tomando los valores resultantes para el mes de inicio en una simulación previa.

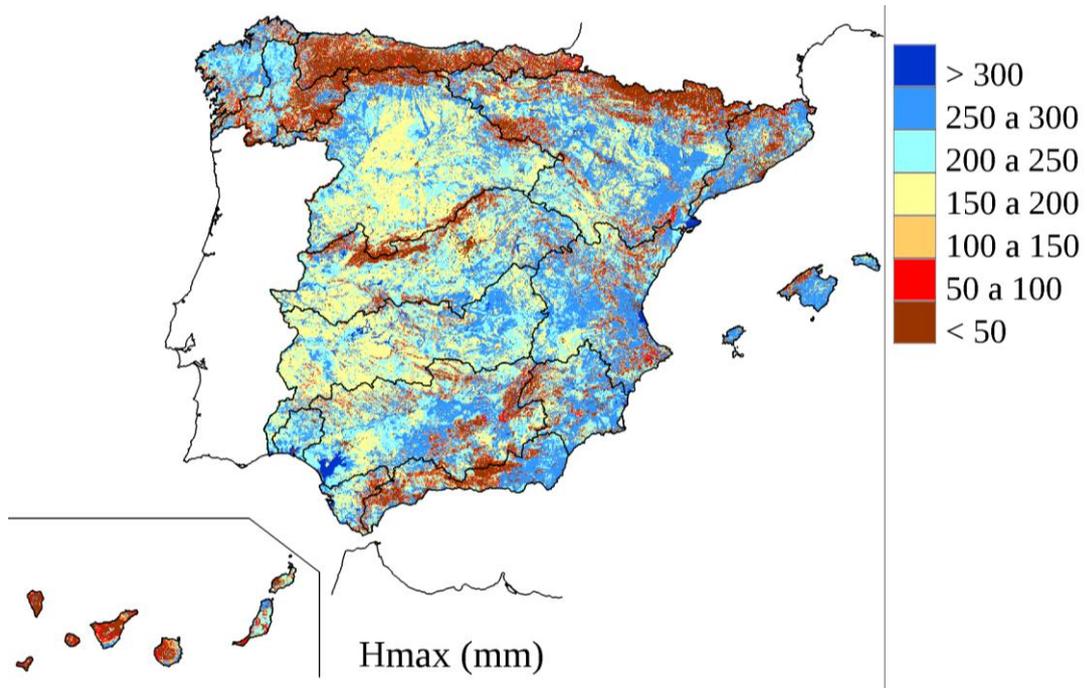


Figura 83. Mapa de  $H_{max}$  (mm) utilizado en las simulaciones hidrológicas.

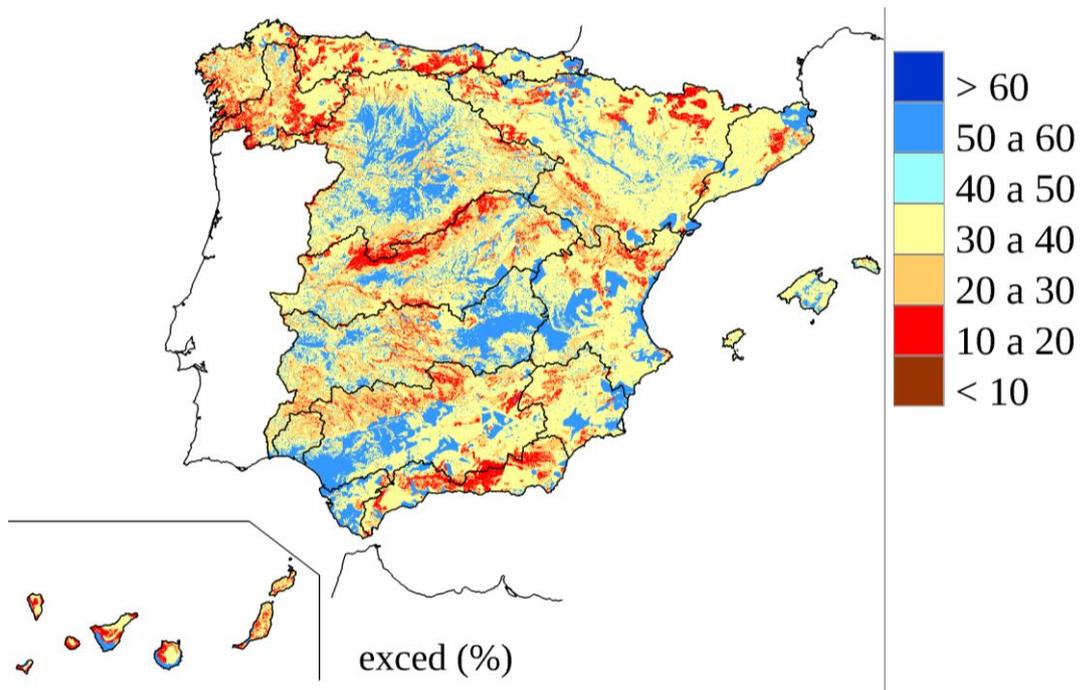


Figura 84. Mapa del parámetro C (%) utilizado en las simulaciones hidrológicas.

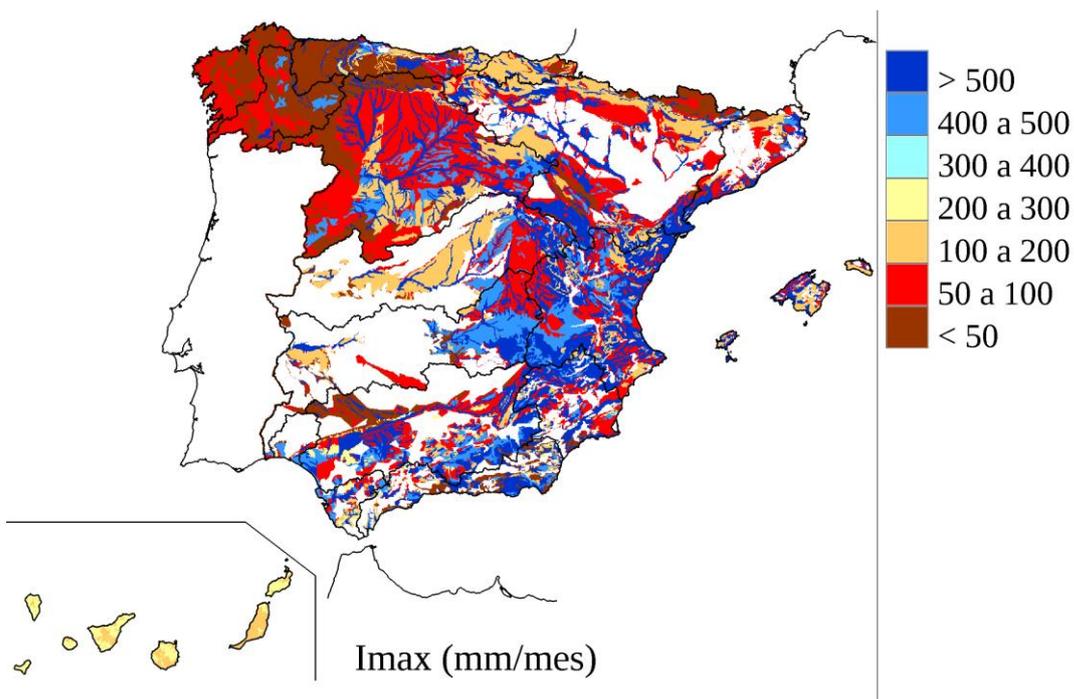


Figura 85. Mapa del parámetro  $I_{max}$  (mm/mes) utilizado en las simulaciones hidrológicas.

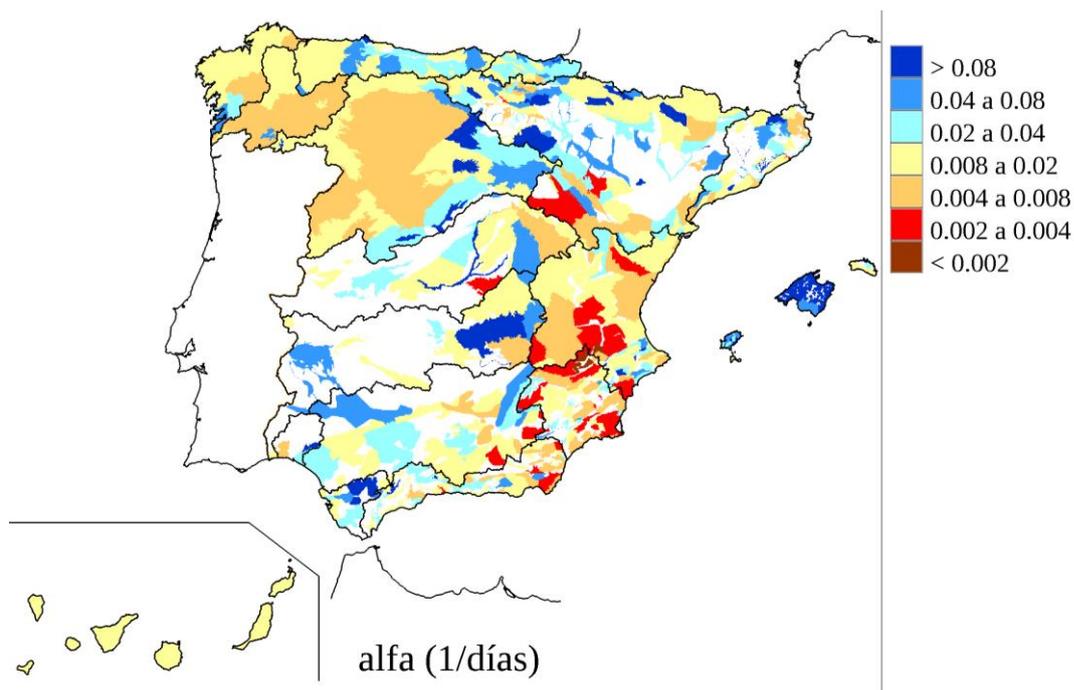


Figura 86. Mapa del coeficiente  $\alpha$  (días<sup>-1</sup>) asignado a cada unidad acuífera utilizado en las simulaciones hidrológicas.

## 7.2 EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL

### 7.2.1 Cambios anuales para el conjunto de España

Los cambios en la ETR anual estimada para el conjunto de España durante el periodo 2010-2100 revelan una tendencia decreciente significativa según el conjunto de todas las proyecciones para ambos escenarios de emisiones RCP (Figura 87). El rango de dispersión de resultados de cada proyección se muestra en la banda sombreada de gris e indica una incertidumbre que con frecuencia se acerca o supera el 10% tanto en positivo como en negativo. La tendencia decreciente significativa de los cambios de ETR se da en las proyecciones M4A y R4A (RCP 4.5) y en F8A, M8A, R8A y Q8A (RCP 8.5) (anexo 1). Como se aprecia en la Figura 87, la pendiente del promedio de los cambios es tan sólo ligeramente mayor en el RCP 8.5 (-0.06%) que en el RCP 4.5 (-0.04%).

Una pendiente del -0.04%, quiere decir que cada año disminuye la ETR un 0.04% respecto a la ETR del periodo de control. Si suponemos que la ETR del PC de la media de las proyecciones es similar a la ETR observada en 1940-2005, que es de 451 mm/año (CEDEX 2013), se tendría una disminución de 0.18 mm/año promediando entre 2010 y 2099, unos 16 mm en el total de ese periodo, hasta unos 417 mm/año aproximadamente. Esta reducción estaría básicamente condicionada por la reducción de PRE.

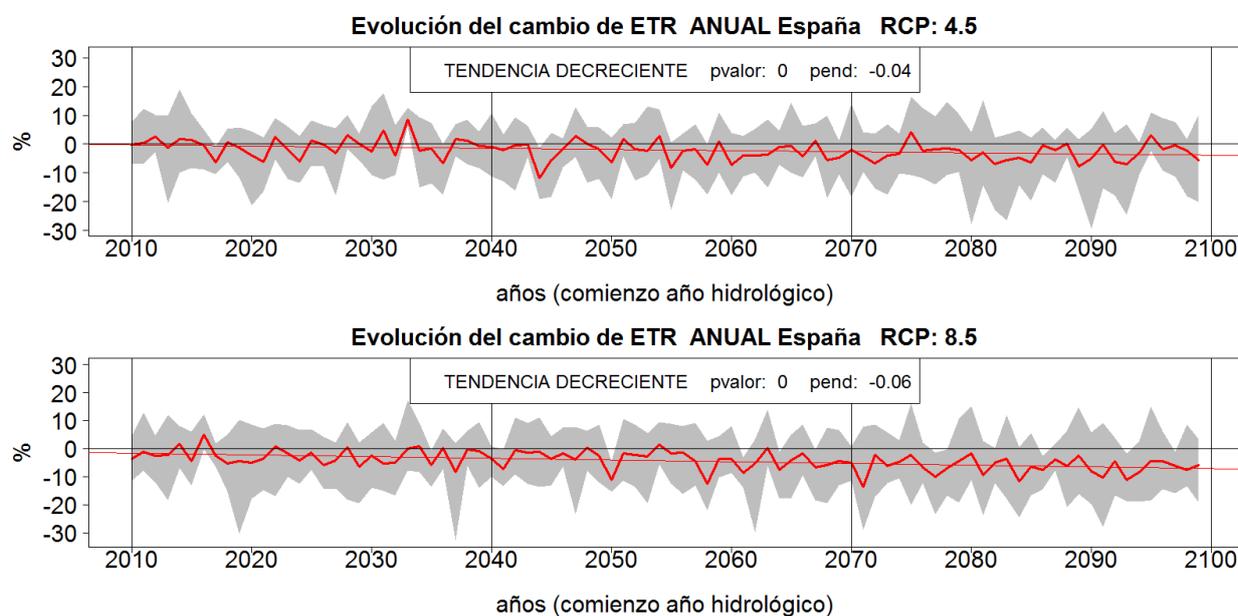


Figura 87. Tendencia del  $\Delta$  (%) ETR del año 2010 al 2099 para los RCP 4.5 (arriba) y 8.5 (abajo) para el conjunto de España. La banda gris indica el rango de resultados de las proyecciones. La línea gruesa indica su promedio y la recta delgada su pendiente. Se indica su p-valor según el test de Mann Kendall; negra: sin tendencia, roja: decreciente, azul: creciente

Los cambios de ETR para cada uno de los tres PI muestran en primer lugar las diferencias en los resultados de cada proyección (Tabla 13 y Figura 88 izquierda). Así por ejemplo, para el periodo 2010-2040 y el RCP 4.5, el rango de cambios va desde un aumento del 4% en el U4A a un valor de -3% en R4A. Los mayores descensos los da la



proyección R4A en RCP 4.5 y M8A en RCP 8.5, llegando a un máximo de -11% para el PI3. Las demás proyecciones están en una banda de rangos con valores de 0 a -5% en RCP 4.5 y algo mayores en RCP 8.5 (0 a -9%). El único aumento los da U4A en el PI1. Promediando los resultados de las proyecciones, se estiman siempre disminuciones de ETR, superiores en RCP 8.5 que en RCP 4.5. Los rasgos de variación de la ETR son contrarios a los de la ETP, por lo que la variación de ETR está más condicionada por el descenso de la PRE que por el ascenso de la ETP. La diferencia entre ambos RCP sólo es destacable en el último PI del siglo XXI; así, la media de los cambios para los RCP 4.5 y 8.5 son respectivamente del -1% y -3% para 2010-2040, -3% y -4% para 2040-2070 y -3% y -6% para 2070-2100.

Tabla 13.  $\Delta$  (%) ETR en cada PI según cada proyección para el conjunto de España. Se indican los valores máximo (Mx), mínimo (Mn) y el promedio (Med) para cada RCP. Los colores reflejan la gradación del cambio.

ETR ESPAÑA $\Delta$ Anual (%)	RCP 4.5									RCP 8.5								
	F4A	M4A	N4A	Q4A	R4A	U4A	Mx	Med	Mn	F8A	M8A	N8A	Q8A	R8A	U8A	Mx	Med	Mn
2010-2040	0	0	-3	-1	-3	4	4	-1	-3	0	-3	-3	-3	-3	-3	0	-3	-3
2040-2070	-3	-2	-2	-2	-5	-2	-2	-3	-5	-1	-6	-7	-4	-6	0	0	-4	-7
2070-2100	-1	-5	-5	-2	-5	0	0	-3	-5	-4	-11	-5	-8	-9	-2	-2	-6	-11

Los cambios de la variabilidad de ETR anual para España en cada PI se muestran de manera gráfica en la Figura 88 derecha. La DT muestra comportamientos muy dispares entre proyecciones. Casi todas incrementan la variabilidad en los PI, siendo RA las que muestran un descenso más evidente, sobre todo en los dos primeros PI. Algunas (RA, F8A, M4A y U4A) muestran cómo la variabilidad aumenta progresivamente hacia finales de siglo XXI. Otras (U8A) muestran una tendencia inversa, mientras que el resto no tienden tendencia definida.

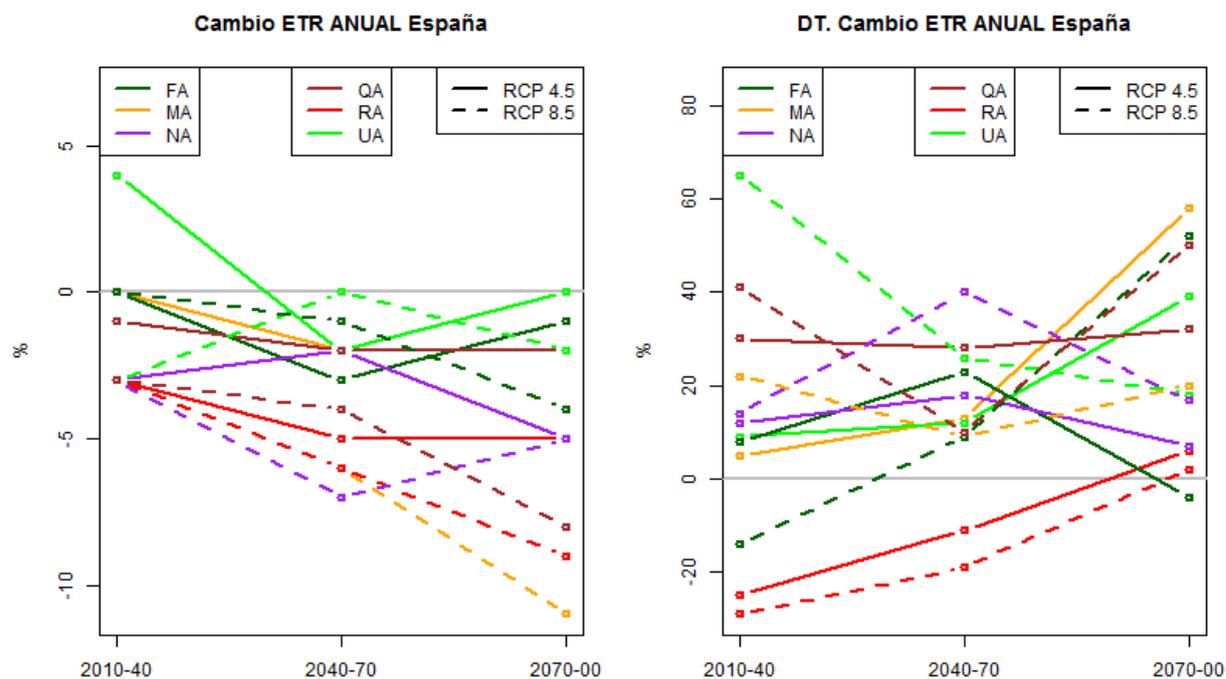


Figura 88.  $\Delta$  (%) ETR en cada PI. Izquierda: valores medios anuales. Derecha: DT de los valores anuales.

## 7.2.2 Distribución espacial de los cambios anuales

Para el PI1 y RCP 4.5 se aprecian algunas diferencias en los cambios de la ETR anual según la proyección climática considerada y también según el escenario climático RCP, tal como se ve en la Figura 89 y Figura 90. Las proyecciones N4A y R4A muestran una leve disminución de ETR que afecta principalmente a la mitad sur peninsular y más en particular al levante y ambos archipiélagos cuando se trata de la proyección R4A. Se nota también la existencia de incrementos en áreas montañosas de la mitad norte peninsular. La proyección U4A da valores diferentes, ya que pronostica un aumento de la ETR en amplias zonas de España, como respuesta a un aumento de la PRE según U4A. La mayor consistencia de resultados entre proyecciones se da en toda la cornisa Cantábrica. Para el PI1 y RCP 8.5 hay reducción de ETR que afecta al sur de la Península y Canarias. R8A estima fuertes reducciones en el SE y ambos archipiélagos. Los aumentos son leves y restringidos en el norte peninsular y pequeñas zonas de las divisorias de aguas. F8A apenas pronostica cambios.

Para el periodo 2040-2070 se acentúa la reducción de ETR según todas las proyecciones, afectando sobre todo al sur y este de España. La excepción se da en Galicia, algunos puntos del Pirineo y otras zonas de montaña de la mitad norte peninsular, que muestra aumentos de ETR relacionado principalmente con una mayor disponibilidad de agua en estas zonas geográficas (Figura 91 y Figura 92). La proyección RA es la que da reducciones mayores y muestra un patrón similar en ambos escenarios, más acusados en el RCP 8.5 en la mitad suroriental y en las islas. Se observan similares patrones de cambio en las DH septentrionales; apenas hay

cambios en las del Cantábrico y hay reducciones en Galicia y Pirineos. N8A da fuertes reducciones de ETR que contrastan con los escasos cambios de N4A. Algo similar ocurre con MA y QA.

Finalmente, en el periodo 2070\_2100 (Figura 93 y Figura 94) se mantiene la tendencia de disminución de ETR generalizada, con el mismo patrón que en el anterior periodo, afectando más a la mitad sur, sureste e islas y más al RCP 8.5 que al RCP 4.5. Nuevamente las DDHH cantábricas tienen pocos cambios cuando se comparan las distintas proyecciones. Se evidencia con más claridad el cambio hacia aumentos de ETR en las zonas de montaña de la mitad septentrional y en Galicia, indicando de manera indirecta y como se apuntó anteriormente, una mayor disponibilidad de agua y un mayor aumento de ETP en estas zonas para que el proceso de evaporación tenga lugar.

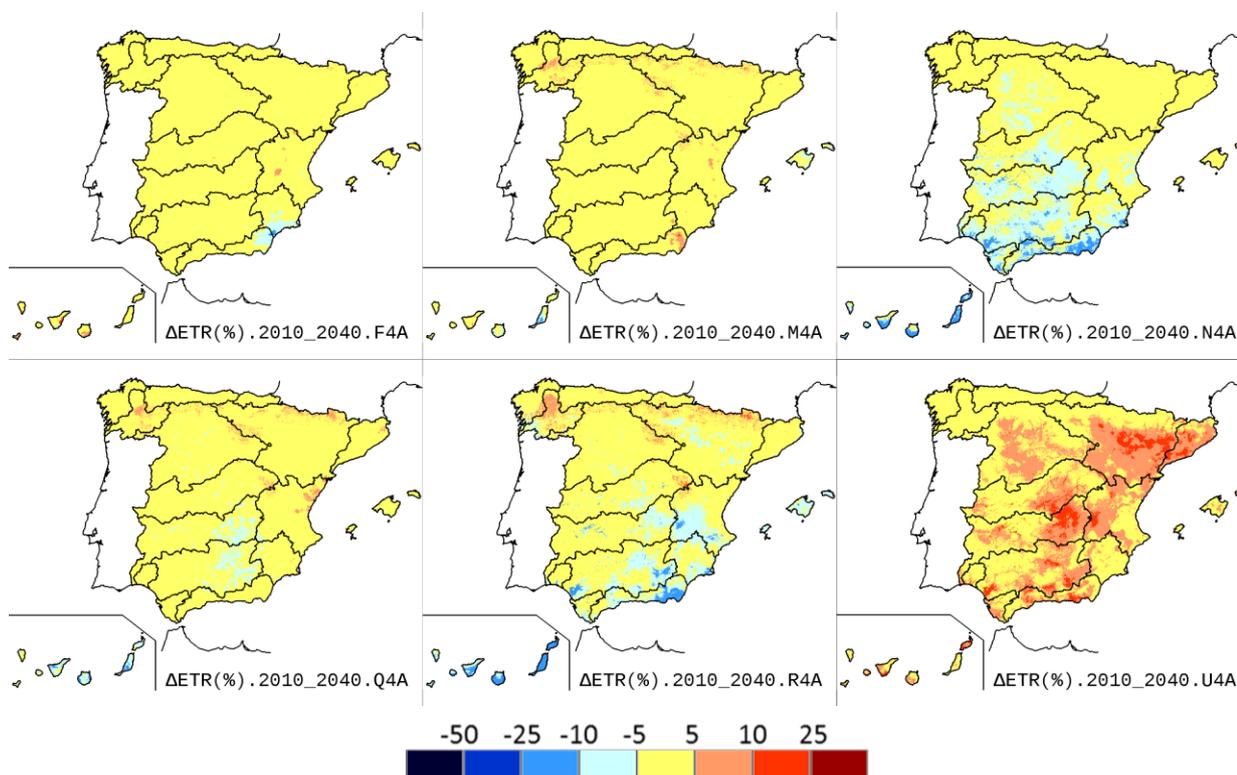


Figura 89.  $\Delta$  (%) ETR anual para 2010-2040 según las proyecciones RCP 4.5.

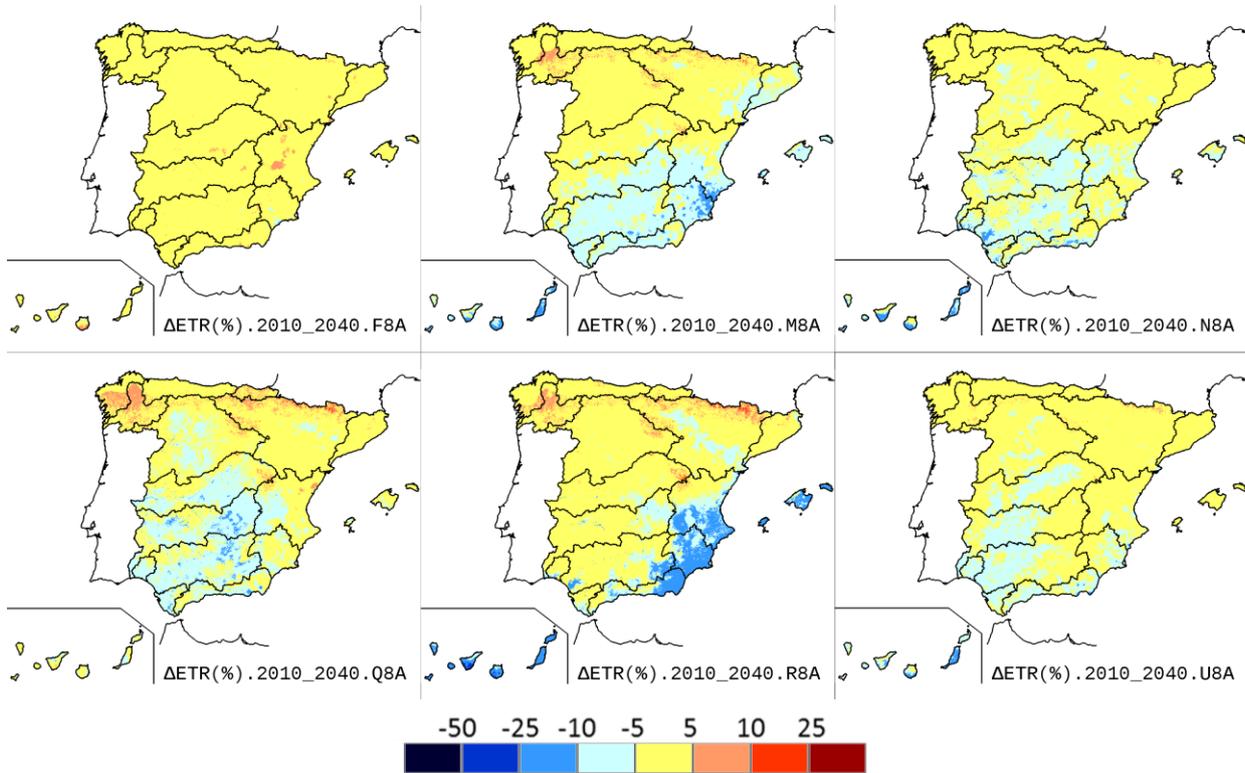


Figura 90.  $\Delta$  (%) ETR anual para 2010-2040 según las proyecciones RCP 8.5.

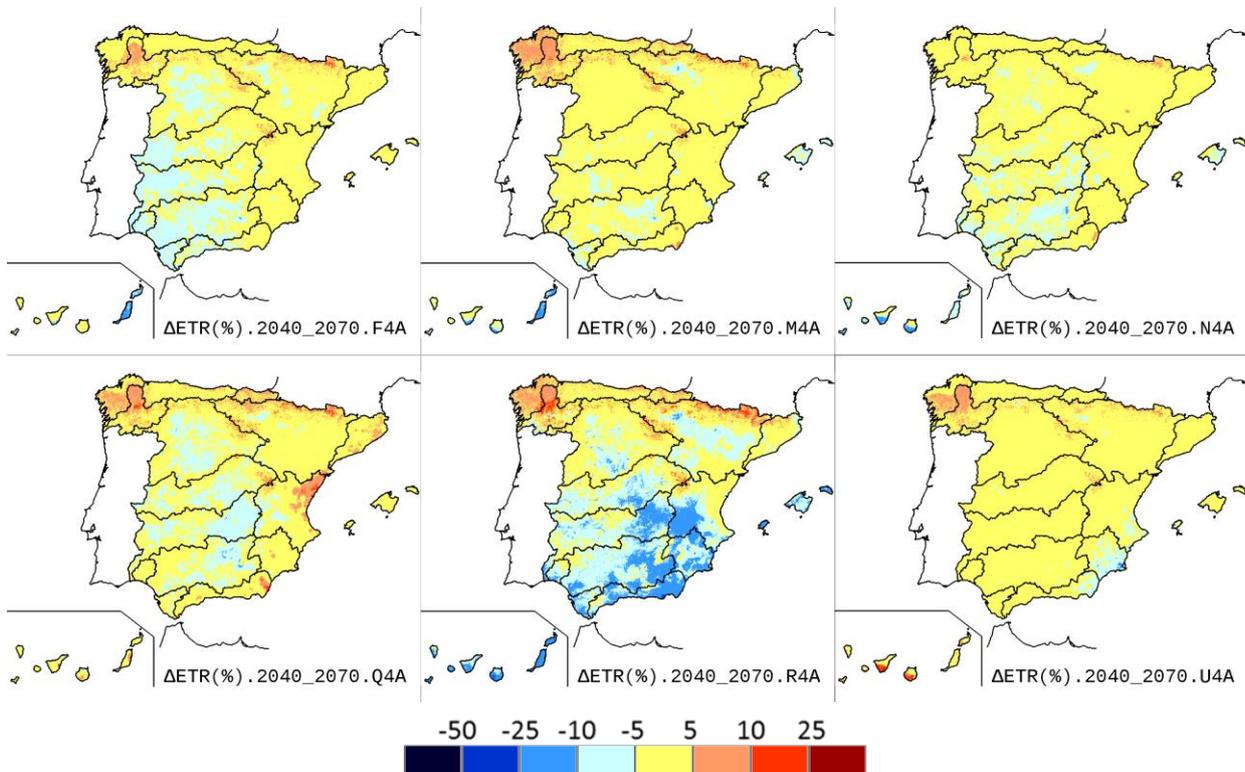


Figura 91.  $\Delta$  (%) ETR anual para 2040-2070 según las proyecciones RCP 4.5.

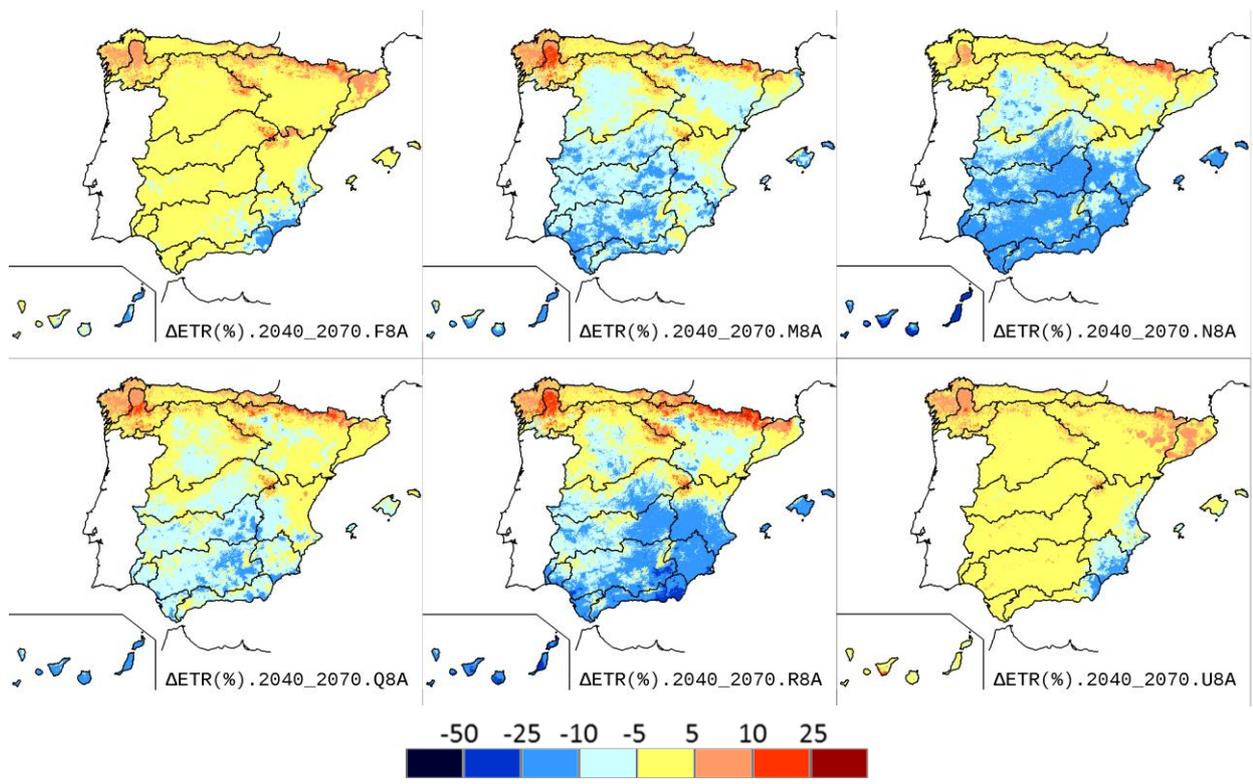


Figura 92.  $\Delta$  (%) ETR anual para 2040-2070 según las proyecciones RCP 8.5.

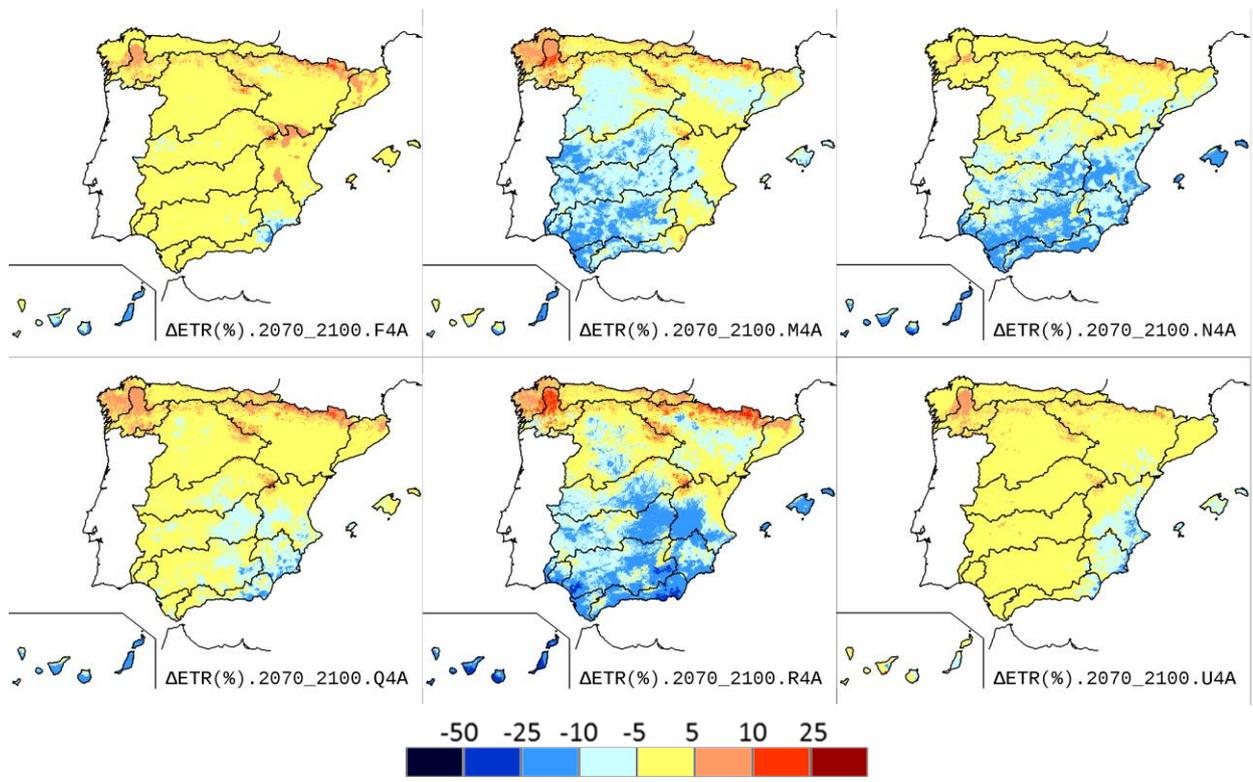


Figura 93.  $\Delta$  (%) ETR anual para 2070-2100 según las proyecciones RCP 4.5.

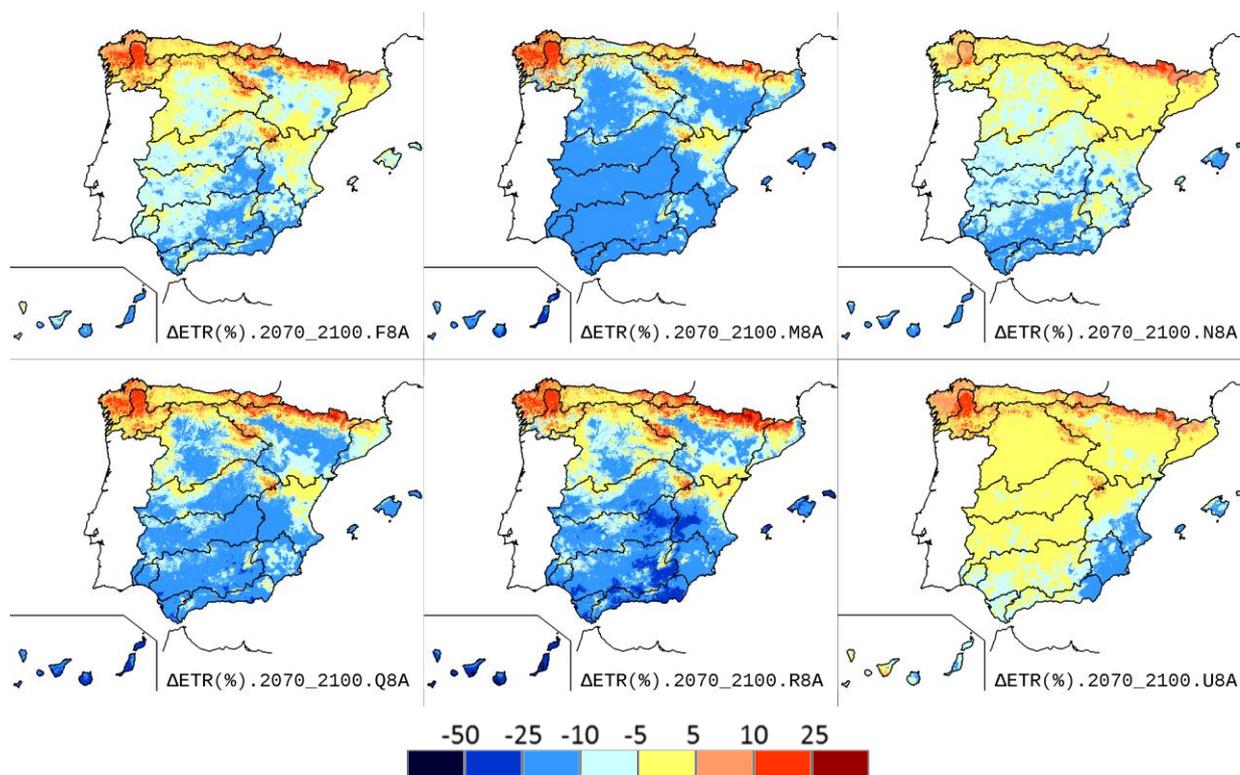


Figura 94.  $\Delta$  (%) ETR anual para 2070-2100 según las proyecciones RCP 8.5.

En el anexo 2 se incluyen las gráficas de las tendencias de la ETR anual de las DDHH durante el siglo XXI. El promedio de las proyecciones para cada DH y RCP da tendencias crecientes significativas en las DDHH del norte peninsular y decrecientes significativas en el resto. La tendencia es estacionaria solamente en el Ebro y CCII de Cataluña para el RCP 8.5.

La Tabla 14 y la Figura 95 contienen los resultados de los cambios de ETR en cada DH. La media de los cambios anuales de ETR para el PI1 oscila entre -2% y +1% (RCP 4.5) y entre -5% y +2% (RCP 8.5), para el PI2 oscila entre -6% y +3% (RCP 4.5) y entre -9% y +4% (RCP 8.5) y para el PI3 oscila entre -8% y +3% (RCP 4.5) y -15% y +6% (RCP 8.5), con la salvedad de que en Canarias siempre se dan reducciones de ETR mayores que el resto de España. Las cuencas de la mitad sur peninsular e islas son las de mayor disminución de ETR. Las DDHH de Miño-Sil, Galicia Costa, Cantábrico, Ebro y CCII de Cataluña tienen variaciones poco significativas y/o con valores positivos, indicando una mayor disponibilidad de agua. Las imágenes de la Figura 95 muestran de manera más evidente las diferencias de valores de ETR en cada proyección. Se aprecian mejor los valores por encima de 0%, que son mayores en el RCP 8.5 (más ETP) y que afectan especialmente a las DDHH del norte peninsular (más PRE). Hacia el sur se van haciendo más notables los descensos de ETR a la vez que aumenta la dispersión de resultados.

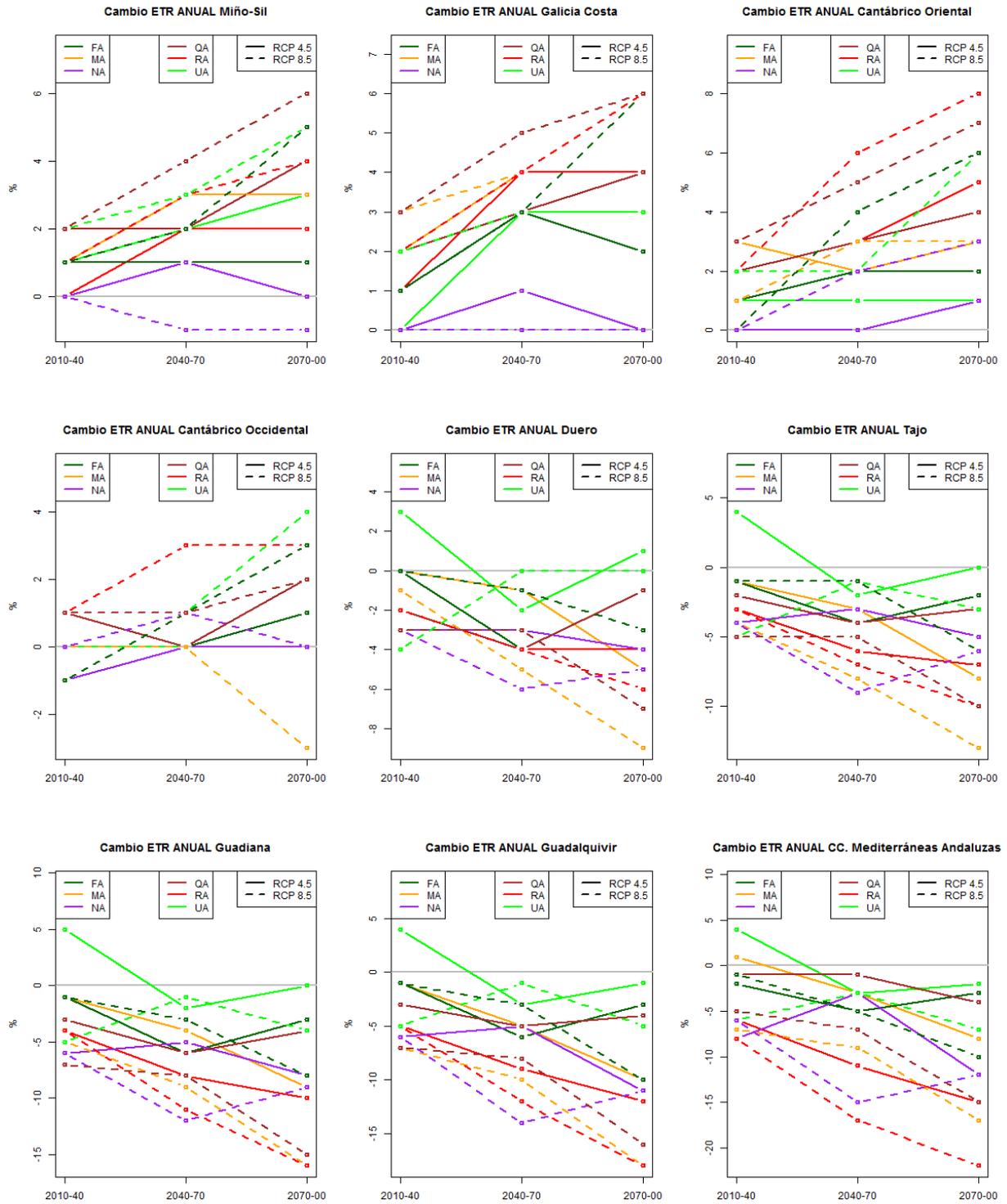
Las proyecciones NA son las que más difieren del resto en la variación de ETR en las DDHH del norte. El caso más claro se da en DDHH de Galicia-Costa para las medias del PI3 y RCP 8.5. La proyección N8A da variaciones de ETR del 0%, diferente del 6% que dan de manera uniforme el resto. La media de los cambios de ETP es del 11% y el



de PRE es del -13%, lo que da un cambio de ETR del 5%. Las diferencias en los cambios de N8A respecto al resto se deben a que NA ajusta bien los valores medios de la PRE observada en Galicia-Costa. El resto de proyecciones da más PRE de la observada por lo que hay más agua para evaporar y por eso sube la ETR cuando sube la ETP.

Tabla 14.  $\Delta$  (%) ETR en cada DH y PI según cada proyección. Se indican los valores máximo (Mx), mínimo (Mn) y el promedio (Med) para cada RCP. Los colores reflejan la gradación del cambio.

ETR $\Delta$ Anual (%)		RCP 4.5									RCP 8.5								
		F4A	M4A	N4A	Q4A	R4A	U4A	Mx	Med	Mn	F8A	M8A	N8A	Q8A	R8A	U8A	Mx	Med	Mn
Miño-Sil	2010-2040	1	1	0	2	0	1	2	1	0	1	2	0	2	1	2	2	1	0
	2040-2070	1	3	1	2	2	2	3	2	1	2	3	-1	4	3	3	4	2	-1
	2070-2100	1	3	0	4	2	3	4	2	0	5	3	-1	6	4	5	6	4	-1
Galicia Costa	2010-2040	1	2	0	2	1	0	2	1	0	1	3	0	3	2	2	3	2	0
	2040-2070	3	4	1	3	4	3	4	3	1	3	4	0	5	4	3	5	3	0
	2070-2100	2	4	0	4	4	3	4	3	0	6	6	0	6	6	6	6	5	0
Cantábrico Oriental	2010-2040	1	3	0	2	2	1	3	1	0	0	1	0	3	2	2	3	1	0
	2040-2070	2	2	0	3	3	1	3	2	0	4	3	2	5	6	2	6	4	2
	2070-2100	2	3	1	4	5	1	5	3	1	6	3	3	7	8	6	8	6	3
Cantábrico Occidental	2010-2040	1	1	-1	1	0	0	1	0	-1	-1	0	0	1	1	1	1	0	-1
	2040-2070	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	3	1	3	1	0
	2070-2100	1	0	0	2	1	1	2	1	0	3	-3	0	2	3	4	4	1	-3
Duero	2010-2040	0	0	-3	-2	-2	3	3	-1	-3	0	-1	-3	-3	-2	-4	0	-2	-4
	2040-2070	-4	-1	-3	-4	-4	-2	-1	-3	-4	-1	-5	-6	-3	-4	0	0	-3	-6
	2070-2100	-1	-5	-4	-1	-4	1	1	-2	-5	-3	-9	-5	-7	-6	0	0	-5	-9
Tajo	2010-2040	-1	-1	-4	-2	-3	4	4	-1	-4	-1	-4	-4	-5	-3	-5	-1	-3	-5
	2040-2070	-4	-3	-3	-4	-6	-2	-2	-4	-6	-1	-8	-9	-5	-7	-1	-1	-5	-9
	2070-2100	-2	-8	-5	-3	-7	0	0	-4	-8	-6	-13	-6	-10	-10	-3	-3	-8	-13
Guadiana	2010-2040	-1	-1	-6	-3	-4	5	5	-2	-6	-1	-5	-6	-7	-4	-5	-1	-5	-7
	2040-2070	-6	-4	-5	-6	-8	-2	-2	-5	-8	-3	-9	-12	-8	-11	-1	-1	-7	-12
	2070-2100	-3	-9	-8	-4	-10	0	0	-6	-10	-8	-16	-9	-15	-16	-4	-4	-11	-16
Guadalquivir	2010-2040	-1	-1	-6	-3	-5	4	4	-2	-6	-1	-7	-6	-7	-5	-5	-1	-5	-7
	2040-2070	-6	-5	-5	-5	-9	-3	-3	-5	-9	-3	-10	-14	-8	-12	-1	-1	-8	-14
	2070-2100	-3	-10	-11	-4	-12	-1	-1	-7	-12	-10	-18	-11	-16	-18	-5	-5	-13	-18
Cuencas Mediterráneas Andaluzas	2010-2040	-2	1	-8	-1	-6	4	4	-2	-8	-1	-7	-6	-5	-8	-6	-1	-5	-8
	2040-2070	-5	-3	-3	-1	-11	-3	-1	-4	-11	-5	-9	-15	-7	-17	-3	-3	-9	-17
	2070-2100	-3	-8	-12	-4	-15	-2	-2	-7	-15	-10	-17	-12	-15	-22	-7	-7	-14	-22
Guadalete y Barbate	2010-2040	-1	-1	-7	-2	-5	4	4	-2	-7	-2	-7	-6	-7	-5	-6	-2	-5	-7
	2040-2070	-7	-5	-5	-5	-10	-3	-3	-6	-10	-3	-11	-16	-8	-13	-1	-1	-9	-16
	2070-2100	-4	-11	-13	-4	-13	-1	-1	-8	-13	-11	-20	-13	-18	-20	-6	-6	-15	-20
Tinto, Odiel y Piedras	2010-2040	-1	0	-6	-3	-4	2	2	-2	-6	-1	-5	-6	-6	-4	-6	-1	-5	-6
	2040-2070	-6	-4	-5	-4	-7	-2	-2	-5	-7	-2	-9	-14	-7	-10	-3	-2	-8	-14
	2070-2100	-3	-10	-9	-4	-10	1	1	-6	-10	-7	-18	-10	-15	-15	-6	-6	-12	-18
Segura	2010-2040	-3	0	-5	-2	-4	2	2	-2	-5	-1	-8	-4	-4	-10	-4	-1	-5	-10
	2040-2070	-2	-2	-1	-2	-10	-5	-1	-4	-10	-6	-7	-11	-7	-15	-7	-6	-9	-15
	2070-2100	-3	-4	-9	-6	-10	-6	-3	-6	-10	-9	-13	-7	-12	-16	-11	-7	-11	-16
Júcar	2010-2040	0	1	-3	-1	-4	5	5	0	-4	1	-5	-4	-3	-7	-3	1	-3	-7
	2040-2070	-1	-1	-2	-1	-7	-2	-1	-2	-7	-1	-6	-9	-4	-10	-3	-1	-5	-10
	2070-2100	1	-3	-8	-3	-7	-4	1	-4	-8	-6	-10	-5	-10	-12	-6	-5	-8	-12
Ebro	2010-2040	1	1	-1	0	-1	5	5	1	-1	0	-2	-2	0	-1	-1	0	-1	-2
	2040-2070	-1	-1	-1	0	-2	-1	0	-1	-2	2	-3	-2	-1	-1	1	2	0	-3
	2070-2100	1	-2	-2	1	-1	-1	1	-1	-2	-1	-6	0	-4	-2	0	0	-2	-6
Cuencas Internas de Cataluña	2010-2040	1	0	1	1	-1	7	7	1	-1	1	-4	-1	1	0	0	1	-1	-4
	2040-2070	0	-2	0	3	-1	0	3	0	-2	4	-3	-2	1	0	4	4	1	-3
	2070-2100	3	-3	-3	2	-1	0	3	0	-3	0	-7	1	-5	-2	1	1	-2	-7
Islas Baleares	2010-2040	-2	-5	-1	-2	-7	3	3	-2	-7	-3	-8	-5	-4	-11	-2	-2	-5	-11
	2040-2070	0	-6	-5	-1	-10	-3	0	-4	-10	-4	-9	-14	-6	-16	-4	-4	-9	-16
	2070-2100	-1	-8	-13	-4	-14	-6	-1	-8	-14	-7	-21	-12	-15	-23	-10	-7	-15	-23
Canarias	2010-2040	1	-2	-8	-7	-10	4	4	-4	-10	-2	-9	-8	-4	-15	-7	-2	-7	-15
	2040-2070	-4	-6	-7	-1	-13	2	2	-5	-13	-7	-11	-22	-13	-20	-3	-3	-13	-22
	2070-2100	-8	-7	-14	-11	-19	-4	-4	-11	-19	-12	-20	-16	-25	-33	-6	-6	-19	-33



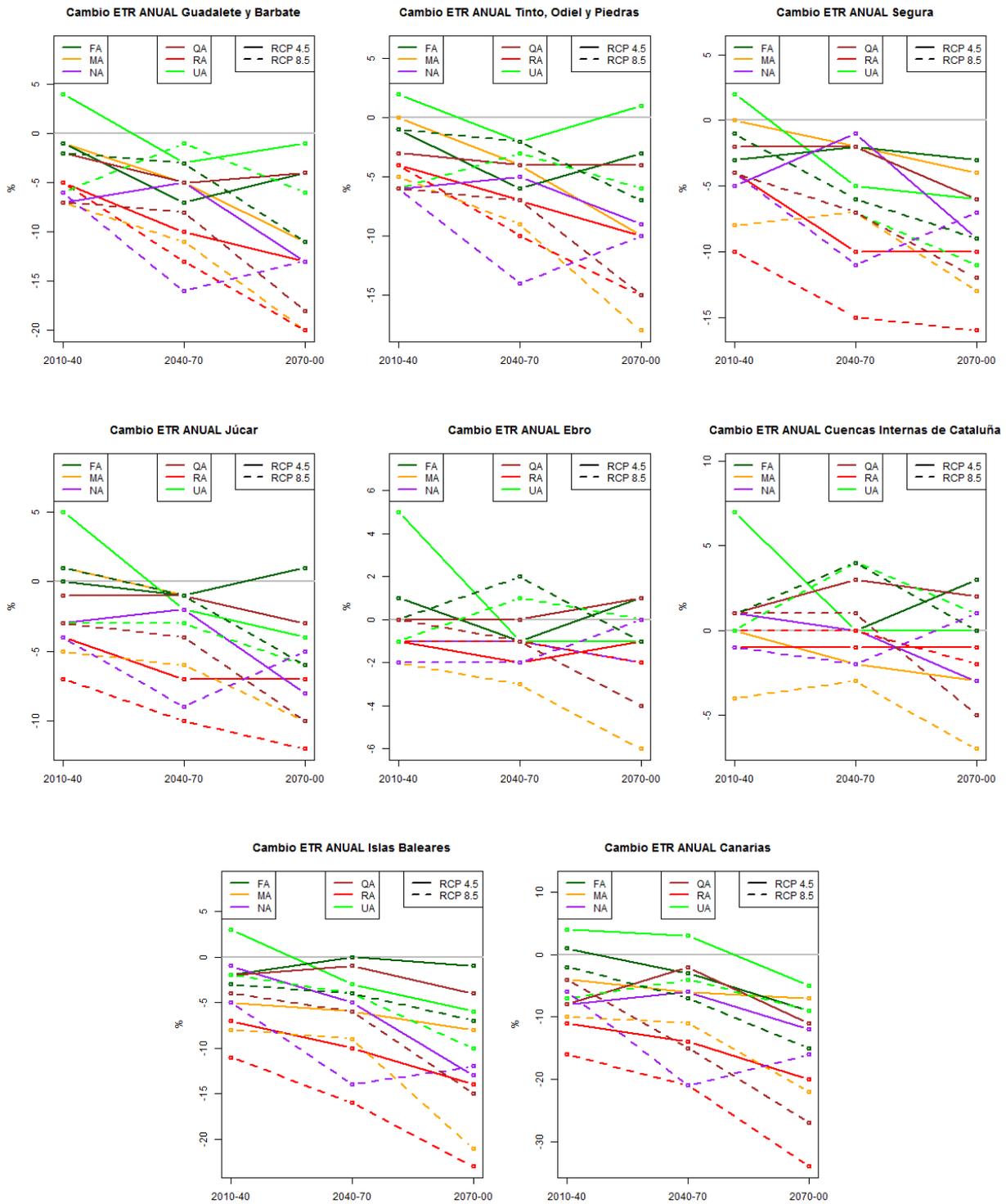


Figura 95.  $\Delta$  (%) ETR de valores medios anuales en cada DH y PI.



### 7.2.3 Cambios en el ciclo anual

En la Figura 96 se han representado los cambios en el ciclo anual de ETR en España. Se aprecia un patrón generalizado de cambio que consiste en una tendencia a concentrar la ETR en los meses donde hay más disponibilidad de agua, donde va a haber más PRE (alrededor de los meses invernales) y, por el contrario, una reducción marcada en verano hacia el final del año hidrológico. Ese patrón de cambio es más acusado en el RCP 8.5 que en el RCP 4.5 y más acusado conforme nos alejamos en el siglo XXI. Casi todas las proyecciones coinciden en ese patrón de cambio, con excepciones ocasionales (incremento en junio-julio según la proyección U4A para el PI3). Los cambios son más acusados según aumenta el PI, aumentando también la dispersión en los meses de verano, siendo mucho más consistentes los resultados entre las distintas proyecciones y escenario de emisiones en el resto del año. Concretamente, la dispersión de resultados entre las proyecciones en el período 2070-2100 es más marcada, oscilando por ejemplo el rango de cambio para el mes de julio entre el -30% y el +10%.



CEDEX

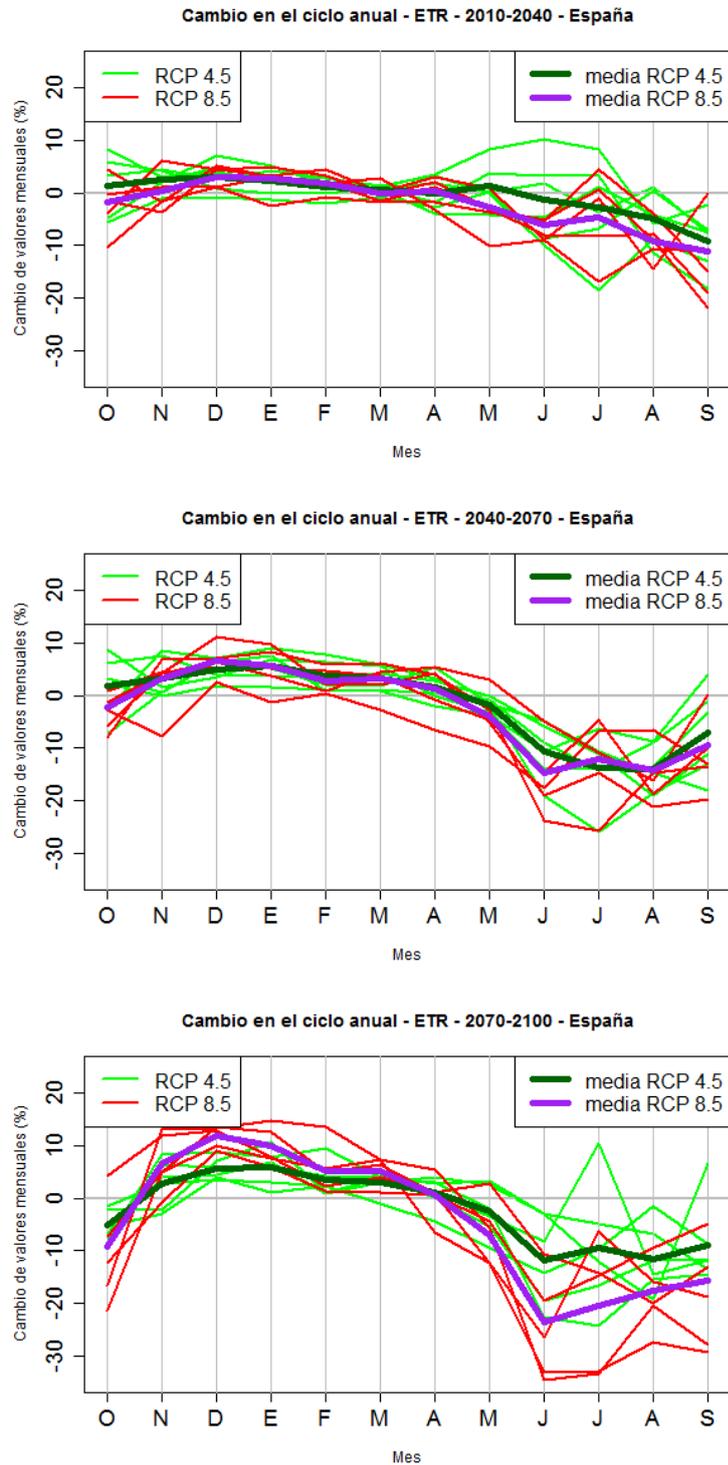


Figura 96. Cambios (%) en el ciclo anual de ETR para cada PI respecto al PC para el conjunto de España según las distintas proyecciones y sus valores medios para cada RCP.

La Tabla 15 muestra esa tendencia a que aumente más la ETR en invierno y otoño en contra de una fuerte reducción en los meses de verano. Así pues, se observa que para cada RCP y PI, las mayores diferencias se dan entre el verano y el resto de estaciones,

si bien también se observan notables reducciones de ETR en primavera conforme avanza el siglo XXI. Destaca el máximo aumento del 11% en la proyección R8A del escenario RCP 8.5, que se corresponde con un gran aumento de la ETP, y los fuertes descensos para el verano según el escenario RCP 8.5 especialmente para el tercer periodo de análisis. La media de los cambios oscila entre 0% y 6% durante otoño e invierno, entre -10% y 0% durante primavera y entre -6% y -18% durante el verano.

Tabla 15.  $\Delta$  (%) ETR estacional en España para cada PI y proyección. Se indican los valores máximo (Mx), mínimo (Mn) y el promedio (Med) para cada RCP. Los colores reflejan la gradación del cambio.

ETR ESPAÑA $\Delta$ Anual (%)	RCP 4.5									RCP 8.5									
	F4A	M4A	N4A	Q4A	R4A	U4A	Mx	Med	Mn	F8A	M8A	N8A	Q8A	R8A	U8A	Mx	Med	Mn	
OND	2010-2040	-1	3	-3	6	4	4	6	2	-3	1	-1	-4	3	1	0	3	0	-4
	2040-2070	-2	3	1	5	3	6	6	3	-2	6	1	-3	3	0	2	6	2	-3
	2070-2100	-1	0	-2	0	1	1	1	0	-2	3	2	-3	-6	0	9	9	1	-6
EFM	2010-2040	2	2	-1	2	2	0	2	1	-1	1	2	-2	3	2	1	3	1	-2
	2040-2070	2	3	1	6	7	4	7	4	1	5	4	-1	4	7	3	7	4	-1
	2070-2100	3	4	0	4	6	3	6	4	0	5	7	2	7	11	4	11	6	2
AMJ	2010-2040	1	2	-4	-4	-2	7	7	0	-4	1	-3	-3	-7	-2	-2	1	-3	-7
	2040-2070	-3	0	-5	-5	-6	-1	0	-3	-6	-4	-7	-11	-6	-8	1	1	-6	-11
	2070-2100	1	-8	-9	-3	-7	1	1	-4	-9	-8	-15	-7	-14	-12	-2	-2	-10	-15
JAS	2010-2040	-4	-8	-5	-3	-14	0	0	-6	-14	-5	-12	-4	-5	-14	-10	-4	-8	-14
	2040-2070	-9	-14	-4	-10	-20	-13	-4	-12	-20	-6	-18	-9	-11	-19	-9	-6	-12	-19
	2070-2100	-8	-14	-7	-5	-19	-8	-5	-10	-19	-12	-30	-10	-13	-28	-15	-10	-18	-30

En la Figura 97 a Figura 102 se muestran los resultados de variación de ETR en todo el territorio, agrupados por estaciones climáticas. Se aprecia un patrón de cambio en la ETR en verano hacia valores más negativos en todas las proyecciones y en todos los PI (colores azules) frente a una predominancia de aumentos de ETR (rojos) en otoño e invierno y con más frecuencia según aumenta el PI y afectando más a la cornisa cantábrica y la mitad occidental peninsular. Destacan los cambios de estacionalidad de la ETR en el SE peninsular según las proyecciones M4A (aumento en primavera y descenso en verano), RA (aumento en otoño y descenso en invierno) y F8A (aumento en otoño y descenso en verano), en el oeste peninsular según M4A, Q4A R4A y R8A (descenso en verano y aumento en otoño o invierno) y en Canarias donde hay una notable dispersión según la proyección.

En el periodo 2040-2070 es consistente la disminución en verano según todas las proyecciones (excepto la N4A) y ambos escenarios, afectando principalmente al interior y sur peninsular y con zonas menos negativas o incluso positivas en verano en las cuencas orientales, Galicia y cornisa cantábrica. Las proyecciones R8A y R4A presentan una marcada estacionalidad, pasando de manera brusca de muy positivo en invierno a muy negativo en verano en gran parte de la Península; otras proyecciones, como QA o UA muestran la misma estacionalidad pero con cambios más graduales, o prácticamente inapreciables como en la N4A. Todas las proyecciones estiman un aumento de ETR, o mínimos descensos, en las zonas montañosas del norte que están principalmente motivadas por las variaciones de la PRE y, por tanto, de la disponibilidad de agua.

Para el periodo PI3 se observa un patrón de cambio similar al del periodo anterior PI2, pero más acusado, con cambios en la estacionalidad muy marcados. Hay mayores



descensos de ETR en gran parte de España según MA y RA en primavera y en verano, siendo los descensos superiores al 25% en amplias zonas del sur, oeste y de Canarias según R8A. También se observan aumentos de ETR en las zonas montañosas septentrionales con valores superiores al 10% en algunas de esas zonas, sobre todo según las proyecciones RA y del RCP 8.5.

Un comentario que aplica a todos los resultados es que la ETR varía en función de la ETP y de la disponibilidad de agua. Puede ocurrir que la ETP sea muy alta, como por ejemplo en verano, pero que no haya agua en el suelo para poderse evaporar, con lo que la ETR sería baja. De ese modo, un cambio hacia una mayor sequedad del suelo puede traducirse en un cambio hacia una menor ETR, de ahí que haya buen ajuste de los resultados según las circunstancias orográficas, su grado de continentalidad y la estación climática. Los aumentos de la ETR en invierno están muy condicionados por los aumentos de la ETP, mientras que los descensos de la ETR en verano están determinados por los descensos de la PRE.

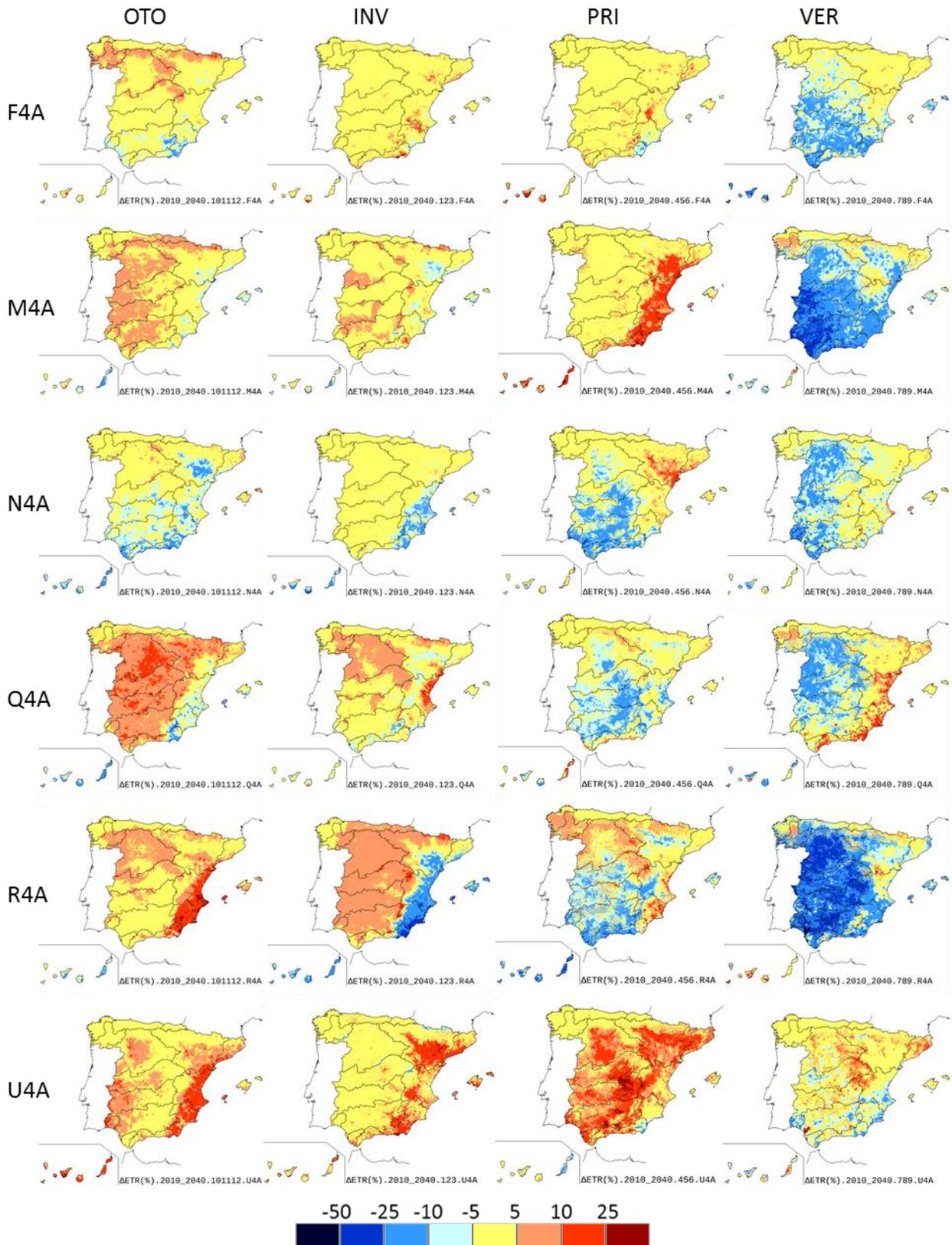


Figura 97.  $\Delta$  (%) ETR estacional para 2010-2040 RCP 4.5

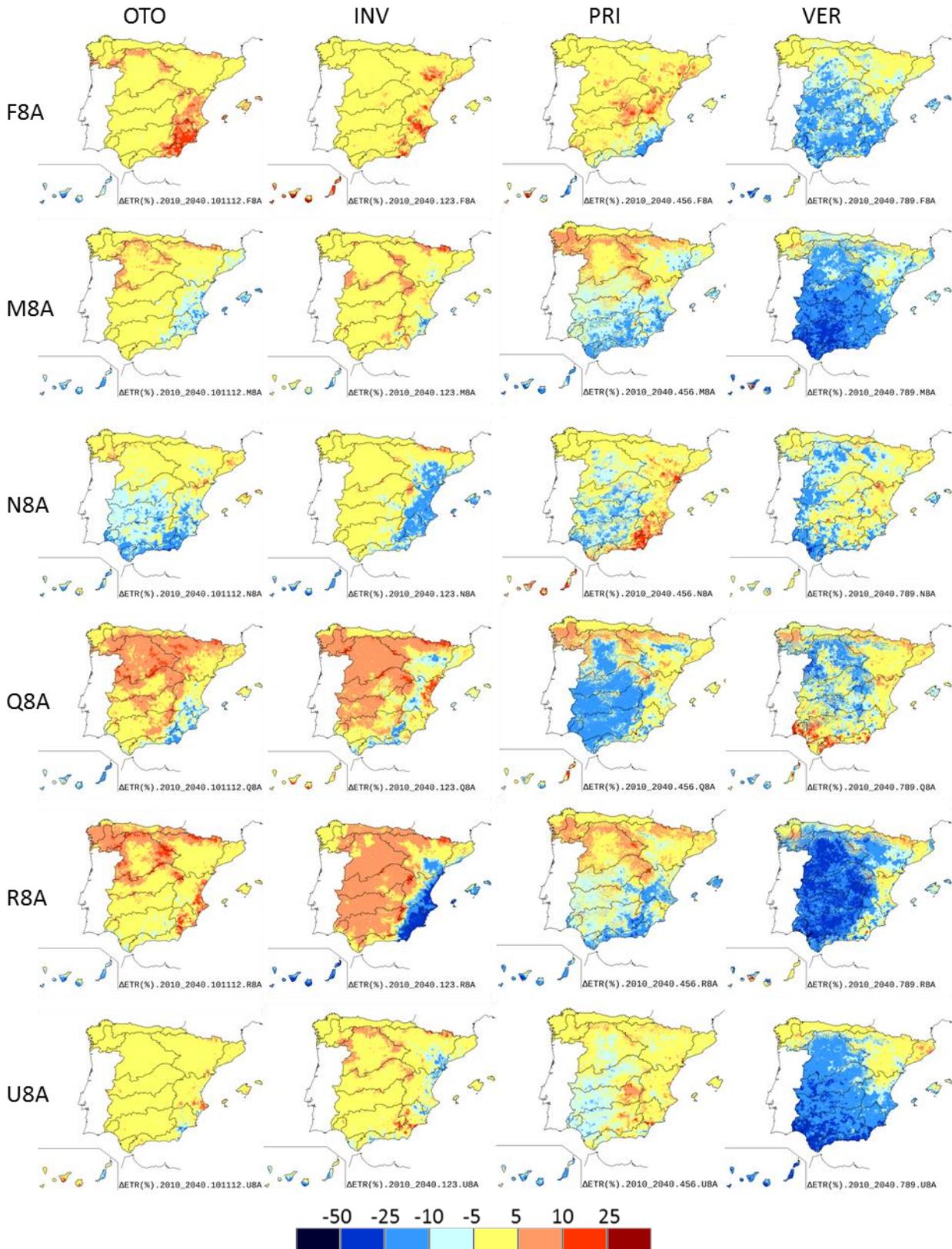


Figura 98.  $\Delta$  (%) ETR estacional para 2010-2040 RCP 8.5

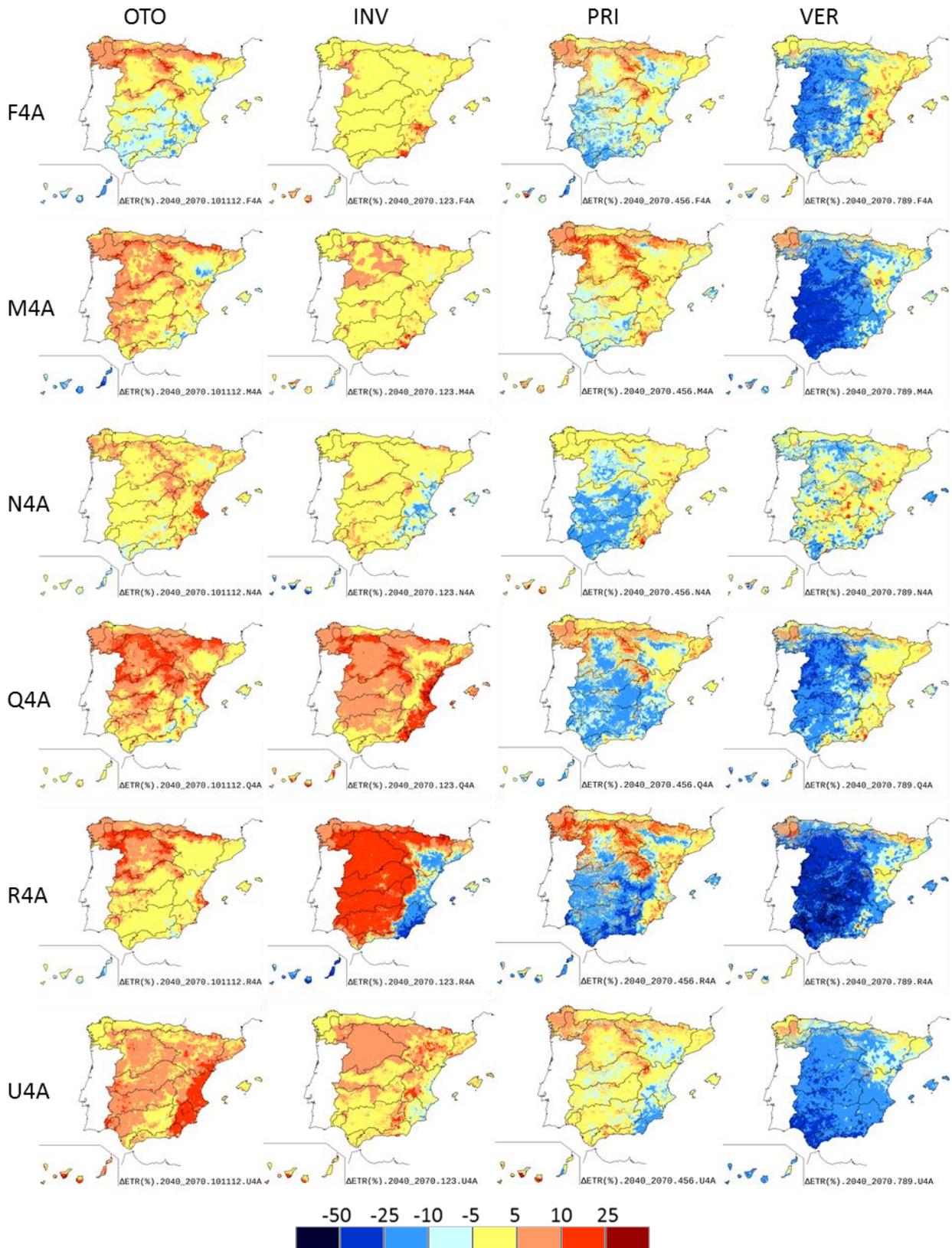


Figura 99.  $\Delta$  (%) ETR estacional para 2040-2070 RCP 4.5

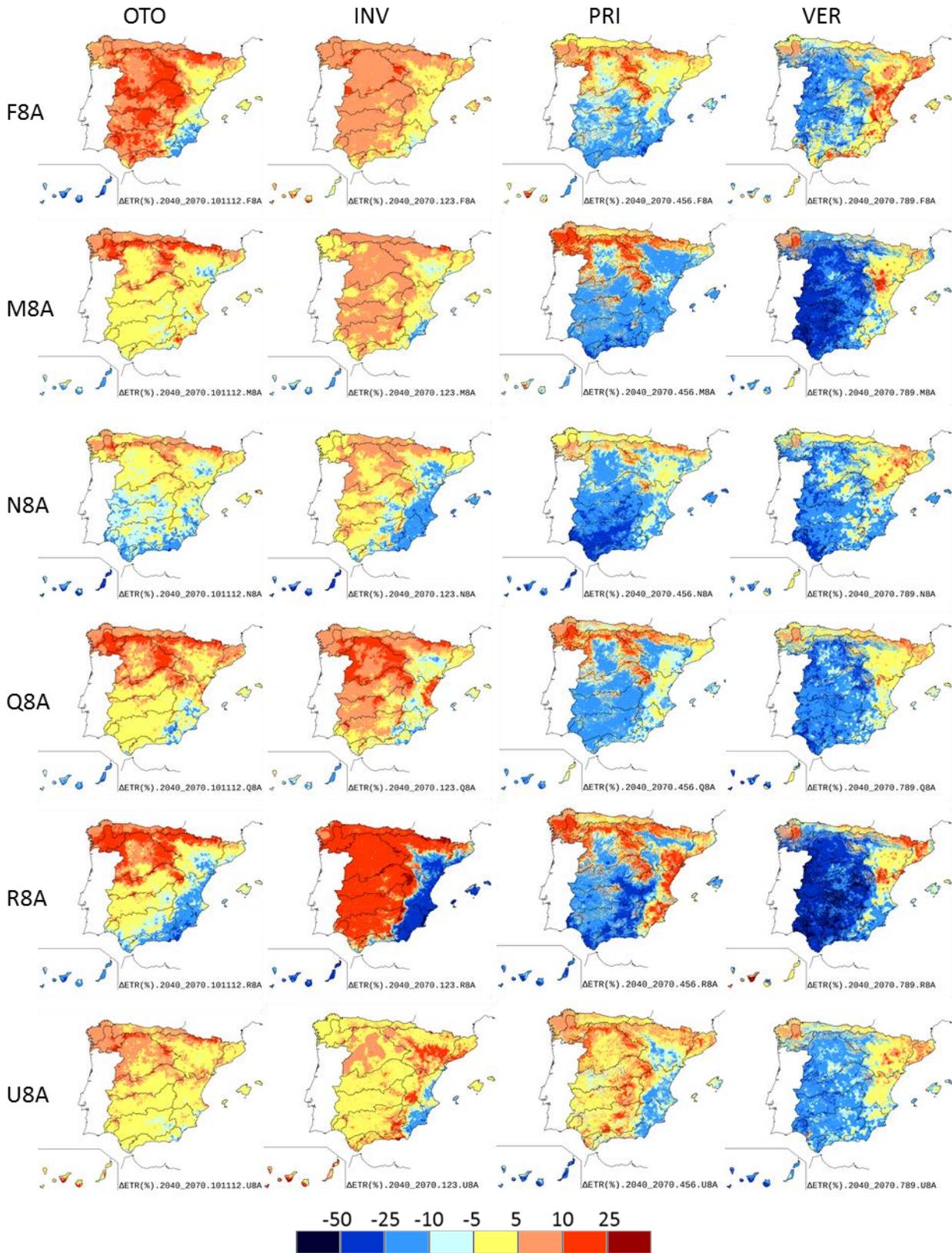


Figura 100.  $\Delta$  (%) ETR estacional para 2040-2070 RCP 8.5

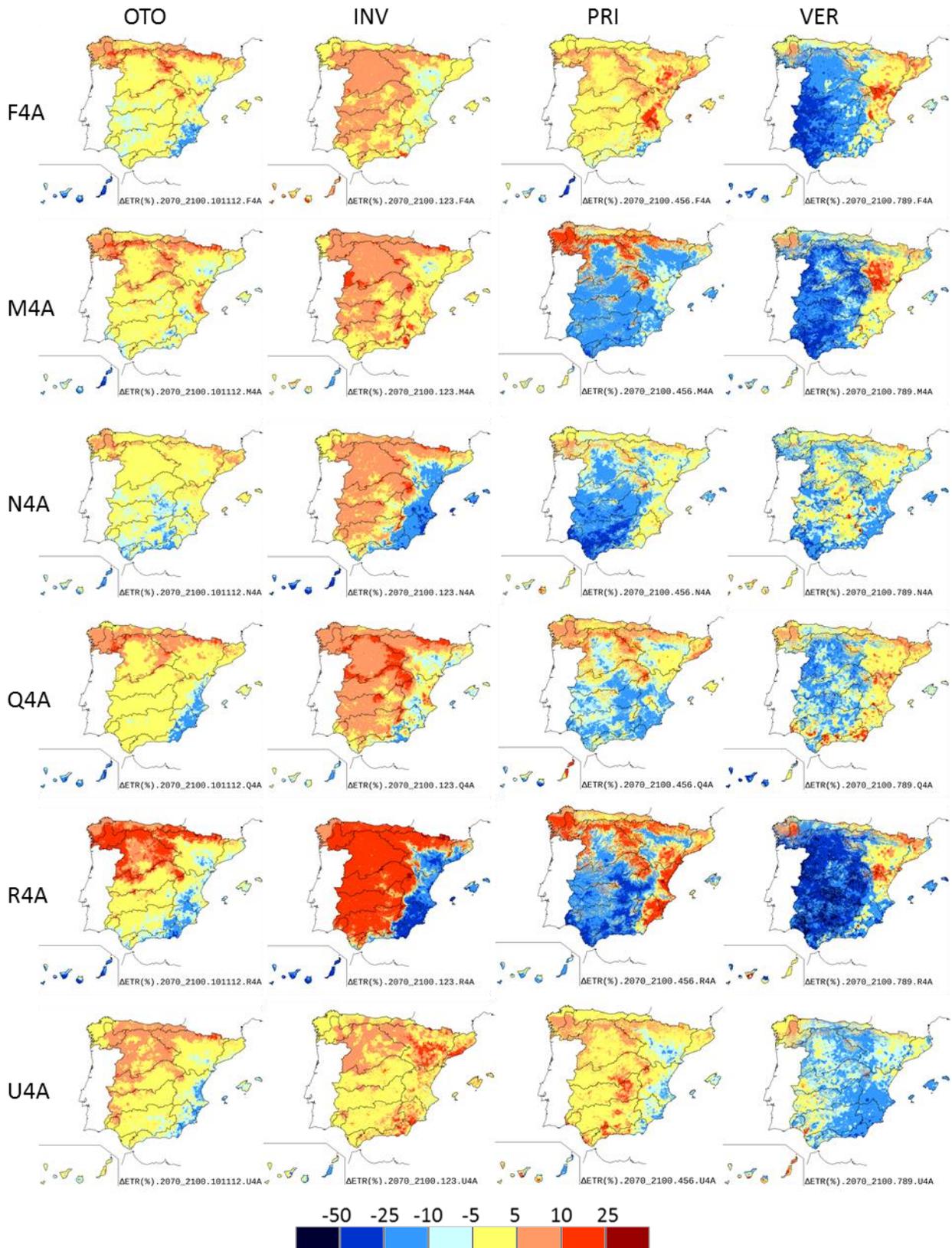


Figura 101.  $\Delta$  (%) ETR estacional para 2070-2100 RCP 4.5

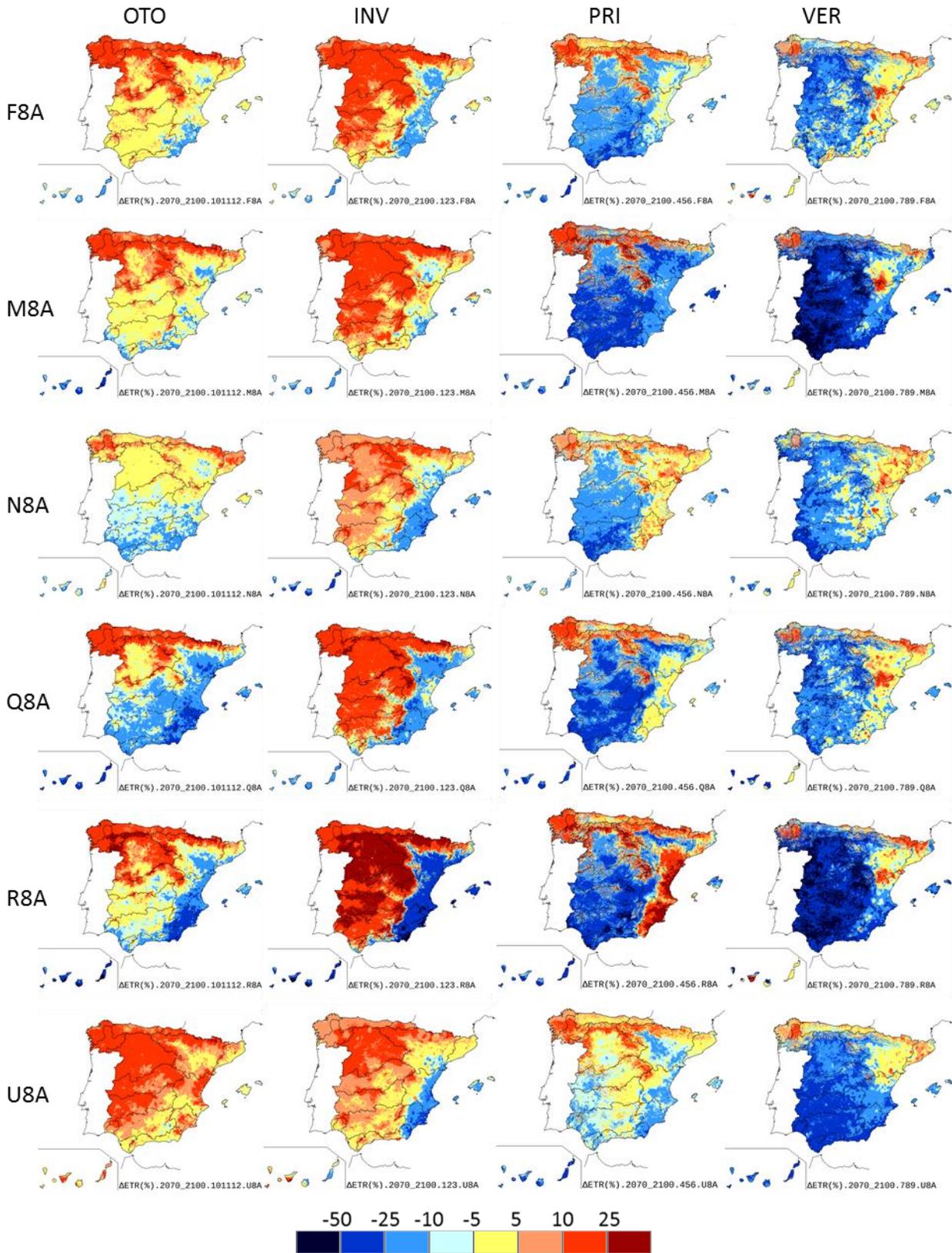


Figura 102.  $\Delta$  (%) ETR estacional para 2070-2100 RCP 8.5



## 7.3 HUMEDAD DEL SUELO

### 7.3.1.1 Cambios anuales para el conjunto de España

Del balance mensual en el suelo se obtiene la HMS en cada mes en función de la capacidad de almacenamiento del suelo ( $H_{max}$ ), de su contenido previo de agua, o humedad antecedente, ( $H_{i-1}$ ) y de la ETP y PRE del mes en que se hace el balance. Debido al descenso de PRE y al aumento de ETP durante la mayor parte del año, es previsible que el suelo pierda humedad, causando importantes impactos para los ecosistemas y la agricultura.

Hay que tener en consideración que el modelo hidrológico utilizado considera al suelo como un almacén temporal de agua cuyo destino final será la evapotranspiración (ETR) y que está desconectado de la escorrentía subterránea. Por tanto, es diferente del suelo entendido como medio físico, con características geológicas tridimensionales, integrado en el subsuelo y conectado con los acuíferos. Así pues, la HMS seguirá patrones de evolución temporal parecidos a los de la ETR, si bien con unas diferencias debidas a que el proceso de evapotranspiración es laminado por el embalse suelo. En concreto, la tendencia de los valores anuales de HMS sigue las pautas de la ETR puesto que el proceso está diferido en el tiempo, pero no más allá de unos meses por lo que la tendencia anual de ambas variables es prácticamente similar (ver apartado 7.2.1).

La HMS se puede considerar como una variable acotada por el valor máximo del contenido de agua que puede almacenar el suelo. Este valor está cuantificado por el parámetro  $H_{max}$  del modelo hidrológico. De ese modo, otra manera de expresar el impacto es evaluar cuánto descende en media el porcentaje de HMS relativizada por  $H_{máx}$  (HMR) en cada periodo del s. XXI respecto al periodo de control. Así considerados, los impactos tendrían valores muy bajos. A modo de ejemplo; suponiendo un lugar con  $H_{máx} = 200$  mm, con un valor medio mensual de HMS de 40 mm durante el periodo de control y de 20 mm durante 2070-2100, el impacto para este periodo podría expresarse como una reducción en la HMS del 50% (con relación a la humedad durante el periodo de control) o como una reducción del 10% (HMR: con relación a la proporción de agua en el suelo respecto al contenido máximo).

El impacto del cambio climático sobre la HMS se ha expresado en este trabajo como cambios de HMR. Considerando todas las celdas de España y cada periodo de impacto, se han calculado los contenidos medios de HMS y se ha dividido entre la media de la capacidad máxima de almacenamiento en el suelo en España. El impacto se calcula como diferencia entre la relación obtenida en cada uno de los periodos de impacto respecto al periodo de control (Tabla 16). Los incrementos varían del +2% al -12%, y las medias del -2% al -8%. Como era de esperar, las mayores reducciones se dan para el RCP 8.5 y PI3. Las proyecciones RA y MA son las que estiman mayores reducciones, mientras que la UA y FA las menores, o incluso un aumento del 2% según F4A para el PI1.

Así pues, se pronostica una pérdida progresiva de la humedad de agua en el suelo a lo largo del siglo XXI. Eso hace que la cantidad de agua al inicio de un periodo sea mayor que al final del mismo, lo que influirá en una ESC menor.



Tabla 16.  $\Delta$  (%) HMR en cada PI según cada proyección para el conjunto de España. Se indican los valores máximo (Mx), mínimo (Mn) y el promedio (Med) para cada RCP. Los colores reflejan la gradación del cambio.

HMR ESPAÑA $\Delta$ Anual (%)	RCP 4.5									RCP 8.5								
	F4A	M4A	N4A	Q4A	R4A	U4A	Mx	Med	Mn	F8A	M8A	N8A	Q8A	R8A	U8A	Mx	Med	Mn
2010-2040	-1	-3	-3	-3	-3	2	2	-2	-3	0	-2	-3	-4	-4	-1	0	-2	-4
2040-2070	-3	-6	-3	-4	-6	-2	-2	-4	-6	-4	-6	-5	-5	-9	-2	-2	-5	-9
2070-2100	-3	-10	-4	-3	-8	-1	-1	-5	-10	-7	-8	-4	-10	-12	-4	-4	-8	-12

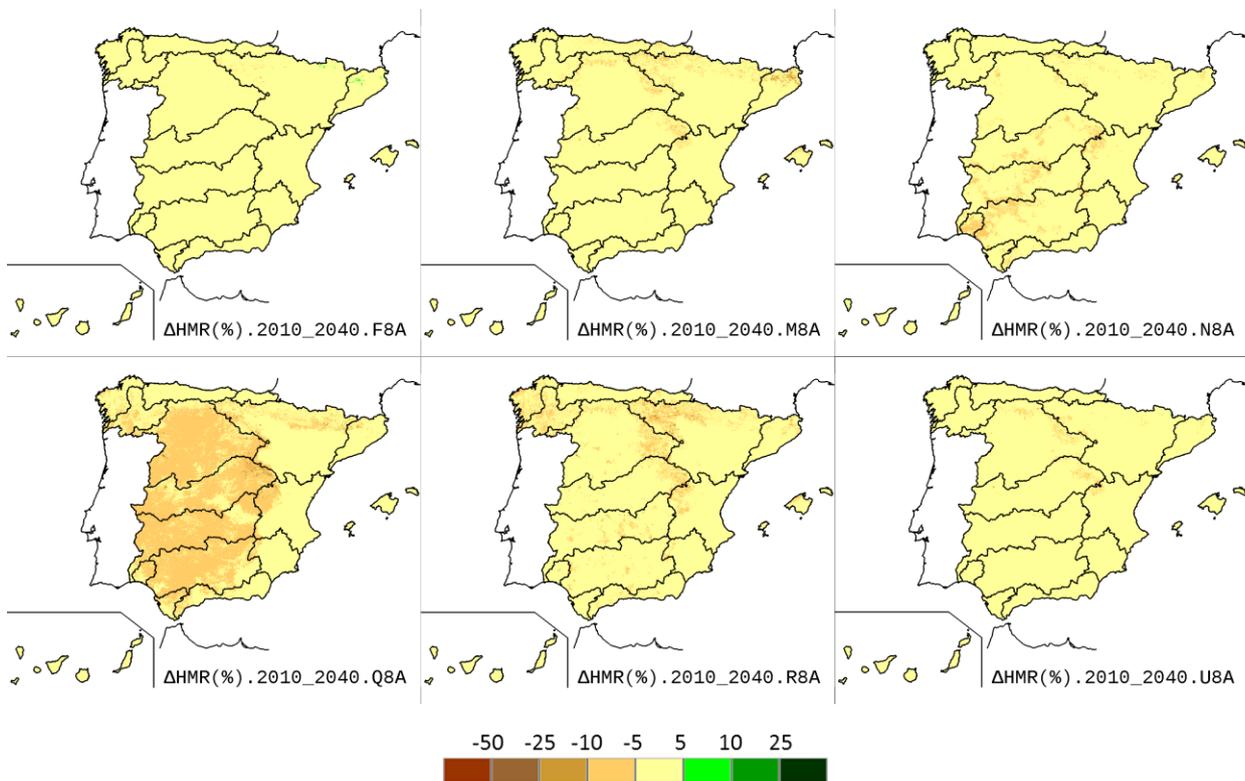
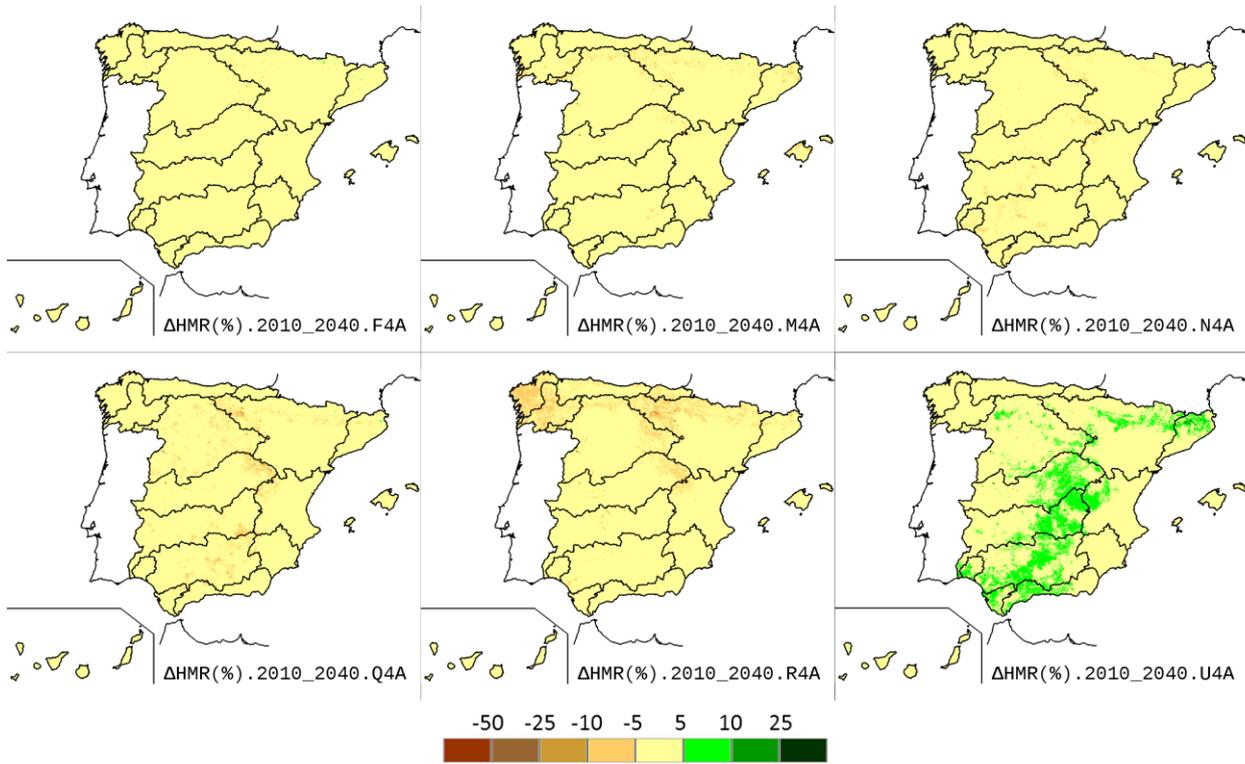
### 7.3.1.2 Distribución espacial de los cambios anuales

En los mapas de la Figura 103 a la Figura 108 se muestra el cambio de HMR anual en cada PI con relación al PC según cada RCP. En general, los cambios en la disponibilidad de agua en el suelo son pequeños y están determinados en gran medida por la PRE estimada.

Para el periodo 2010-2040, se observa poca variación en la HMR anual pronosticada en casi todo el territorio. Para el RCP 4.5, lo más destacable es que U4A da aumentos inferiores al 10% en el centro-sur peninsular y área pirenaica y que R4A da ligeros aumentos en el NO y áreas occidentales y meridionales de la cuenca del Ebro. Tampoco hay cambios relevantes para el RCP 8.5, siendo lo más relevante el leve descenso en las grandes cuencas atlánticas pronosticado por Q8A.

Para el periodo 2040-2070 los descensos son ya más notorios. Para el RCP 4.5 destaca la proyección R4A que presenta descensos en las cuencas atlánticas y Pirineo y cómo todas las proyecciones dan los mayores descensos en las zonas de cabeceras de cuencas de la mitad norte, donde hay más agua disponible. Para el RCP 8.5 se observa un patrón de cambio similar pero con descensos más importantes según la mayoría de las proyecciones salvo F8A, que apenas experimenta cambios, y U8A, que incluso exhibe leves incrementos en el Pirineo central.

Para el periodo 2070\_2100 se observan patrones de cambios similares a los del periodo anterior pero con los descensos de HMR más acusados y generalizados. Éstos son muy notorios para el RCP 8.5. y las proyecciones F8A, M8A, Q8A y, sobre todo, R8A que exhibe descensos superiores al 10% en casi toda España, con la excepción de la parte baja de la cuenca del Ebro, cuencas mediterráneas orientales y Canarias. Al igual que se observa en todos los periodos y RCP, todas las proyecciones dan los mayores descensos en las zonas de cabeceras de cuencas, donde hay más agua disponible. La excepción son las proyecciones UA que dan ligeros aumentos en zonas aisladas del Pirineo central.



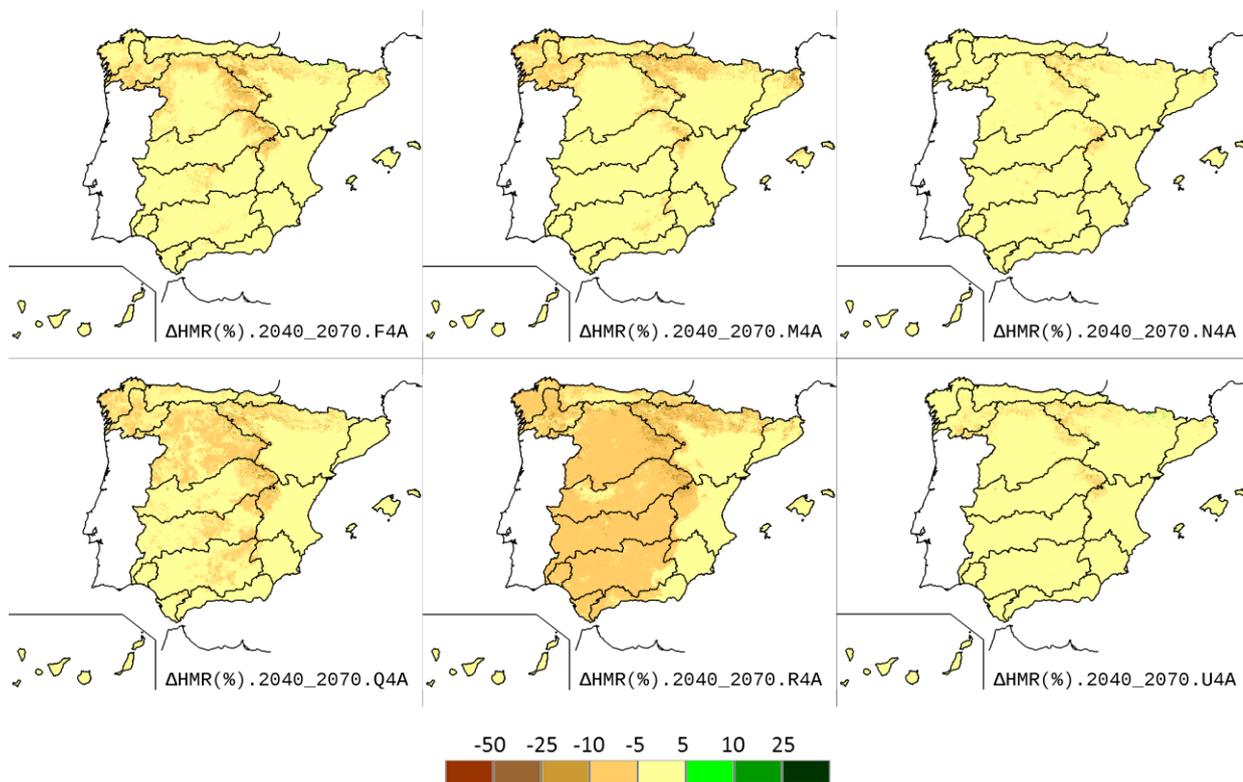


Figura 105.  $\Delta$  (%) HMR anual para 2040-2070 según las proyecciones RCP 4.5.

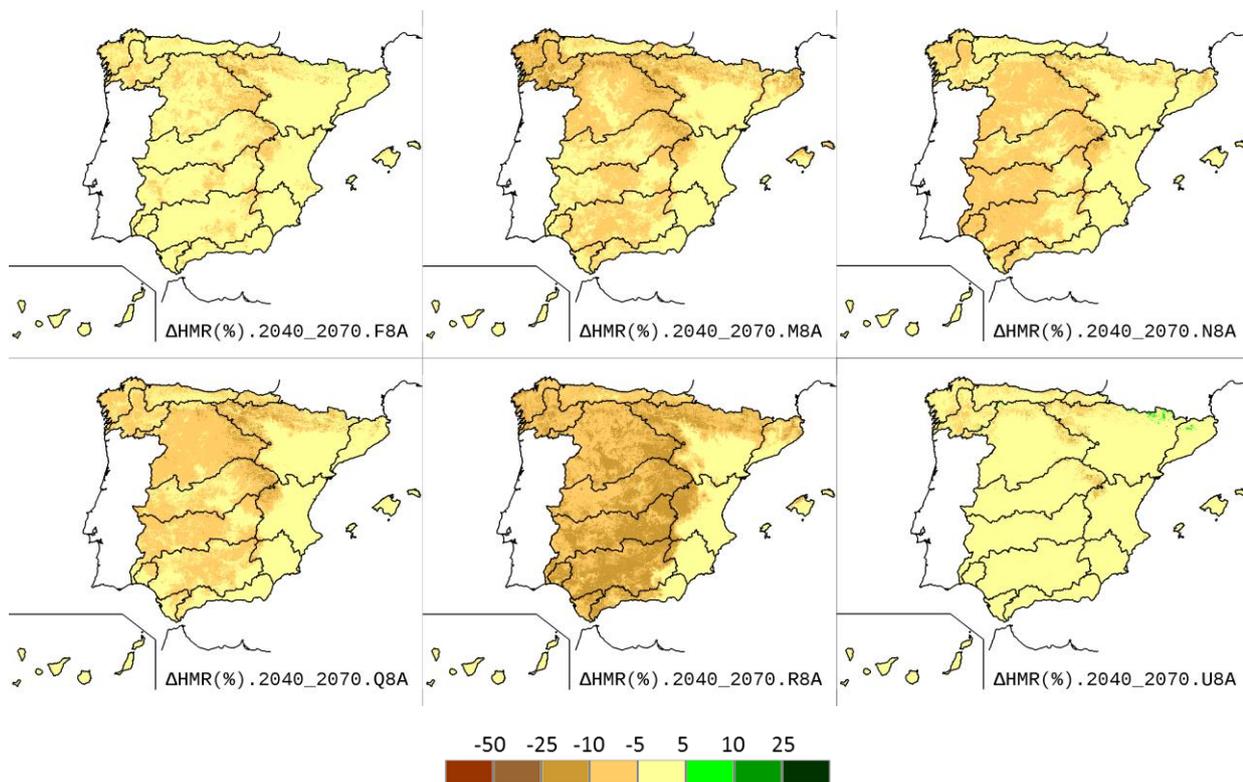
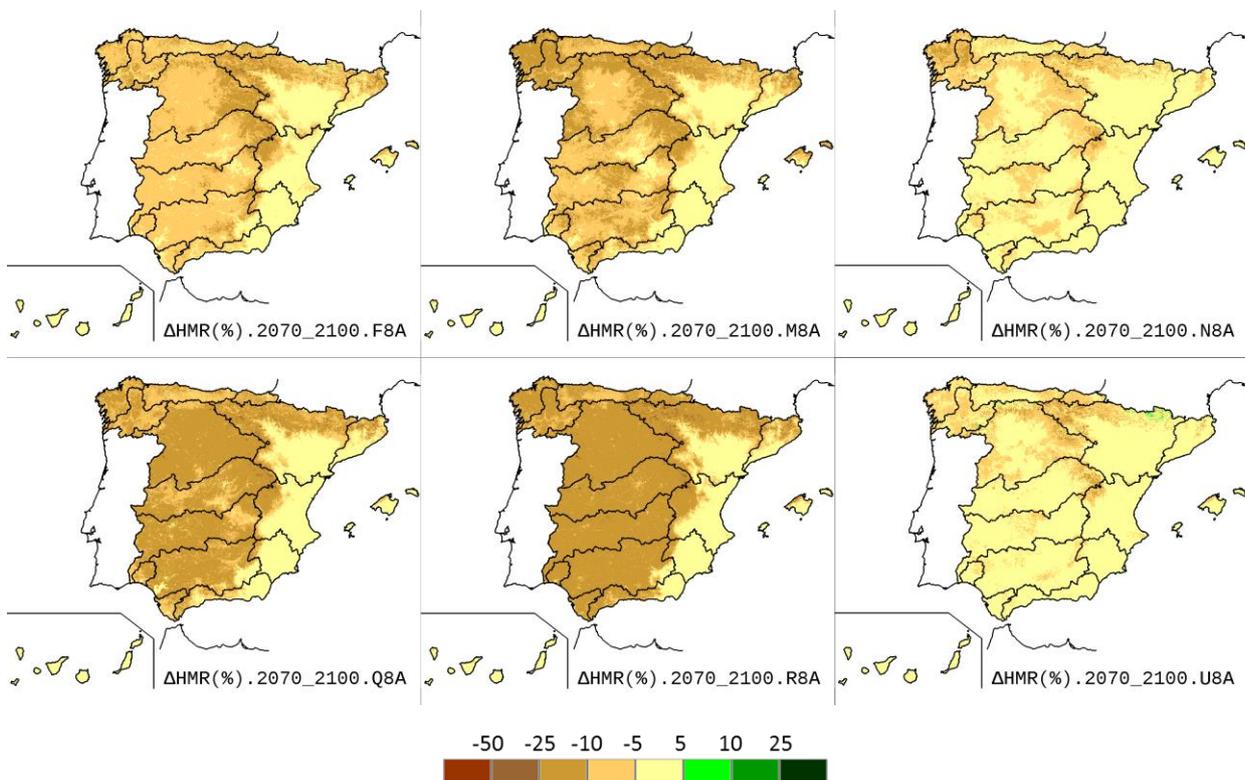
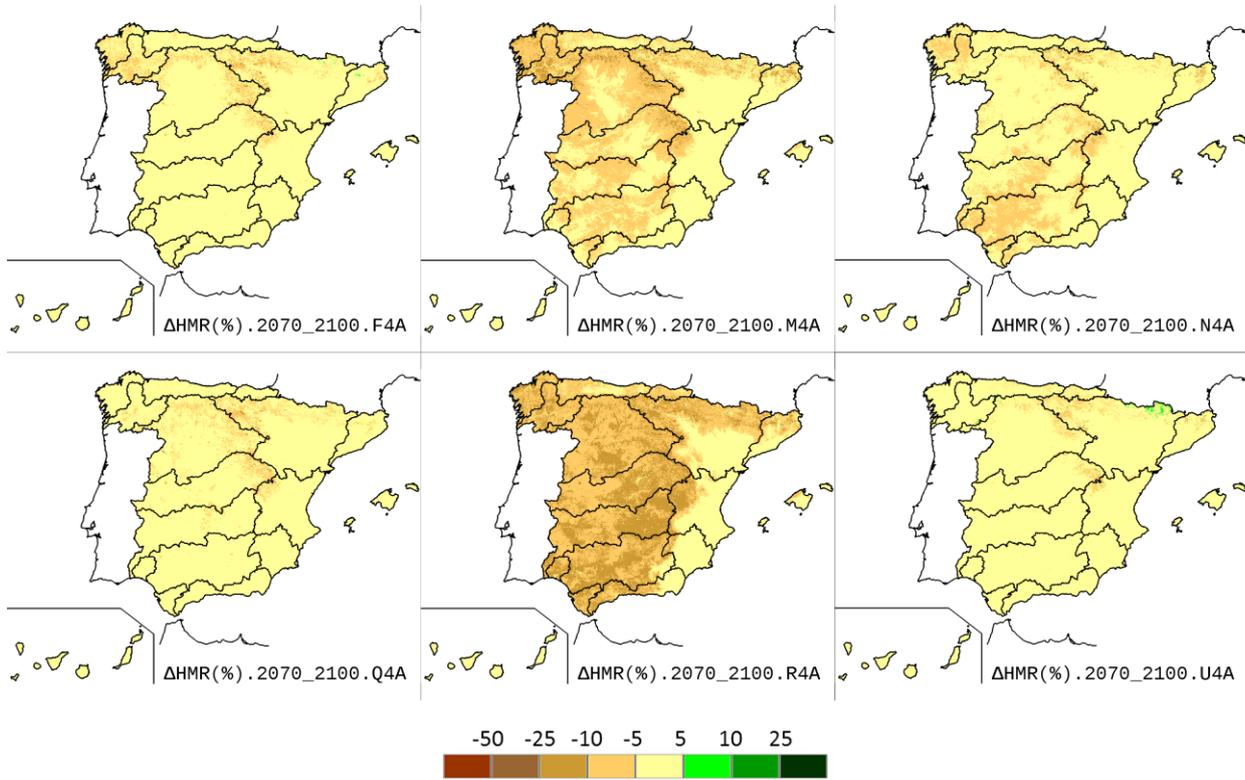


Figura 106.  $\Delta$  (%) HMR anual para 2040-2070 según las proyecciones RCP 8.5.





Los cambios de HMR para cada uno de los tres PI en cada DH se muestran en la Tabla 17. Se pronostican mayoritariamente descensos de HMR. Los descensos no sobrepasan el 14% en ningún caso. Los mayores descensos se dan en las DDHH atlánticas, sobre todo en el NO, donde hay más disponibilidad de agua. Los menores descensos se dan en el SE y Canarias, donde el suelo ya está tan seco durante el PC que no hay variación de humedad en los PI. Los descensos van siendo más notables del PI1 al PI2 y al PI3. Los descensos son mayores en el RCP 8.5 que en el RCP 4.5. Las proyecciones RA son las que dan los mayores descensos, seguidas por las QA y MA. Los aumentos de HMR son minoritarios y no sobrepasan el 4% en ningún caso. La mayoría de los aumentos los da la proyección U4A en las grandes cuencas atlánticas durante el PI1.

Tabla 17. Δ (%) HMR en cada DH y PI según cada proyección. Se indican los valores máximo (Mx), mínimo (Mn) y el promedio (Med) para cada RCP. Los colores reflejan la gradación del cambio.

HMR Δ Anual (%)		RCP 4.5									RCP 8.5								
		F4A	M4A	N4A	Q4A	R4A	U4A	Mx	Med	Mn	F8A	M8A	N8A	Q8A	R8A	U8A	Mx	Med	Mn
Miño-Sil	2010-2040	-2	-3	-1	-2	-5	1	1	-2	-5	-1	-3	-2	-5	-5	-2	-1	-3	-5
	2040-2070	-5	-6	-3	-5	-7	-4	-3	-5	-7	-5	-8	-5	-6	-6	-4	-4	-6	-8
	2070-2100	-5	-8	-4	-4	-9	-2	-2	-5	-9	-9	-14	-8	-11	-11	-6	-6	-10	-14
Galicia Costa	2010-2040	-2	-3	-1	-2	-5	0	0	-2	-5	-1	-3	-2	-4	-4	-2	-1	-3	-4
	2040-2070	-4	-6	-3	-5	-7	-4	-3	-5	-7	-5	-9	-6	-6	-6	-4	-4	-6	-9
	2070-2100	-5	-8	-5	-3	-9	-2	-2	-5	-9	-8	-14	-8	-11	-11	-6	-6	-10	-14
Cantábrico Oriental	2010-2040	-2	-3	-1	-2	-4	0	0	-2	-4	-3	-4	-2	-3	-3	-1	-1	-2	-4
	2040-2070	-3	-6	-3	-4	-6	-3	-3	-4	-6	-4	-6	-3	-6	-6	-4	-3	-5	-6
	2070-2100	-3	-5	-4	-3	-7	-4	-3	-4	-7	-9	-12	-6	-11	-11	-7	-6	-9	-12
Cantábrico Occidental	2010-2040	-1	-2	0	-2	-3	0	0	-1	-3	-2	-3	-1	-3	-3	-1	-1	-2	-3
	2040-2070	-3	-5	-2	-4	-6	-3	-2	-4	-6	-4	-6	-3	-5	-5	-4	-3	-5	-6
	2070-2100	-3	-5	-3	-3	-6	-2	-2	-4	-6	-8	-10	-6	-9	-9	-6	-6	-8	-10
Duero	2010-2040	-3	-2	-3	-4	-4	3	3	-2	-4	-1	-1	-4	-7	-7	-2	-1	-4	-7
	2040-2070	-5	-4	-4	-6	-7	-2	-2	-5	-7	-5	-7	-6	-7	-7	-2	-2	-6	-7
	2070-2100	-4	-7	-5	-5	-10	-1	-1	-5	-10	-10	-11	-6	-14	-14	-6	-6	-10	-14
Tajo	2010-2040	-2	-1	-3	-3	-4	3	3	-2	-4	0	-1	-4	-6	-6	-2	0	-3	-6
	2040-2070	-4	-3	-3	-5	-7	-2	-2	-4	-7	-4	-6	-6	-6	-6	-2	-2	-5	-6
	2070-2100	-4	-6	-5	-4	-10	-1	-1	-5	-10	-8	-9	-5	-13	-13	-4	-4	-9	-13
Guadiana	2010-2040	-1	-1	-4	-4	-4	4	4	-2	-4	0	-1	-4	-7	-7	0	0	-3	-7
	2040-2070	-4	-2	-4	-5	-7	-1	-1	-4	-7	-4	-5	-6	-6	-6	-1	-1	-5	-6
	2070-2100	-3	-6	-5	-4	-11	0	0	-5	-11	-8	-9	-5	-12	-12	-3	-3	-8	-12
Guadalquivir	2010-2040	-1	-2	-4	-4	-3	4	4	-2	-4	0	-2	-4	-6	-6	0	0	-3	-6
	2040-2070	-3	-2	-3	-4	-7	-1	-1	-3	-7	-4	-6	-6	-5	-5	0	0	-4	-6
	2070-2100	-2	-5	-5	-3	-10	0	0	-4	-10	-7	-9	-4	-11	-11	-3	-3	-8	-11
Cuencas Mediterráneas Andaluzas	2010-2040	0	-1	-2	-2	-2	3	3	-1	-2	0	-1	-2	-3	-3	0	0	-1	-3
	2040-2070	-2	-1	-1	-1	-4	0	0	-2	-4	-3	-3	-4	-2	-2	0	0	-2	-4
	2070-2100	-2	-3	-3	-2	-6	0	0	-3	-6	-5	-5	-2	-5	-5	-1	-1	-4	-5
Guadalete y Barbate	2010-2040	0	-2	-4	-4	-3	4	4	-1	-4	1	-1	-4	-5	-5	0	1	-3	-5
	2040-2070	-3	-2	-2	-3	-7	0	0	-3	-7	-4	-5	-6	-5	-5	0	0	-4	-6
	2070-2100	-2	-5	-5	-3	-10	0	0	-4	-10	-7	-8	-4	-10	-10	-3	-3	-7	-10
Tinto, Odiel y Piedras	2010-2040	-2	0	-4	-4	-3	4	4	-2	-4	0	0	-5	-6	-6	-1	0	-3	-6
	2040-2070	-4	-2	-3	-3	-7	-1	-1	-3	-7	-4	-5	-8	-5	-5	-1	-1	-5	-8
	2070-2100	-3	-5	-6	-4	-10	0	0	-5	-10	-7	-9	-5	-11	-11	-3	-3	-8	-11
Segura	2010-2040	0	-1	-1	-1	-1	0	0	0	-1	0	0	-1	-1	-1	0	0	-1	-1
	2040-2070	0	-1	0	-1	-1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
	2070-2100	-1	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-2	-2	-2	-1	-2	-2	-1	-1	-2	-2
Júcar	2010-2040	0	-1	-2	-1	-2	1	1	-1	-2	1	-1	-2	-2	-2	-1	1	-1	-2
	2040-2070	-2	-2	-1	-1	-3	-1	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	-3
	2070-2100	-2	-2	-2	-2	-4	-1	-1	-2	-4	-5	-4	-3	-5	-5	-2	-2	-4	-5
Ebro	2010-2040	-1	-2	-2	-2	-3	2	2	-1	-3	-1	-2	-2	-3	-3	-1	-1	-2	-3
	2040-2070	-3	-4	-2	-3	-5	-2	-2	-3	-5	-3	-5	-4	-5	-5	-1	-1	-4	-5
	2070-2100	-3	-4	-3	-3	-7	-2	-2	-4	-7	-7	-8	-4	-9	-9	-4	-4	-7	-9
Cuencas Internas de Cataluña	2010-2040	0	-2	-1	-1	-1	3	3	0	-2	1	-3	-2	-1	-1	-1	1	-1	-3
	2040-2070	-2	-4	-2	0	-3	-1	0	-2	-4	-2	-6	-4	-2	-2	0	0	-3	-6
	2070-2100	-2	-5	-3	-1	-5	-2	-1	-3	-5	-7	-8	-3	-7	-7	-3	-3	-6	-8
Islas Baleares	2010-2040	-1	-3	0	-1	-1	0	0	-1	-3	0	-3	-1	-1	-1	-1	0	-1	-3
	2040-2070	-1	-3	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-3	-2	-5	-2	-1	-1	-2	-1	-2	-5
	2070-2100	-2	-3	-2	-1	-3	-2	-1	-2	-3	-5	-7	-1	-2	-2	-3	-1	-3	-7
Canarias	2010-2040	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2040-2070	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2070-2100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

### 7.3.1.3 Cambios en el ciclo anual

Hay una marcada estacionalidad en la HMS, tal como lo muestran los valores de proyecciones promediados para España en cada RCP y PI por estación climática (Figura 109). La dimensión de las ordenadas representa el valor de  $H_{max}$  medio para España, que ronda los 190 mm. Según los datos acordes con los valores medios de las proyecciones para el PC, el suelo tendría para España unos 50 mm de media de agua para los meses otoñales (OND) y primaverales (AMJ), unos 100 mm para el invierno (EFM) y apenas 10 para el verano (JAS). Se observa que el conjunto de las proyecciones da una reducción de HMS progresiva para los PI y mayor para el RCP 8.5. La reducción es escasa en valores absolutos en verano debido a la sequedad del suelo en esos meses.

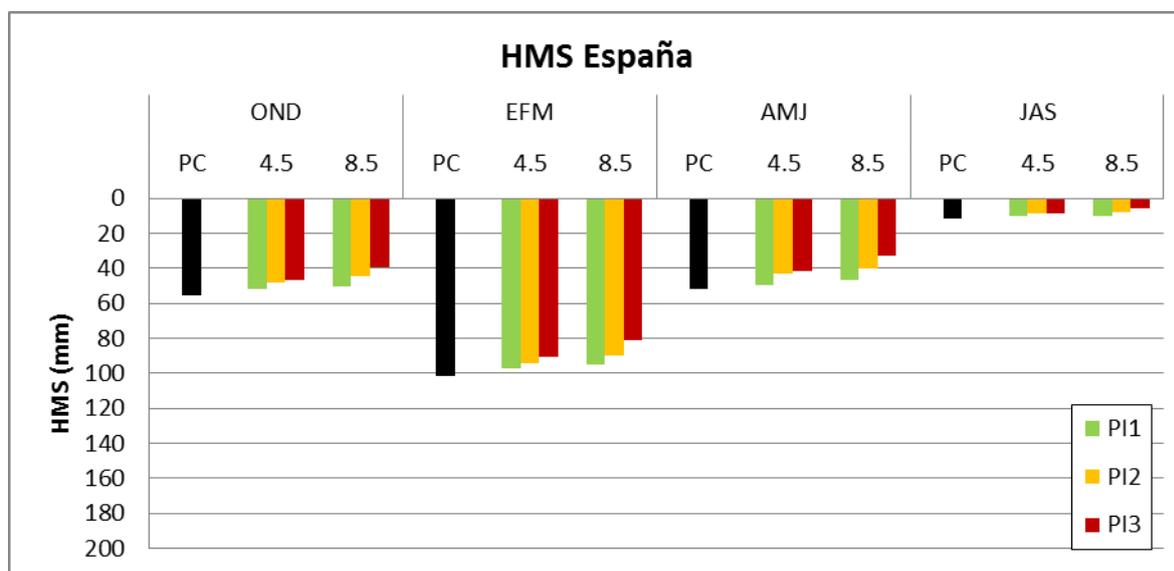


Figura 109. Valores de HMS en España por estación climática. Valores de proyecciones promediados en cada RCP y PI.

En la Tabla 18 y la Figura 110 se observa cómo las reducciones de HMR para el conjunto de España afectan más al invierno, primavera y otoño y mucho menos al verano, cuando apenas hay agua en el suelo. También se ve que las reducciones son mayores en el RCP 8.5 y conforme se avanza en el siglo XXI, siendo la diferencia entre RCP 8.5 y RCP 4.5 más notable en el PI3. La máxima reducción es del 17% y la da R8A para el invierno del PI3 y RCP 8.5.

Tabla 18.  $\Delta$  (%) HMR estacional en España para cada PI y proyección. Se indican los valores máximo (Mx), mínimo (Mn) y el promedio (Med) para cada RCP. Los colores reflejan la gradación del cambio.

HMR ESPAÑA $\Delta$ (%)		RCP 4.5									RCP 8.5								
		F4A	M4A	N4A	Q4A	R4A	U4A	Mx	Med	Mn	F8A	M8A	N8A	Q8A	R8A	U8A	Mx	Med	Mn
OND	2010-2040	-4	-1	-3	-3	-2	1	1	-2	-4	-1	0	-4	-5	-5	-1	0	-3	-5
	2040-2070	-5	-3	-3	-4	-4	-2	-2	-4	-5	-5	-5	-5	-6	-8	-5	-5	-6	-8
	2070-2100	-4	-4	-4	-3	-8	-3	-3	-4	-8	-7	-8	-5	-10	-12	-6	-5	-8	-12
EFM	2010-2040	0	-4	-6	-5	-3	6	6	-2	-6	1	-2	-7	-6	-3	-1	1	-3	-7
	2040-2070	-3	-2	-5	-4	-7	0	0	-4	-7	-4	-6	-9	-7	-11	1	1	-6	-11
	2070-2100	-3	-6	-7	-5	-11	0	0	-5	-11	-10	-9	-6	-15	-17	-3	-3	-10	-17
AMJ	2010-2040	0	0	-1	-2	-6	3	3	-1	-6	0	-4	-1	-5	-5	-2	0	-3	-5
	2040-2070	-4	-5	-2	-4	-9	-2	-2	-4	-9	-5	-8	-4	-6	-12	-1	-1	-6	-12
	2070-2100	-3	-8	-4	-4	-11	-1	-1	-5	-11	-9	-13	-5	-10	-16	-4	-4	-10	-16
JAS	2010-2040	-1	-1	0	-1	-2	0	0	-1	-2	-1	-1	0	-2	-2	-1	0	-1	-2
	2040-2070	-2	-2	-1	-2	-3	-2	-1	-2	-3	-2	-3	-1	-2	-3	-2	-1	-2	-3
	2070-2100	-2	-2	-1	-1	-3	-1	-1	-2	-3	-3	-4	-2	-3	-4	-2	-2	-3	-4

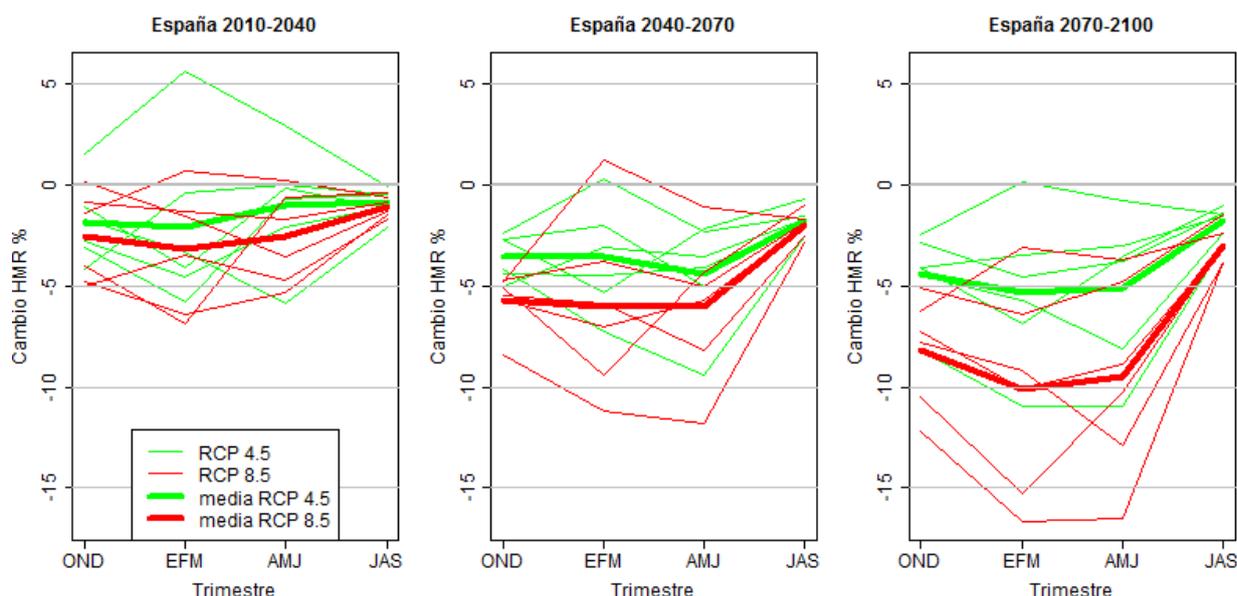


Figura 110. Cambios (%) en la estacionalidad de HMR para cada PI respecto al PC para el conjunto de España según las distintas proyecciones y sus valores medios para cada RCP.

Durante el PI1 y RCP 4.5, los cambios más reseñables se dan en las cuencas atlánticas y Pirineo (Figura 111). Los descensos mayoritarios se dan en invierno, si bien U4A da fuertes ascensos. En otoño destacan los descensos según F4A y en primavera los de R4A. Durante el verano apenas hay cambios, destacando tan sólo las reducciones de HMR del NO y de divisorias de cuencas del norte de la Península, donde hay más disponibilidad de agua. La situación es similar para el RCP 8.5, con mayor reducción en invierno y menor en verano (Figura 112).

Durante el PI2 y RCP 4.5, las mayores reducciones en las cuencas atlánticas se dan en invierno (N4A, Q4A), primavera (M4A, R4A) y otoño (F4A), y las mayores reducciones se dan en verano en las zonas con disponibilidad de agua en esa estación: Galicia y divisorias de cuencas (Figura 113). La situación es similar para el RCP 8.5, con la



mayor reducción en primavera según F8A y en otoño según U8A. Destaca el incremento en invierno según U8A (Figura 114).

Durante el PI3 y RCP 4.5, de manera similar al PI anterior, las mayores reducciones en las cuencas atlánticas se dan en invierno (N4A, Q4A), primavera (M4A, R4A) y otoño (F4A), y las mayores reducciones se dan en verano en Galicia y divisorias de cuencas (Figura 115). Finalmente, para el RCP 8.5 la reducción es ya muy notoria en toda España, salvo Levante y archipiélagos, en invierno, primavera y otoño (Figura 116). En verano la reducción afecta a Galicia y divisorias de cuencas según todas las proyecciones.

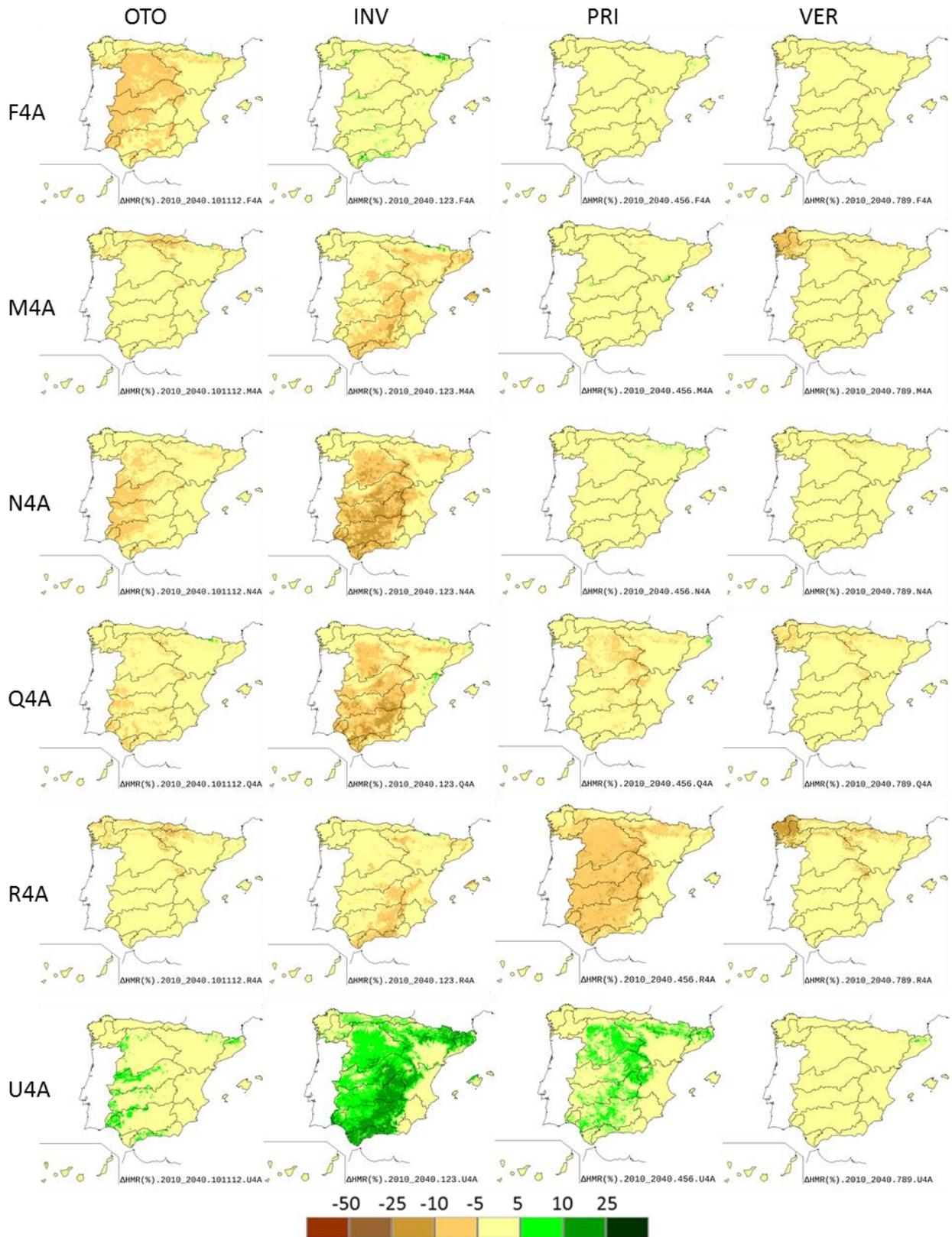


Figura 111.  $\Delta$  (%) HMR estacional para 2010-2040 RCP 4.5

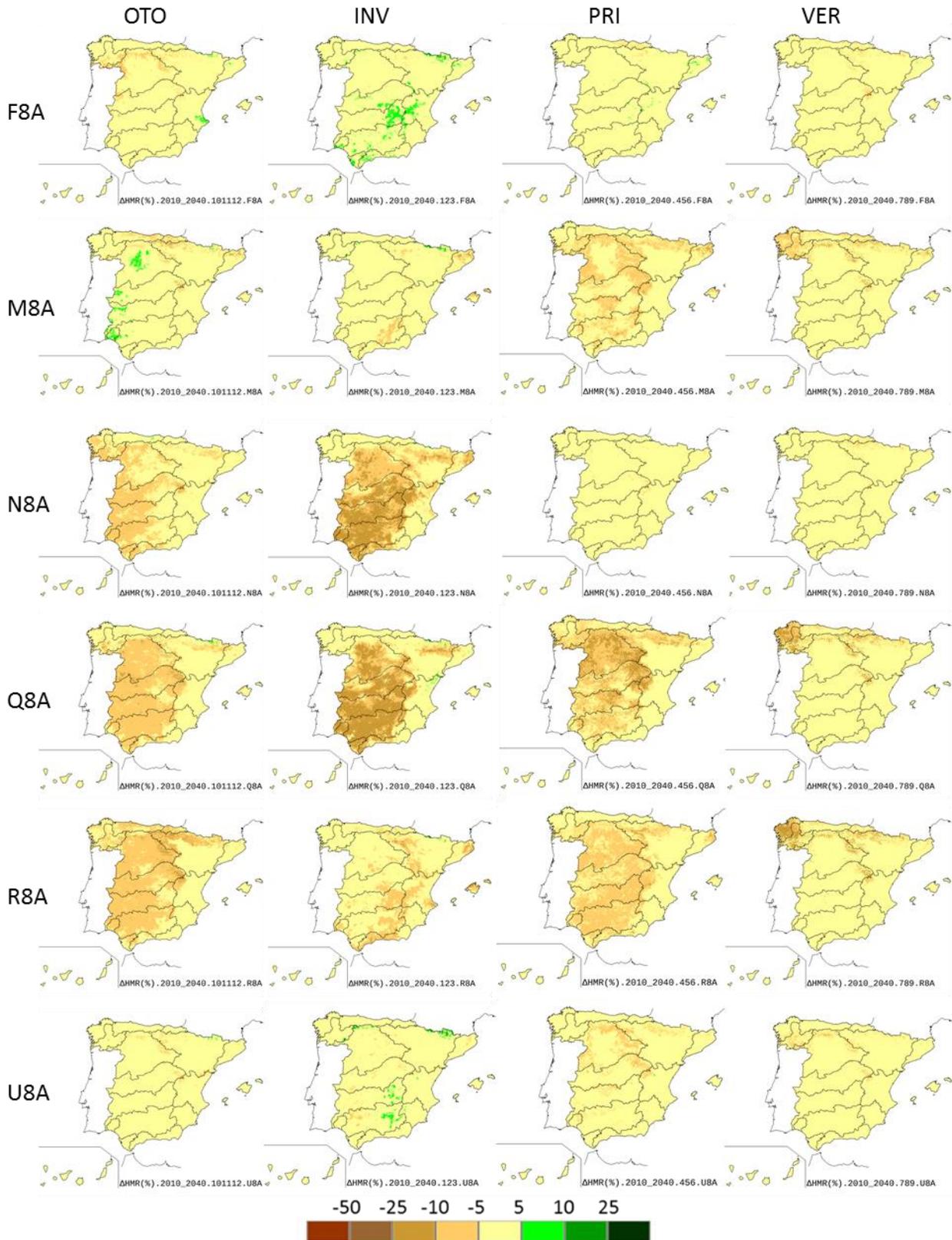


Figura 112.  $\Delta$  (%) HMR estacional para 2010-2040 RCP 8.5

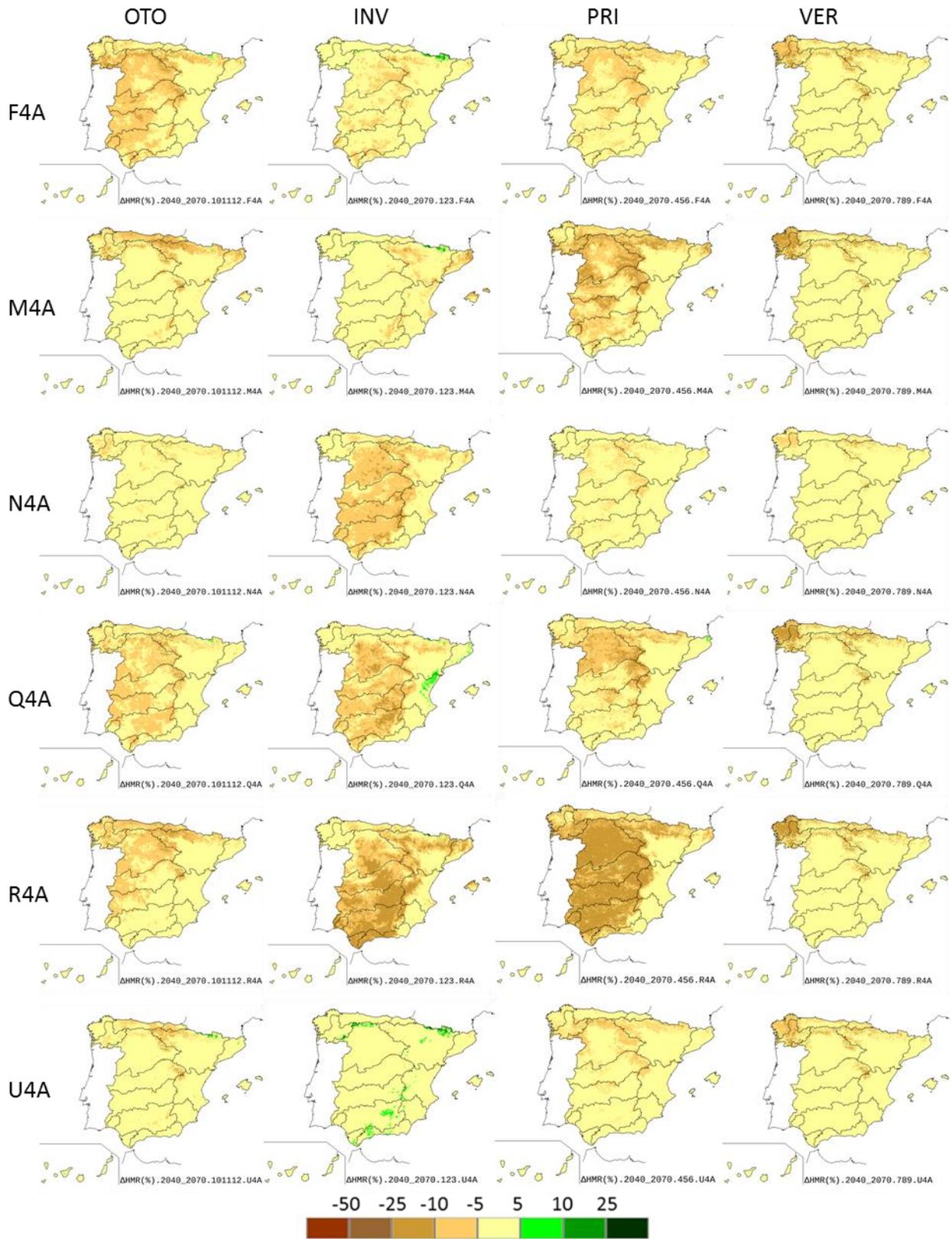


Figura 113.  $\Delta$  (%) HMR estacional para 2040-2070 RCP 4.5

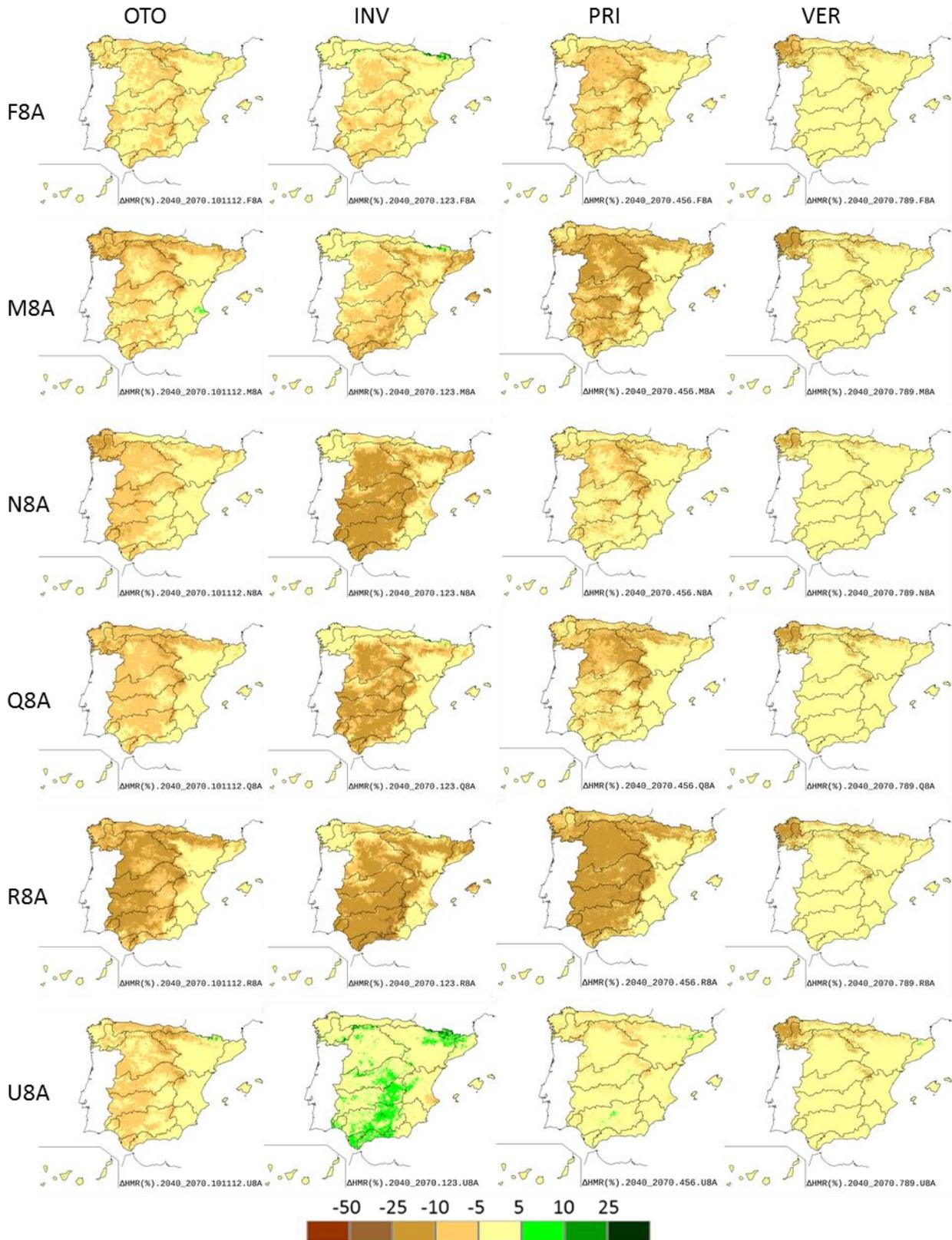


Figura 114.  $\Delta$  (%) HMR estacional para 2040-2070 RCP 8.5

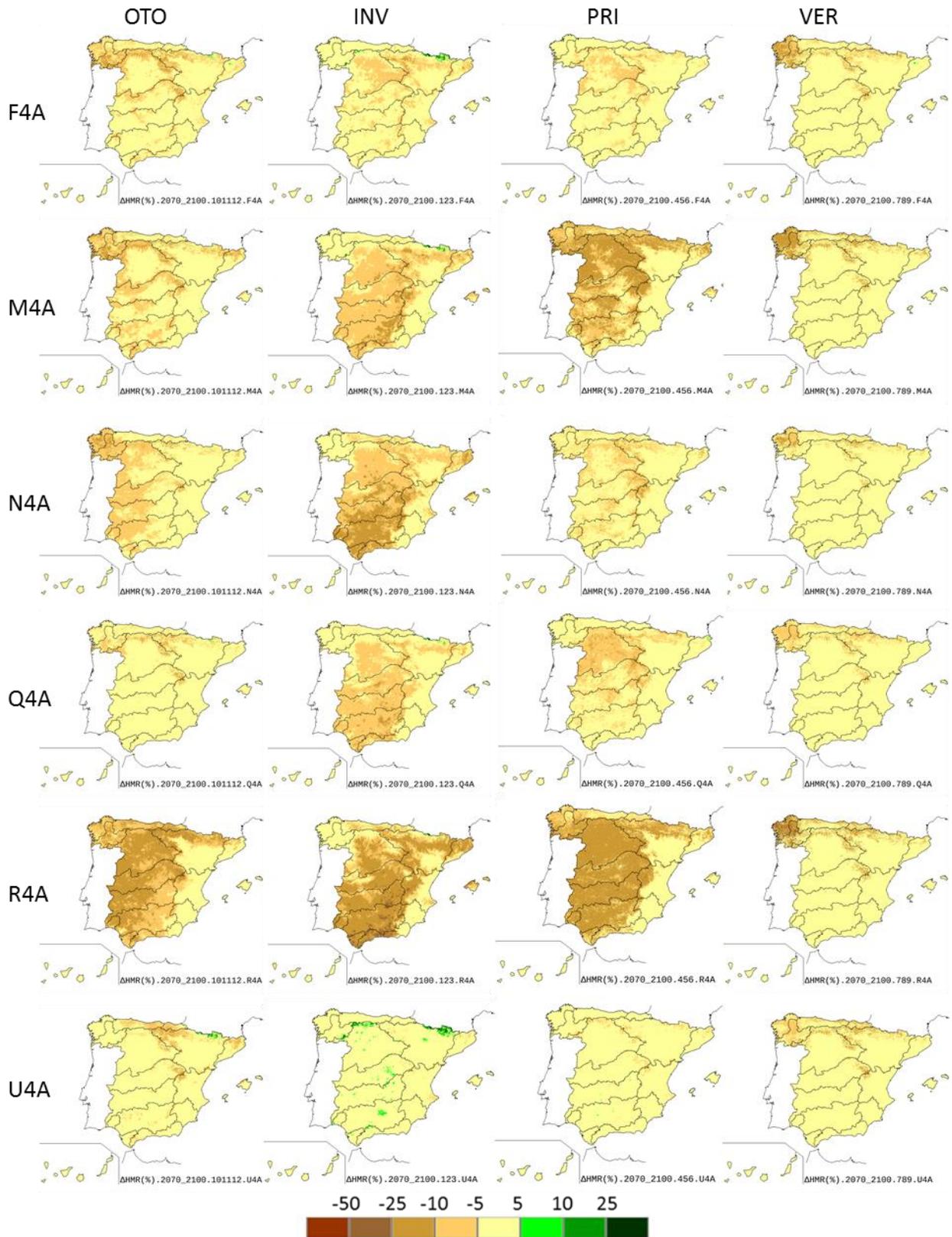


Figura 115.  $\Delta$  (%) HMR estacional para 2070-2100 RCP 4.5

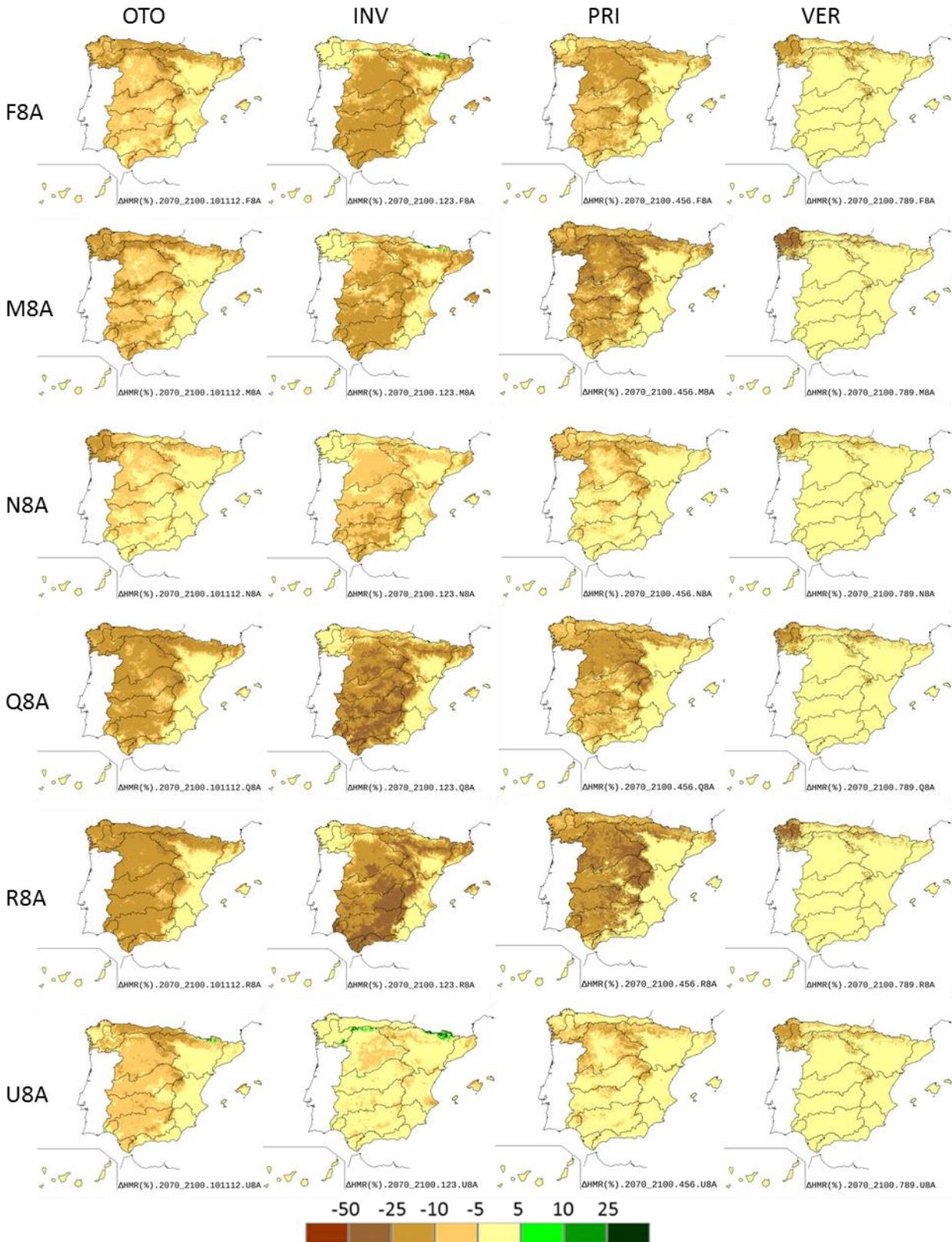


Figura 116.  $\Delta$  (%) HMR estacional para 2070-2100 RCP 8.5



## 7.4 RECARGA SUBTERRÁNEA

Tal como se comentó en el capítulo 7.1.1, el modelo hidrológico calcula la recarga de los acuíferos (REC) en función del agua de lluvia que no cabe en el suelo y del parámetro  $I_{max}$ , o capacidad máxima de infiltración al mes. En definitiva, la REC en un mes es directamente proporcional a la PRE de ese mes y al parámetro  $I_{max}$ , que se ha supuesto invariable en el tiempo. Además, la REC está inversamente relacionada con la ETP. Las variaciones de la REC se deben pues a las de PRE y, en menor medida, a las de ETP.

La necesidad de simplificar procesos tan complejos como son la infiltración y la REC subterránea lleva asociadas una serie incertidumbres en aquellos resultados expresados como valores absolutos. No obstante, los resultados expresados como tendencias o como cambios en periodos de impacto contrarrestan esas limitaciones, rebajando el grado de incertidumbre.

### 7.4.1 Cambios anuales para el conjunto de España

Hay una tendencia decreciente en la REC anual estimada para el conjunto de España durante el periodo 2010-2100 según todas las proyecciones y en ambos RCP (Figura 117), siendo más acusado ese descenso en la pendiente media del RCP 8.5 (-0.28 %) que en la del RCP 4.5 (-0.14 %).

Se observan disparidades entre las diferentes proyecciones tal como indica la anchura de la banda de cambios. Las pendientes medias para todo el periodo dan siempre valores negativos que oscilan entre -0.07 % (N8A) y -0.48 % (R8A). La tendencia decreciente es sólo estadísticamente significativa (nivel de significación del 5%) para la proyección R4A del RCP 4.5. siendo ésta la que más determina la tendencia decreciente significativa del promedio para RCP 4.5. Por su parte, la tendencia decreciente es estadísticamente significativa para cuatro del RCP 8.5 (F8A, M8A, Q8A y R8A) (ver anexo 1).

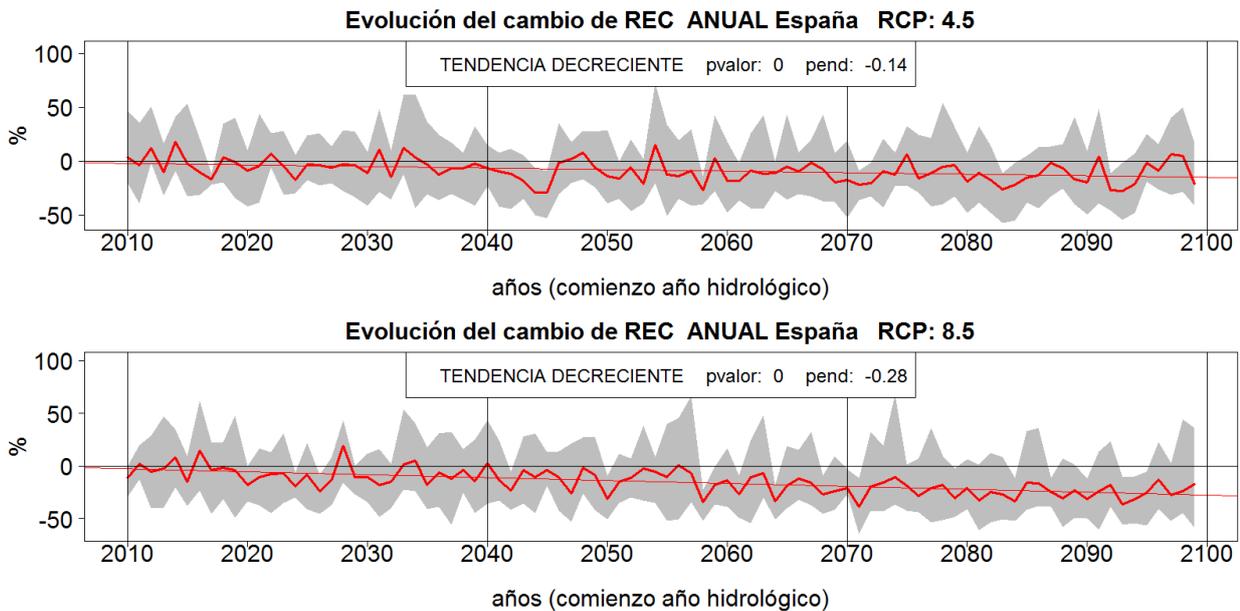


Figura 117. Tendencia del  $\Delta$  (%) REC del año 2010 al 2099 para los RCP 4.5 (arriba) y 8.5 (abajo) para el conjunto de España. La banda gris indica el rango de resultados de las proyecciones. La línea gruesa indica su promedio y la recta delgada su pendiente. Se indica su p-valor según el test de Mann Kendall; negra: sin tendencia, roja: decreciente, azul: creciente.

En la Tabla 19 se muestran los cambios de REC en cada PI para el conjunto de España con relación a los valores medios del PC. Las variaciones de REC informan sobre las variaciones en los recursos subterráneos, habida cuenta de que aquella se promedia sobre un periodo temporal de 30 años. Los cambios de REC para cada uno de los tres PI muestran claramente la disparidad de resultados de cada proyección y como la REC va disminuyendo, en general, del PI1 al PI2 y PI3 y del RCP 4.5 al RCP 8.5 (Tabla 19 y Figura 118 izquierda). Así por ejemplo, el rango de cambios de la REC para el periodo 2010-2040 va del +15% (U4A) al -13% (Q8A) y para el periodo 2070-2100 va del +1% (U4A) al -40% (R8A). La proyección RA es la que suele dar las mayores disminuciones y la UA los mayores aumentos o menores descensos. Promediando los resultados de las proyecciones, se estiman siempre descensos de REC, superiores en RCP 8.5 que en RCP 4.5 y superiores cuando más avanza el siglo XXI. La diferencia entre ambos RCP se hace muy patente para finales del siglo XXI. Los cambios medios para los RCP 4.5 y 8.5 son, respectivamente, del -3% y -7% para 2010-2040, -11% y -14% para 2040-2070 y -13% y -24% para 2070-2100.

Tabla 19.  $\Delta$  (%) REC en cada PI según cada proyección para el conjunto de España. Se indican los valores máximo (Mx), mínimo (Mn) y el promedio (Med) para cada RCP. Los colores reflejan la gradación del cambio.

REC ESPAÑA $\Delta$ Anual (%)	RCP 4.5									RCP 8.5								
	F4A	M4A	N4A	Q4A	R4A	U4A	Mx	Med	Mn	F8A	M8A	N8A	Q8A	R8A	U8A	Mx	Med	Mn
2010-2040	0	-4	-8	-7	-13	15	15	-3	-13	1	-7	-10	-13	-12	-2	1	-7	-13
2040-2070	-9	-9	-10	-12	-22	-2	-2	-11	-22	-9	-18	-18	-15	-28	4	4	-14	-28
2070-2100	-6	-17	-16	-10	-28	1	1	-13	-28	-22	-28	-16	-32	-40	-6	-6	-24	-40

Los cambios de la variabilidad de REC anual para España en cada PI se muestran de manera gráfica en la Figura 118 derecha. La proyección RA da, de manera destacada, los mayores descensos de variabilidad de REC anual, disminuyendo del PI1 al PI2 y PI3. El resto de proyecciones muestran mayor irregularidad y tienden a aumentar la variabilidad de los valores anuales de REC durante el siglo XXI con relación al PC.

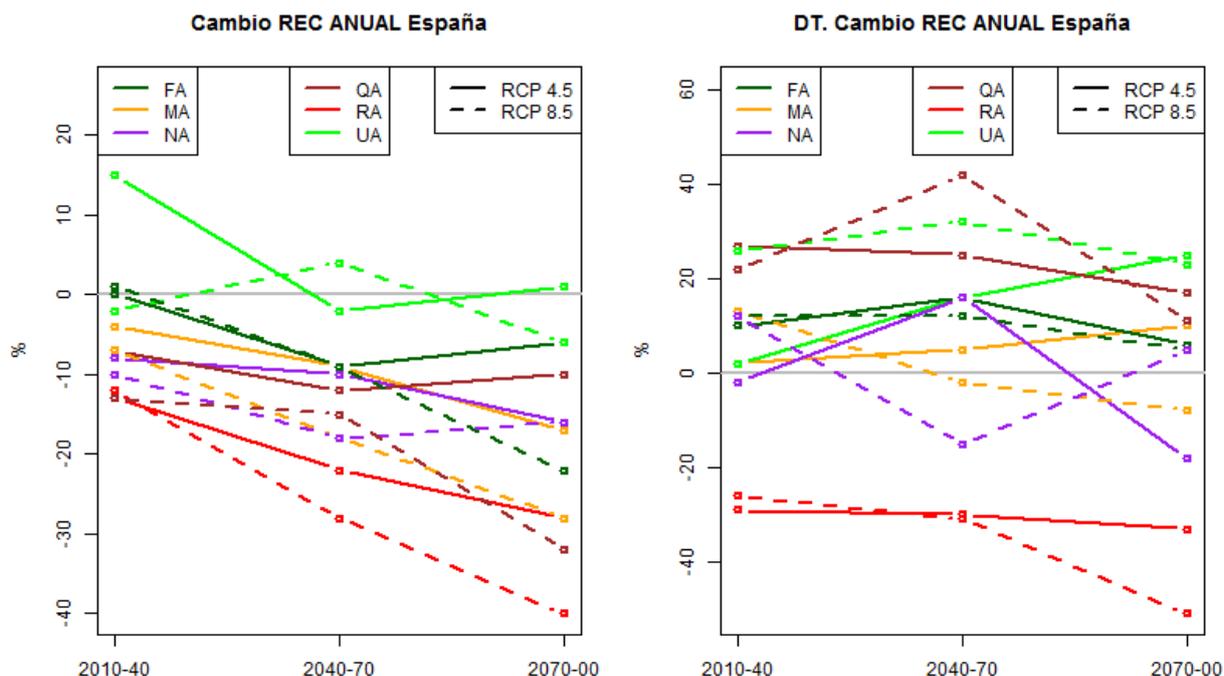


Figura 118.  $\Delta$  (%) REC en cada PI. Izquierda: valores medios anuales. Derecha: DT de los valores anuales.

A grandes rasgos, los cambios en la REC anual en España siguen unas pautas similares a las de la PRE, aunque más acentuadas; un descenso porcentual en la PRE se traduce en un mayor descenso en la REC.

#### 7.4.2 Distribución espacial de los cambios anuales

La distribución espacial de los cambios de la REC anual se muestra en los mapas de la Figura 119 a Figura 124. En blanco aparecen aquellas celdas en las que no se han identificado masas de agua subterráneas.

Por otro lado, es necesario precisar que los mapas no dan una perspectiva clara en aquellas celdas con valores de REC bajos en los que pequeñas variaciones de REC se hacen porcentualmente importantes. Para evitar en lo posible este efecto, no se han representado cambios en celdas con REC inferior a 1 mm/año en el PC o en cualquiera de los PI. Este hecho explica que pueda haber en algunos casos notables diferencias entre proyecciones en zonas de baja REC. Esto ocurre en los valles de las grandes cuencas, así como en el centro y sureste de la Península.



Para el periodo 2010-2040 hay grandes diferencias en los cambios de la REC anual según la proyección climática, sobre todo en zonas con baja PRE y por tanto baja REC (Figura 119 y Figura 120). La mayoría dan descensos, tal como R4A, N4A y Q4A que dan descensos hacia el oeste peninsular y R4A en Galicia y Cantábrico. La proyección U4A da notables aumentos generalizados, más patentes en la mitad occidental y Pirineos, y con reducciones muy localizadas en el SE. La proyección F4A da aumentos más tenues y menos extendidos, con descensos sólo en el SE peninsular y este de los archipiélagos. Para el RCP 8.5, las diferencias más reseñables con el RCP 4.5 las dan la proyección F8A, que muestra aumentos de REC más acusados y generalizados, salvo en el Cantábrico oriental, y la proyección U8A, con una notoria reducción del área y la intensidad en la que se estima un incremento de REC.

El patrón de cambio es similar en el PI2 en líneas generales, pero acentuándose las reducciones de REC (Figura 121 y Figura 122). Dichas reducciones son claras en el norte de España y en gran parte de las proyecciones. Se reducen además las zonas con aumento de REC de las proyecciones UA y FA. La excepción la supone la proyección U8A, que muestra un incremento de REC superior en extensión e intensidad a la del periodo anterior y a la del RCP 4.5.

La reducción de la REC es más intensa en el PI3 que en el periodo anterior, estando muy marcada en el RCP 8.5 (Figura 123 y Figura 124). Las reducciones de REC son mayoritarias en casi todas las proyecciones y sobrepasan el 50% en amplias zonas. Las proyecciones U4A y U8A siguen dando aumentos por el centro de las cuencas occidentales y zonas pirenaicas, F4A da aumentos en zonas aisladas del interior peninsular mientras que el resto de proyecciones restringen los aumentos a zonas del Levante.

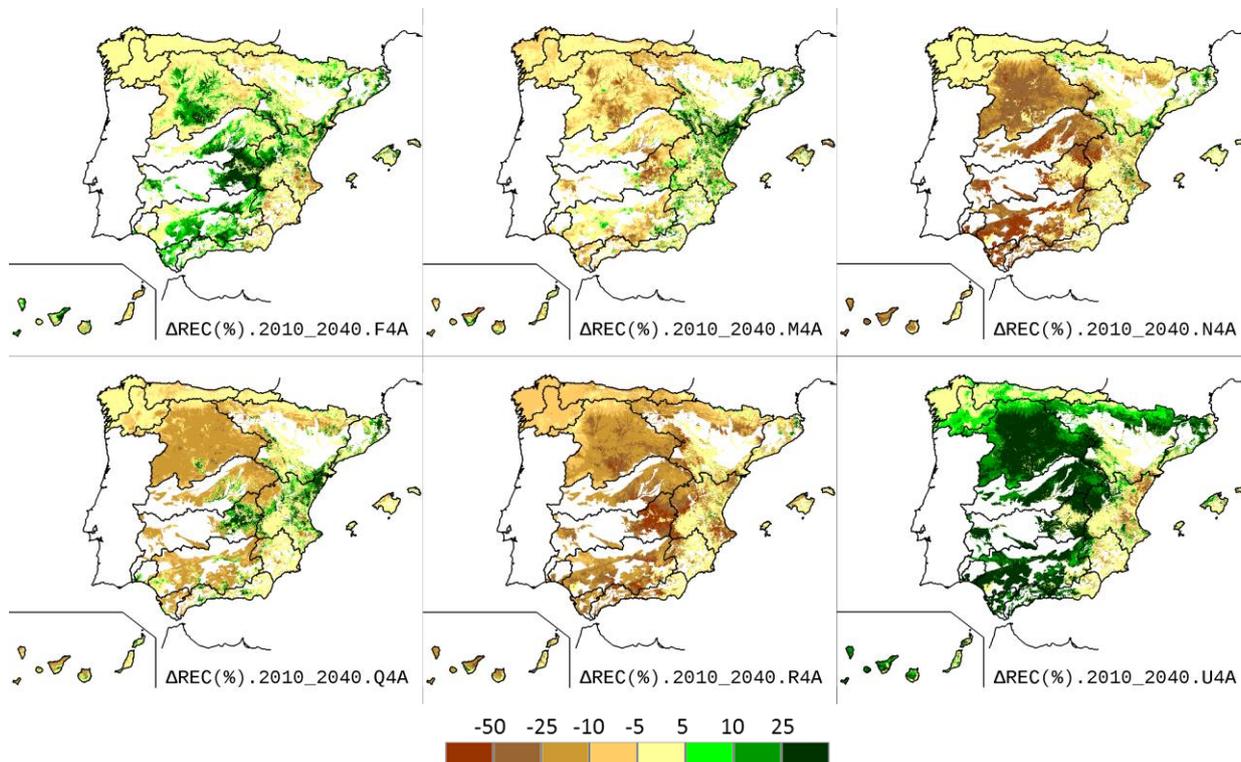


Figura 119.  $\Delta$  (%) REC anual para 2010-2040 según las proyecciones RCP 4.5.

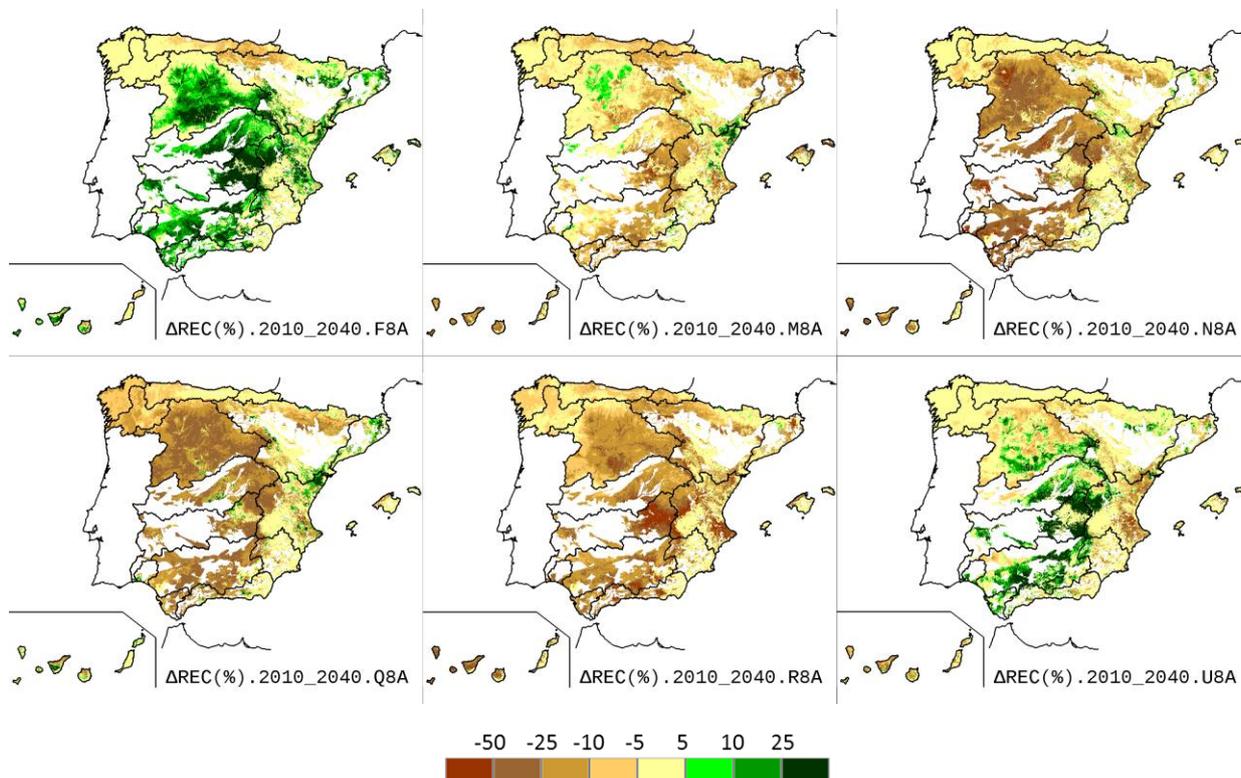


Figura 120.  $\Delta$  (%) REC anual para 2010-2040 según las proyecciones RCP 8.5.

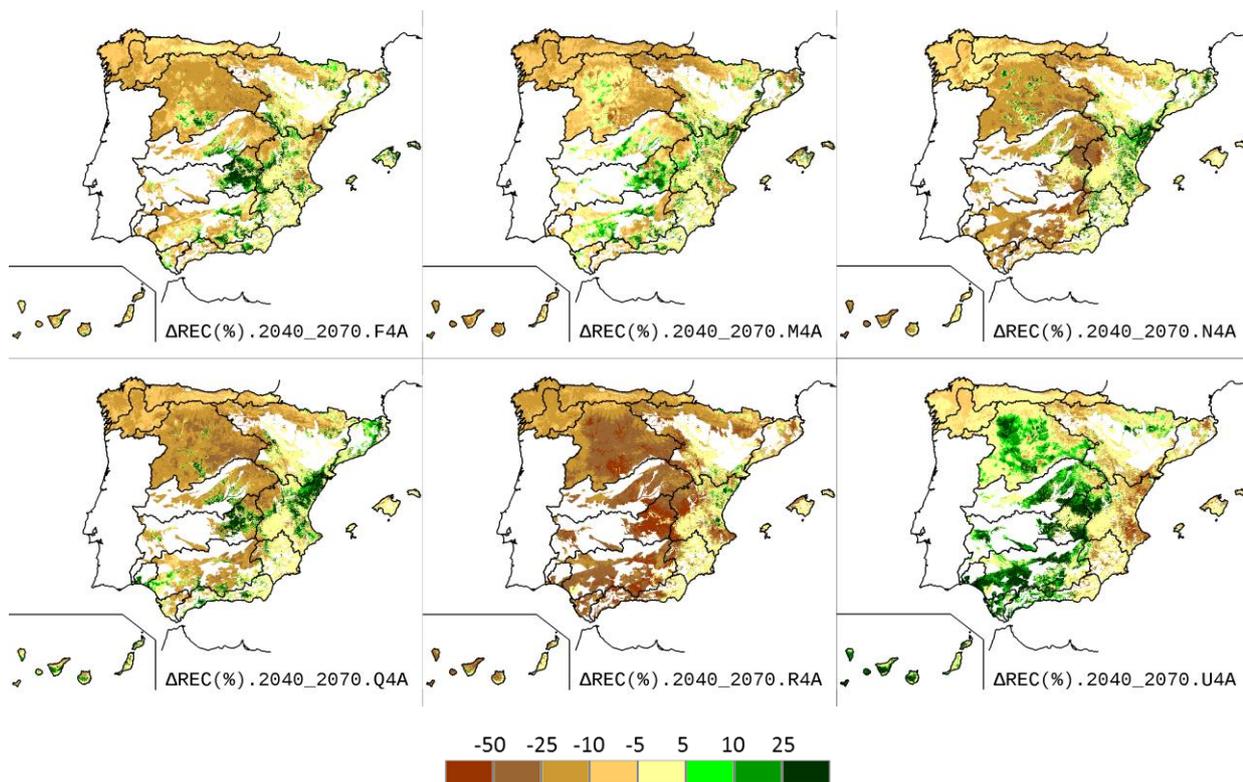


Figura 121.  $\Delta$  (%) REC anual para 2040-2070 según las proyecciones RCP 4.5.

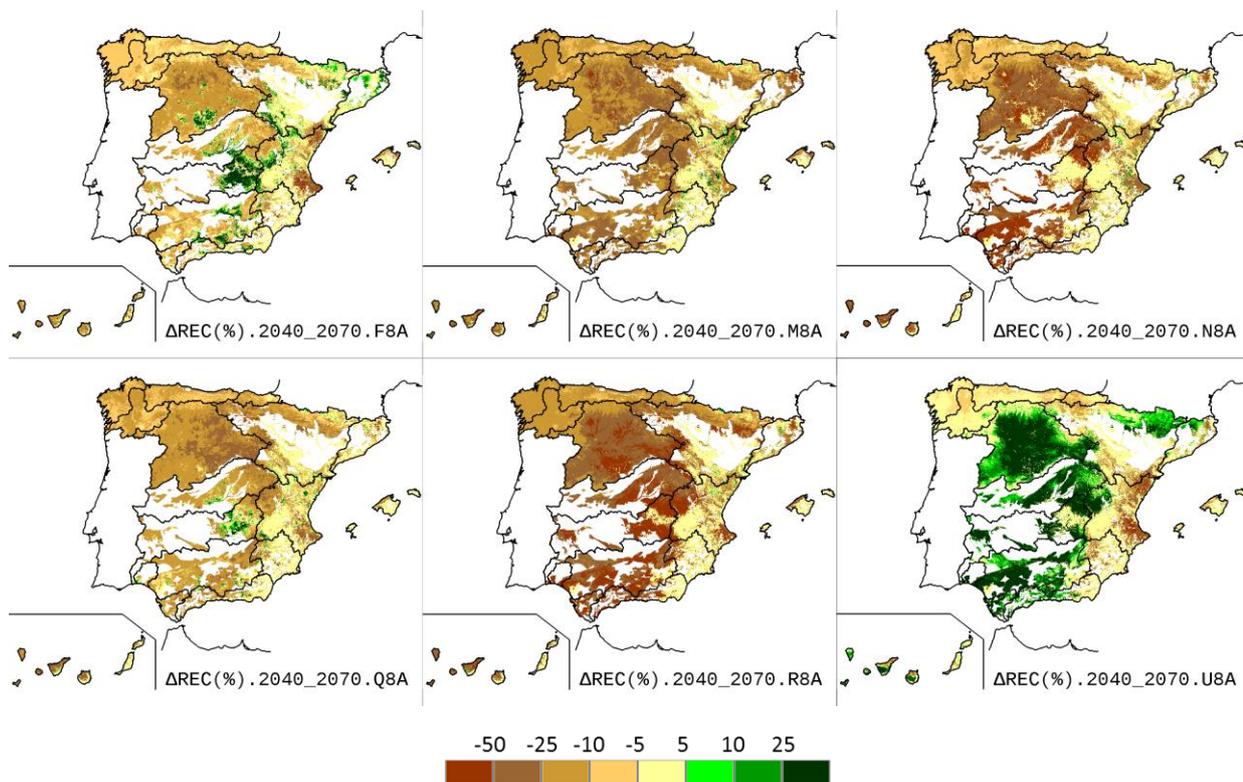


Figura 122.  $\Delta$  (%) REC anual para 2040-2070 según las proyecciones RCP 8.5.

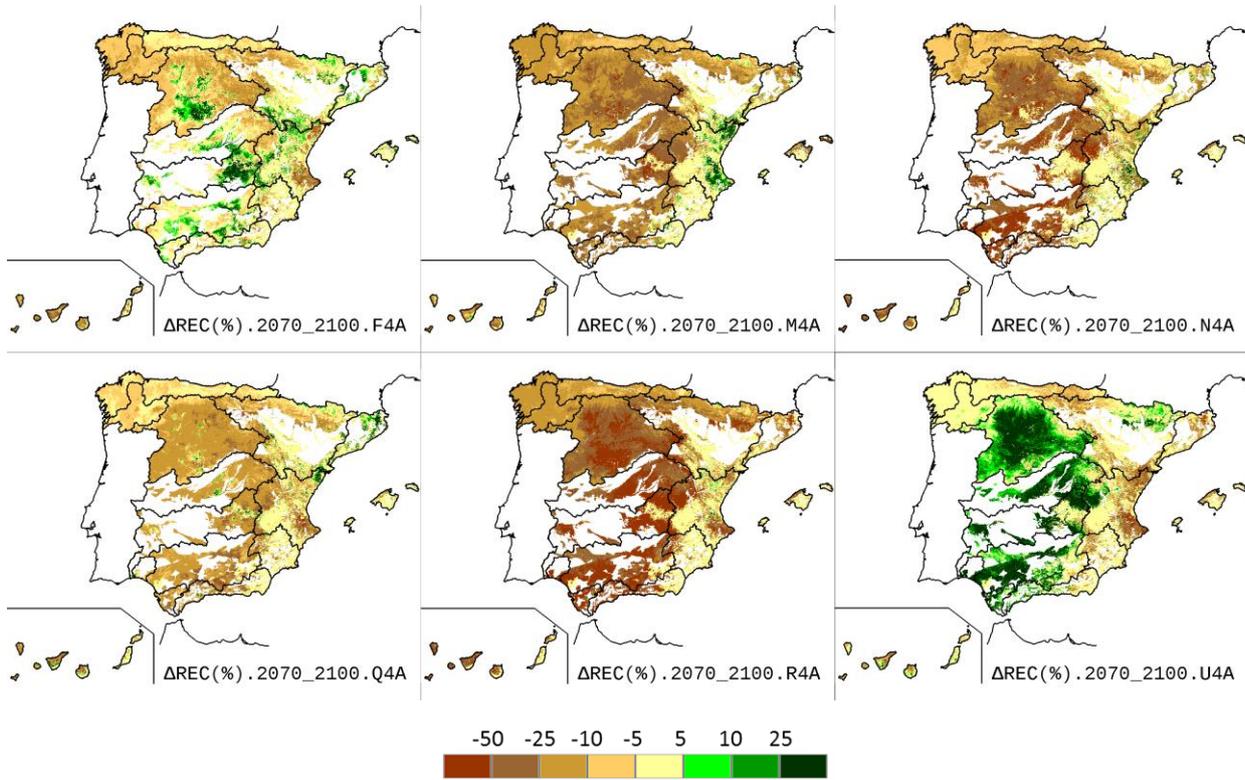


Figura 123.  $\Delta$  (%) REC anual para 2070-2100 según las proyecciones RCP 4.5.

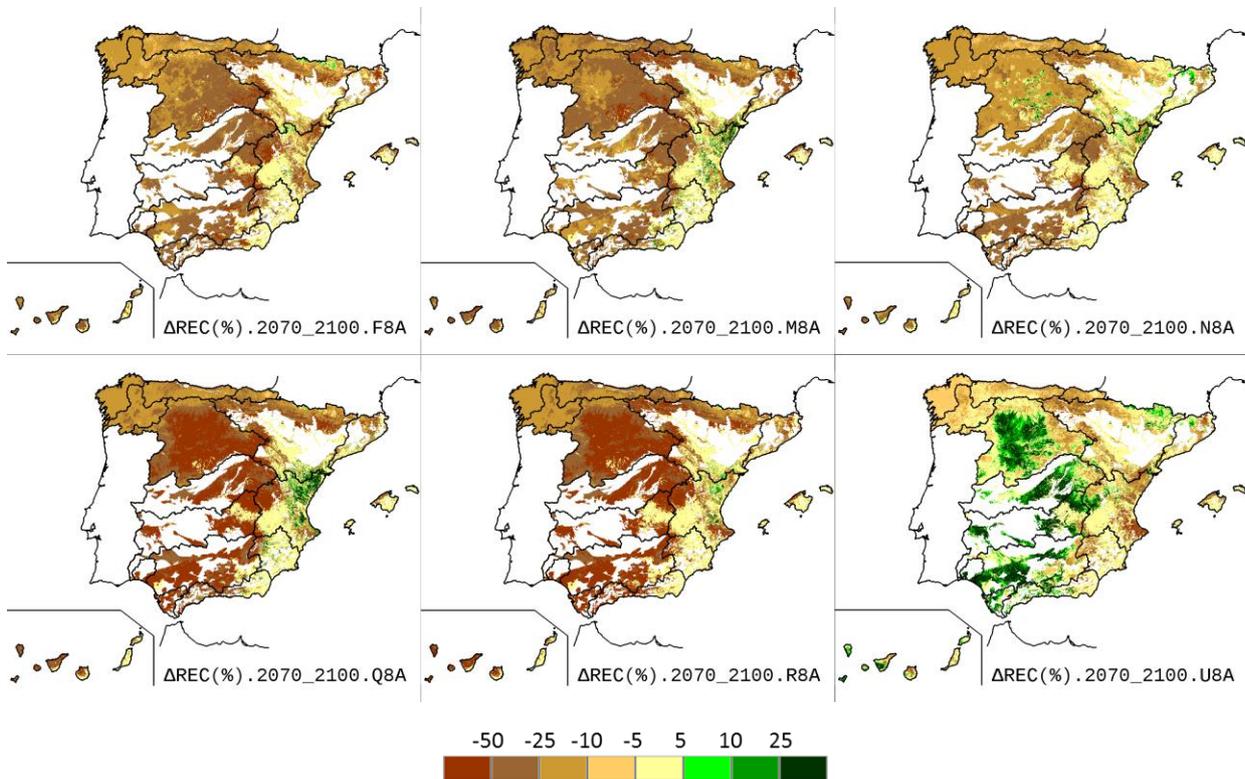


Figura 124.  $\Delta$  (%) REC anual para 2070-2100 según las proyecciones RCP 8.5.



Las tendencias de la REC anual de las DDHH durante el siglo XXI se muestran en el anexo 2. Al igual que pasa para el conjunto de España, la banda de variación de cambios es amplia, síntoma de la incertidumbre. El promedio de las proyecciones para cada DH y RCP da tendencias decrecientes significativas en todos los casos. La pendiente de ese promedio de cambios es mayor en el RCP 8.5 que en el RCP 4.5, indicando un mayor descenso de REC cuando se considera el RCP 8.5. Además, la pendiente va aumentando hacia el sur y hacia Levante. La proyección RA da siempre tendencias decrecientes significativas y las pendientes negativas más acusadas. Todas las DDHH desde Miño-Sil hacia el sur muestran las mismas tendencias para todas las proyecciones y son las que determinan la general para España: tendencia decreciente estadísticamente significativa para la proyección R4A del RCP 4.5 y para cuatro del RCP 8.5 (F8A, M8A, Q8A y R8A). Los resultados de las tendencias para las DDHH del norte, Levante y Archipiélagos difieren algo del comportamiento general; así, por ejemplo, casi todas las proyecciones, salvo Q4A y U4A, dan tendencias decrecientes significativas en Galicia-Costa.

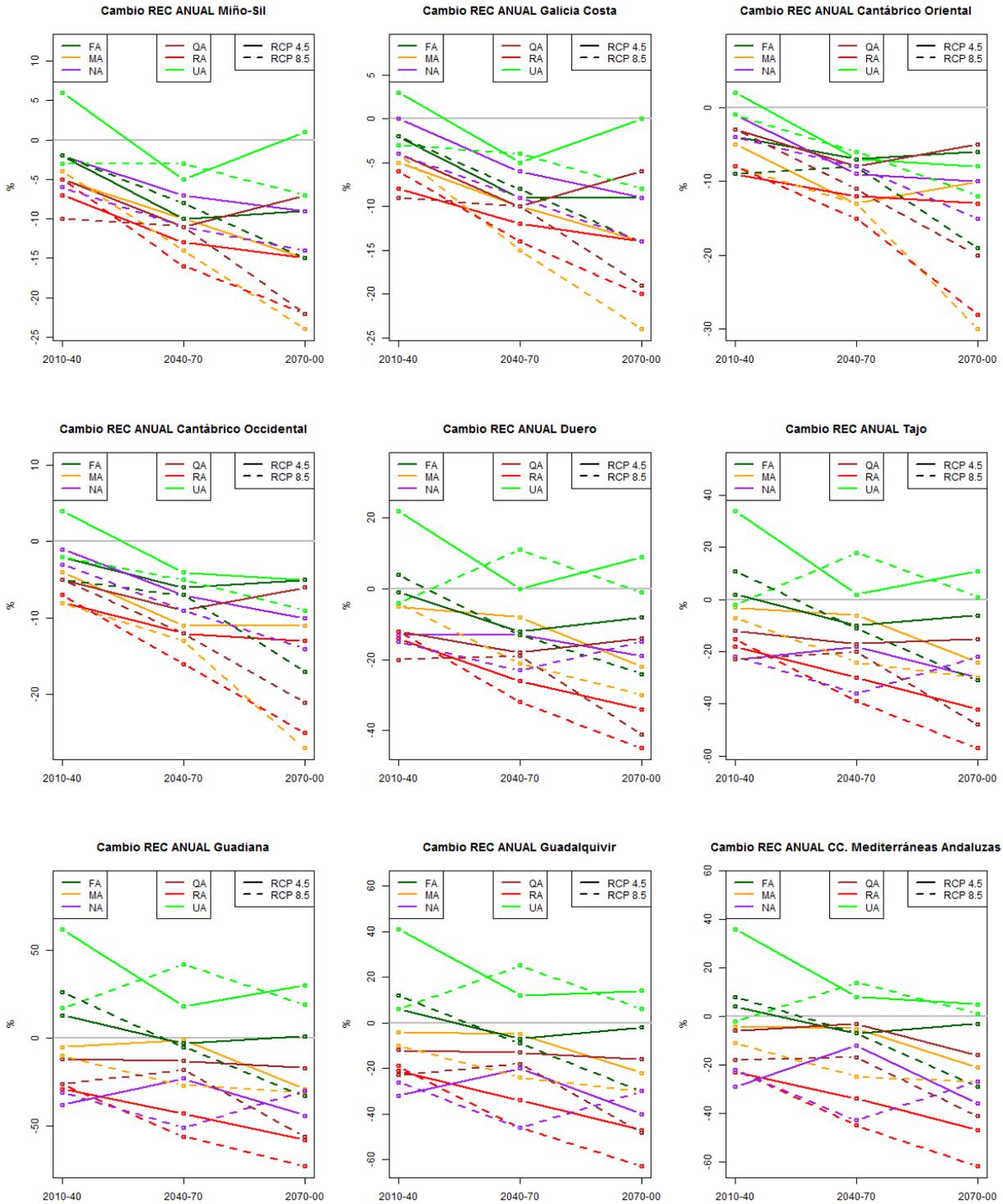
Los cambios de REC para cada uno de los tres PI en cada DH varían según la proyección (Tabla 20 y Figura 125). El rango de variación es mayor en las DDHH del sur de la Península, y está motivado por los fuertes incrementos estimados por las proyecciones UA frente a los fuertes descensos estimados por las proyecciones RA y N4A. Así, para la DH de Tinto, Odiel y Piedras, el rango de los cambios de REC para el PI1 y RCP 4.5 oscila entre el +69% (U4A) al -39% (N4A)

Con relación al promedio de cambios de las proyecciones, hay un descenso general de la REC. Este descenso es más acusado en el RCP 8.5 que en el RCP 4.5 y aumenta del PI1 al PI2 y de éste al PI3. El descenso es también más acusado hacia el sur peninsular, con los menores descensos en las CCII de Cataluña y los mayores en las islas. Así, para el PI1 y RCP 4.5, muchas DDHH tienen valores entre 0 y -4%, Segura, Baleares y Canarias tienen reducciones un poco mayores, alrededor del -7%, mientras que se estima un incremento de la REC en las CCII de Cataluña (+5%). Para el escenario RCP 8.5, se estiman cambios entre -4% y -6% en las DDHH del norte, entre -8% y -11% hacia el sur y sobre -15% en Baleares y Canarias. Para el PI2, los descensos para el RCP 4.5 oscilan entre el -7% y el -13%, siendo el descenso más bajo en las CCII de Cataluña con un -4%. Para el RCP 8.5, los cambios son del -6% en las CCII de Cataluña, rondan el -10% en el norte, -16% en el Duero, -19 % a -20% hacia el sur, -23% en las DDHH del Júcar y Segura, -28% en Baleares y -24% en Canarias. Para el PI3, los descensos de REC para el RCP 4.5 son similares en el norte de España (entre el -7 y -10%), pero son mayores en el resto (entre -15% y -20%) y sobre todo en Baleares y Canarias (-22% y -23% respectivamente). Finalmente, para el RCP 8.5, los cambios van del -16% al -22% en las DDHH del norte (incluyendo Ebro y CCII de Cataluña), -26% en el Duero, entre -29% y -36% en resto peninsular y Canarias y -39% en Baleares.



Tabla 20. Δ (%) REC en cada DH y PI según cada proyección. Se indican los valores máximo (Mx), mínimo (Mn) y el promedio (Med) para cada RCP. Los colores reflejan la gradación del cambio.

REC Δ Anual (%)		RCP 4.5									RCP 8.5								
		F4A	M4A	N4A	Q4A	R4A	U4A	Mx	Med	Mn	F8A	M8A	N8A	Q8A	R8A	U8A	Mx	Med	Mn
Miño-Sil	2010-2040	-2	-5	-2	-5	-7	6	6	-2	-7	-2	-4	-6	-10	-5	-3	-2	-5	-10
	2040-2070	-10	-10	-7	-11	-13	-5	-5	-9	-13	-8	-14	-11	-11	-16	-3	-3	-10	-16
	2070-2100	-9	-15	-9	-7	-15	1	1	-9	-15	-15	-24	-14	-22	-22	-7	-7	-17	-24
Galicia Costa	2010-2040	-2	-5	0	-4	-8	3	3	-3	-8	-2	-4	-4	-9	-6	-3	-2	-5	-9
	2040-2070	-9	-10	-6	-10	-12	-5	-5	-9	-12	-8	-15	-9	-10	-14	-4	-4	-10	-15
	2070-2100	-9	-14	-9	-6	-14	0	0	-9	-14	-14	-24	-14	-19	-20	-8	-8	-17	-24
Cantábrico Oriental	2010-2040	-4	-5	-1	-3	-9	2	2	-3	-9	-9	-8	-4	-3	-8	-1	-1	-6	-9
	2040-2070	-7	-13	-9	-8	-12	-7	-7	-9	-13	-8	-13	-8	-11	-15	-6	-6	-10	-15
	2070-2100	-6	-10	-10	-5	-13	-8	-5	-9	-13	-19	-30	-15	-20	-28	-12	-12	-21	-30
Cantábrico Occidental	2010-2040	-2	-4	-1	-5	-8	4	4	-3	-8	-5	-8	-3	-5	-7	-2	-2	-5	-8
	2040-2070	-6	-11	-7	-9	-12	-4	-4	-8	-12	-7	-13	-9	-12	-16	-5	-5	-10	-16
	2070-2100	-5	-11	-10	-6	-13	-5	-5	-8	-13	-17	-27	-14	-21	-25	-9	-9	-19	-27
Duero	2010-2040	-1	-5	-13	-12	-14	22	22	-4	-14	4	-4	-15	-20	-12	-4	4	-9	-20
	2040-2070	-12	-8	-13	-18	-26	0	0	-13	-26	-13	-21	-23	-19	-32	11	11	-16	-32
	2070-2100	-8	-22	-19	-14	-34	9	9	-15	-34	-24	-30	-15	-41	-45	-1	-1	-26	-45
Tajo	2010-2040	2	-3	-23	-12	-18	34	34	-4	-23	11	-7	-22	-23	-15	-2	11	-10	-23
	2040-2070	-10	-6	-18	-17	-30	2	2	-13	-30	-11	-24	-36	-20	-39	18	18	-19	-39
	2070-2100	-6	-24	-30	-15	-42	11	11	-18	-42	-31	-30	-22	-48	-57	1	1	-31	-57
Guadiana	2010-2040	13	-5	-38	-12	-29	63	63	-1	-38	26	-10	-31	-26	-26	17	26	-8	-31
	2040-2070	-3	-1	-23	-13	-43	18	18	-11	-43	-5	-27	-51	-18	-56	42	42	-19	-56
	2070-2100	1	-29	-44	-17	-58	30	30	-20	-58	-33	-31	-30	-56	-73	19	19	-34	-73
Guadalquivir	2010-2040	6	-4	-32	-12	-21	41	41	-4	-32	12	-10	-26	-23	-19	6	12	-10	-26
	2040-2070	-7	-5	-20	-13	-34	12	12	-11	-34	-9	-24	-46	-18	-46	25	25	-20	-46
	2070-2100	-2	-22	-40	-16	-47	14	14	-19	-47	-30	-30	-30	-48	-63	6	6	-33	-63
Cuencas Mediterráneas Andaluzas	2010-2040	4	-4	-29	-6	-23	36	36	-4	-29	8	-11	-22	-18	-22	-2	8	-11	-22
	2040-2070	-7	-5	-12	-3	-34	8	8	-9	-34	-7	-25	-43	-17	-45	14	14	-20	-45
	2070-2100	-3	-21	-36	-16	-47	5	5	-20	-47	-29	-27	-27	-41	-62	1	1	-31	-62
Guadalete y Barbate	2010-2040	7	-6	-32	-12	-21	40	40	-4	-32	10	-11	-27	-21	-19	3	10	-11	-27
	2040-2070	-7	-5	-18	-11	-34	11	11	-11	-34	-9	-26	-46	-19	-43	23	23	-20	-46
	2070-2100	-1	-24	-39	-15	-47	12	12	-19	-47	-29	-30	-28	-47	-62	4	4	-32	-62
Tinto, Odiel y Piedras	2010-2040	-1	-2	-39	-5	-22	69	69	0	-39	14	-4	-39	-12	-25	4	14	-10	-39
	2040-2070	-12	-7	-17	2	-38	27	27	-7	-38	-16	-30	-56	-12	-50	42	42	-20	-56
	2070-2100	-5	-24	-47	-9	-53	33	33	-18	-53	-27	-24	-35	-49	-68	28	28	-29	-68
Segura	2010-2040	3	-4	-18	-13	-21	14	14	-7	-21	9	-13	-18	-22	-20	5	9	-10	-22
	2040-2070	-2	-9	-10	-17	-30	-2	-2	-12	-30	-12	-19	-35	-23	-46	-5	-5	-23	-46
	2070-2100	-6	-19	-27	-17	-41	-8	-6	-20	-41	-35	-31	-31	-43	-61	-17	-17	-36	-61
Júcar	2010-2040	3	1	-15	-6	-24	18	18	-4	-24	11	-11	-18	-19	-24	-4	11	-11	-24
	2040-2070	-8	-6	-7	-11	-32	-9	-6	-12	-32	-14	-21	-32	-20	-47	-9	-9	-24	-47
	2070-2100	-8	-16	-25	-17	-43	-11	-8	-20	-43	-35	-28	-24	-40	-58	-20	-20	-34	-58
Ebro	2010-2040	-1	-4	-2	-5	-10	12	12	-2	-10	-3	-8	-6	-8	-9	-3	-3	-6	-9
	2040-2070	-8	-11	-8	-10	-16	-5	-5	-10	-16	-7	-16	-12	-13	-21	1	1	-11	-21
	2070-2100	-6	-13	-11	-8	-21	-3	-3	-10	-21	-21	-29	-13	-28	-34	-9	-9	-22	-34
Cuencas Internas de Cataluña	2010-2040	4	3	3	3	-6	22	22	5	-6	5	-15	-3	0	-6	-3	5	-4	-15
	2040-2070	-4	-10	0	5	-10	-5	5	-4	-10	3	-20	-10	-5	-12	5	5	-6	-20
	2070-2100	2	-15	-10	4	-16	-9	4	-7	-16	-17	-29	-3	-23	-22	-5	-3	-16	-29
Islas Baleares	2010-2040	-1	-14	0	-6	-23	7	7	-6	-23	-4	-20	-11	-13	-37	-5	-4	-15	-37
	2040-2070	3	-17	-10	-6	-34	-11	3	-12	-34	-18	-31	-32	-19	-52	-16	-16	-28	-52
	2070-2100	-4	-19	-31	-11	-47	-21	-4	-22	-47	-27	-51	-27	-37	-64	-30	-27	-39	-64
Canarias	2010-2040	5	-10	-24	-11	-19	19	19	-7	-24	2	-18	-22	-5	-30	-11	2	-14	-30
	2040-2070	-8	-17	-20	-2	-25	15	15	-10	-25	-16	-25	-43	-26	-39	6	6	-24	-43
	2070-2100	-18	-18	-34	-20	-40	-10	-10	-23	-40	-28	-37	-26	-46	-59	-1	-1	-33	-59



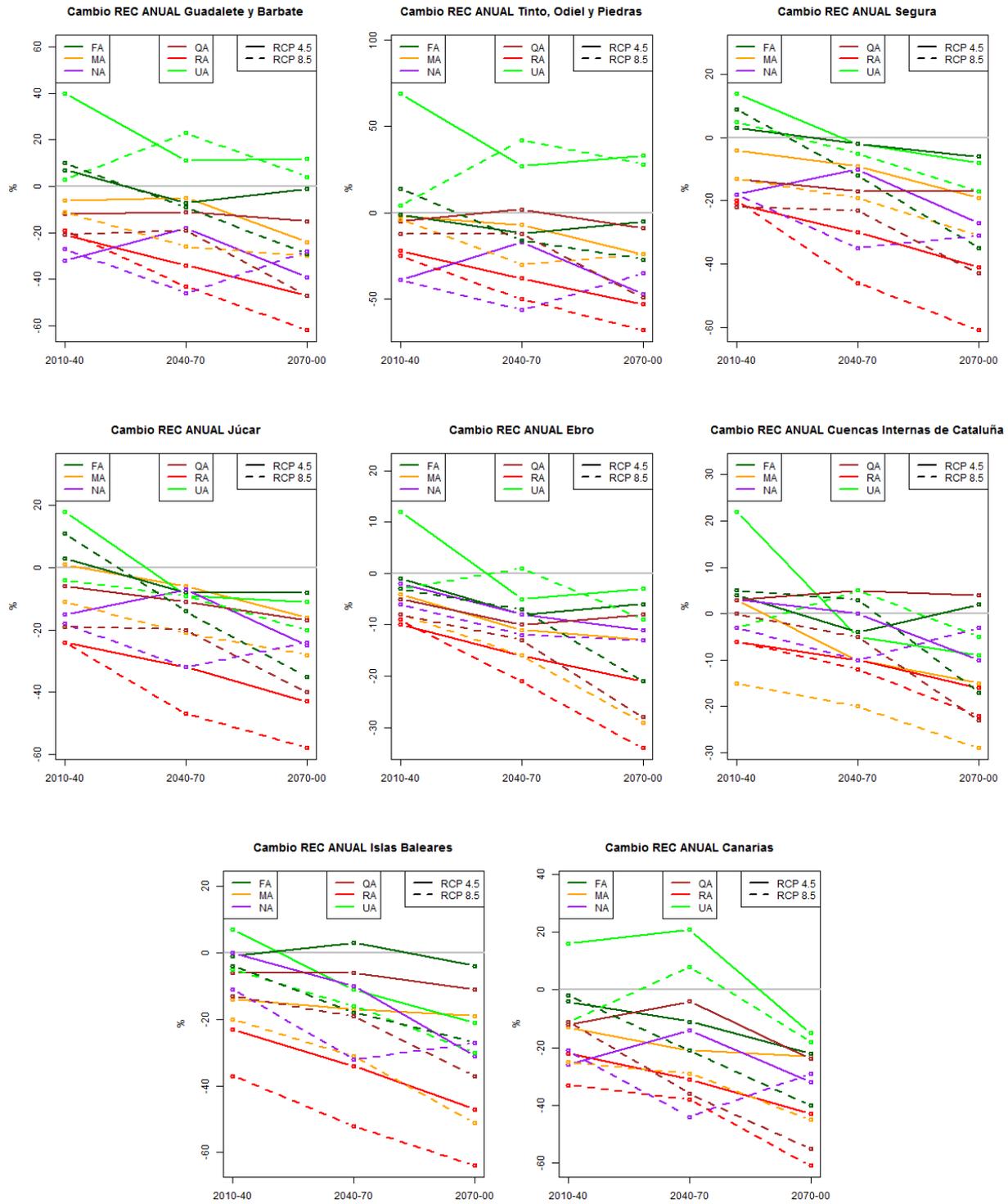


Figura 125.  $\Delta$  (%) REC de valores medios anuales en cada DH y PI.



### 7.4.3 Cambios en el ciclo anual

Al igual que en el caso de la PRE, no se observan unos claros patrones de cambio en el ciclo anual de la REC para el conjunto de España ya que los resultados varían mucho según la proyección climática (Figura 126). Lo más destacado es la tendencia a concentrarse la REC de España en los meses invernales y a una reducción al final del verano. La media de las proyecciones para el PI1 da un cambio en la distribución mensual más marcado para el RCP 4.5, con un aumento de la REC entre febrero y mayo. Para el PI2 y el PI3, se observa un aumento notable de la REC en febrero y una disminución hacia final del verano, siendo este cambio más visible en el RCP 8.5.

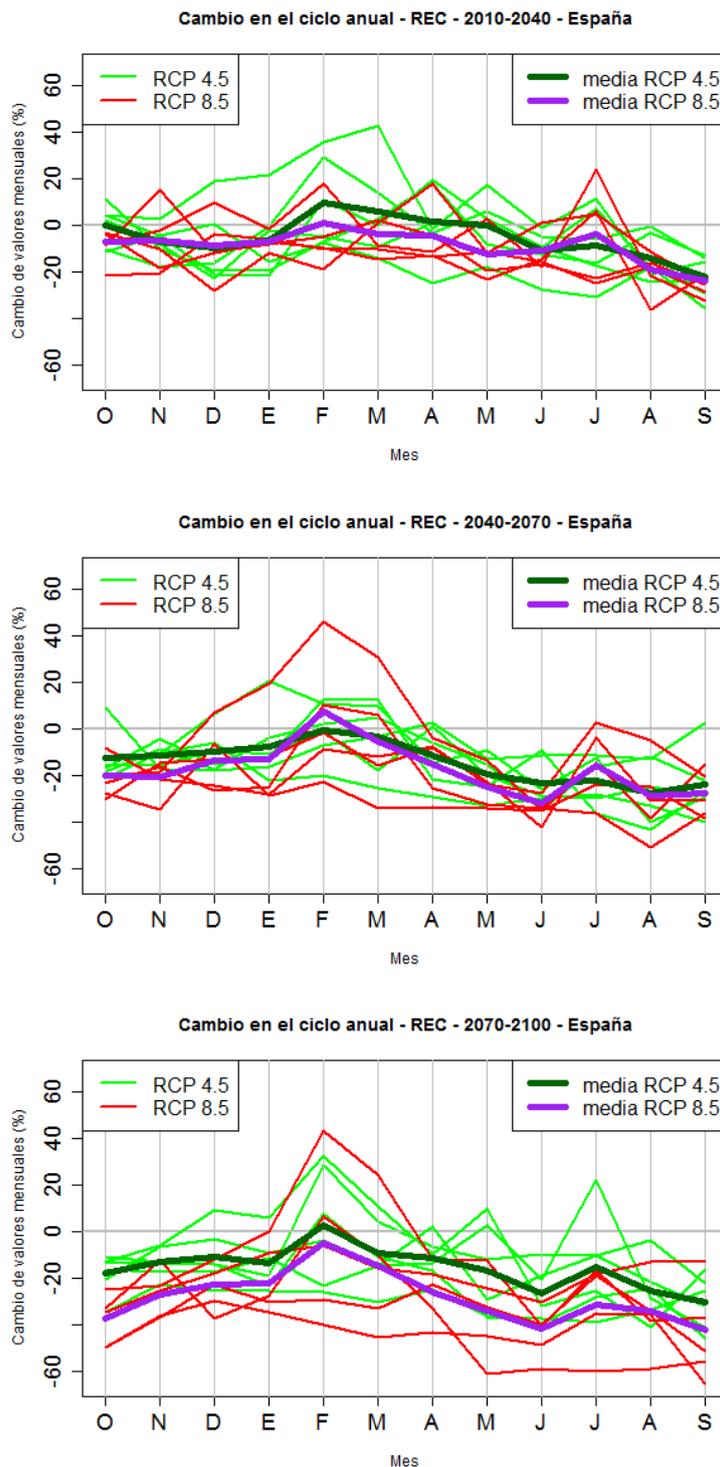


Figura 126. Cambios (%) en el ciclo anual de REC para cada PI respecto al PC para el conjunto de España según las distintas proyecciones y sus valores medios para cada RCP.

Estacionalmente (Tabla 21), se observa que los menores descensos porcentuales de REC, o incluso ascensos, se dan en invierno. Por otro lado, los mayores descensos se observan en verano. También se observa en dicha tabla la gran disparidad de



resultados según las proyecciones. Las proyecciones UA tienen muy marcado el cambio estacional, con una fuerte tendencia a concentrar la REC en invierno y a reducirla en verano, motivado por la simulación de fuertes PRE invernales de las proyecciones UA, mientras que las RA lo tienen mucho menos marcado.

Tabla 21.  $\Delta$  (%) REC estacional en España para cada PI y proyección. Se indican los valores máximo (Mx), mínimo (Mn) y el promedio (Med) para cada RCP. Los colores reflejan la gradación del cambio.

REC ESPAÑA $\Delta$ (%)		RCP 4.5									RCP 8.5								
		F4A	M4A	N4A	Q4A	R4A	U4A	Mx	Med	Mn	F8A	M8A	N8A	Q8A	R8A	U8A	Mx	Med	Mn
OND	2010-2040	-16	-11	-12	-13	-3	9	9	-8	-16	-3	-3	-20	-13	-13	1	1	-8	-20
	2040-2070	-15	-12	-14	-13	-10	-5	-5	-11	-15	-16	-23	-22	-17	-20	-9	-9	-18	-23
	2070-2100	-13	-14	-17	-8	-26	-2	-2	-13	-26	-24	-29	-23	-33	-35	-19	-19	-27	-35
EFM	2010-2040	13	-5	-9	-6	-13	33	33	2	-13	10	-4	-10	-11	-9	2	10	-4	-11
	2040-2070	1	2	-10	-10	-23	14	14	-4	-23	3	-5	-17	-10	-29	31	31	-5	-29
	2070-2100	3	-10	-16	-10	-28	16	16	-8	-28	-16	-12	-10	-31	-40	21	21	-15	-40
AMJ	2010-2040	-1	9	2	-1	-23	4	9	-2	-23	-5	-12	4	-17	-13	-8	4	-9	-17
	2040-2070	-15	-21	-6	-11	-31	-15	-6	-16	-31	-17	-30	-17	-19	-34	-13	-13	-22	-34
	2070-2100	-9	-28	-13	-10	-30	-8	-8	-16	-30	-29	-48	-23	-29	-45	-18	-18	-32	-48
JAS	2010-2040	-8	-22	-12	-16	-29	-11	-8	-16	-29	-11	-23	-9	-19	-25	-17	-9	-17	-25
	2040-2070	-17	-33	-7	-28	-34	-28	-7	-25	-34	-22	-40	-7	-24	-30	-21	-7	-24	-40
	2070-2100	-22	-31	-12	-21	-34	-25	-12	-24	-34	-32	-58	-15	-38	-47	-33	-15	-37	-58

La disparidad de resultados es también patente en los mapas que muestran los cambios estacionales (Figura 127 a la Figura 132). Para el periodo PI1, la proyección U4A da los mayores aumentos en invierno frente a descensos en verano en casi toda España, salvo Canarias que da los mayores aumentos en otoño (Figura 127). El resto de las proyecciones varían según zonas. Hay consenso con el norte de España, que muestra una reducción de la REC en verano y un aumento, menos claro, en invierno. En el resto de zonas y con carácter general, F4A tiende a concentrar la REC en invierno, M4A, N4A y Q4A en primavera y R4A en otoño. Las proyecciones del RCP 8.5 dan también esa disparidad de resultados en casi todas las zonas (Figura 128). Así por ejemplo, en el Levante, el incremento de la REC se estima en otoño (F8A, M8A, Q8A, R8A), invierno (F8A, Q8A) o primavera (N8A, U8A). La excepción es el norte de España, donde hay acuerdo en una bajada de REC en verano. Para el periodo PI1, el caso más claro es el patrón de cambios estacionales de las proyecciones RA y UA. Las proyecciones RA dan una destacada polaridad este-oeste; concentran la REC en los acuíferos más orientales durante la primavera y otoño en detrimento del invierno, mientras que en el resto peninsular es al revés. Por el contrario, las UA concentran de manera acusada la REC en invierno en casi toda la Península, salvo en el Levante que tiene un comportamiento opuesto. El resto de proyecciones muestra comportamientos intermedios menos definidos. El incremento de la REC en invierno según U4A determina el incremento en invierno de su media.

Similares pautas se observan conforme avanza el siglo XXI, en el PI2 y PI3. Para el periodo PI2, los patrones de cambio son similares a los del periodo anterior (Figura 129 y Figura 130). Los cambios de estacionalidad son más patentes en las proyecciones FA, MA y UA, en las que la REC tiende a concentrarse en invierno en casi toda España. Sigue habiendo unanimidad en una mayor bajada de la REC en verano en el norte de España y disparidad en la zona de Levante.



Para el periodo PI3, 2070-2100, se agudiza en general la reducción de REC, salvo en las proyecciones UA y, en menor grado F4A, que siguen la tendencia a concentrar la REC en invierno (Figura 131 y Figura 132). El NE de España también se escapa de la tónica general ya que presenta aumentos de REC en diferentes estaciones, incluso en verano. Los fuertes descensos de REC en Galicia, Cantábrico y norte del Ebro alcanzan a otras estaciones, además del verano.

De manera resumida se puede decir que hay una tendencia a concentrarse la REC en invierno, en detrimento del verano (sobre todo). En el norte de España hay un fuerte descenso en verano según todas las proyecciones. Las proyecciones UA, FA y MA son las que más marcado tienen el cambio estacional con la tendencia a concentrar la REC en invierno. Hay menor acuerdo ente las proyecciones en el este de España, ya que marcan cambios estacionales de diferente signo. Las pautas de cambio son similares en todos los PI.

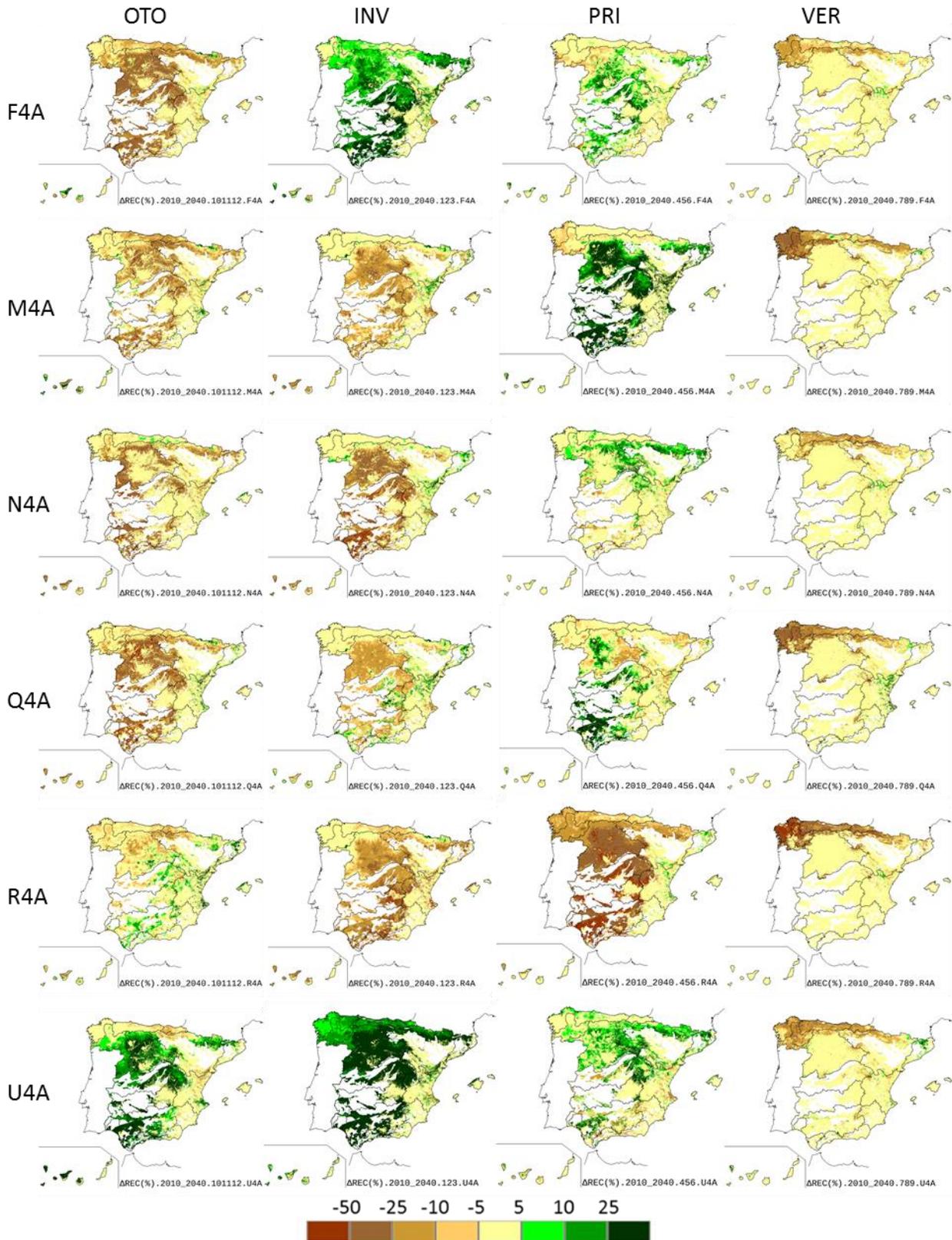


Figura 127.  $\Delta$  (%) REC estacional para 2010-2040 RCP 4.5

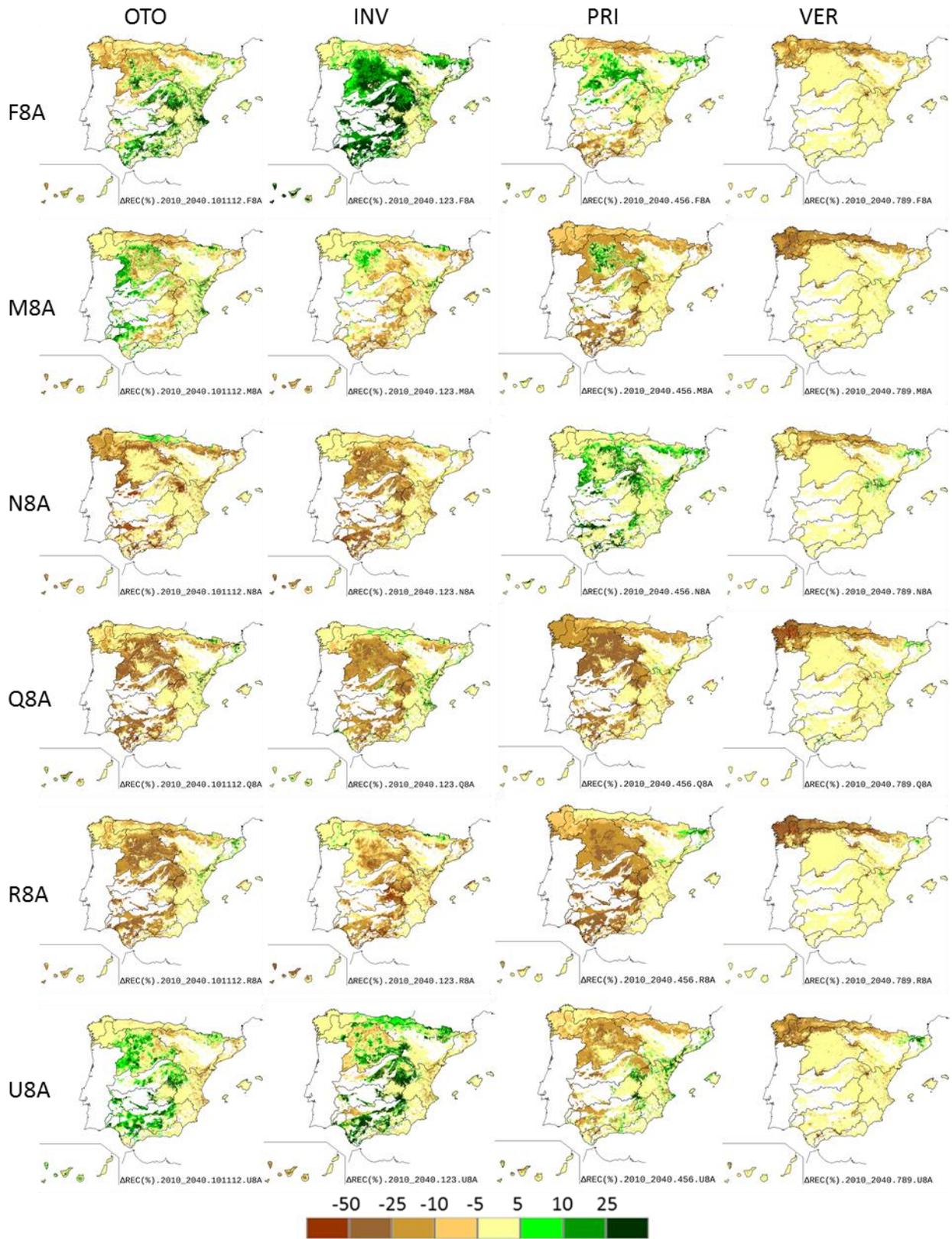


Figura 128.  $\Delta$  (%) REC estacional para 2010-2040 RCP 8.5

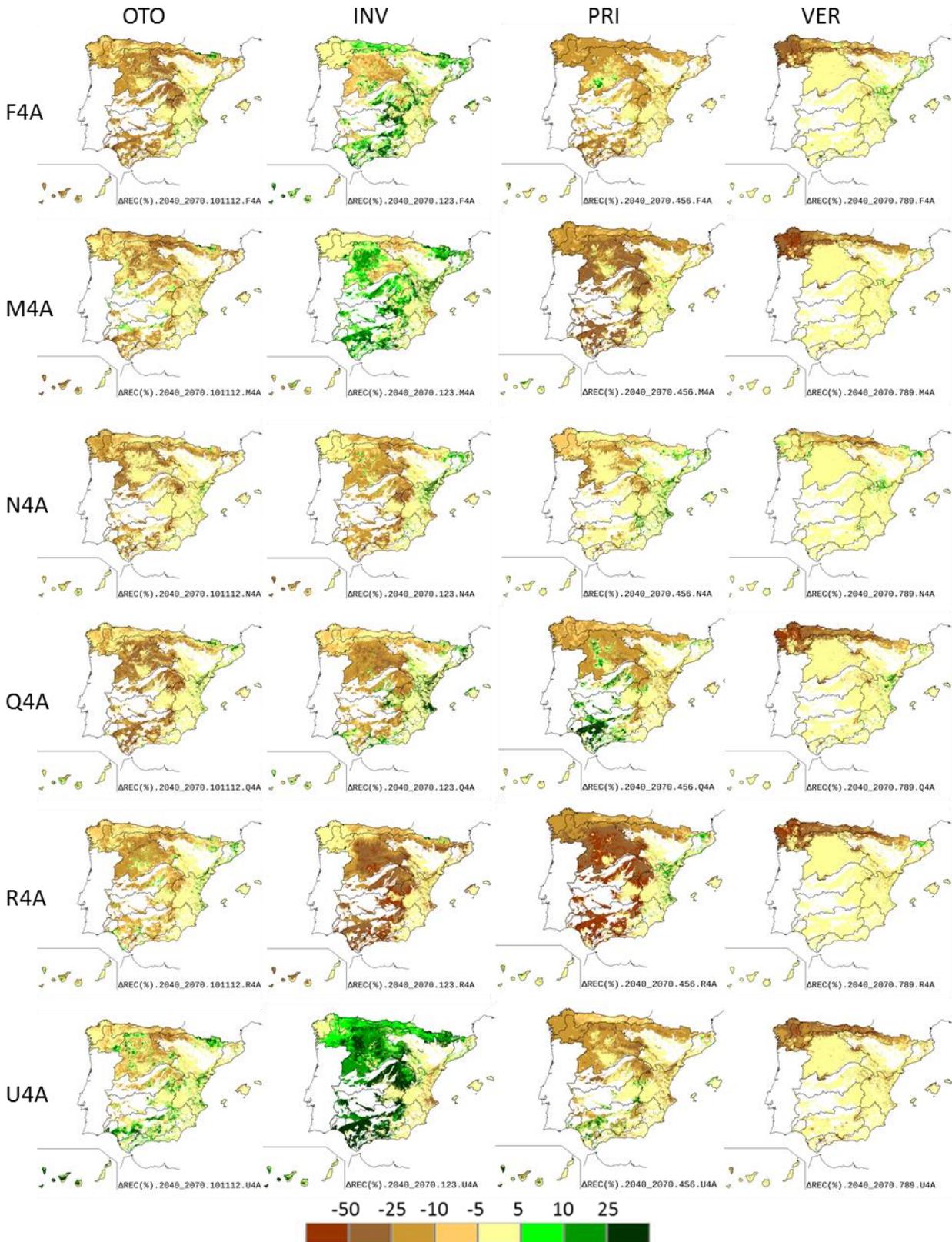


Figura 129.  $\Delta$  (%) REC estacional para 2040-2070 RCP 4.5

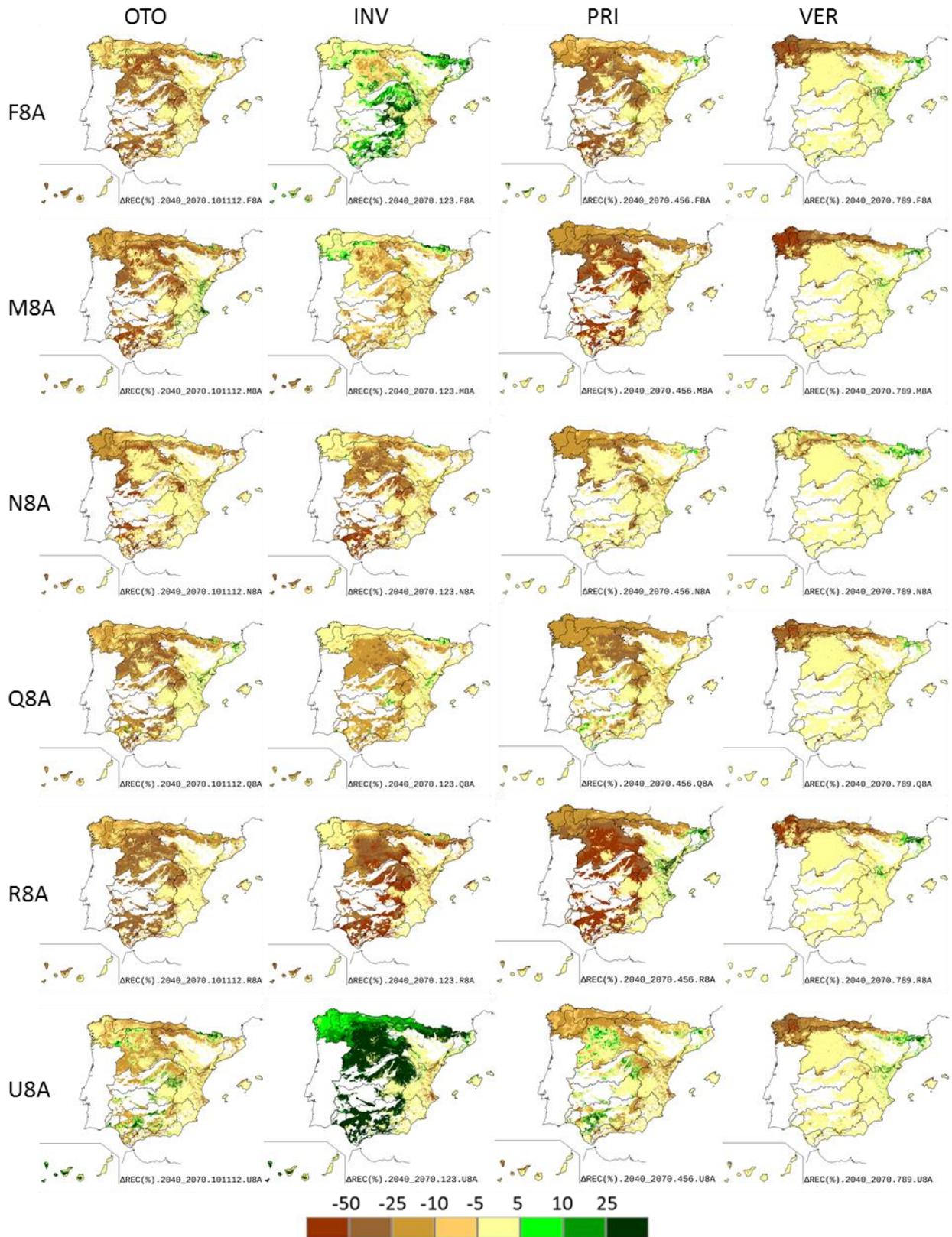


Figura 130.  $\Delta$  (%) REC estacional para 2040-2070 RCP 8.5

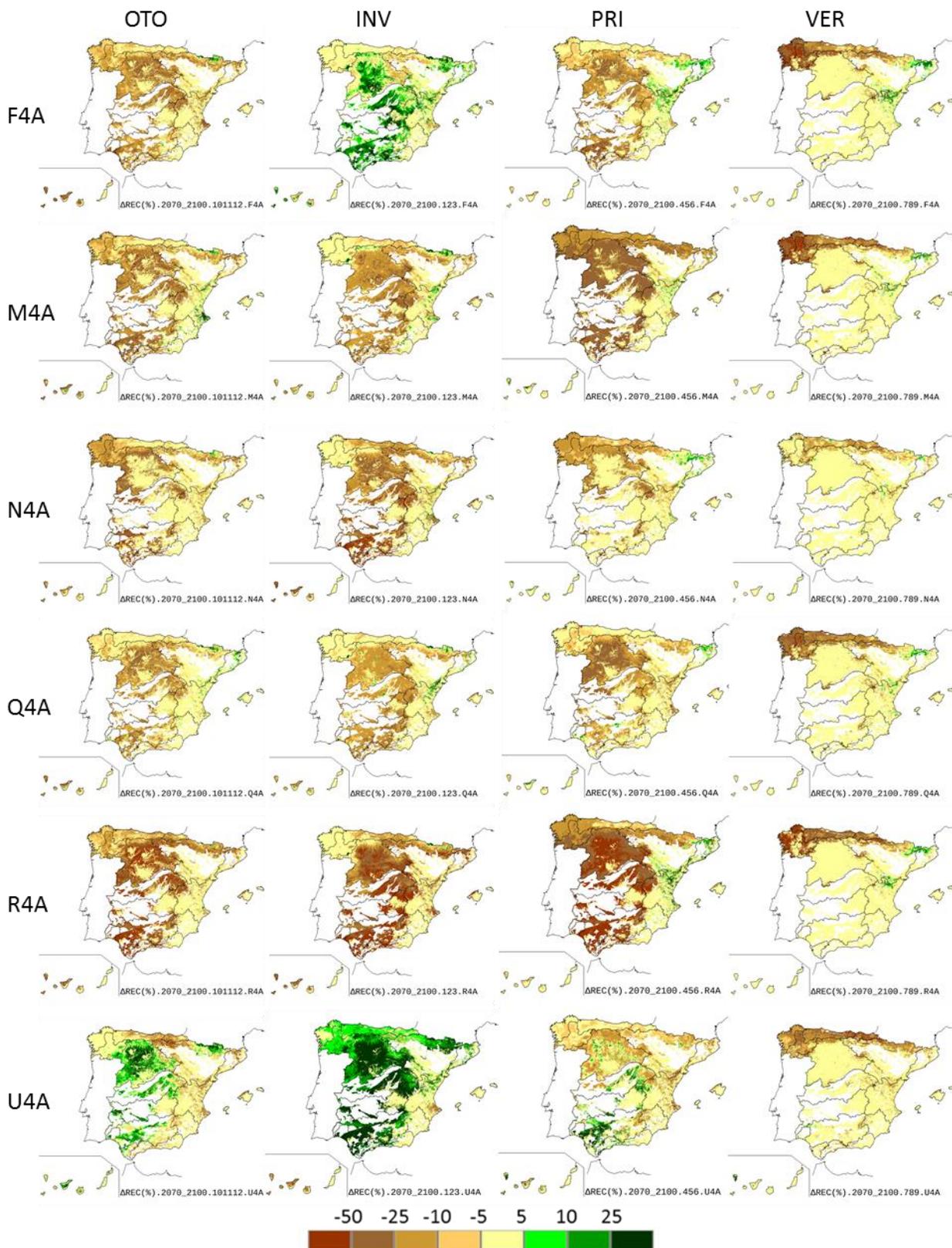


Figura 131.  $\Delta$  (%) REC estacional para 2070-2100 RCP 4.5

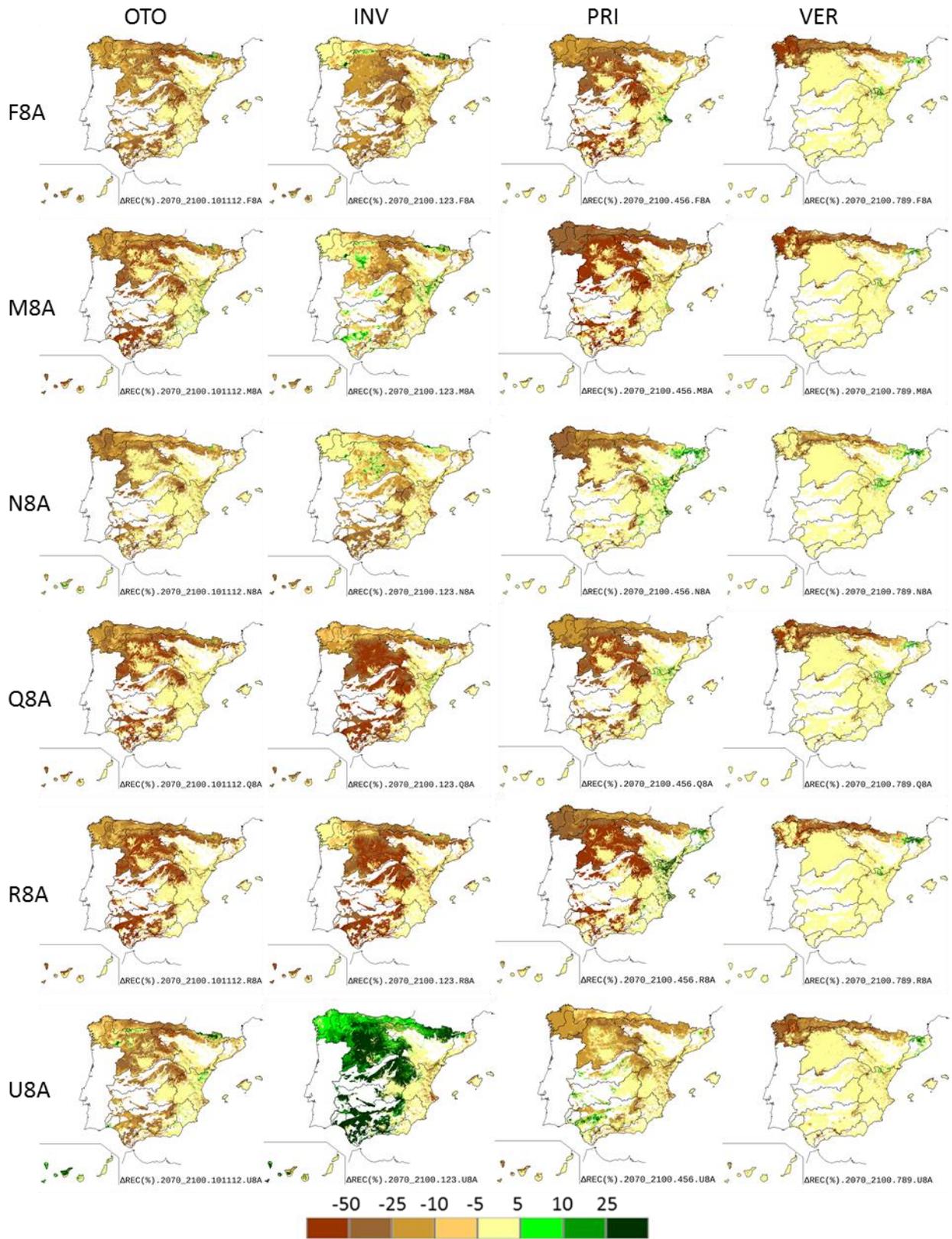


Figura 132.  $\Delta$  (%) REC estacional para 2070-2100 RCP 8.5

## 7.5 ESCORRENTÍA

### 7.5.1 Cambios anuales para el conjunto de España

Los cambios en la ESC anual estimada para el conjunto de España durante el periodo 2010-2100 revelan una tendencia decreciente según todas las proyecciones y en ambos RCP (Figura 133 y Figura 45). La incertidumbre de resultados se hace patente por la anchura de la banda de cambios según las diferentes proyecciones. La tendencia decreciente es sólo estadísticamente significativa para una proyección del RCP 4.5 (R4A) y para cuatro del RCP 8.5 (F8A, M8A, Q8A y R8A), mientras que el resto de proyecciones no muestran tendencia significativa alguna (Tabla 22 y anexo 1).

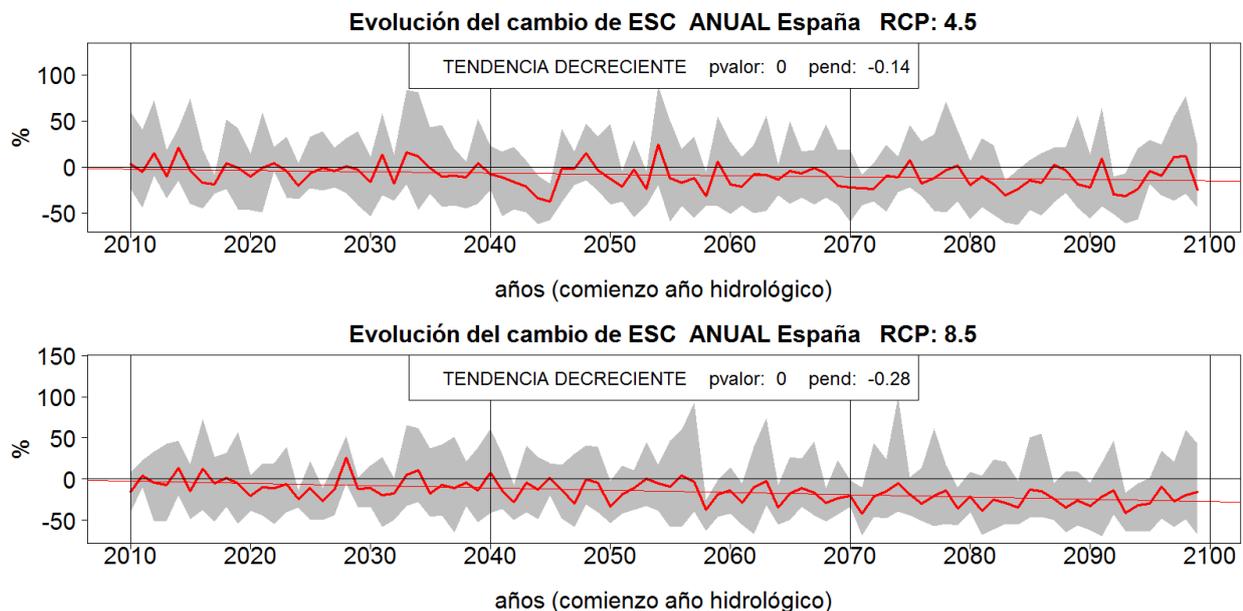


Figura 133. Tendencia del  $\Delta$  (%) ESC del año 2010 al 2099 para los RCP 4.5 (arriba) y 8.5 (abajo) para el conjunto de España. La banda gris indica el rango de resultados de las proyecciones. La línea gruesa indica su promedio y la recta delgada su pendiente. Se indica su p-valor según el test de Mann Kendall; negra: sin tendencia, roja: decreciente, azul: creciente.

Tabla 22. Pendientes de las series anuales de  $\Delta$  (%) de PRE y ESC del año 2010 al 2099 según cada proyección para el conjunto de España. En relleno naranja se indican las series con tendencia decreciente según el test de Mann-Kendall

		FA	MA	NA	QA	RA	UA	Media
Pendiente (% PRE / año)	RCP 4.5	-0.03	-0.11	-0.03	-0.01	-0.17	-0.08	-0.08
	RCP 8.5	-0.21	-0.22	-0.02	-0.16	-0.29	-0.01	-0.15
Pendiente (% ESC / año)	RCP 4.5	-0.06	-0.15	-0.05	-0.02	-0.33	-0.16	-0.14
	RCP 8.5	-0.43	-0.38	-0.01	-0.29	-0.53	-0.06	-0.28

Sin embargo, el promedio de cambios de las proyecciones da una tendencia decreciente significativa para ambos RCP; la proyección R4A determina la tendencia del promedio para RCP 4.5. La pendiente de ese promedio de cambios es generalmente mayor en el RCP 8.5 que en el RCP 4.5, indicando un mayor descenso de ESC cuando se considera el RCP 8.5. Las pendientes negativas son más acusadas que en el caso de la PRE, indicando mayores porcentajes de reducción de ESC que de PRE (Tabla 22).

Los cambios de ESC para cada uno de los tres PI muestran en primer lugar las diferencias en los resultados de cada proyección (Tabla 23 y Figura 134 izquierda). Así por ejemplo, para el periodo 2010-2040 y el RCP 4.5, el rango de cambios va desde un aumento de la ESC del 20% (U4A) a una disminución del 13% (R4A). Este rango es muy amplio por el fuerte aumento de U4A, alejado de los valores del resto de las proyecciones. La proyección RA es la que da las mayores disminuciones y la UA suele dar los mayores aumentos o menores descensos. Como norma general, cada proyección da más reducción en el RCP 8.5 que en el RCP 4.5 y esa reducción va aumentando de PI1 a PI2 y a PI3. No obstante, hay excepciones como una mayor reducción de ESC en PI2 que en PI3 para F4A, Q4A, U4A y N8A, el notable ascenso de ESC en PI2 según U8A o los menores valores en PI1 según F4A respecto a F8A o de R4A respecto a R8A.

Promediando los resultados de las proyecciones, se estiman siempre descensos de ESC, superiores en RCP 8.5 que en RCP 4.5 y más superiores cuando más avanza el siglo XXI. La diferencia entre ambos RCP se hace más patente conforme se avanza en el siglo XXI. Los cambios medios para España indican siempre reducción de ESC. Para los RCP 4.5 y 8.5 son respectivamente del -3% y -7% para 2010-2040, -11% y -14% para 2040-2070 y -13% y -24% para 2070-2100.

Tabla 23.  $\Delta$  (%) ESC en cada PI según cada proyección para el conjunto de España. Se indican los valores máximo (Mx), mínimo (Mn) y el promedio (Med) para cada RCP. Los colores reflejan la gradación del cambio.

ESC ESPAÑA $\Delta$ Anual (%)	RCP 4.5									RCP 8.5								
	F4A	M4A	N4A	Q4A	R4A	U4A	Mx	Med	Mn	F8A	M8A	N8A	Q8A	R8A	U8A	Mx	Med	Mn
2010-2040	2	-5	-11	-9	-13	20	20	-3	-13	4	-8	-13	-14	-11	-2	4	-7	-14
2040-2070	-7	-9	-13	-14	-23	-1	-1	-11	-23	-9	-19	-21	-16	-29	9	9	-14	-29
2070-2100	-5	-18	-17	-11	-31	4	4	-13	-31	-23	-28	-17	-34	-43	-1	-1	-24	-43

Los cambios de la variabilidad de ESC anual para España en cada PI se muestran de manera gráfica en la Figura 134 derecha. Las proyecciones RA son las que dan los mayores descensos de ESC anual y además las que dan un mayor descenso de su variabilidad. En el lado contrario, QA, FA y UA muestran un aumento de variabilidad de la ESC anual en los tres PI respecto al PC. No hay un patrón común de cambio respecto a su comportamiento conforme avanza el siglo XXI ni tampoco respecto a la relación entre la variabilidad y el RCP.

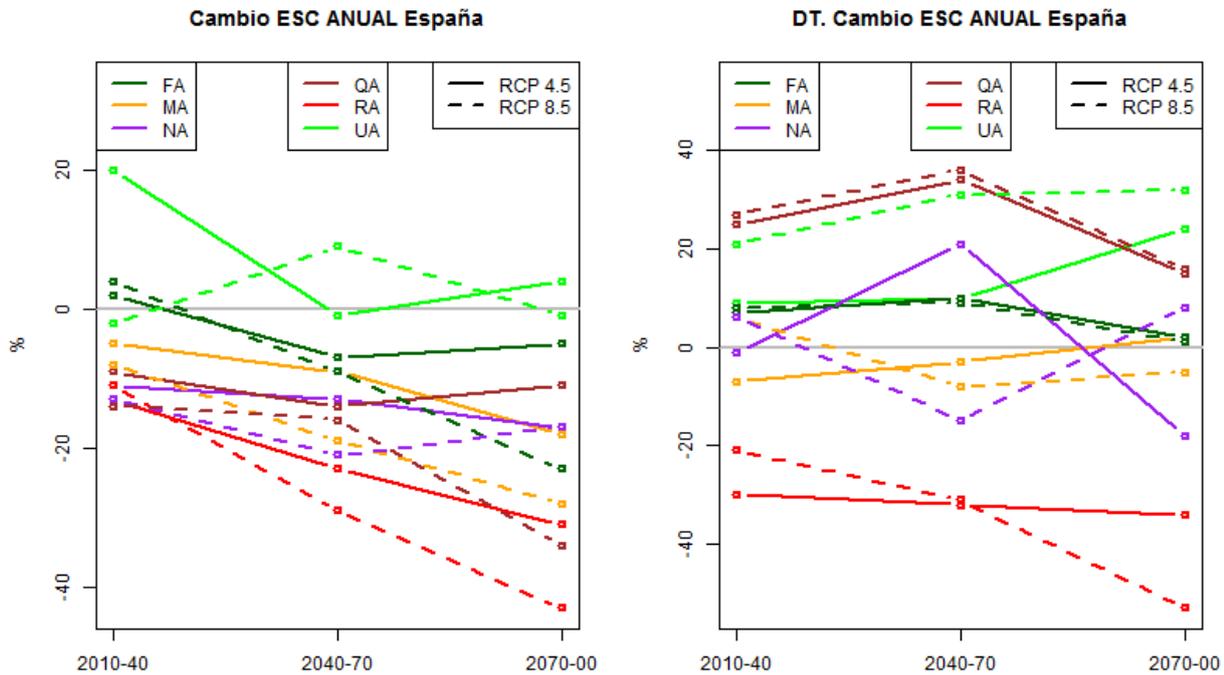


Figura 134.  $\Delta$  (%) ESC en cada PI. Izquierda: valores medios anuales. Derecha: DT de los valores anuales.

### 7.5.2 Distribución espacial de los cambios anuales

En los mapas de la Figura 135 a la Figura 140 se muestra el cambio de ESC anual en cada PI con relación al PC según cada RCP. Hay bastantes celdas en las que la ESC es prácticamente cero durante todo un periodo (PC o PI) y a las que se les ha asignado un valor de cero de variación porcentual. Son celdas en la parte central del valle del Ebro, por ejemplo en los Monegros. El hecho de que no haya ESC de manera tan permanente en esas zonas se debe a la confluencia de varios factores. Por un lado, suele haber una escasa PRE y una alta ETP, con lo que casi toda la PRE se evapora en cada mes. Por otro lado, la PRE puede ser superior a la ETP en algunos meses seguidos de invierno o primavera, pero la diferencia PRE-ETP acumulada en esos meses no sobrepasa la capacidad del suelo de almacenar agua (un valor típico de  $H_{max}$  en Monegros es de 150 mm, mientras que el suelo no se llena nunca más de 40 mm).

Los cambios están en consonancia con las variaciones de PRE. Los cambios en ESC agudizan los cambios en PRE estimados por las proyecciones.

Para el periodo 2010-2040 hay notables diferencias en la distribución espacial de los cambios de ESC anual según la proyección climática (Figura 135 y Figura 136). Para el RCP 4.5, U4A da aumentos generalizados, más patentes en los tres cuartos occidentales y en Canarias, con leves descensos en Levante; F4A muestra un patrón similar pero menos acusado. Por otro lado, M4A, N4A y Q4A dan descensos en la parte central y occidental y aumentos en zonas de Levante. R4A muestra descensos generalizados. Los patrones de cambio son similares para el RCP 8.5, siendo la mayor diferencia la mostrada por proyección U8A que reduce considerablemente la zona de aumento de ESC respecto al RCP 4.5.

Para el periodo 2040-2070 continúa la dispersión de resultados (Figura 137 y Figura 138). El patrón de cambios para el RCP 4.5 es similar que el del PI1, resaltando los menores aumentos según las proyecciones U4A y F4A y los mayores aumentos según Q4A en Levante. Para el RCP 8.5, destaca cómo las reducciones de ESC se van haciendo dominantes en casi todas las proyecciones, con las salvedades de U8A, que muestra patentes ascensos en las cuencas desde el Duero hacia el sur, en el Pirineo y en las islas occidentales de Canarias, y de F8A, que muestra ascensos ligeros y aislados en el centro y NE peninsular. U8A y U4A intercambian sus resultados, siendo en este periodo U8A la que pronostica mayores aumentos de ESC, superiores al 25% en algunas zonas del centro, oeste, sur, Canarias y del Pirineo.

Para el periodo 2070\_2100 sigue la diferencia de resultados si bien la reducción de ESC es la tónica dominante y es mayor que en el periodo anterior, PI2 (Figura 139 y Figura 140). La mayoría de las proyecciones muestran descensos en todas las zonas salvo en el Levante. Hay fuertes descensos que sobrepasan el 50% en amplias zonas del centro y SO peninsular y de Canarias (R8A, R4A, Q8A y N4A). U4A y U8A son la excepción ya que muestran amplias zonas con aumentos en el oeste peninsular, superando el 25% en algunas zonas y, en menor medida, F4A, con aumentos menos notables repartidos por la Península. Otras proyecciones apenas muestran zonas con aumentos, restringidos a zonas del Levante (M4A, Q4A, M8A, Q8A). En general, hay una reducción más intensa hacia el SO peninsular y en Canarias y menor reducción, o incluso aumento de ESC en algunas zonas del este peninsular. Por el contrario, U4A y U8A muestran un patrón contrario, con mayores descensos hacia el este.

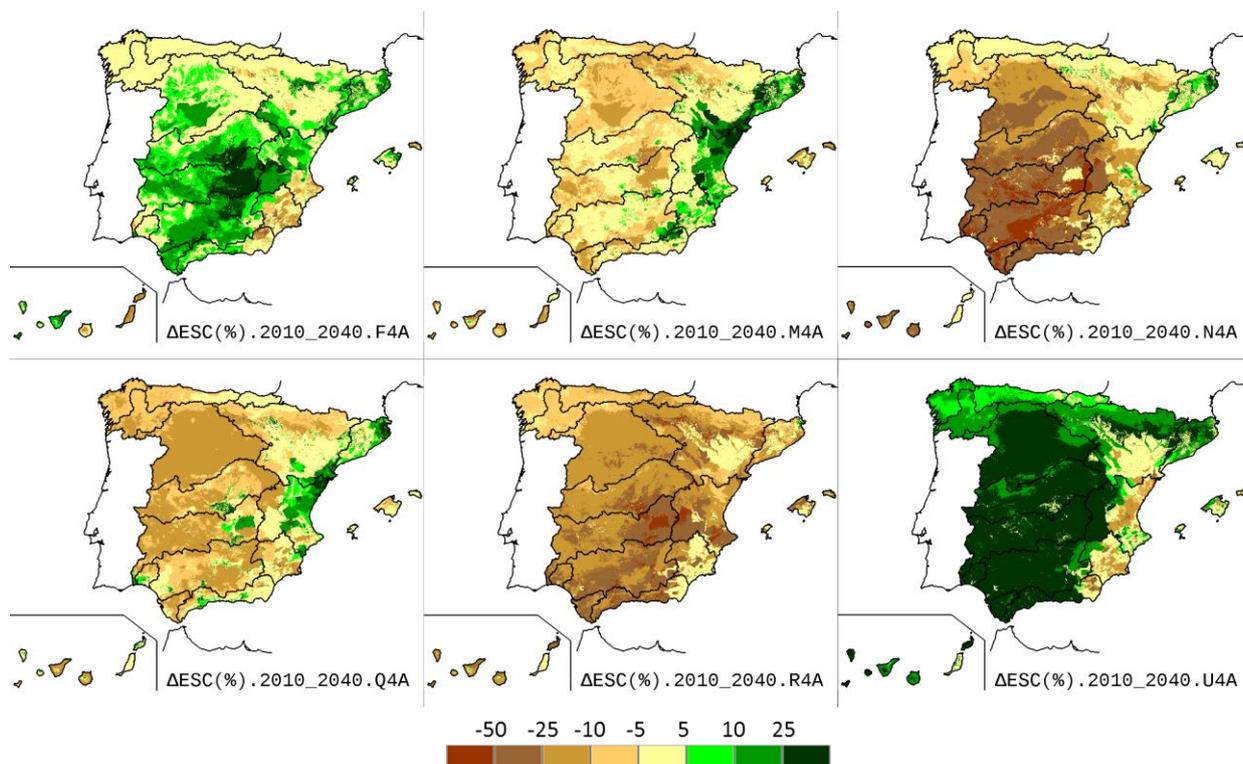


Figura 135.  $\Delta$  (%) ESC anual para 2010-2040 según las proyecciones RCP 4.5.

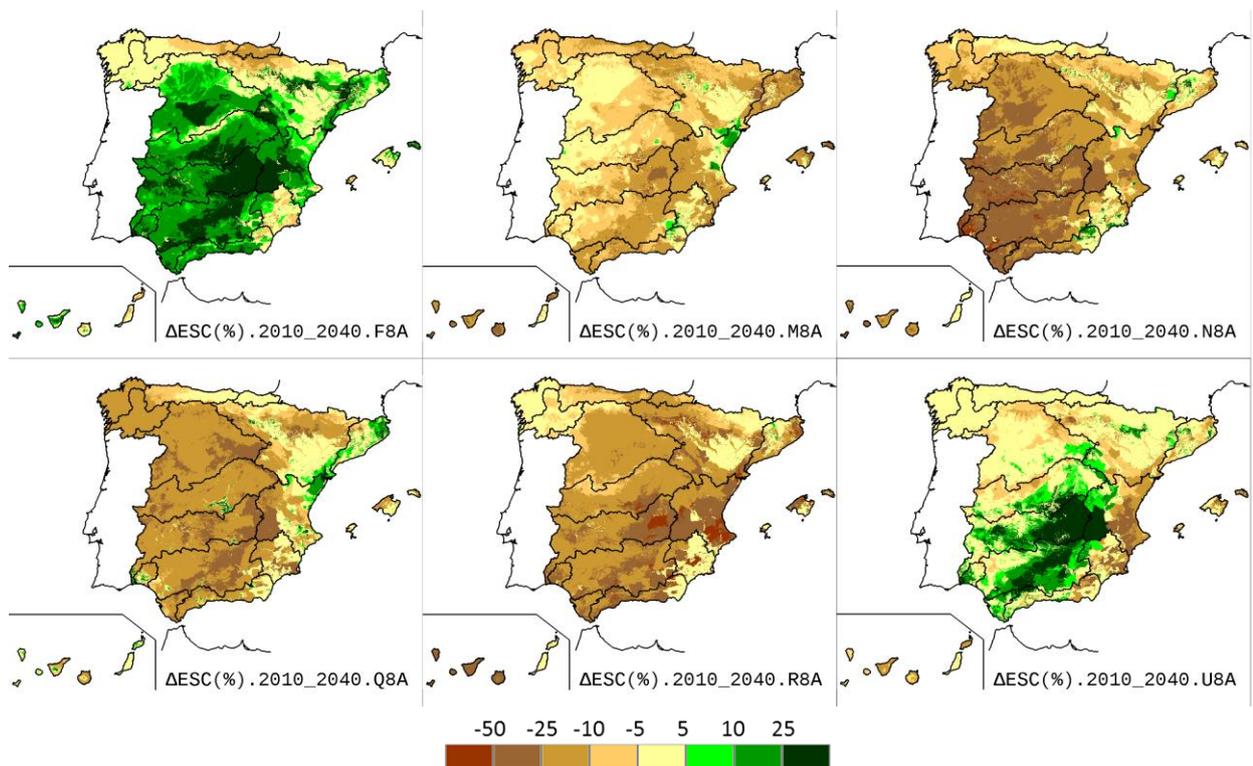


Figura 136.  $\Delta$  (%) ESC anual para 2010-2040 según las proyecciones RCP 8.5.

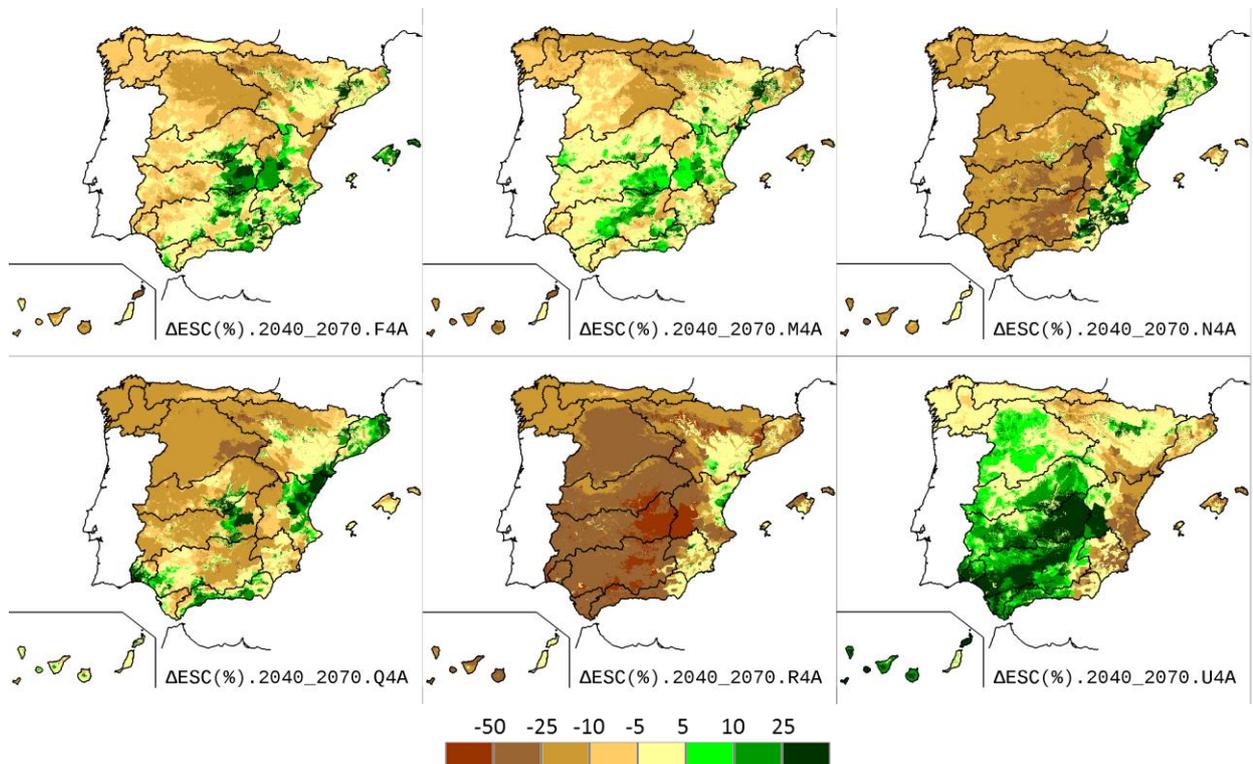


Figura 137.  $\Delta$  (%) ESC anual para 2040-2070 según las proyecciones RCP 4.5.

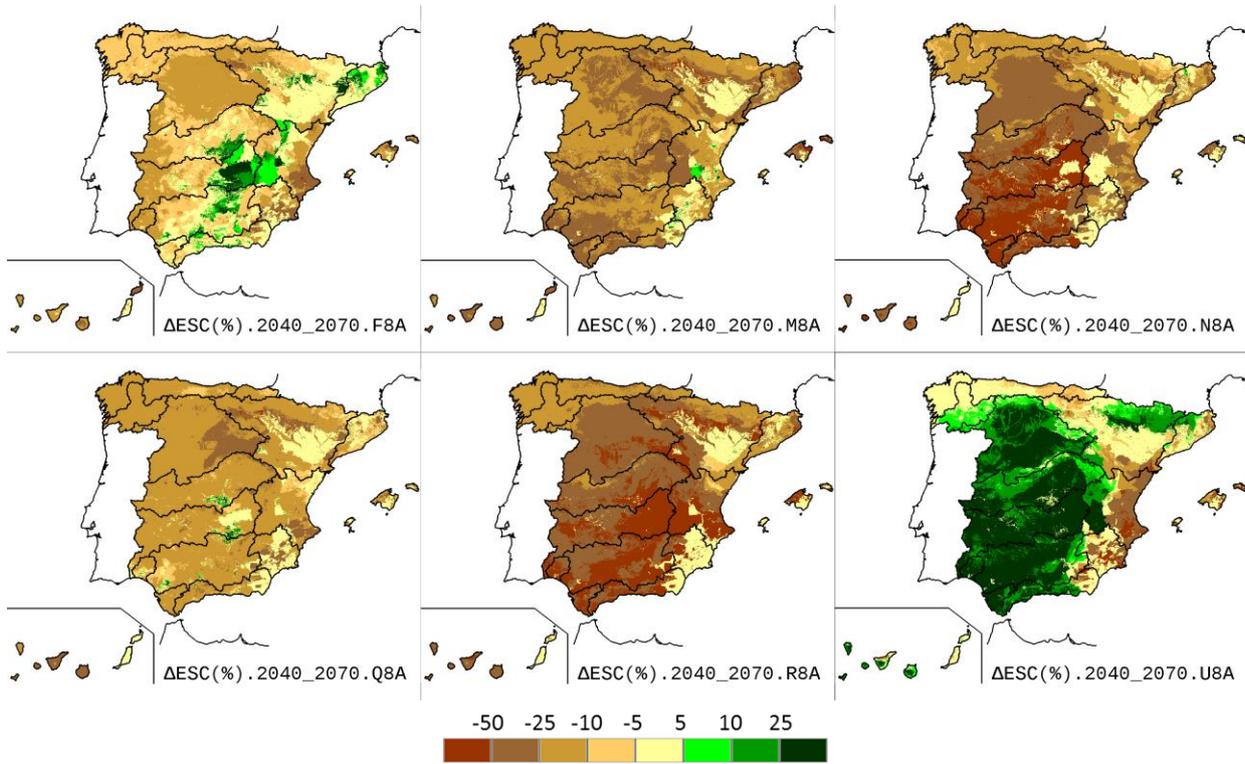


Figura 138.  $\Delta$  (%) ESC anual para 2040-2070 según las proyecciones RCP 8.5.

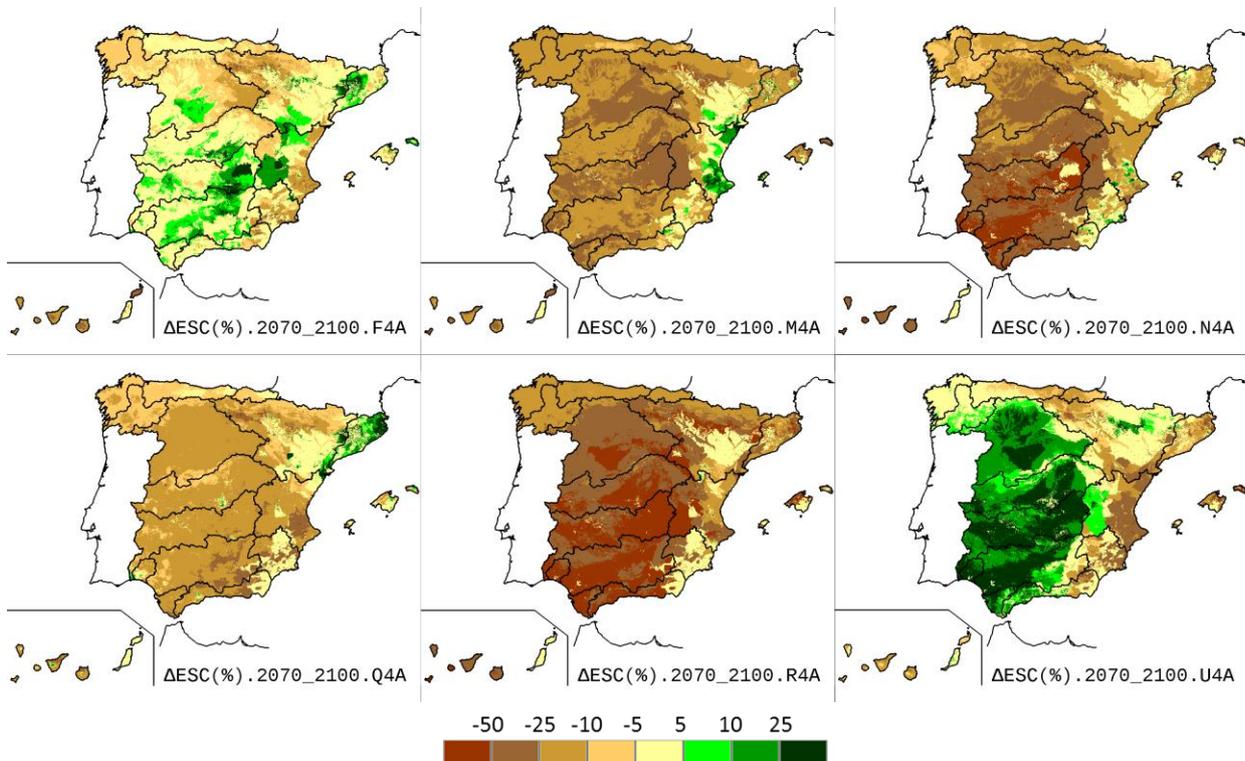


Figura 139.  $\Delta$  (%) ESC anual para 2070-2100 según las proyecciones RCP 4.5.

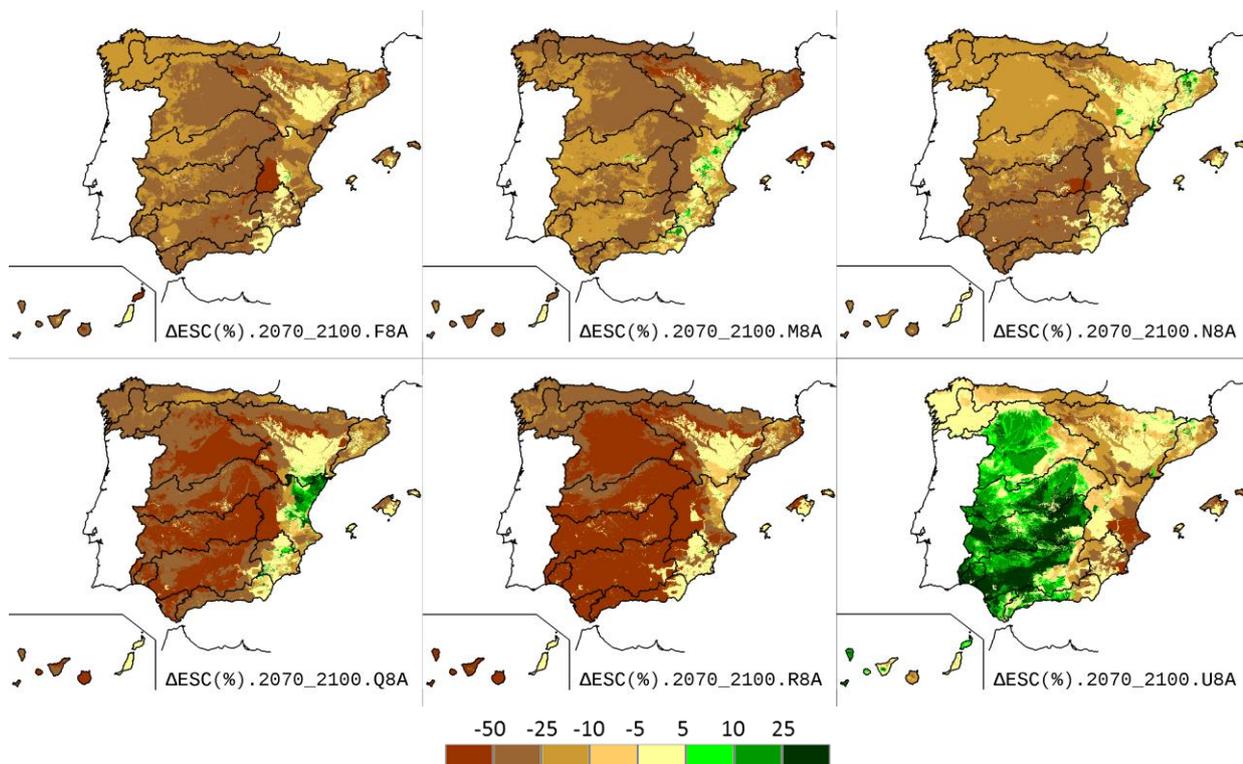


Figura 140.  $\Delta$  (%) ESC anual para 2070-2100 según las proyecciones RCP 8.5.

En los mapas de la Figura 141 a la Figura 144 se muestran los resultados de tratar conjuntamente los cambios estimados por todas las proyecciones. En las zonas más secas apenas se genera ESC, con lo que ínfimos cambios absolutos suelen provocar fuertes cambios porcentuales y, por tanto, bruscas variaciones espaciales de esos cambios porcentuales. Es por ello que hay que interpretar con cautela los resultados en las zonas áridas, sobre todo del SE de España, centro del valle del Ebro y Canarias.

La media de los resultados de las distintas proyecciones para cada PI y RCP se muestra en la Figura 141. Se observa cómo la reducción se va generalizando del PI1 al PI2 y al PI3 y cómo es mayor en el RCP 8.5 que en el RCP 4.5. Para el PI1 y RCP 4.5 se observan ligeros cambios que consisten en aumentos en el NE, básicamente en todo el ámbito de la CCIL de Cataluña y desembocadura del Ebro. Los descensos son, en general, inferiores al 10% y los más relevantes se dan en el centro y este de la DDHH del Duero y en las cabeceras de las cuencas del Júcar, Guadiana y Guadalquivir. El hecho de que la disminución de RRHH sea mayor en esas zonas de cabecera que en las partes bajas y medias de las cuencas tiene importancia a la hora de valorar la hipotética repercusión del cambio climático sobre los RRHH en los embalses de zonas tan estratégicas. Según el RCP 8.5, apenas se dan aumentos de ESC, restringiéndose a zonas aisladas del NE con escasa ESC. Los descensos son ya mayoritarios, entre el 5% y el 25%, afectando también a la franja norte de España. Son más acusados en la parte oriental del Duero, hacia el sur y SE de España y en los dos archipiélagos.

La reducción de ESC es más evidente en el PI2 según el RCP 4.5, entre el 10% y el 25% en las cuencas atlánticas, partes occidentales de las mediterráneas e islas Canarias orientales. En el este de la Península no hay una clara señal de cambio ya



que no hay una continuidad espacial de los cambios, con leves reducciones o aumentos de ESC. El este de la DH del Júcar apenas muestra cambios. Los aumentos estimados para el PI1 en el NE se ven ahora muy limitados, tanto en extensión como en cantidad. El resto de los aumentos se restringen a zonas de escasa ESC del SE y valle del Ebro. La imagen para el RCP 8.5 del PI2 se parece a la del mismo RCP para el PI1, con la diferencia de que aumentan los descensos de ESC de manera bastante uniforme en todo el territorio. Se sobrepasan descensos del 10% en casi toda España, salvo zonas aisladas del norte, y del 25% en la parte oriental del Duero, cabecera del Guadiana y Mancha oriental, zonas del sur y SE de España, islas orientales Canarias y Baleares.

El mapa con la media de los cambios estimados para el PI3 según el RCP 4.5 se asemeja al del PI2 según el RCP 8.5. Las diferencias principales consisten en que en el PI3-RCP 4.5 muestra menos descensos en el SE y en Baleares. Los aumentos del NE son aislados, de poca continuidad espacial, y no son relevantes ya que corresponden a zonas con escasa ESC. Los mapas de cambio medio para el PI3 según el RCP 8.5 muestran reducciones de ESC generalizadas e importantes, sobrepasándose el 25% en gran parte de España y el 50% en el este del Duero, La Mancha y zonas orientales del Guadalquivir. Las reducciones son más leves ya que no superan el 25% en casi toda la franja norte, salvo zonas costeras de Asturias y País Vasco, en el Sistema Central, SE del Ebro y parte oriental de la DH del Júcar.

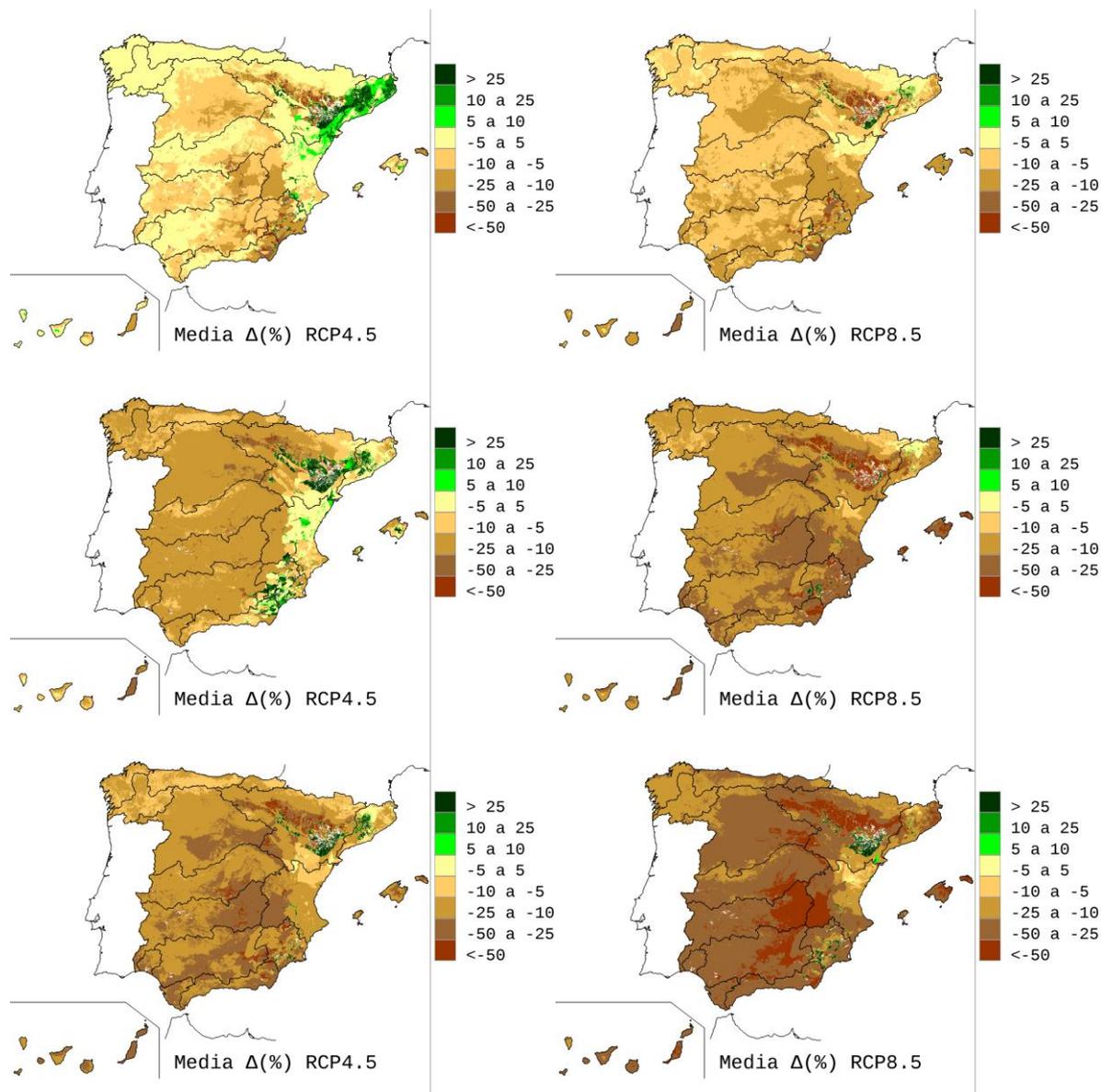


Figura 141. Media de  $\Delta$  (%) ESC anual para PI1 (arriba), PI2 (medio) y PI3 (abajo) y RCP 4.5 (izquierda) y 8.5 (derecha).

También se han calculado las medias de las proyecciones de ambos RCP para cada PI (Figura 142 izquierda). El mapa para el PI1 muestra cambios mayoritarios entre el -5% y -10%, con las siguientes salvedades: aumentos de ESC en zonas reducidas del NE, sin apenas cambios en el norte, NE, Cordillera Ibérica-Maestrazgo y zonas del Sistema Central y descensos mayores, entre el 10% y 25%, en Duero oriental, La Mancha, SE e islas Canarias orientales.

Las reducciones son más extensas y mayores para el PI2, con cambios que oscilan entre -10% y -25% en la mayor parte del territorio. Descensos mayores, entre el 25% y 50%, en Duero oriental, La Mancha e islas Canarias orientales. Los aumentos de ESC son más reducidos y restringidos a zonas con escasa ESC.



Para el PI3, hay un patrón de cambio dominado por las reducciones de ESC, superiores al 10% en casi toda España, al 25% en gran parte de las cuencas al sur del Duero, en la parte occidental de las del Júcar y Segura y en las islas, y al 50% en zonas del centro peninsular y otras zonas con ínfima ESC. Los aumentos de ESC son reducidos y restringidos a zonas con escasa ESC. Son remarcables las fuertes reducciones que se pronostican para este escenario tan negativo de finales de siglo en las cabeceras del Júcar, Segura, Tajo, Guadiana y Guadalquivir.

Los mapas del rango de resultados de los cambios de ESC se muestran en la Figura 142 derecha. El amplio rango de valores evidencia de manera muy clara las diferencias entre proyecciones y, por tanto, la incertidumbre de los resultados. El rango es menor en el norte que el resto de España, ya que en gran parte de ésta se superan diferencias del 70% en el porcentaje de cambio entre proyecciones para los tres PI, mientras que en el norte, el rango es del 10% al 40%. El rango va aumentando del PI1 al PI2 y PI3, tal como se ve claramente en el norte de España. Cuando hay muy baja ESC se dan cambios porcentuales muy grandes y por lo tanto pueden suponer amplios rangos de variación entre proyecciones. El caso más extremo se da en las celdas cuando la ESC es cero en los periodos comparados, en cuyo caso las celdas aparecen en blanco en los mapas.

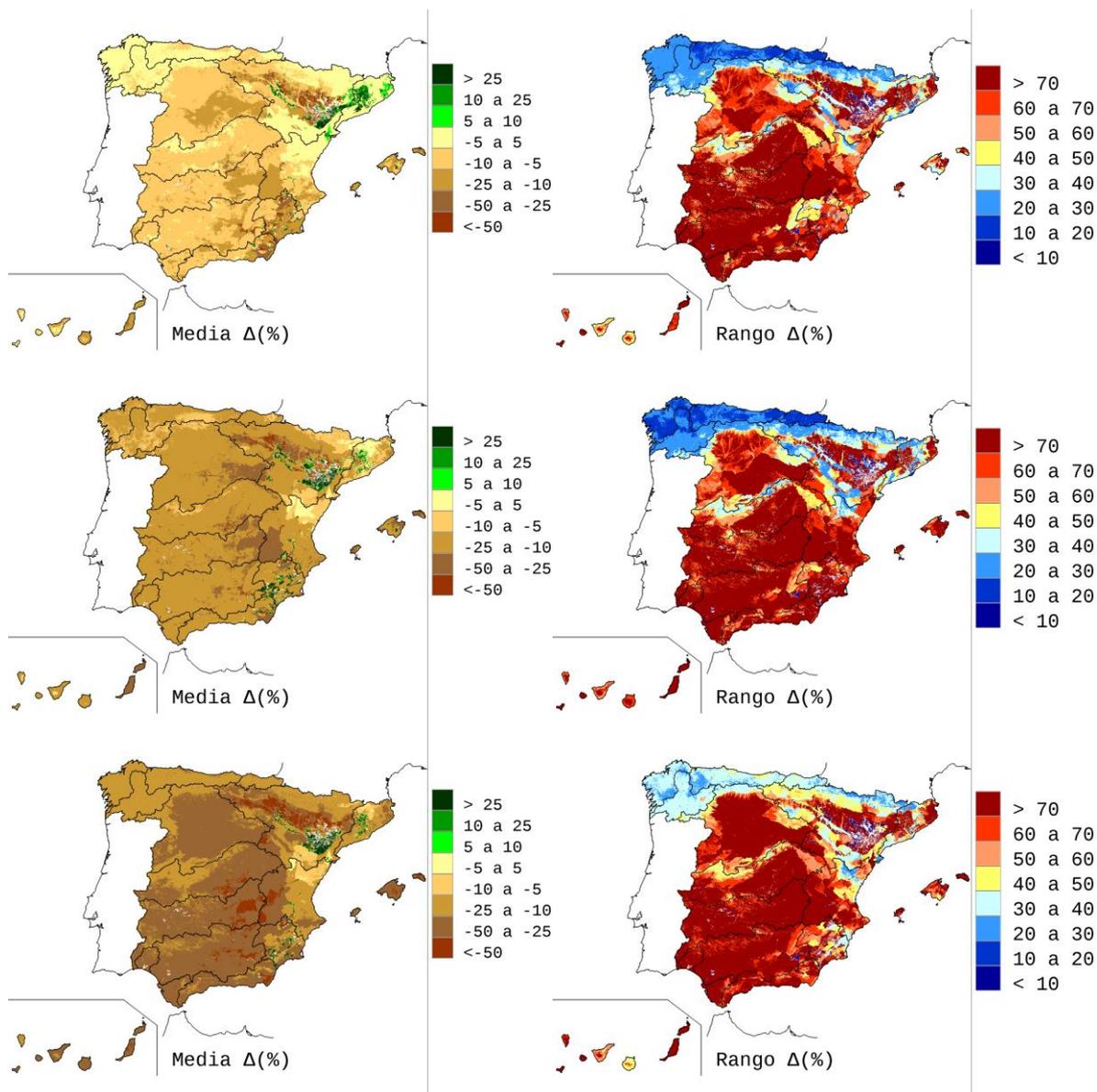


Figura 142. Media y rango de  $\Delta$  (%) ESC anual para todas las proyecciones durante PI1 (arriba), PI2 (medio) y PI3 (abajo).

En la Figura 143 se observan los porcentajes de cambio mínimos a la derecha (mayores reducciones de ESC) y máximos a la izquierda (mayores aumentos de ESC). Se observa cómo las diferencias entre ambos se agudizan hacia el SO. Se ve que siempre hay una proyección, al menos, que pronostica un aumento de ESC para el PI1 en casi cualquier punto de España y otra que pronostica una reducción de ESC. Conforme se avanza en los PI hay zonas en las que ya no hay ninguna proyección que pronostique aumentos de ESC (norte, Ibérica, Pirineo, SE y en algunas islas).

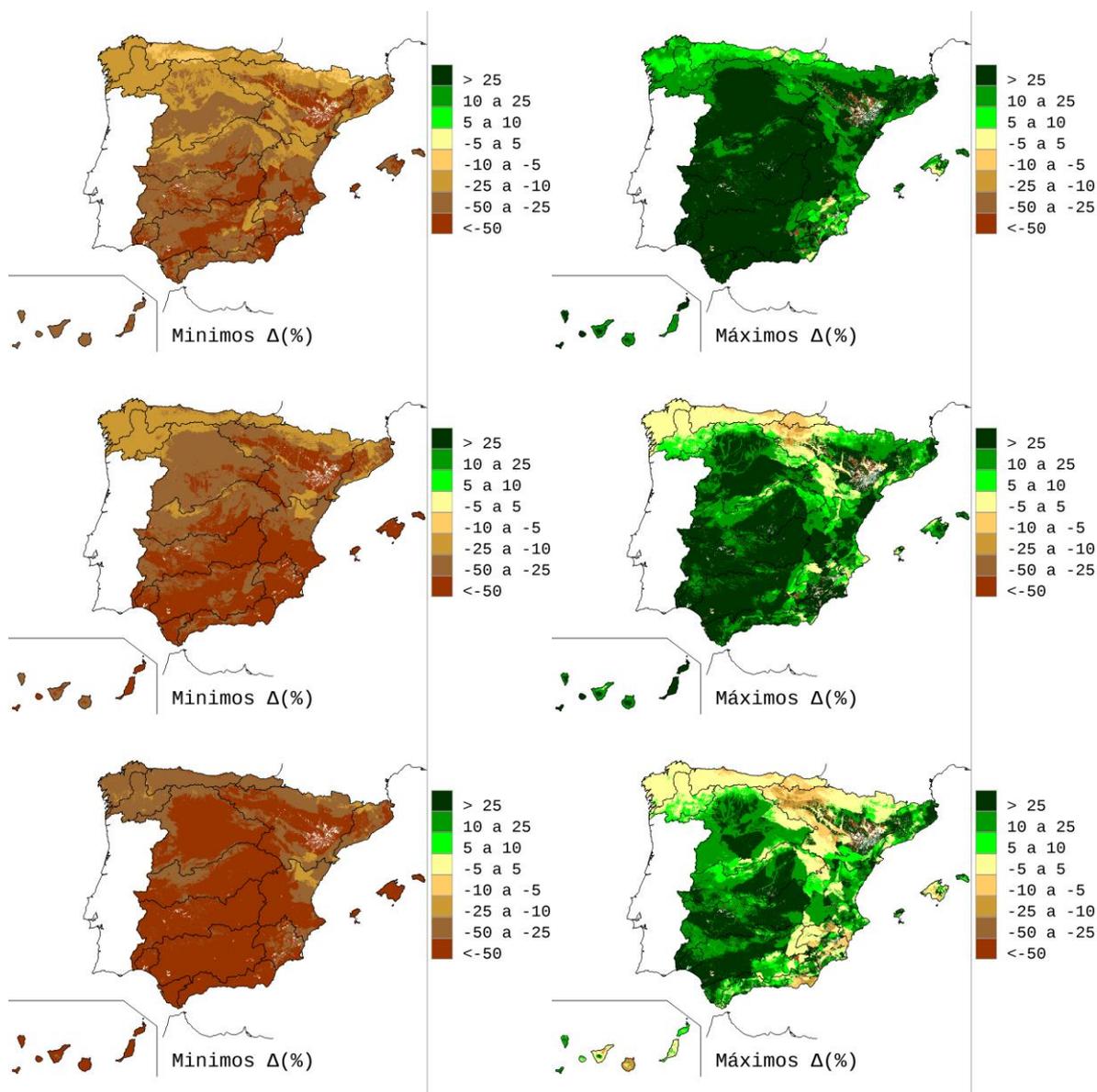


Figura 143. Mínimos y máximos  $\Delta$  (%) ESC anual de todas las proyecciones durante PI1 (arriba), PI2 (medio) y PI3 (abajo).

En la Figura 144 se indica cuál es la proyección que da el máximo y el mínimo incremento de ESC en cada punto de España. En blanco aparecen las celdas sin ESC en las proyecciones. Para el PI1 (Figura 144 arriba), la proyección U4A es la que da los mayores aumentos en el centro, oeste y norte peninsular y en los archipiélagos, mientras que son M4A, F4A y F8A las que los dan en el este de la Península y Baleares y centro del valle del Ebro. Los mínimos incrementos de ESC (mayores reducciones) los da N4A en el centro-sur, Q8A en el Duero, Galicia y Pirineo central, R8A y R4A hacia el este y en los archipiélagos; el resto de proyecciones dan mínimos en zonas más restringidas (M8A en Cantábrico occidental y NE peninsular, F8A en el Cantábrico Oriental, N8A en la margen derecha del Duero, etc).

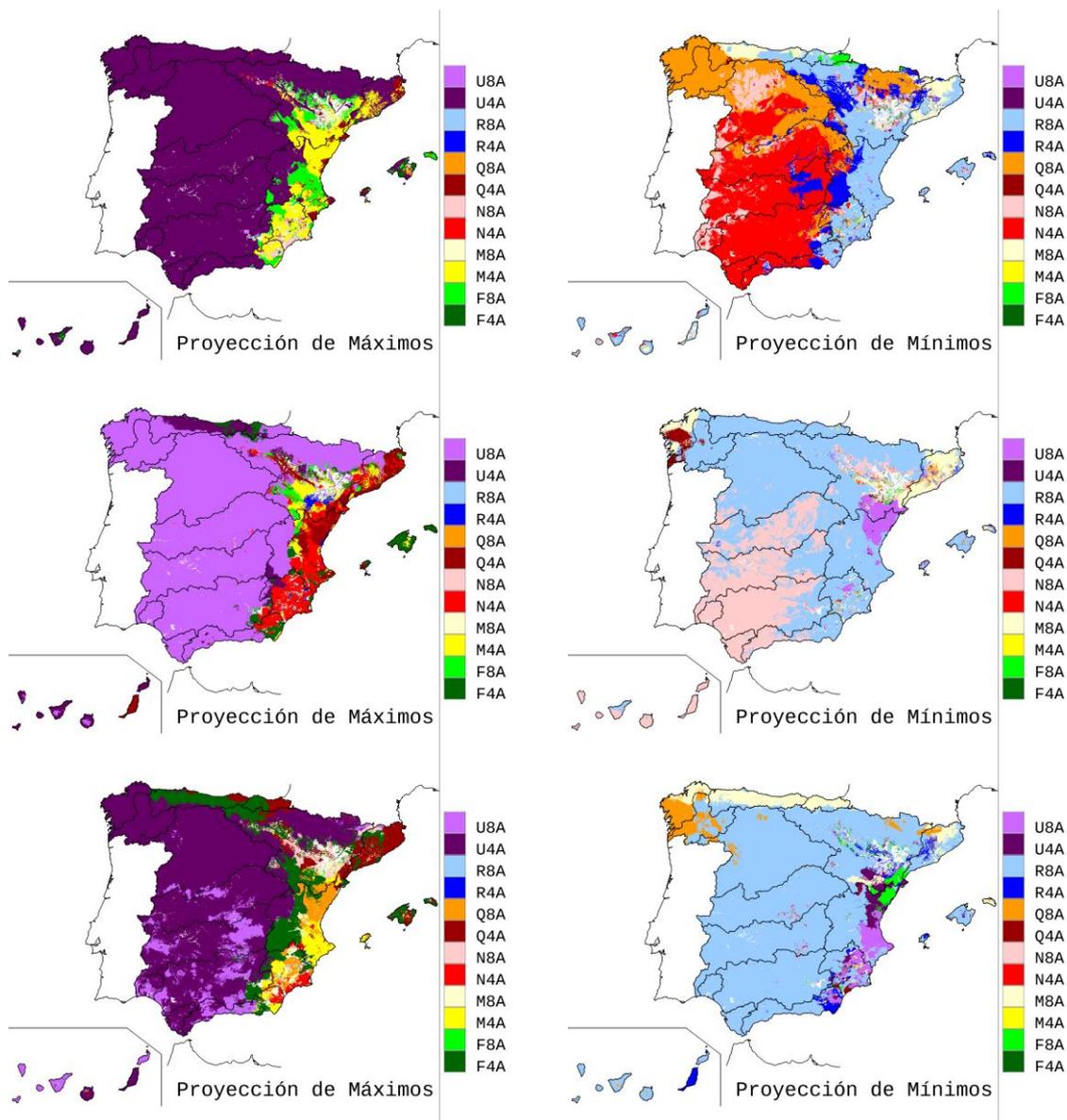


Figura 144. Proyección que da los máximos y mínimos  $\Delta$  (%) ESC anual durante PI1 (arriba), PI2 (medio) y PI3 (abajo).

Los mapas son muy diferentes en el PI2 (Figura 144 medio). Es la proyección U8A la que da los máximos (mayores ascensos o menores descensos) en gran parte de España. U4A los da en el Cantábrico y en zonas de Canarias, N4A, Q4A, M4A y F8A en Levante y F4A en Baleares. Los mínimos los dan R8A y N8A en casi toda España, salvo U4A en Galicia, M8A en Galicia y las CCII de Cataluña, U8A en zonas del Levante.

Para el PI3 (Figura 144 abajo), las proyecciones U4A y U8A (en menor medida) son las que dan los incrementos de ESC máximos en las cuencas occidentales, Pirineos y Canarias. En el Cantábrico los dan F4A y Q4A, ésta hacia el este. En las cuencas del este de España, los máximos los dan diversas proyecciones, casi todas del RCP 4.5 (F4A, M4A, Q4A), si bien también los da Q8A, sobre todo en la parte septentrional de la DH del Júcar. Los mínimos incrementos (máximas reducciones de ESC) los dan las



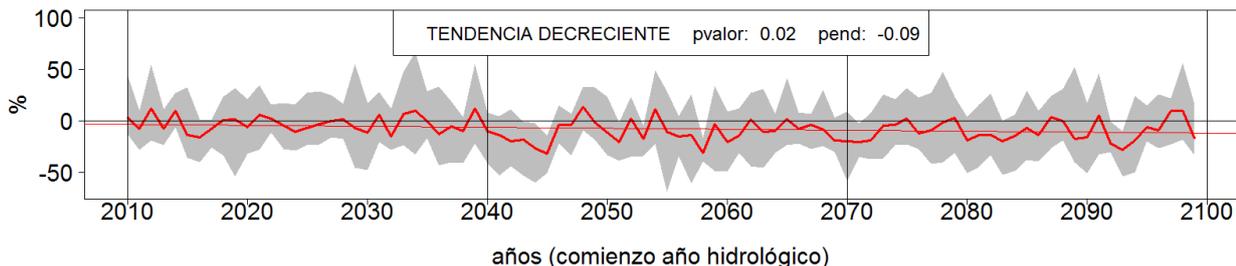
proyecciones del RCP 8.5, especialmente R8A. En el Cantábrico los dan Q8A y M8A y en el este de España los dan varias proyecciones (sobre todo U8A, U4A y F8A).

Con relación a las tendencias de las series de ESC simuladas en los ámbitos de las diferentes DDHH, el análisis de Mann-Kendall indica que las medias de los cambios de las proyecciones de cada RCP dan tendencias significativas decrecientes de ESC en todos los ámbitos analizados (Figura 145). En todos los casos, las pendientes negativas son más acusadas para el RCP 8.5 que para el RCP 4.5. Además, las pendientes negativas más acusadas se dan hacia el sur y este, con máximos de 0.46 %/año en Segura y Baleares, por lo que se estima una mayor aceleración en la disminución de RRHH durante el siglo XXI para el RCP 8.5 y hacia esas zonas. La banda de incertidumbre es más amplia hacia el Mediterráneo y en Canarias.

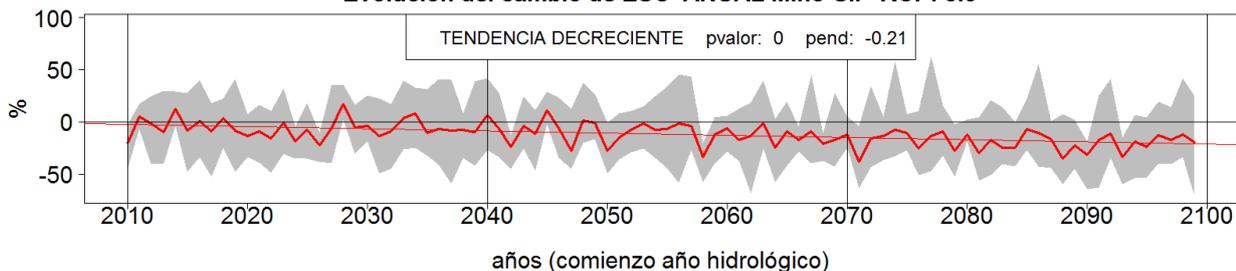
No hay ninguna proyección que dé tendencia creciente significativa en los cambios de ESC para el siglo XXI en ninguno de los ámbitos territoriales (ver anexo 1). Las proyecciones del RCP 8.5 tienden a dar tendencias negativas y las del RCP 4.5 a no dar tendencias significativas. La proyección RA en ambos RCP (R4A y R8A) da tendencia decreciente significativa en todos los ámbitos, tiene fuertes pendientes negativas, superando 0.7 %/año en el sur de España y es por lo tanto la principal responsable de la tendencia negativa cuando se considera el conjunto de proyecciones. La significación de las tendencias de los cambios de ESC para el siglo XXI según cada una de las proyecciones es la misma para todas las cuencas occidentales de la Península, desde Galicia a Andalucía, incluyendo Ceuta, y son las que determinan el comportamiento general de España: tendencias decrecientes según R4A para el RCP 4.5 y según F8A, M8A, Q8A y R8A para el RCP 8.5; el resto de proyecciones no dan tendencias significativas. En el Cantábrico, la principal diferencia con las anteriores radica en que las proyecciones NA y UA dan tendencias decrecientes en ambos RCP. En las DDHH orientales, las proyecciones RA y UA dan tendencias decrecientes y las NA no significativas. Destaca que todas las proyecciones del RCP 8.5 y hasta tres del RCP 4.5 (NA, RA y UA) den tendencias negativas en Baleares. Sorprende que la proyección U4A dé tendencia negativa mientras que U8A no da tendencia en las CCII de Cataluña y en Canarias. En Canarias, las 4 islas más occidentales tienen un comportamiento similar y son las que determinan el comportamiento general del archipiélago al ser las más lluviosas y con mayor ESC; su escasez en las islas orientales limita la validez del test y hace que se den resultados muy dispares, como la tendencia creciente según U8A en Fuerteventura.



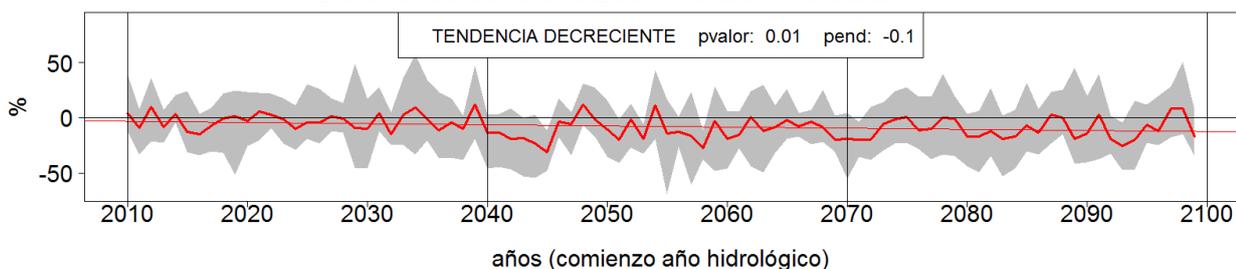
**Evolución del cambio de ESC ANUAL Miño-Sil RCP: 4.5**



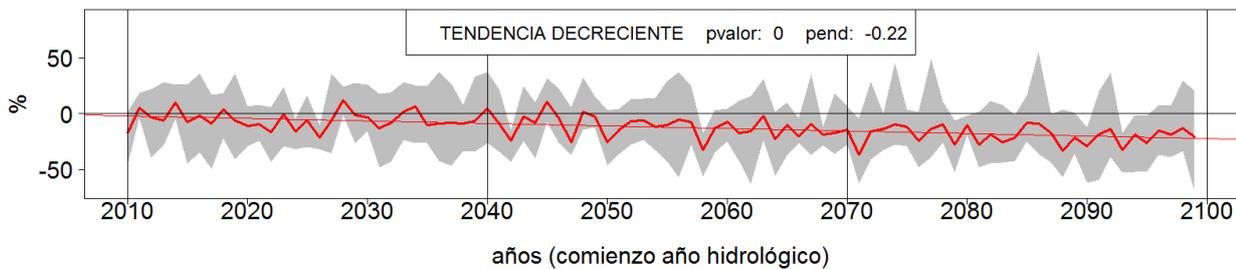
**Evolución del cambio de ESC ANUAL Miño-Sil RCP: 8.5**



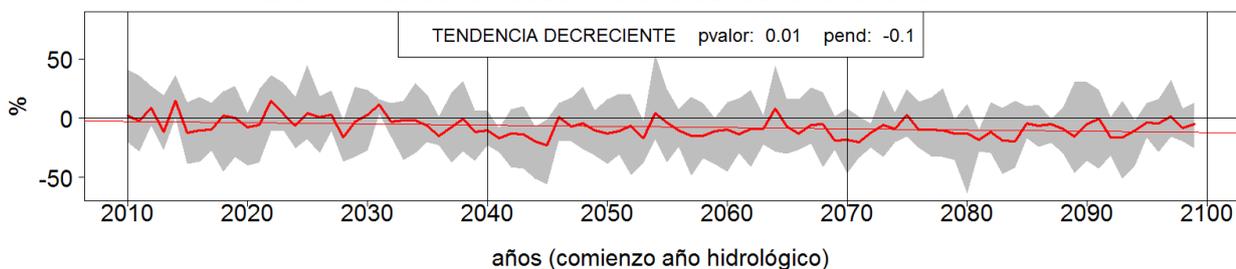
**Evolución del cambio de ESC ANUAL Galicia Costa RCP: 4.5**



**Evolución del cambio de ESC ANUAL Galicia Costa RCP: 8.5**

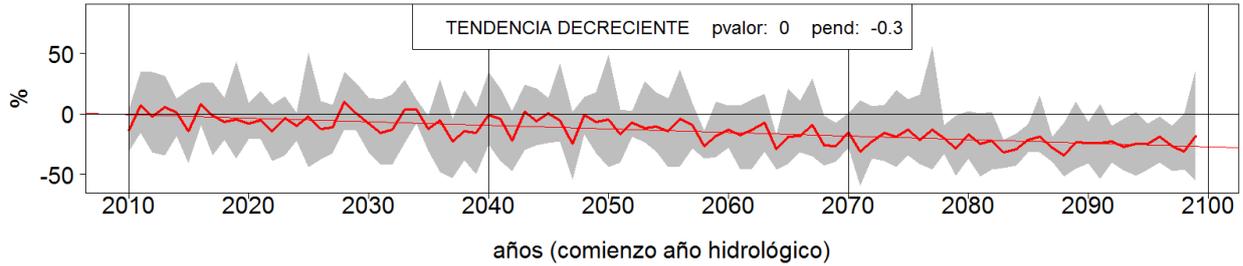


**Evolución del cambio de ESC ANUAL Cantábrico Occidental RCP: 4.5**

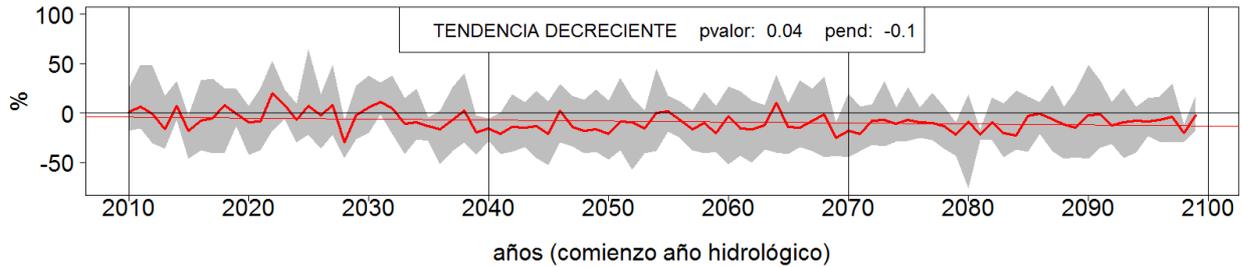




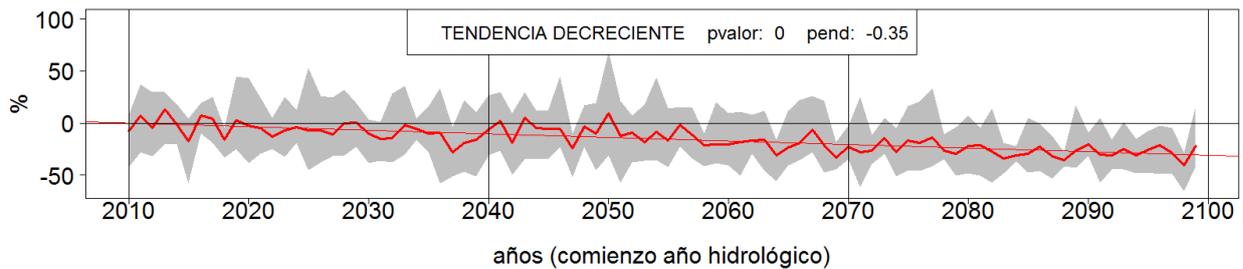
**Evolución del cambio de ESC ANUAL Cantábrico Occidental RCP: 8.5**



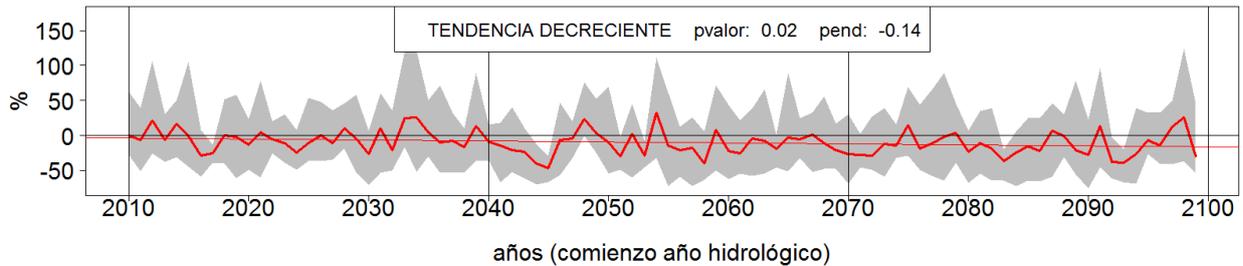
**Evolución del cambio de ESC ANUAL Cantábrico Oriental RCP: 4.5**



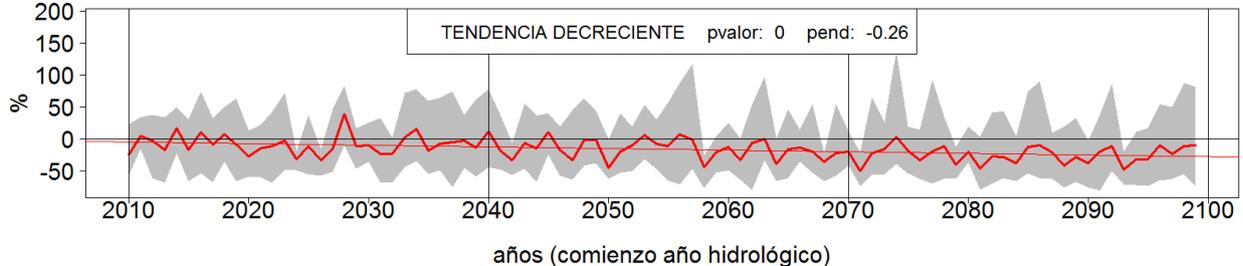
**Evolución del cambio de ESC ANUAL Cantábrico Oriental RCP: 8.5**



**Evolución del cambio de ESC ANUAL Duero RCP: 4.5**

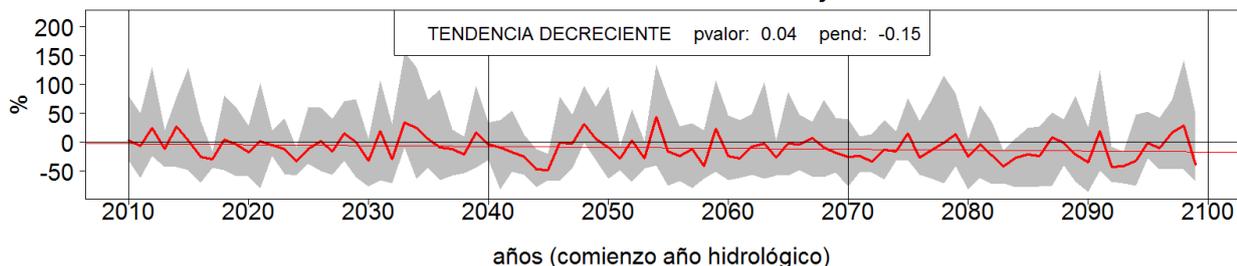


**Evolución del cambio de ESC ANUAL Duero RCP: 8.5**

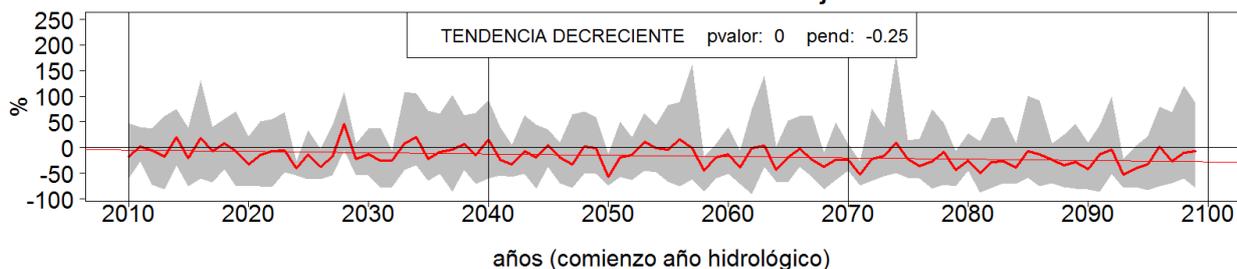




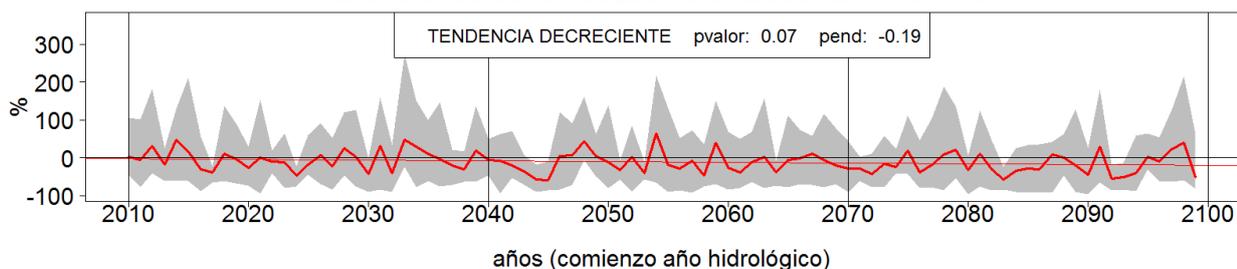
**Evolución del cambio de ESC ANUAL Tajo RCP: 4.5**



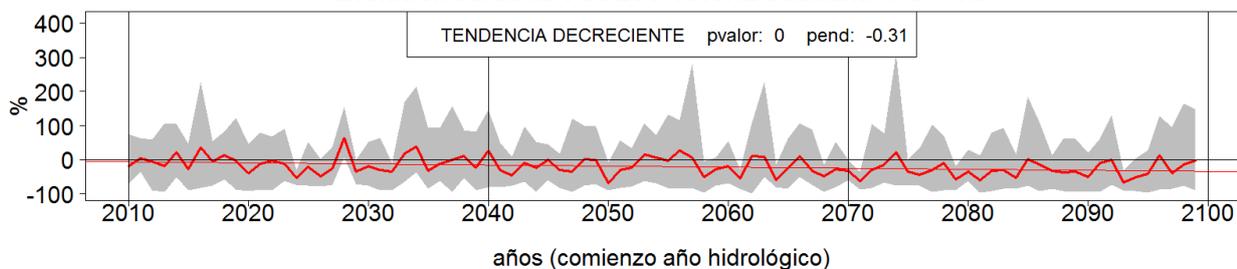
**Evolución del cambio de ESC ANUAL Tajo RCP: 8.5**



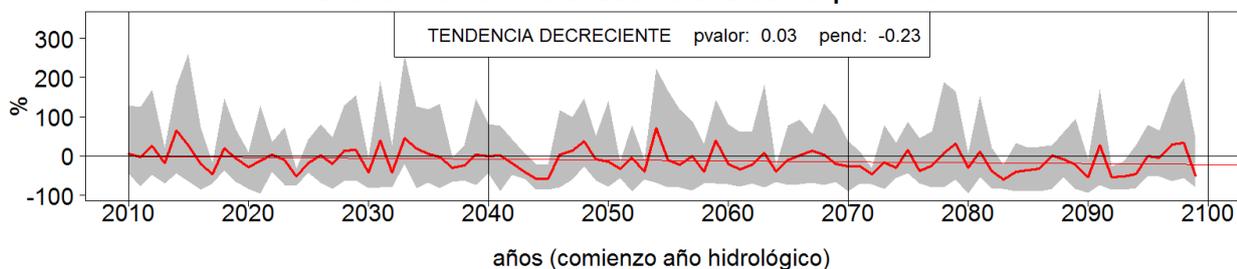
**Evolución del cambio de ESC ANUAL Guadiana RCP: 4.5**

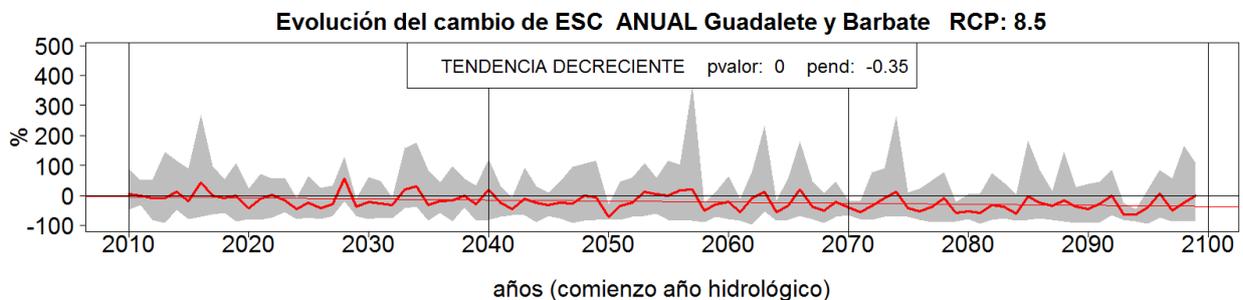
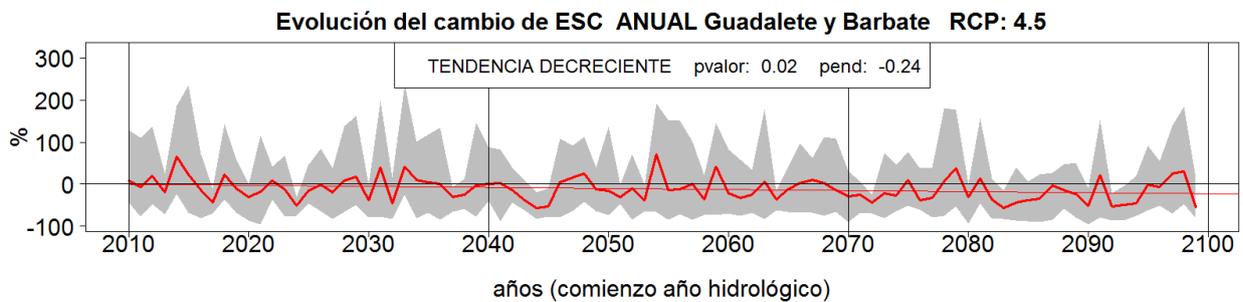
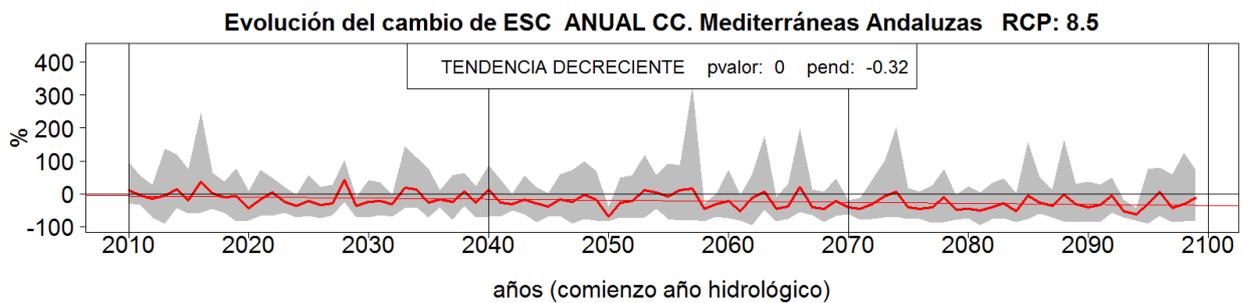
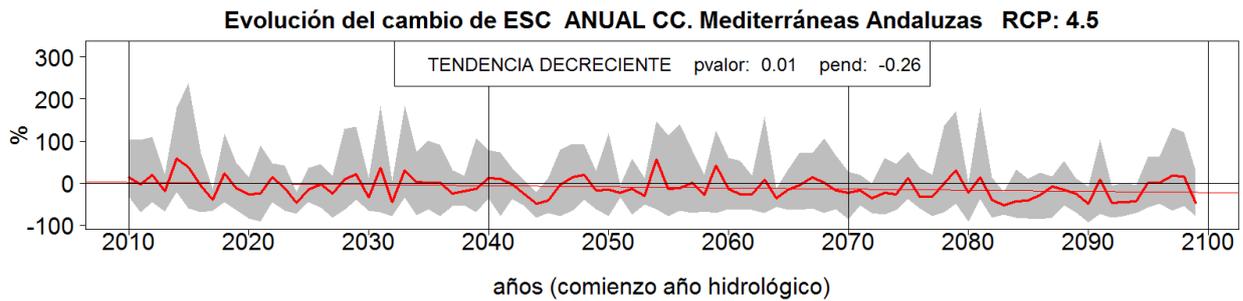
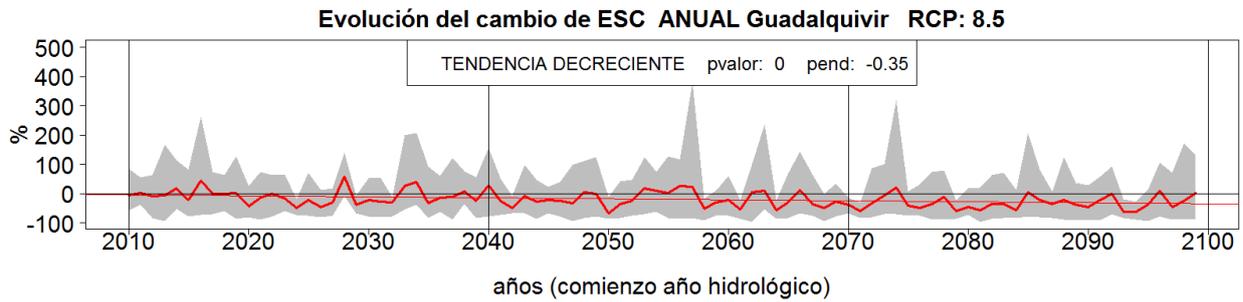


**Evolución del cambio de ESC ANUAL Guadiana RCP: 8.5**



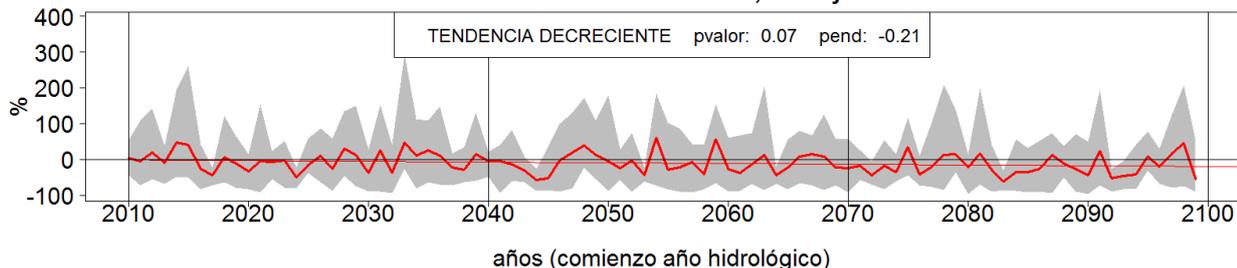
**Evolución del cambio de ESC ANUAL Guadalquivir RCP: 4.5**



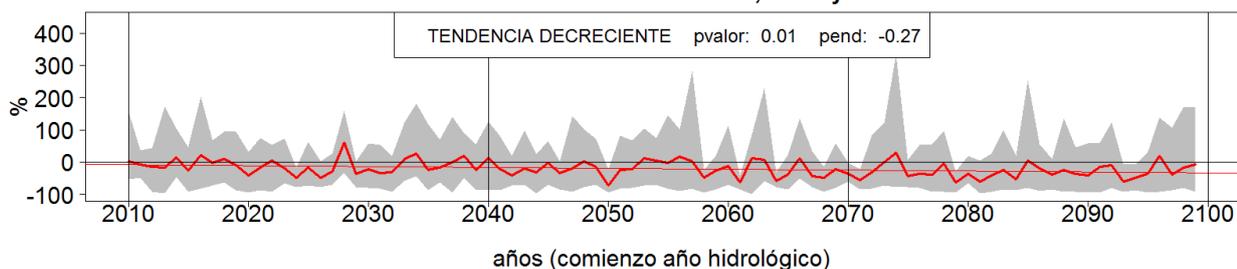




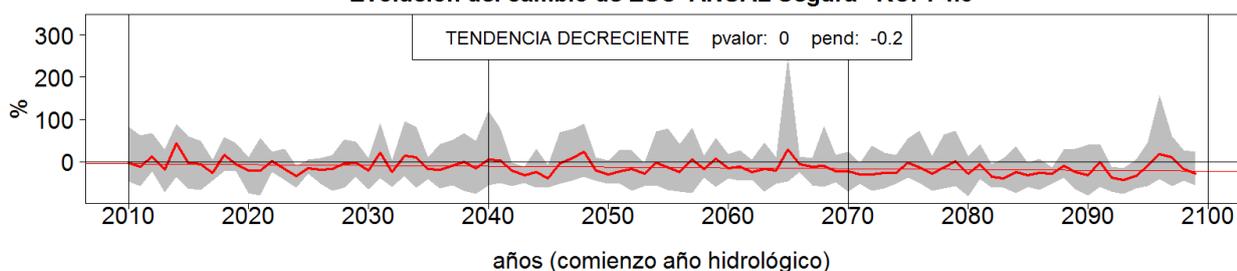
**Evolución del cambio de ESC ANUAL Tinto, Odiel y Piedras RCP: 4.5**



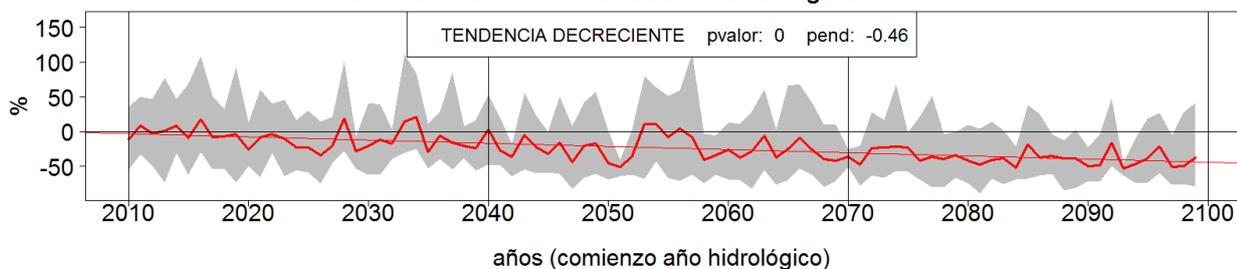
**Evolución del cambio de ESC ANUAL Tinto, Odiel y Piedras RCP: 8.5**



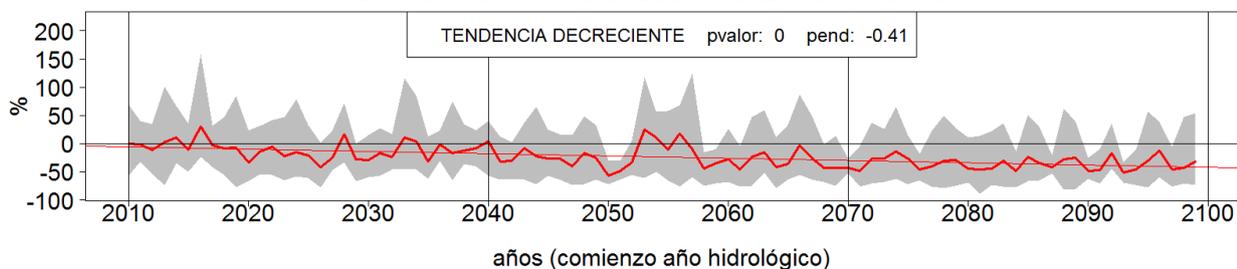
**Evolución del cambio de ESC ANUAL Segura RCP: 4.5**

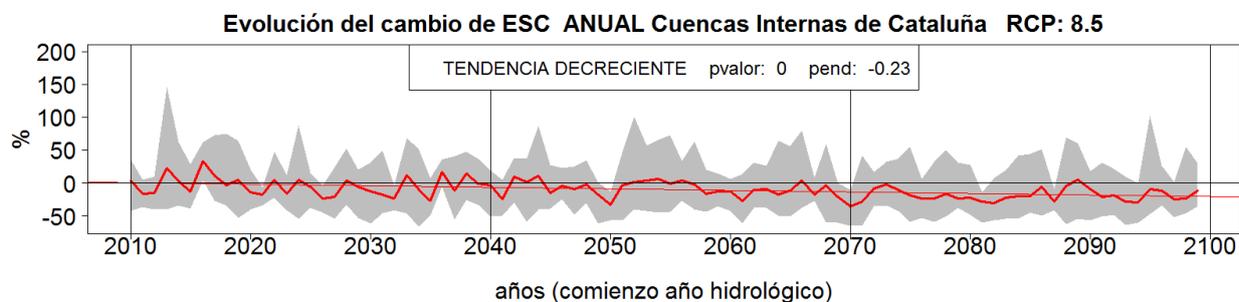
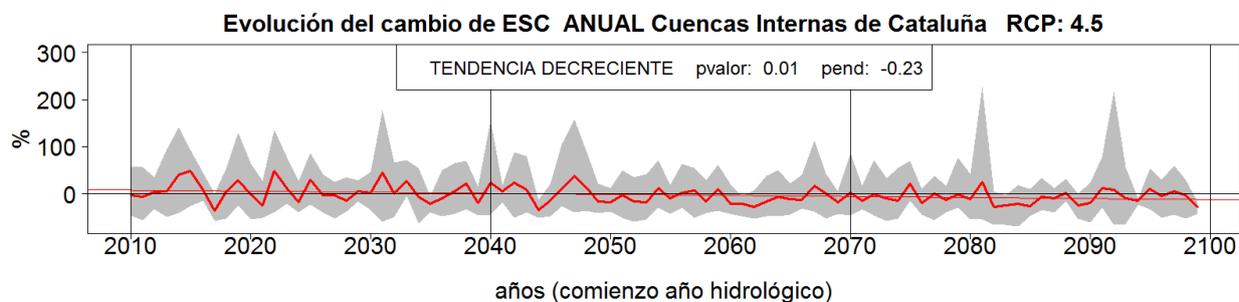
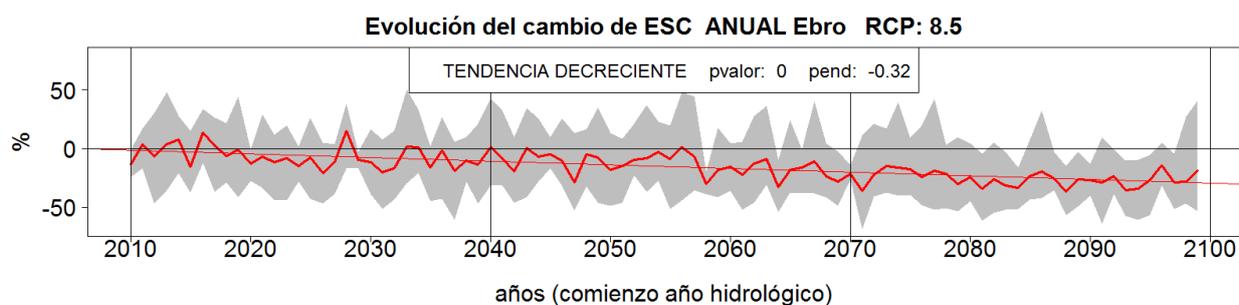
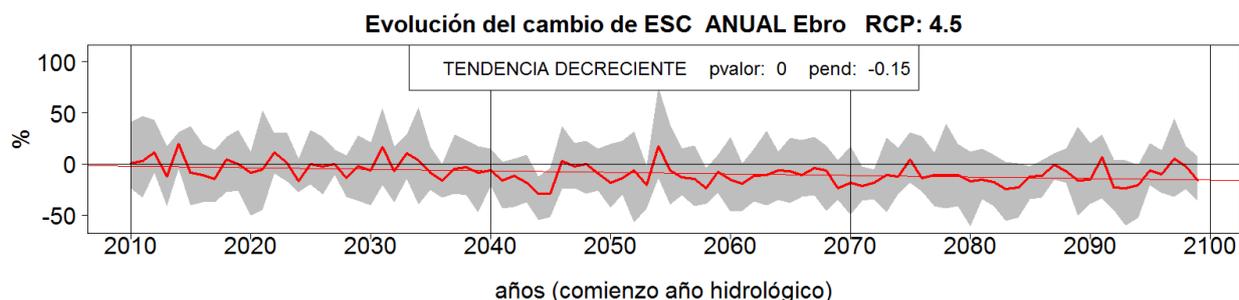
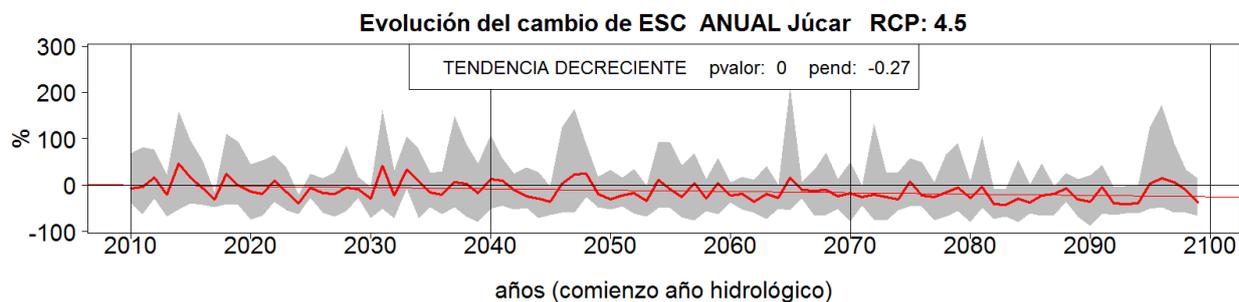


**Evolución del cambio de ESC ANUAL Segura RCP: 8.5**



**Evolución del cambio de ESC ANUAL Júcar RCP: 8.5**





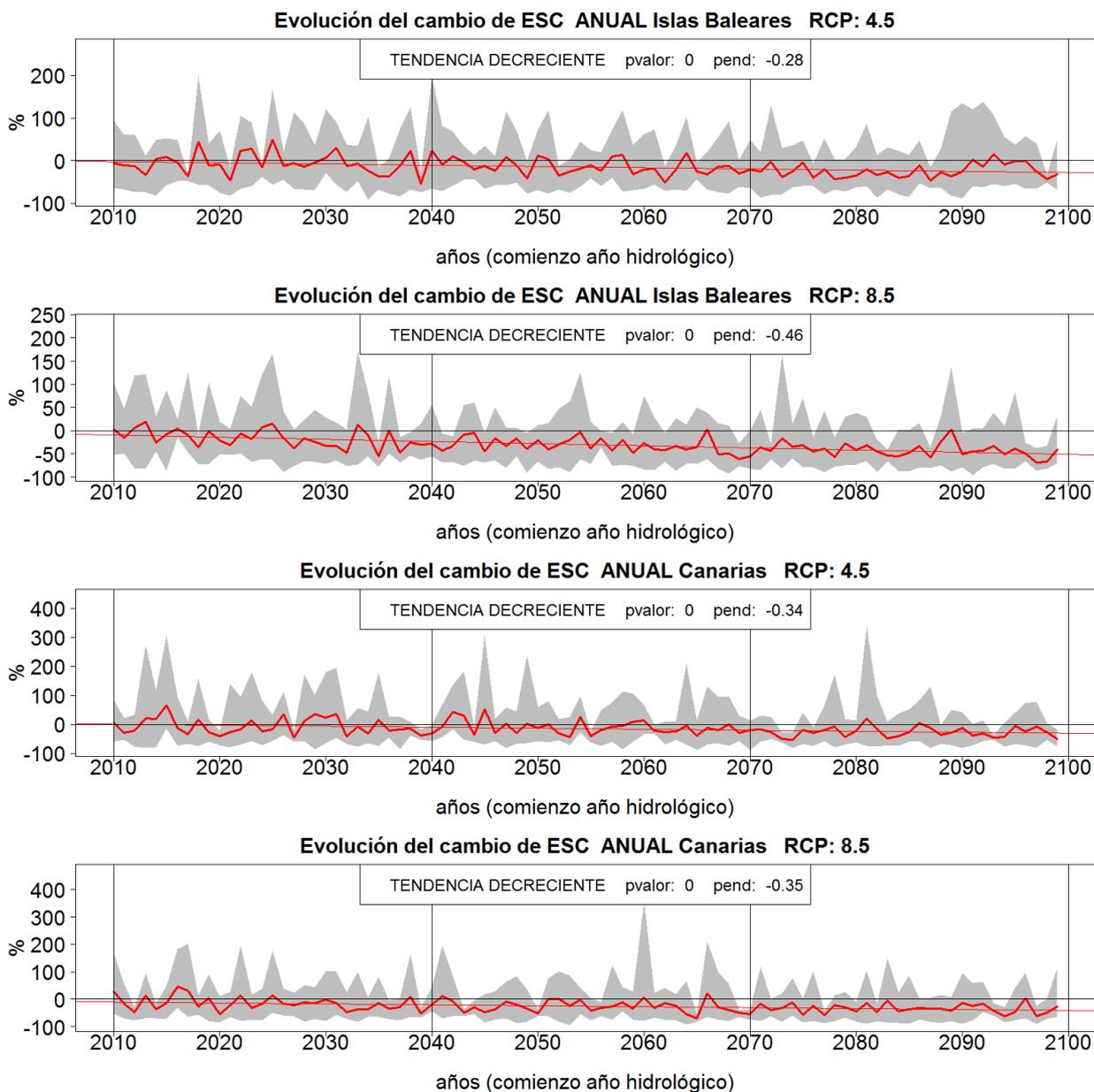


Figura 145. Tendencia del  $\Delta$  (%) ESC del año 2010 al 2099 para los RCP 4.5 (arriba) y 8.5 (abajo) en cada DH. La banda gris indica el rango de resultados de las proyecciones. La línea gruesa indica su promedio y la recta delgada su pendiente; negra: sin tendencia, roja: decreciente, azul: creciente. Se indica el p-valor del test de Mann Kendall.

Los cambios de ESC para cada uno de los tres PI en cada DH muestran en primer lugar las grandes diferencias en los resultados de cada proyección (Tabla 24 y Figura 146). El rango de variación es mayor hacia el sur de la Península, en el RCP 8.5 y en los PI más lejanos, llegando a oscilar entre -65% (R8A) y 21% (U8A) en Tinto, Odiel y Piedras para el PI3 del RCP 8.5. Las proyecciones U4A, U8A y, en menor medida, F4A y F8A dan ascensos de ESC, superándose aumentos del 40% para el PI1 según U4A en DDHH del sur. En el lado contrario, R8A y R4A dan los mayores descensos, llegando a reducirse la ESC en más de la mitad para el PI3 en todas las DDHH al sur del Duero, además de Baleares, que es donde una proyección pronostica los mayores



descensos para cualquier PI. Resalta que casi todas las proyecciones pronostican un descenso de ESC en Baleares para RCP 4.5 y todas para RCP 8.5, atenuándose el efecto al alza que suelen dar las proyecciones UA y acentuándose el efecto a la baja de las RA (Figura 146). No obstante, se estima que el cambio de ESC para el PI1 en Baleares oscilaría desde un aumento del 8% a una disminución del 40%.

Los cambios en ESC agudizan los cambios en PRE estimados por las proyecciones (Tabla 7). Esto es muy notable en las cuencas mediterráneas donde la relación  $\Delta\text{ESC}/\Delta\text{PRE}$  es mayor debido a sus menores ESC.

Con relación al promedio de  $\Delta$  de las proyecciones, se ve que hay un descenso de ESC en todos los PI, RCP y ámbitos; con una única excepción: el aumento de ESC del 6% en las CCII de Cataluña para el PI1 y RCP 4.5. Los descensos son mayores para el RCP 8.5 que el RCP 4.5. Los descensos aumentan del PI1 al PI2 y PI3, salvo en las DDHH del norte que tienen valores similares del PI2 y PI3 para el RCP 4.5. Las mayores diferencias entre periodos se dan entre PI2 y PI3 para el RCP 8.5, que es cuando más se notaría la diferencia en las emisiones de GEI.

Los descensos porcentuales son mayores hacia el sur. Para el PI1 y RCP 4.5 se estiman descensos mayoritarios del -2% al -4% en la mayor parte de la Península, siendo más notables en Segura y Baleares (-7%) y Canarias (-6%) y con aumentos sólo en las CCII de Cataluña (6%). Para el PI1 y RCP 8.5 se estiman descensos en el norte del -4% al -7%, del -8% al -11% en el resto, salvo descensos mayores de las islas Baleares (-16%) y Canarias (-14%).

Para el PI2 y RCP 4.5, los cambios de ESC oscilan entre el -8% y el -13%, con los mínimos descensos en las CCII de Cataluña (-4%) y no se observa un mayor descenso hacia el sur peninsular. Para el PI2 y RCP 8.5, los descensos van aumentando desde el NO (-11%) hacia el sur (-20%) y sureste (-24%). Destacan el descenso moderado en las CCII de Cataluña (-8%) y los fuertes descensos de Canarias (-25%) y sobre todo de Baleares (-31%).

Para el PI3 y RCP 4.5, los cambios rondan el -10% en el norte, siendo del -8% en Cataluña y -12% en el Ebro, y van acentuándose hacia el sur, rondando el -20% en las DDHH del sur y Levante. En Baleares es -24% y en Canarias -26%. Para el PI3 y RCP 8.5, los descensos medios son muy importantes. Los cambios son el -19% en el NO y NE, rondan el -25% en Cantábrico, Duero, Tajo y Ebro, el -30% en el sur, sobre el -37% en Júcar y Segura, el -34% en Canarias y el -42% en Baleares.

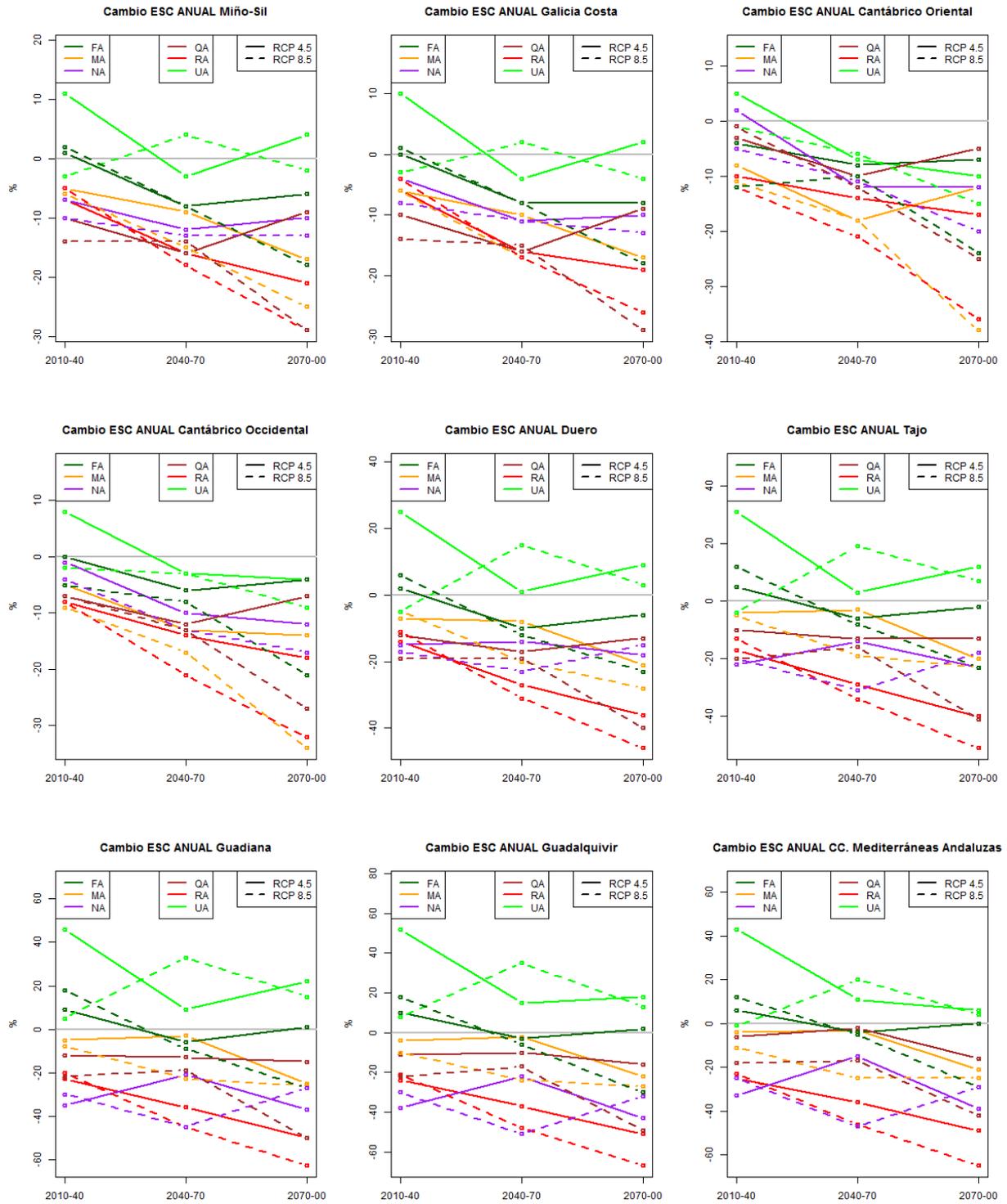
Un aspecto controvertido ligado con el amplio rango de resultados es la ponderación de los mismos en función del sesgo de la proyección, de manera que se podría dar más valor a los cambios estimados por aquellas proyecciones que mejor ajusten los datos observados, básicamente la PRE del PC. No obstante, el ajuste va por zonas, de manera que en algunas zonas ajusta mejor una proyección y en otras otra (Tabla 5). Así por ejemplo, las proyecciones FA son las que tienen menor sesgo en las DDHH mediterráneas, en donde los resultados de impacto están sujetos a una destacada incertidumbre porque las proyecciones infravaloran la ya escasa PRE de esas zonas. En concreto, el cambio medio estimado en la DDHH del Júcar en el PI1 es -4% para el RCP 4.5 y -16% para el RCP 8.5, mientras que los estimados por las proyecciones con menos sesgo (FA) son +5% para el RCP 4.5 y +15% para el RCP 8.5. Algo similar



ocurre en las Islas Baleares, donde por ejemplo, el incremento para el PI1 y RCP 8.5 es del -16% si se considera el promedio de las proyecciones y sólo del -3% según F8A.

Tabla 24. Δ (%) ESC en cada DH y PI según cada proyección. Se indican los valores máximo (Mx), mínimo (Mn) y el promedio (Med) para cada RCP. Los colores reflejan la gradación del cambio.

ESC Δ Anual (%)		RCP 4.5									RCP 8.5								
		F4A	M4A	N4A	Q4A	R4A	U4A	Mx	Med	Mn	F8A	M8A	N8A	Q8A	R8A	U8A	Mx	Med	Mn
Miño-Sil	2010-2040	1	-5	-7	-10	-7	11	11	-3	-10	2	-6	-10	-14	-5	-3	2	-6	-14
	2040-2070	-8	-9	-12	-16	-16	-3	-3	-11	-16	-8	-15	-13	-14	-18	4	4	-11	-18
	2070-2100	-6	-17	-10	-9	-21	4	4	-10	-21	-18	-25	-13	-29	-29	-2	-2	-19	-29
Galicia Costa	2010-2040	0	-6	-4	-10	-6	10	10	-3	-10	1	-6	-8	-14	-4	-3	1	-6	-14
	2040-2070	-8	-10	-11	-16	-16	-4	-4	-11	-16	-8	-17	-11	-15	-17	2	2	-11	-17
	2070-2100	-8	-17	-10	-9	-19	2	2	-10	-19	-18	-26	-13	-29	-26	-4	-4	-19	-29
Cantábrico Oriental	2010-2040	-4	-8	2	-3	-10	5	5	-3	-10	-12	-11	-5	-1	-12	-1	-1	-7	-12
	2040-2070	-8	-18	-12	-10	-14	-7	-7	-12	-18	-10	-18	-11	-12	-21	-6	-6	-13	-21
	2070-2100	-7	-12	-12	-5	-17	-10	-10	-10	-17	-24	-38	-20	-25	-36	-15	-15	-26	-38
Cantábrico Occidental	2010-2040	0	-5	-1	-7	-8	8	8	-2	-8	-5	-9	-4	-7	-8	-2	-2	-6	-9
	2040-2070	-6	-13	-10	-12	-14	-3	-3	-10	-14	-8	-17	-13	-13	-21	-3	-3	-12	-21
	2070-2100	-4	-14	-12	-7	-18	-4	-4	-10	-18	-21	-34	-17	-27	-32	-9	-9	-23	-34
Duero	2010-2040	2	-7	-15	-12	-14	25	25	-3	-15	6	-5	-17	-19	-11	-5	6	-9	-19
	2040-2070	-10	-8	-14	-17	-27	1	1	-13	-27	-12	-20	-23	-19	-31	15	15	-15	-31
	2070-2100	-6	-21	-18	-13	-36	9	9	-14	-36	-23	-28	-15	-40	-46	3	3	-25	-46
Tajo	2010-2040	5	-4	-22	-10	-17	31	31	-3	-22	12	-5	-20	-20	-13	-4	12	-8	-20
	2040-2070	-6	-3	-14	-13	-29	3	3	-11	-29	-8	-19	-31	-16	-34	19	19	-15	-34
	2070-2100	-2	-20	-23	-13	-40	12	12	-14	-40	-23	-23	-18	-41	-51	7	7	-25	-51
Guadiana	2010-2040	9	-5	-35	-12	-23	46	46	-3	-35	18	-8	-30	-22	-20	5	18	-9	-30
	2040-2070	-6	-3	-21	-13	-36	9	9	-12	-36	-9	-23	-45	-19	-45	33	33	-18	-45
	2070-2100	1	-25	-37	-15	-50	22	22	-17	-50	-27	-26	-27	-50	-63	15	15	-30	-63
Guadalquivir	2010-2040	10	-4	-38	-11	-24	52	52	-2	-38	18	-10	-30	-22	-21	8	18	-10	-30
	2040-2070	-3	-2	-22	-10	-37	15	15	-10	-37	-6	-24	-51	-17	-48	35	35	-18	-51
	2070-2100	2	-22	-43	-16	-51	18	18	-19	-51	-30	-27	-32	-49	-67	13	13	-32	-67
Cuencas Mediterráneas Andaluzas	2010-2040	6	-4	-33	-6	-25	43	43	-3	-33	12	-11	-25	-18	-23	-1	12	-11	-25
	2040-2070	-4	-3	-15	-2	-36	11	11	-8	-36	-5	-25	-47	-17	-46	20	20	-20	-47
	2070-2100	0	-21	-39	-16	-49	6	6	-20	-49	-29	-25	-29	-42	-65	4	4	-31	-65
Guadalete y Barbate	2010-2040	10	-7	-38	-11	-25	48	48	-4	-38	15	-13	-31	-21	-21	6	15	-11	-31
	2040-2070	-2	-2	-21	-8	-37	14	14	-10	-37	-5	-27	-51	-18	-47	31	31	-20	-51
	2070-2100	1	-24	-43	-16	-52	12	12	-20	-52	-31	-27	-31	-49	-67	7	7	-33	-67
Tinto, Odiel y Piedras	2010-2040	1	-4	-36	-8	-21	54	54	-2	-36	14	-5	-36	-17	-22	-1	14	-11	-36
	2040-2070	-8	-6	-19	-4	-37	15	15	-10	-37	-14	-26	-51	-16	-46	34	34	-20	-51
	2070-2100	-1	-25	-44	-12	-50	25	25	-18	-50	-26	-24	-35	-48	-65	21	21	-29	-65
Segura	2010-2040	6	-4	-21	-13	-22	15	15	-7	-22	12	-13	-19	-23	-19	7	12	-9	-23
	2040-2070	-1	-7	-10	-18	-32	-1	-1	-11	-32	-10	-17	-37	-23	-48	-3	-3	-23	-48
	2070-2100	-6	-19	-28	-17	-43	-9	-6	-20	-43	-36	-30	-34	-44	-63	-17	-17	-38	-63
Júcar	2010-2040	5	1	-17	-7	-26	21	21	-4	-26	15	-12	-20	-20	-25	-4	15	-11	-25
	2040-2070	-6	-4	-7	-11	-34	-8	-4	-12	-34	-12	-21	-34	-22	-49	-7	-7	-24	-49
	2070-2100	-7	-16	-26	-18	-46	-11	-7	-21	-46	-36	-28	-26	-41	-62	-20	-20	-36	-62
Ebro	2010-2040	0	-6	-3	-7	-12	15	15	-2	-12	-3	-9	-7	-9	-10	-2	-2	-7	-10
	2040-2070	-9	-12	-10	-13	-19	-5	-5	-11	-19	-9	-19	-14	-16	-25	4	4	-13	-25
	2070-2100	-7	-16	-12	-10	-25	-3	-3	-12	-25	-25	-33	-14	-32	-40	-10	-10	-26	-40
Cuencas Internas de Cataluña	2010-2040	5	7	3	4	-9	24	24	6	-9	6	-17	-3	0	-8	-4	6	-4	-17
	2040-2070	-4	-8	1	6	-13	-6	6	-4	-13	3	-22	-11	-7	-15	4	4	-8	-22
	2070-2100	3	-15	-10	8	-20	-10	8	-8	-20	-20	-31	-3	-25	-27	-7	-3	-19	-31
Islas Baleares	2010-2040	1	-15	0	-7	-26	8	8	-7	-26	-3	-21	-12	-14	-40	-6	-3	-16	-40
	2040-2070	6	-17	-10	-7	-39	-13	6	-13	-39	-20	-35	-34	-21	-56	-19	-19	-31	-56
	2070-2100	-4	-19	-33	-10	-52	-24	-4	-24	-52	-28	-54	-28	-40	-69	-32	-28	-42	-69
Canarias	2010-2040	6	-10	-27	-9	-18	25	25	-6	-27	7	-22	-24	-4	-32	-11	7	-14	-32
	2040-2070	-10	-22	-22	-1	-26	22	22	-10	-26	-19	-29	-46	-27	-41	14	14	-25	-46
	2070-2100	-22	-22	-38	-18	-44	-11	-11	-26	-44	-33	-39	-25	-50	-60	3	3	-34	-60



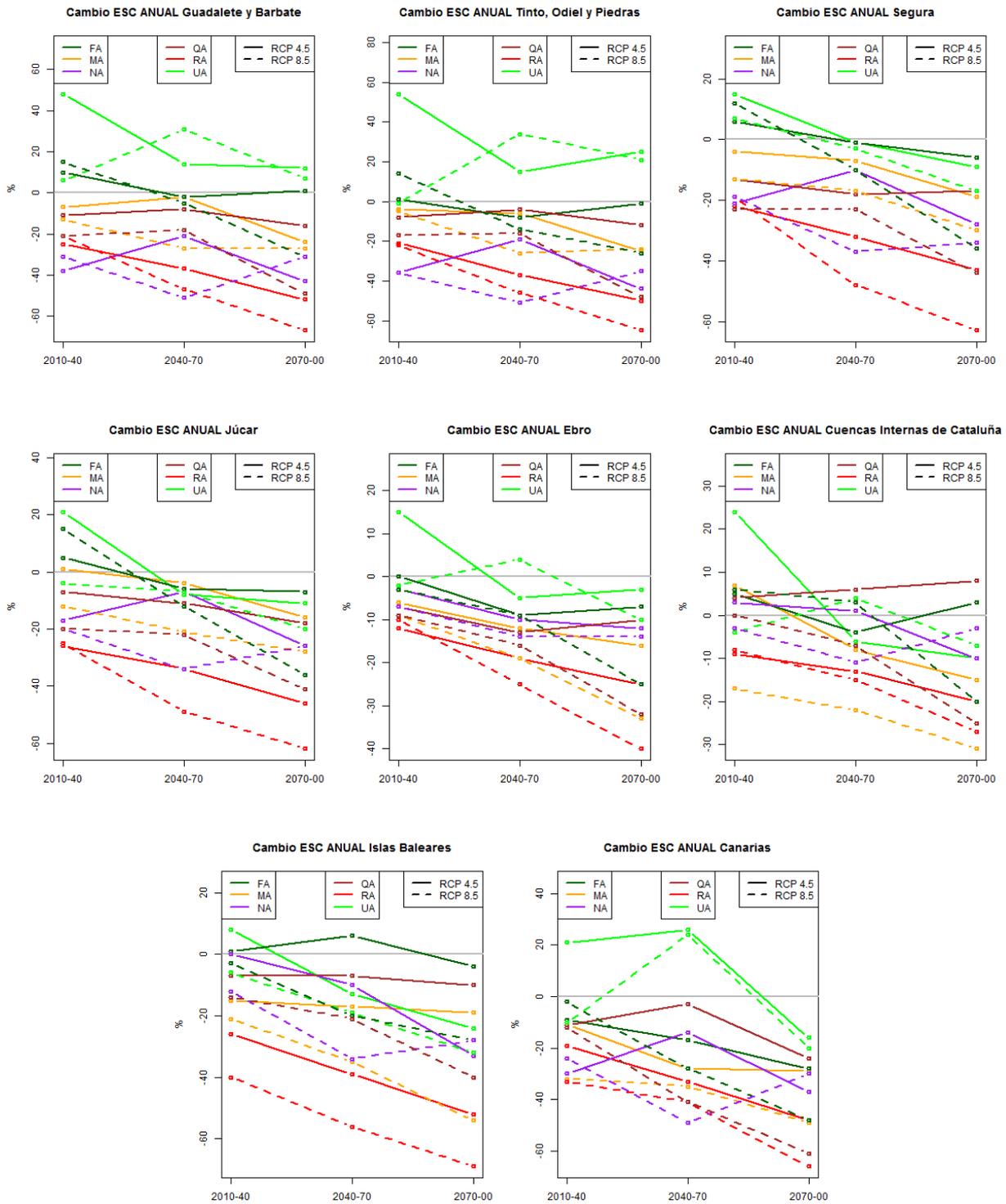
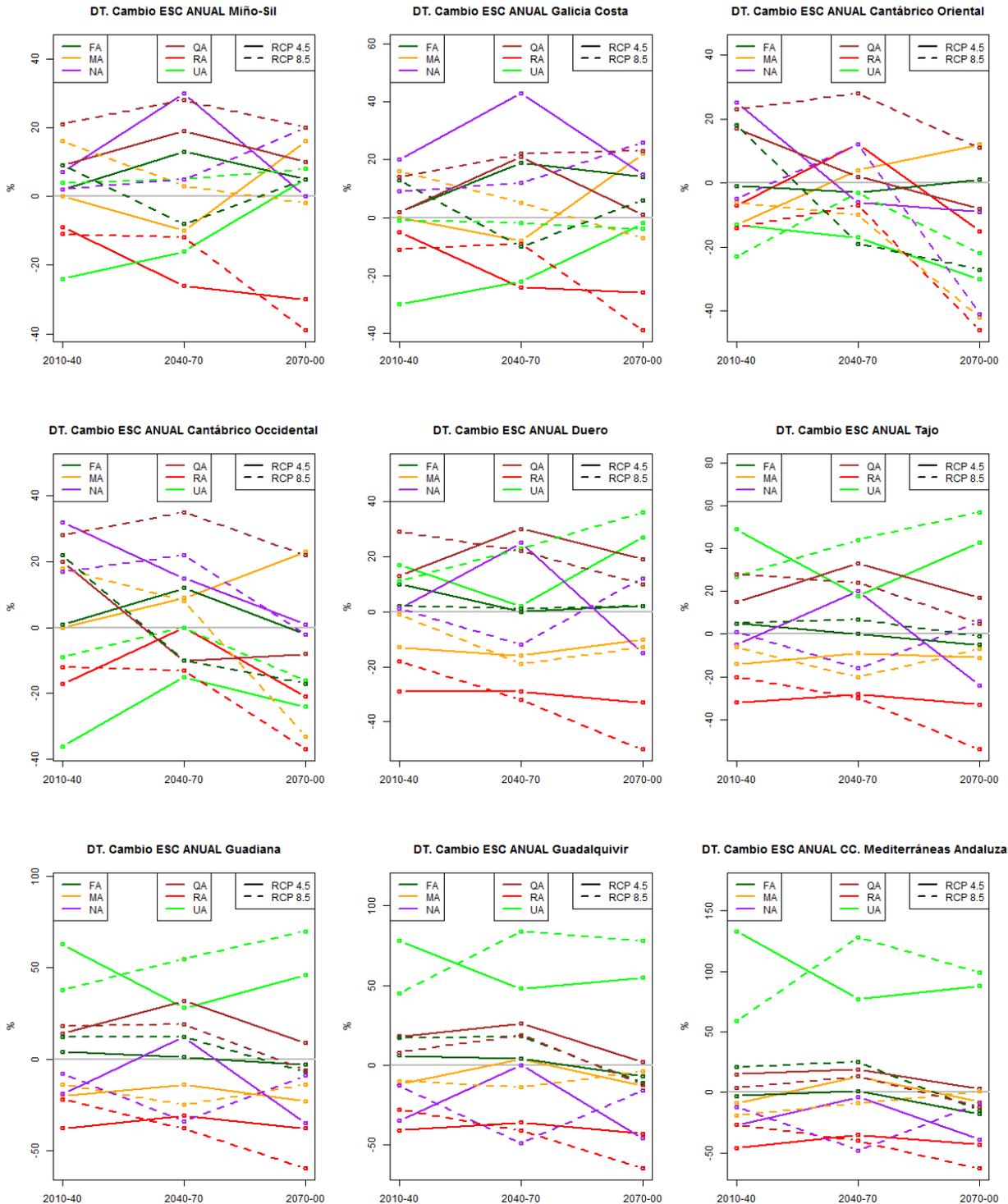


Figura 146.  $\Delta$  (%) ESC de valores medios anuales en cada DH y PI.

Con relación a la variabilidad, el conjunto de las proyecciones no informan de un claro cambio en la variabilidad en cada DH (Figura 147), ya que el cambio depende de la proyección considerada. Las proyecciones UA, y en menor medida QA, dan aumento de la variabilidad de la ESC en los PI; son las que estiman un menor descenso o

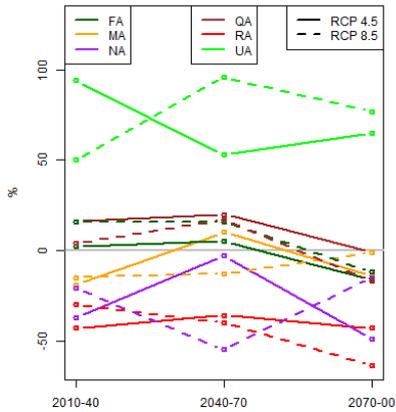


incluso aumento de ESC. Por el contrario, las proyecciones que dan más descenso de ESC anual son las que dan descenso de variabilidad anual (RA). No hay un patrón común de cambio respecto a su comportamiento conforme avanza el siglo XXI o a la relación entre la variabilidad y el RCP.

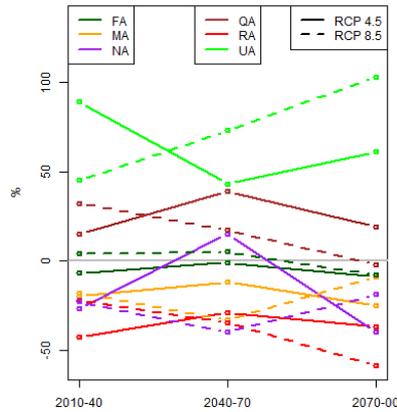




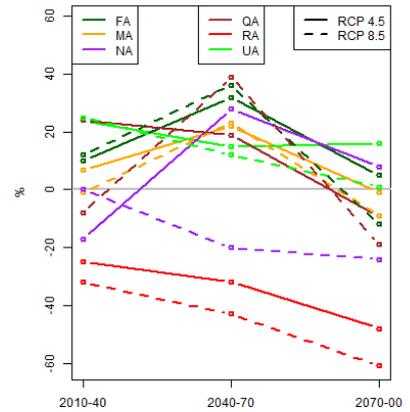
DT. Cambio ESC ANUAL Guadalete y Barbate



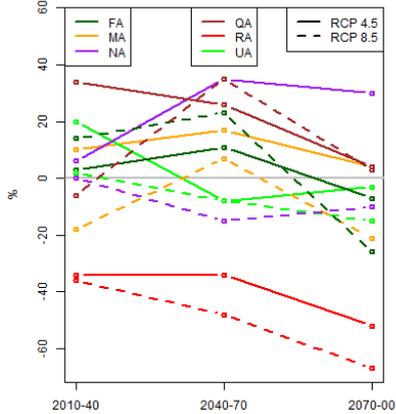
DT. Cambio ESC ANUAL Tinto, Odiel y Piedras



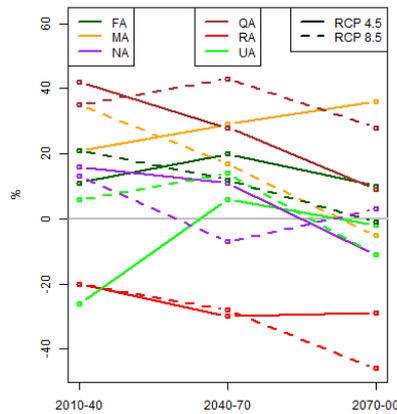
DT. Cambio ESC ANUAL Segura



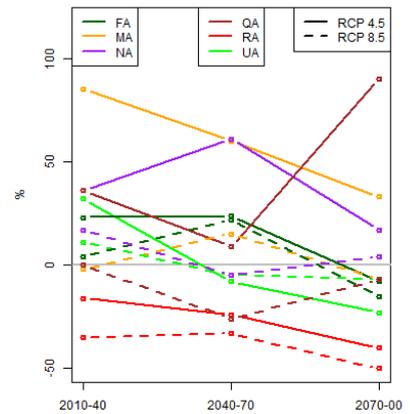
DT. Cambio ESC ANUAL Júcar



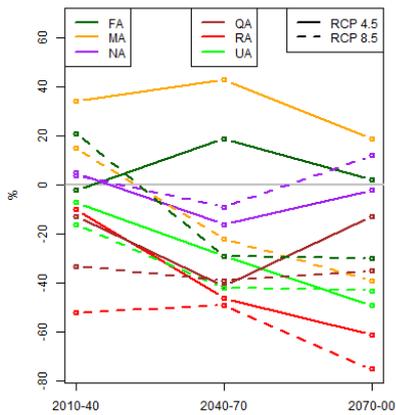
DT. Cambio ESC ANUAL Ebro



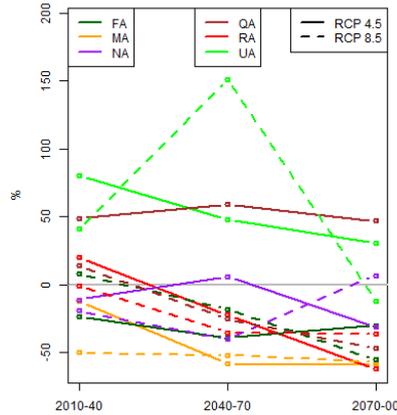
DT. Cambio ESC ANUAL Cuencas Internas de Cataluña



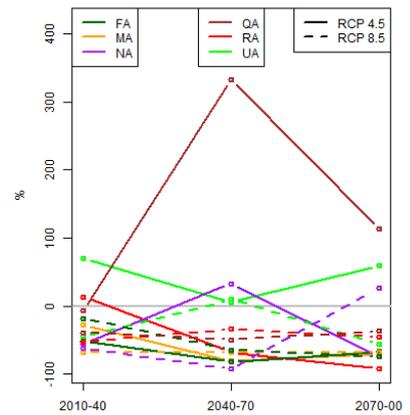
DT. Cambio ESC ANUAL Islas Baleares



DT. Cambio ESC ANUAL Canarias



DT. Cambio ESC ANUAL Gran Canaria



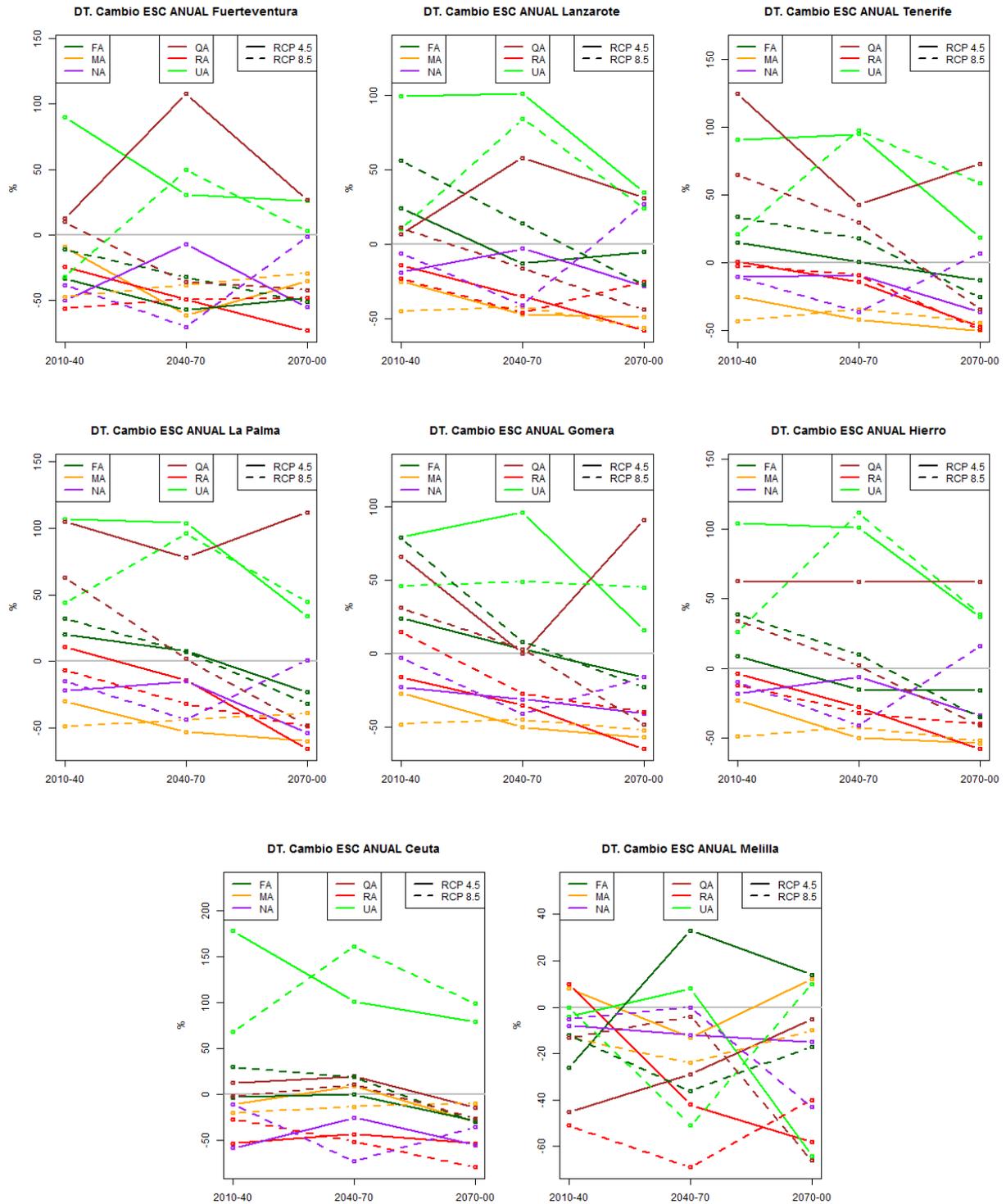


Figura 147.  $\Delta$  de variabilidad (%) de ESC anual en cada DH y PI.



En la Tabla 25 se muestran las variaciones de ESC en las DDHH de menor extensión territorial: las 7 islas Canarias y Ceuta y Melilla. Como se expresó anteriormente, en las tablas similares de este informe, las DDHH de las islas se han agrupado en una sola, Canarias, y las de Ceuta y Melilla se han integrado en la DH de las Cuencas Internas Andaluzas. No obstante, las variaciones de la ESC se han mostrado aquí de manera individualizada al ser ésta la variable que mejor representa los RRHH.

Tabla 25.  $\Delta$  (%) ESC en cada PI según cada proyección en las DDHH de Canarias y Ceuta y Melilla. Los colores reflejan la gradación del cambio.

ESC $\Delta$ Anual (%)		RCP 4.5						RCP 8.5					
		F4A	M4A	N4A	Q4A	R4A	U4A	F8A	M8A	N8A	Q8A	R8A	U8A
Gran Canaria	2010-2040	-9	-11	-30	-11	-19	21	-2	-32	-24	-12	-33	-10
	2040-2070	-17	-28	-14	-3	-33	26	-28	-35	-49	-41	-41	24
	2070-2100	-28	-29	-37	-24	-48	-16	-48	-49	-30	-61	-66	-20
Fuerteventura	2010-2040	-25	-19	-60	-9	-35	33	-5	-62	-60	-18	-61	-63
	2040-2070	-76	-73	0	173	-81	9	-61	-68	-93	-64	-61	-18
	2070-2100	-57	-75	-80	18	-97	18	-72	-69	13	-55	-71	-44
Lanzarote	2010-2040	-26	-4	-62	23	-37	82	-13	-32	-57	22	-58	-26
	2040-2070	-51	-53	-24	43	-63	47	-45	-43	-82	-48	-53	7
	2070-2100	-42	-46	-74	-10	-80	-6	-63	-41	-34	-53	-75	9
Tenerife	2010-2040	12	-13	-27	-16	-20	20	10	-21	-19	-7	-30	-16
	2040-2070	-12	-20	-20	-1	-26	17	-14	-31	-46	-32	-45	6
	2070-2100	-24	-22	-37	-20	-43	-16	-30	-46	-22	-51	-57	-2
La Palma	2010-2040	6	-8	-25	-2	-16	29	5	-18	-25	1	-31	-6
	2040-2070	-5	-19	-24	-1	-22	23	-19	-24	-43	-18	-37	18
	2070-2100	-17	-17	-37	-15	-40	-6	-28	-27	-27	-44	-59	14
La Gomera	2010-2040	4	-12	-38	2	-12	37	9	-26	-39	1	-40	-7
	2040-2070	-7	-27	-33	4	-38	37	-24	-32	-57	-32	-46	19
	2070-2100	-24	-28	-52	-11	-56	-12	-41	-35	-33	-59	-73	5
El Hierro	2010-2040	17	-10	-32	-9	-22	32	25	-28	-39	-4	-37	-1
	2040-2070	-8	-27	-39	-9	-37	39	-19	-30	-63	-26	-45	22
	2070-2100	-17	-29	-49	-15	-60	-10	-25	-35	-42	-53	-69	19
Ceuta	2010-2040	15	-5	-47	-1	-35	65	20	-15	-24	-21	-34	9
	2040-2070	0	-1	-25	3	-46	28	0	-31	-60	-18	-59	36
	2070-2100	-3	-28	-49	-26	-58	16	-38	-30	-42	-50	-78	8
Melilla	2010-2040	-10	2	-15	-33	-28	5	-4	-5	6	-20	-41	-12
	2040-2070	4	-15	5	-13	-38	-17	-36	-22	-25	-42	-69	-50
	2070-2100	-13	0	-27	-20	-60	-54	-44	-44	-30	-65	-70	-39

Estas DDHH tienen dos características: su pequeña extensión y sus bajos valores de ESC, lo que causa fuertes variaciones de ESC y discrepancia entre los resultados de las proyecciones. El caso extremo lo muestra la isla de Fuerteventura, con un rango que oscila entre 173% y -81% para el PI2 del RCP 4.5. Esto es debido a que los valores absolutos estimados por las proyecciones para cada periodo no sobrepasan el valor de 1 mm/año, por lo que pequeñas variaciones absolutas se traducen en fuertes variaciones porcentuales. Algo similar sucede en Lanzarote. Por el contrario, las islas más occidentales, de mayor PRE, tienen menor rango de variación. Los amplios márgenes de variación son un indicativo de la incertidumbre de las conclusiones que se puedan extraer. Otra característica que añade más incertidumbre a los resultados es la complejidad hidrogeológica en esos ámbitos, que ha sido simplificada en el modelo

hidrológico utilizado. En definitiva, hay que tomar con precaución los resultados de la Tabla 25.

Dejando al lado las incertidumbres, se observa que dominan las reducciones de ESC. En general, las reducciones se hacen más acusadas del PI1 al PI2 y al PI3 y en el RCP 8.5 que en el RCP 4.5. Las proyecciones que dan los mayores descensos de ESC son R4A y N4A, en el RCP 4.5, y R8A, N8A y M8A en el RCP 8.5. En el lado contrario, U4A y, menos frecuentemente, U8A, Q4A y FA dan los principales aumentos de ESC.

### 7.5.3 Cambios en el ciclo anual

No hay una clara señal de cambio en el ciclo anual. Los cambios son de escasa cuantía y no se aprecian desplazamientos laterales de los máximos de ESC, siendo lo más destacable cómo el máximo de marzo que dan las proyecciones para el PC se va suavizando progresivamente conforme avanza el siglo XXI (Figura 148).

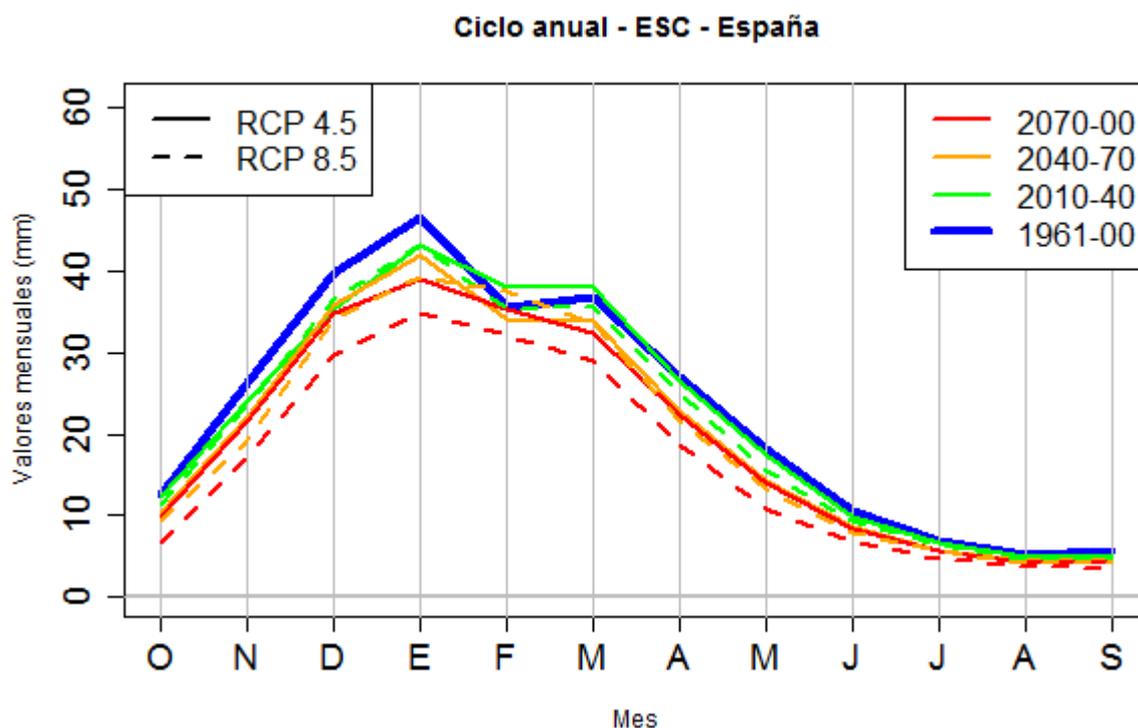


Figura 148. Ciclo anual de ESC para el PC y cada PI para el conjunto de España según la media de las distintas proyecciones para cada RCP.

Al igual que ocurría con la PRE, no se observan unos claros patrones de cambio en el ciclo anual ya que los resultados varían mucho según la proyección climática (Figura 149). Las únicas proyecciones que muestran un claro cambio en la distribución mensual de la ESC son M8A y U8A, que retrasan los máximos de ESC de los PI de uno a dos meses hasta el mes de febrero debido a un retraso en los máximos de PRE. De hecho, lo más destacado es el mayor aumento de la ESC en febrero en todos los PI y RCP, motivado por proyecciones que estiman un fuerte aumento en ese mes. En contraposición se identifica una reducción al final del verano. Hacia finales de siglo y el



CEDEX

RCP 8.5 se hace más patente la reducción en mayo-junio y sobre todo en septiembre-octubre. La media del RCP 8.5 acentúa el descenso en todos los meses respecto a la del RCP 4.5.

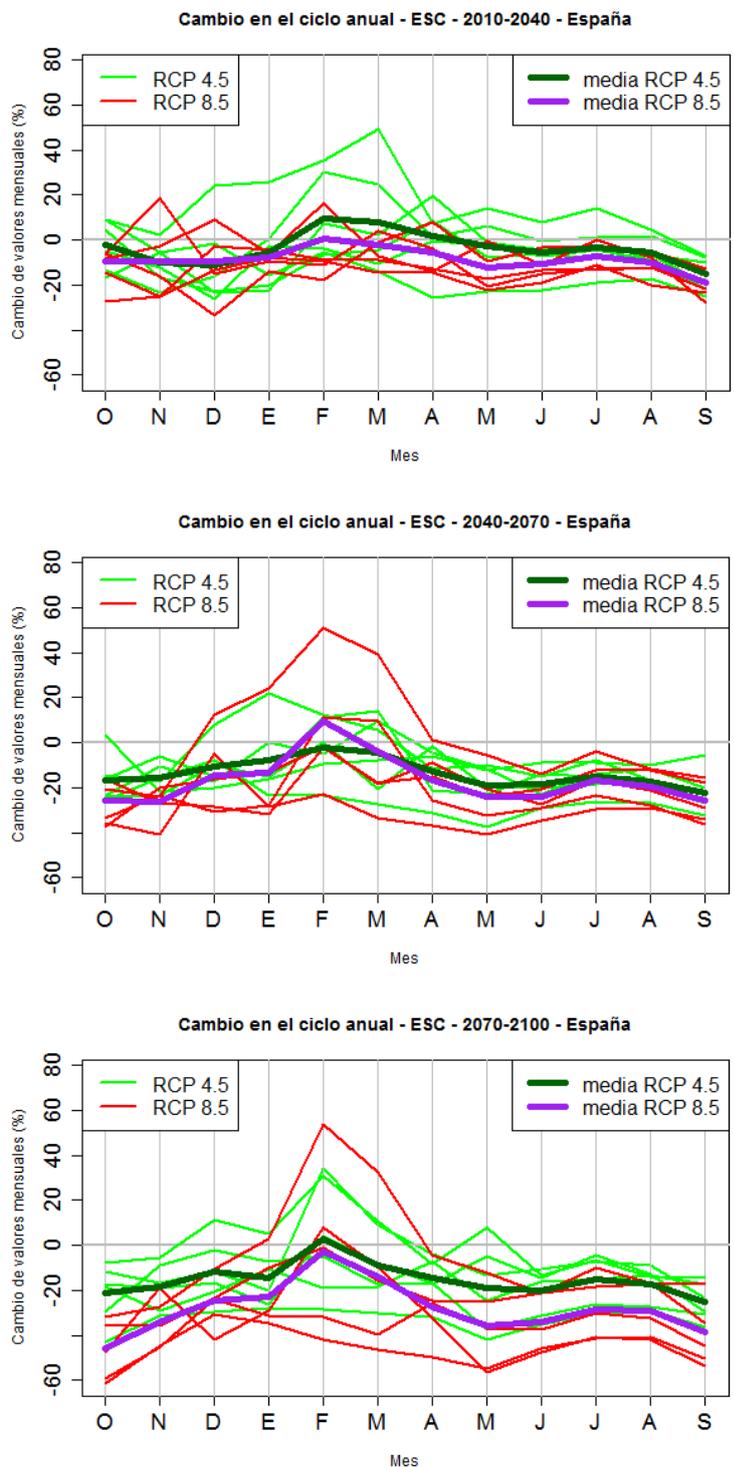


Figura 149. Cambios (%) en el ciclo anual de ESC para cada PI respecto al PC para el conjunto de España según las distintas proyecciones y sus valores medios para cada RCP.

Con objeto de poder comparar los cambios en los diferentes PI pero sólo del ciclo anual sin la interferencia de sus valores absolutos, se ha elaborado la Figura 150, con los valores mensuales medios estandarizados.

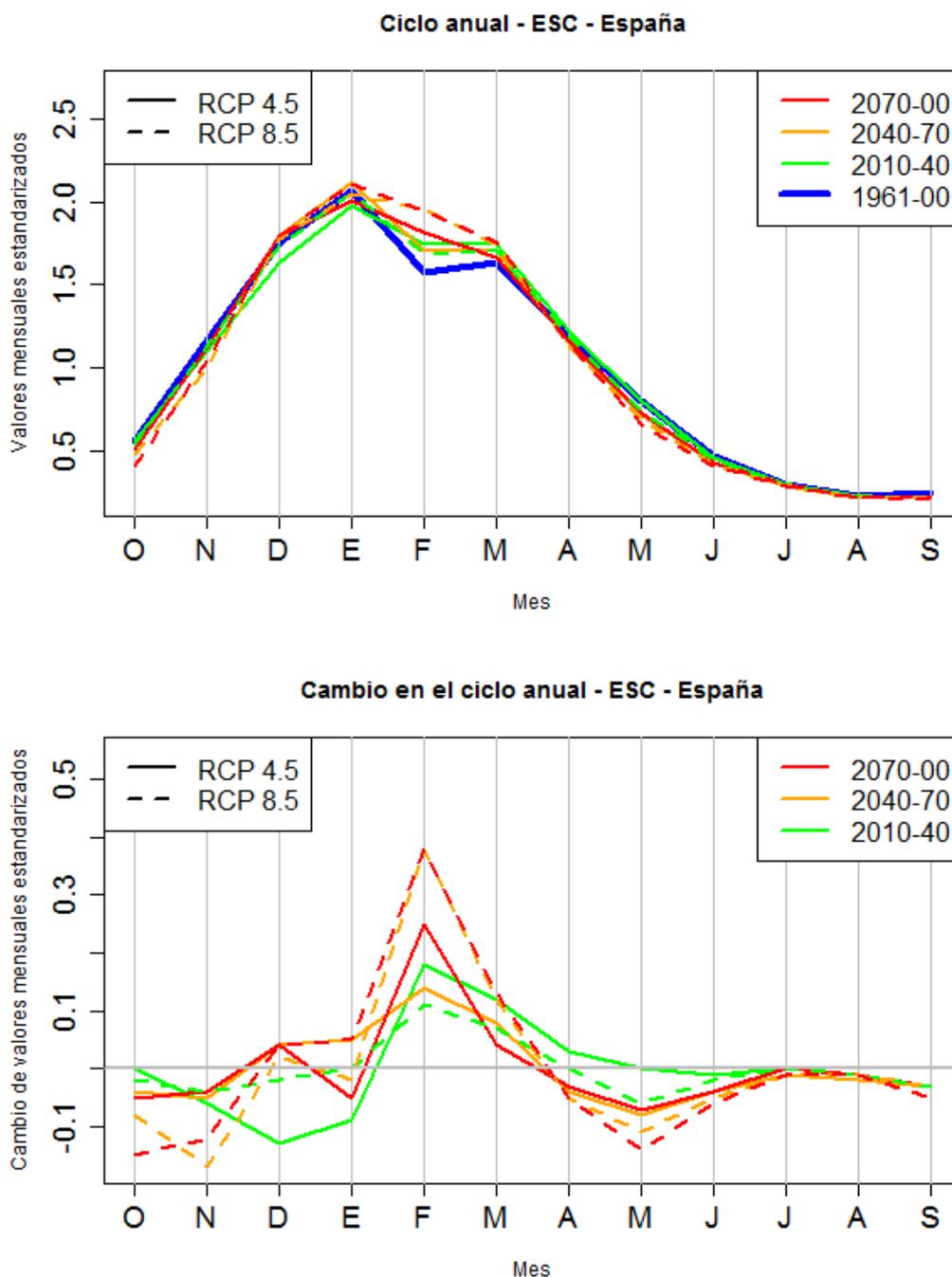


Figura 150. Ciclo anual estandarizado de ESC para el conjunto de España según los valores medios para cada RCP (arriba) y sus cambios para cada PI respecto al PC (abajo).

La estandarización se ha realizado primero calculando la media de los valores absolutos de ESC para cada mes, cada periodo y cada RCP; después se ha dividido el



valor absoluto de cada mes entre la media anual (Figura 150 arriba) y finalmente se ha restado ese valor obtenido para cada PI respecto el obtenido para el PC. De ese modo, se representa el porcentaje (entre 0 y 1) de ESC anual que se incrementa en cada mes para cada PI y RCP (Figura 150 abajo). Lo más destacado es la tendencia a concentrarse la ESC de España en febrero, y en menor grado en marzo, en todos los PI y RCP, siendo mayor esa tendencia en el RCP 8.5 de PI2 y PI3. En el sentido contrario, hay una pérdida relativa de ESC en los meses de primavera (mayo y en menor medida junio y abril) y finales de verano y principio de otoño (septiembre a noviembre), más acusada en el RCP 8.5 y según avanza el siglo XXI. Fuera de este comportamiento general, está la reducción relativa de la ESC en diciembre para PI1 según RCP 4.5, motivada por los fuertes descensos de ESC para ese mes según Q4A y, en menor cuantía, según F4A, M4A y N4A.

Estacionalmente (Tabla 26), se observa que los menores descensos porcentuales, o incluso ascensos, se dan en invierno, tal como se deduciría de los máximos en febrero de las figuras anteriores. Por otro lado, se observan descensos bastante homogéneos cuando se comparan el resto de estaciones, con alguna única salvedad, como el bajo descenso (-1%) del promedio de las proyecciones en primavera (AMJ) en el PI1 y RCP 4.5 respecto a otoño o verano. También se observa en dicha tabla la gran disparidad de resultados según las proyecciones. La consideración de las medias de las proyecciones suaviza el comportamiento de cambio estacional de las proyecciones individualizadas.

Tabla 26. Δ (%) ESC estacional en España para cada PI y proyección. Se indican los valores máximo (Mx), mínimo (Mn) y el promedio (Med) para cada RCP. Los colores reflejan la gradación del cambio.

ESC ESPAÑA Δ (%)		RCP 4.5									RCP 8.5								
		F4A	M4A	N4A	Q4A	R4A	U4A	Mx	Med	Mn	F8A	M8A	N8A	Q8A	R8A	U8A	Mx	Med	Mn
OND	2010-2040	-18	-13	-18	-18	-5	13	13	-10	-18	-2	-4	-26	-17	-14	1	1	-10	-26
	2040-2070	-16	-13	-18	-17	-13	-6	-6	-14	-18	-20	-29	-27	-21	-22	-8	-8	-21	-29
	2070-2100	-13	-18	-22	-9	-32	1	1	-16	-32	-25	-36	-28	-37	-40	-21	-21	-31	-40
EFM	2010-2040	17	-7	-12	-6	-12	36	36	3	-12	12	-6	-12	-11	-7	1	12	-4	-12
	2040-2070	2	2	-12	-13	-25	14	14	-5	-25	4	-6	-19	-12	-28	37	37	-4	-28
	2070-2100	5	-12	-15	-10	-29	15	15	-8	-29	-17	-12	-9	-34	-41	27	27	-14	-41
AMJ	2010-2040	2	7	0	-2	-24	9	9	-1	-24	0	-12	0	-18	-14	-9	0	-9	-18
	2040-2070	-11	-20	-9	-11	-33	-12	-9	-16	-33	-17	-29	-19	-16	-38	-4	-4	-20	-38
	2070-2100	-8	-27	-15	-13	-35	-4	-4	-17	-35	-28	-44	-24	-31	-50	-10	-10	-31	-50
JAS	2010-2040	-2	-10	-8	-11	-20	3	3	-8	-20	-5	-16	-6	-18	-15	-13	-5	-12	-18
	2040-2070	-15	-20	-8	-19	-28	-18	-8	-18	-28	-16	-29	-14	-22	-31	-11	-11	-20	-31
	2070-2100	-13	-28	-15	-15	-31	-12	-12	-19	-31	-28	-45	-17	-36	-44	-21	-17	-32	-45

Al igual que pasa para el conjunto de España, no hay claras pautas de cambio en los diferentes ámbitos territoriales ya que hay una notable disparidad de resultados entre proyecciones (Figura 151 a Figura 156). En PI1 y RCP 4.5, hay una tendencia a concentrar la ESC en primavera (M4A, N4A, Q4A) y en invierno (F4A, U4A); R4A es la excepción con notables descensos en primavera. En PI1 y RCP 8.5, hay también tendencia a concentrar la ESC en invierno de manera general (F8A, U8A) o en el Cantábrico (Q8A) o Galicia (R8A). En primavera, sólo N8A da mayores aumentos, mientras que las mayores reducciones son mayoritarias (M8A, Q8A y R8A).



En PI2 y RCP 4.5, la ESC se suele concentrar en invierno (F4A, M4A, U4A) o en primavera en Levante (N4A) o SO (Q4A); por otro lado, hay mayor reducción de ESC en otoño, según F4A, N4A y Q4A, salvo en Levante, y en invierno y primavera según R4A. En PI2 y RCP 8.5, la ESC tiende a concentrarse en invierno según F8A, salvo Levante y Duero, M8A, sobre todo en Galicia y, de manera acusada, según U8A, y en verano (sobre todo en el Pirineo oriental), según N8A Q8A y R8A.

En el periodo PI3 se muestran comportamientos de cambio estacional en la generación de ESC similar al del periodo anterior. Sigue habiendo una tendencia mayoritaria a concentrar la ESC en invierno (según F4A y U4A para el RPC 4.5 y M8A y U8A sobre todo en el oeste peninsular y N8A en Galicia para RCP 8.5). En el PI3 se aprecia una tendencia a la mayor similitud de los mapas de cada estación climática (así, hay pocos cambios entre estaciones según M4A, N4A, Q4A, R4A, Q8A y R8A).

En la Figura 157 se muestran los cambios estacionales del conjunto de 6 proyecciones promediadas para cada PI y RCP. Se observa cómo de manera general, la ESC tiende a disminuir menos, o aumentar más, en invierno. No obstante, hay particularidades regionales. Así, el mayor aumento en Canarias se da en otoño durante el PI1 y RCP 4.5, en zonas del Levante también en otoño durante PI1 y PI2 o en las CCII de Cataluña en primavera y verano hacia finales de siglo.

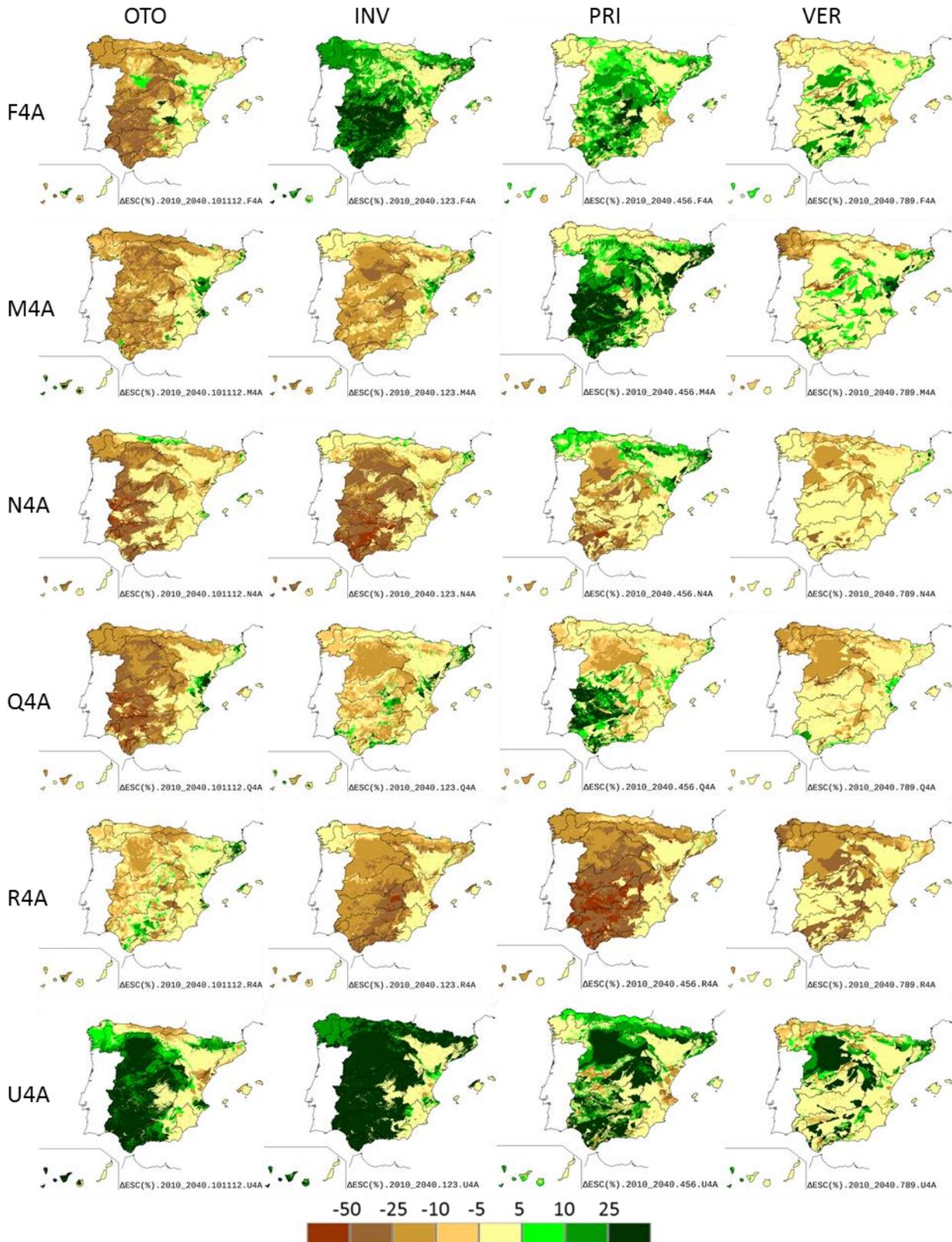


Figura 151.  $\Delta$  (%) ESC estacional para 2010-2040 RCP 4.5

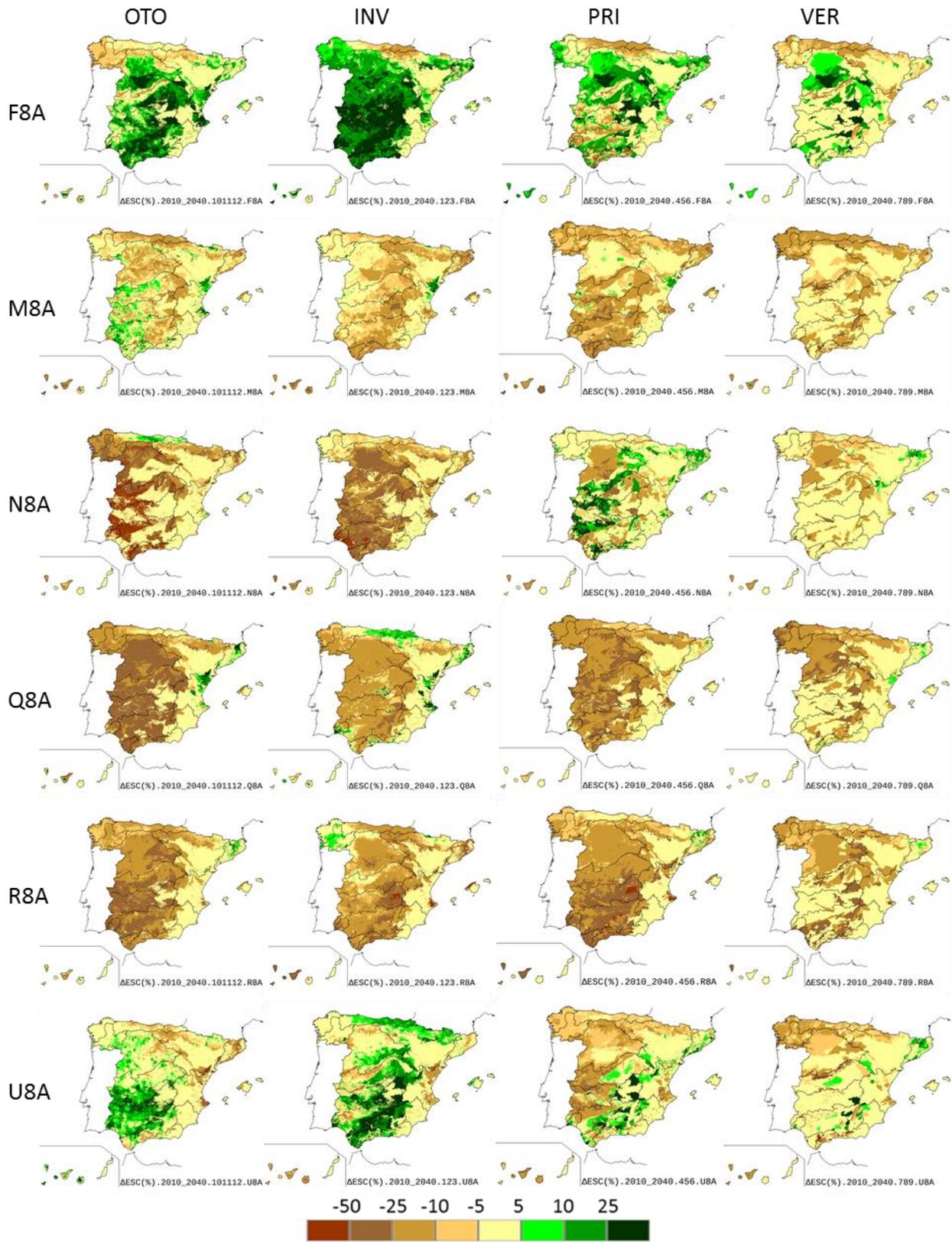


Figura 152.  $\Delta$  (%) ESC estacional para 2010-2040 RCP 8.5

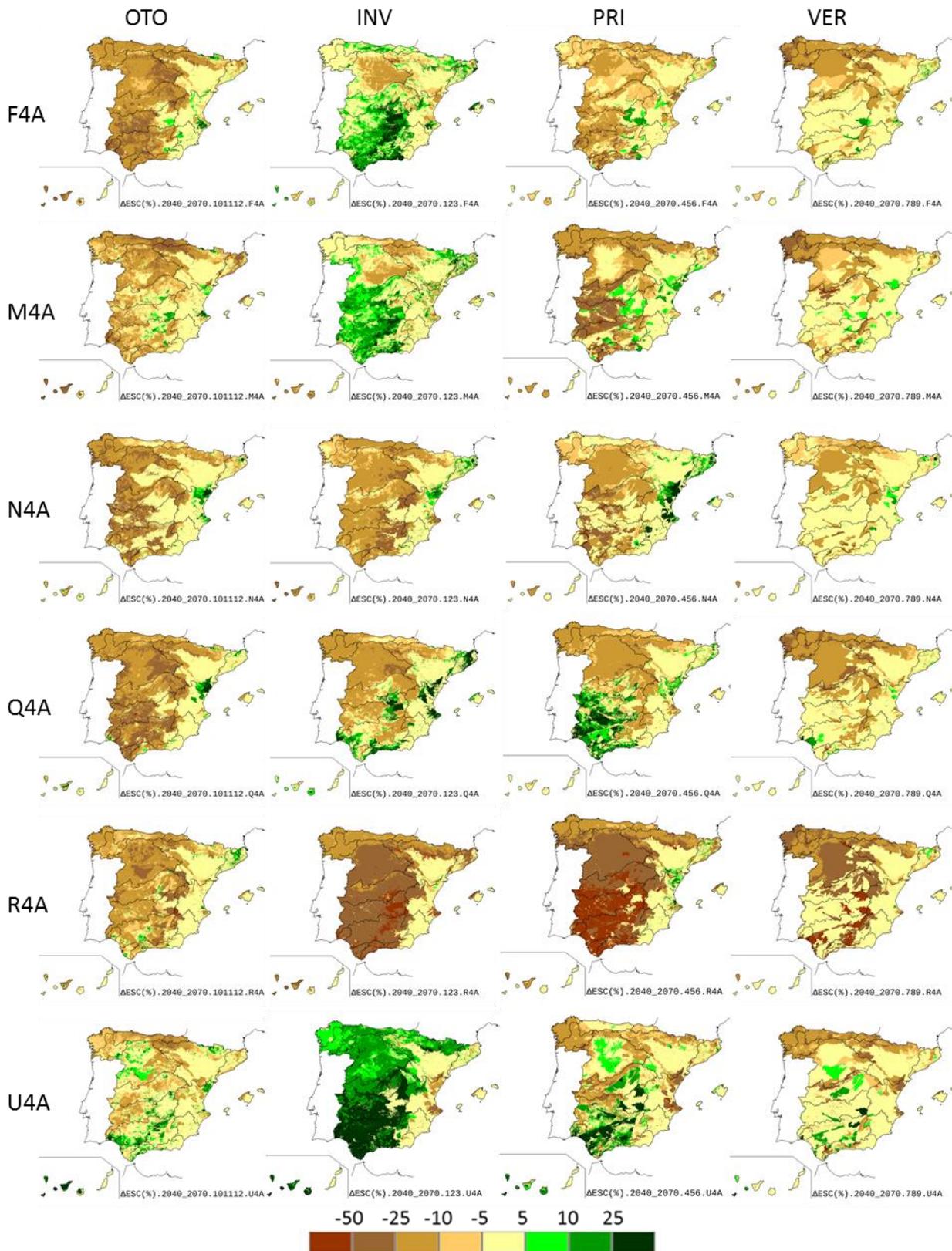


Figura 153.  $\Delta$  (%) ESC estacional para 2040-2070 RCP 4.5

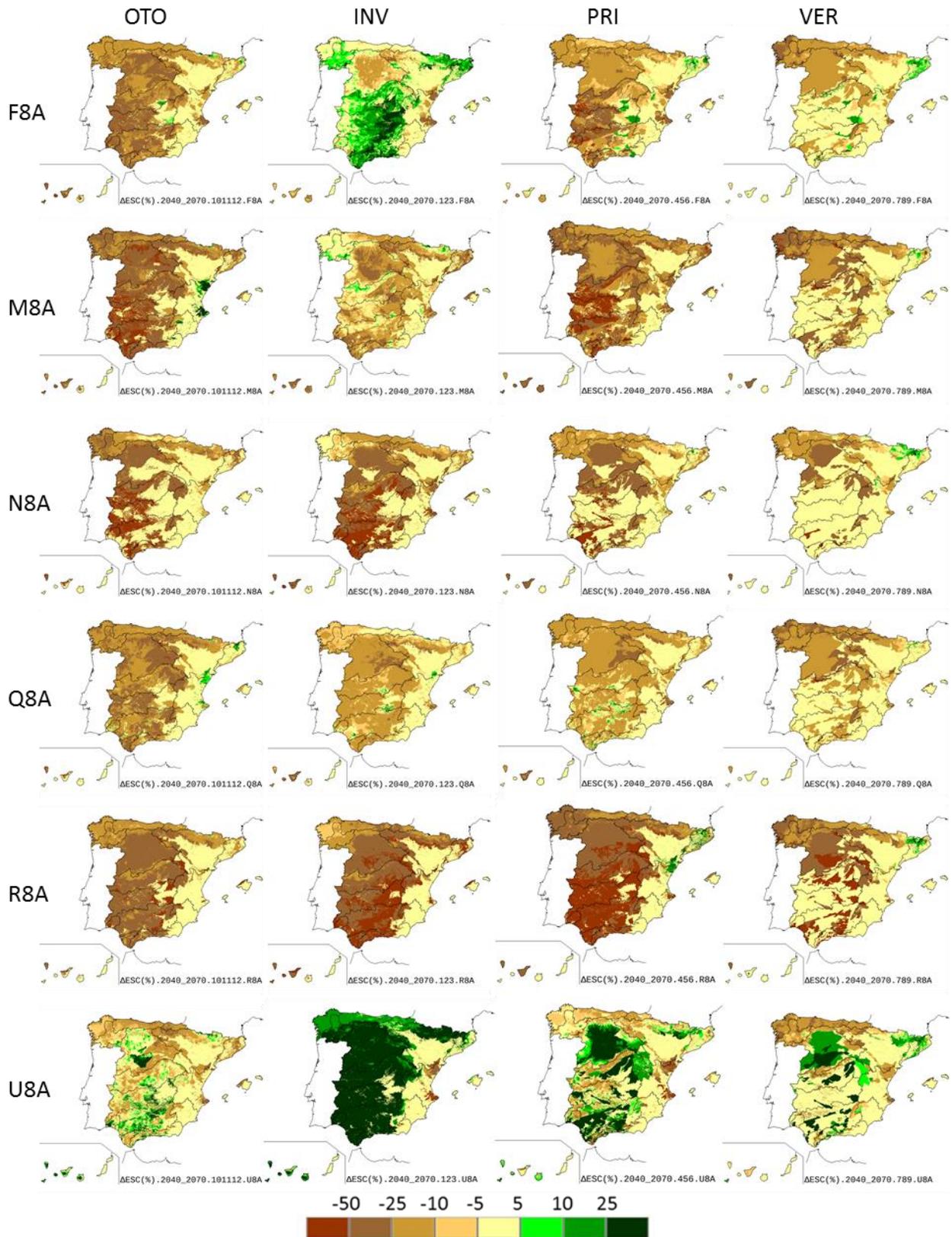


Figura 154.  $\Delta$  (%) ESC estacional para 2040-2070 RCP 8.5

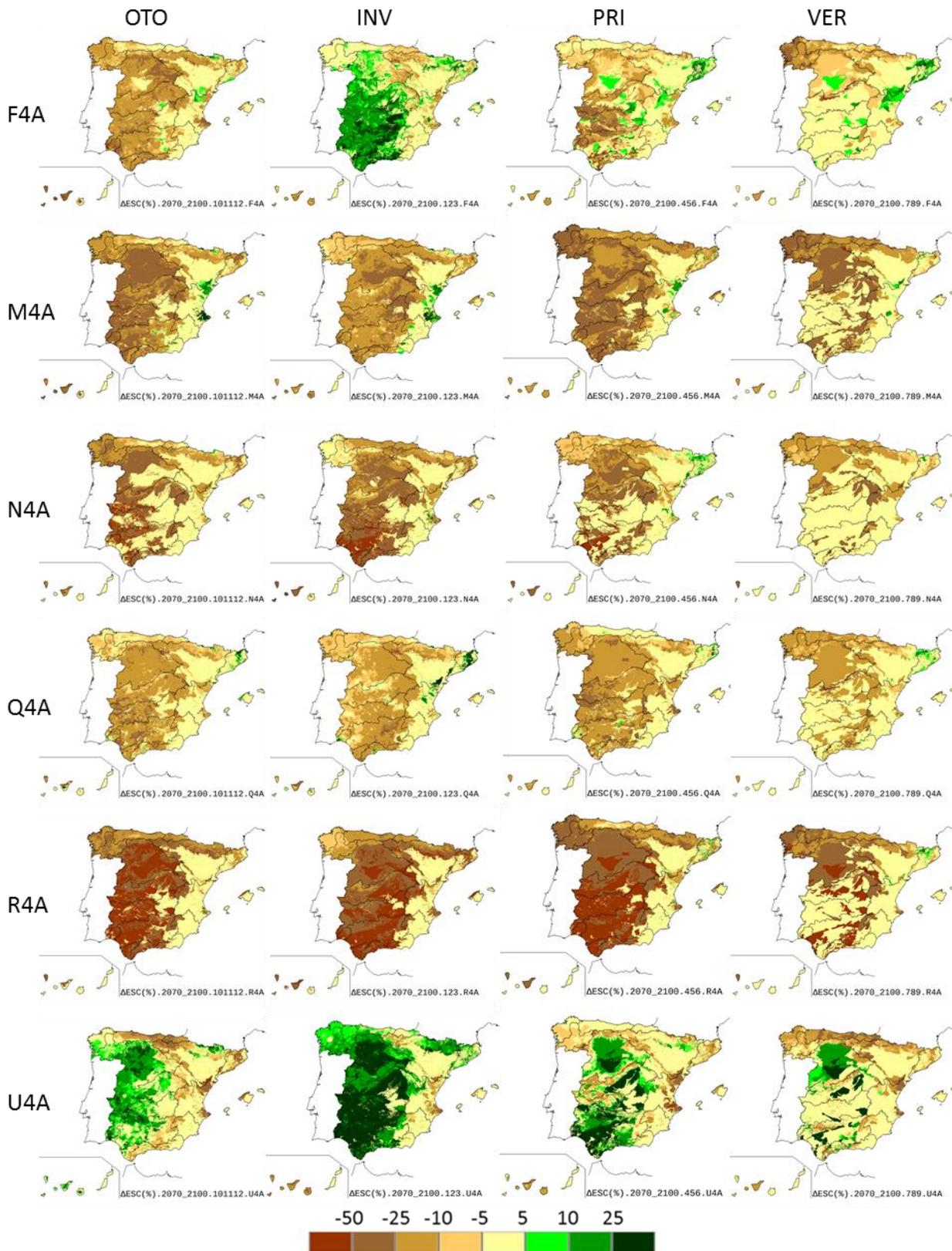


Figura 155.  $\Delta$  (%) ESC estacional para 2070-2100 RCP 4.5

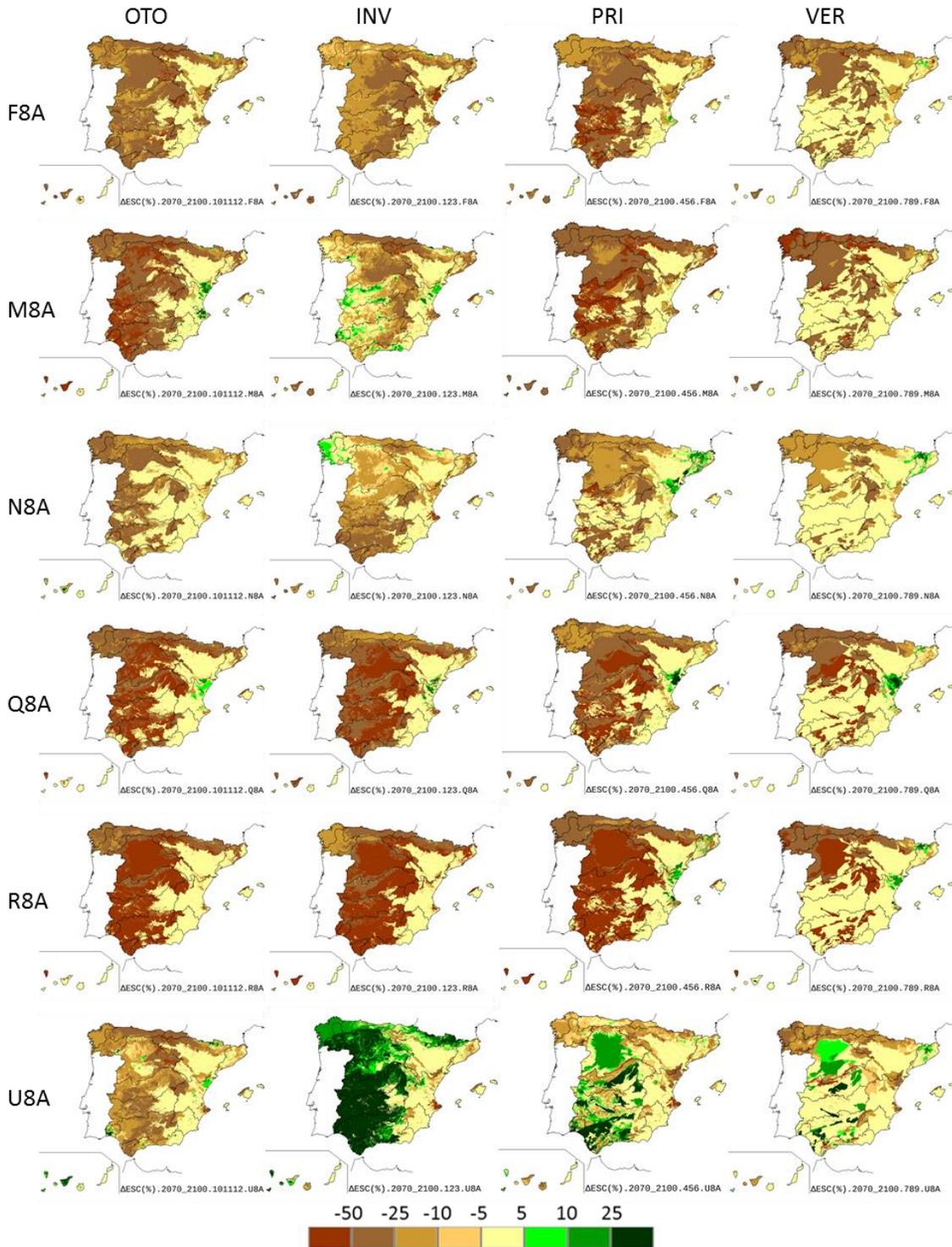


Figura 156.  $\Delta$  (%) ESC estacional para 2070-2100 RCP 8.5

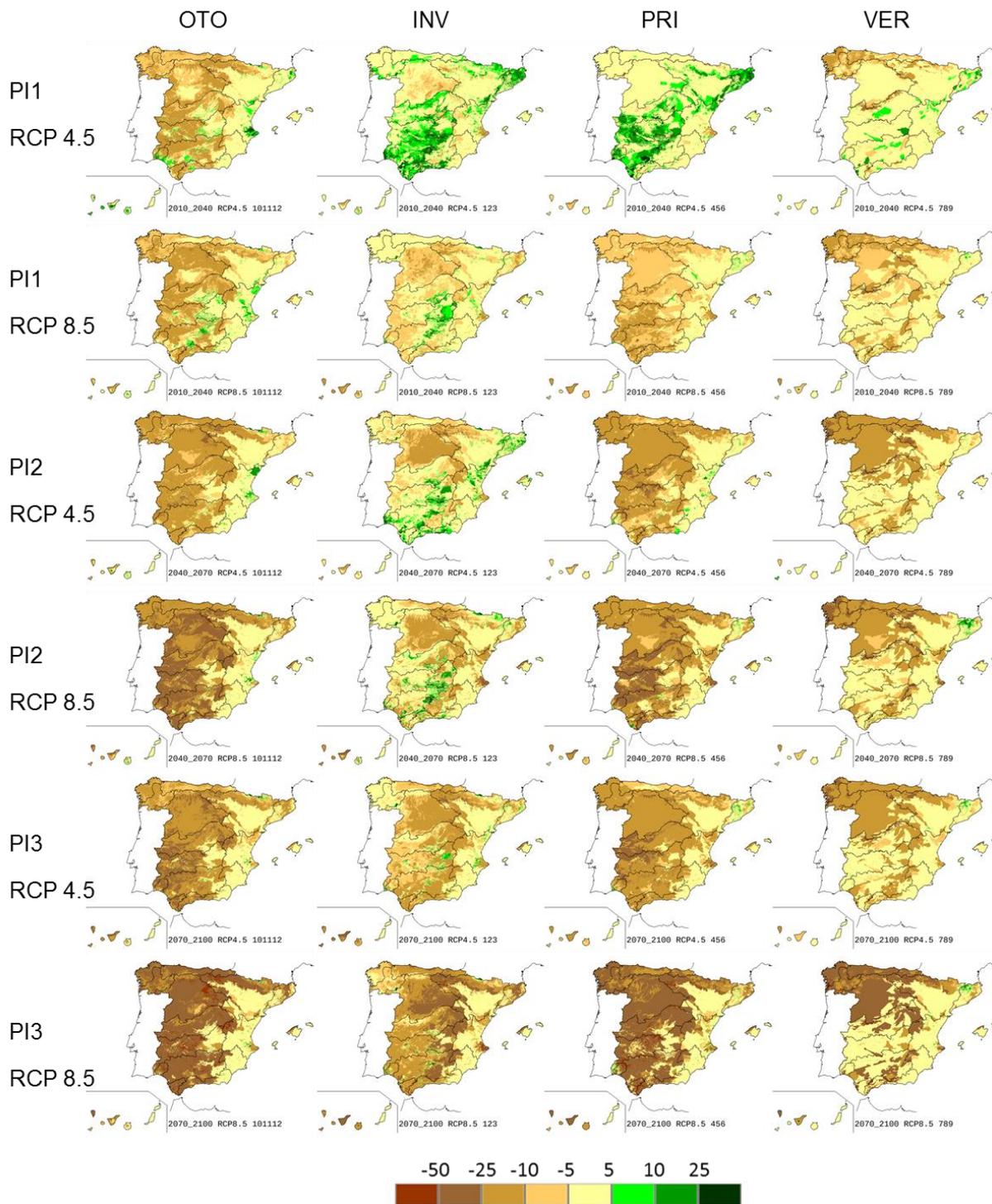


Figura 157.  $\Delta$  (%) ESC estacional para el promedio de proyecciones.

#### 7.5.4 Nieve

La acumulación estacional de nieve en las zonas montañosas es una importante fuente de agua en algunas partes de España, contribuyendo a su difusión en el tiempo. A pesar de las incertidumbres acerca de cómo el incremento de GEI afectará a las PRE, todos los modelos pronostican un incremento de temperaturas a lo largo del siglo XXI. De hecho, en la Tabla 9 del presente informe se ha mostrado cómo todas las proyecciones estiman incrementos medios para España alrededor de 1 °C para el periodo 2010-40, de 1.6 °C a 2.3 °C para 2040-2070 y de 2.0 °C a 3.9 °C para 2070-2100.

Es previsible que mayores temperaturas supongan varios efectos destacables en la capa de nieve: retrasarán la aparición de la nieve, incrementarán la relación lluvia/nieve, acortarán la época de nieves y adelantarán y acortarán el proceso de fusión, lo que conllevará un cambio en la distribución estacional de la ESC. Además, también se prevén disminuciones de los reducidos glaciares españoles.

En España, la Dirección General del Agua viene desarrollando el programa ERHIN (Evaluación de Recursos Hídricos procedentes de la Innivación) desde 1983. En él se han identificado las cuencas de las montañas españolas donde la presencia de la nieve es hidrológicamente significativa (Arenillas et al. 2008). Así, el ámbito de actuación de ERHIN lo constituye el Pirineo, Cordillera Cantábrica, Sierra Nevada, Sistema Central y Cordillera Ibérica. La cota desde la que se acumula la nieve de manera significativa varía desde los 1500 m en el norte a 2000 m en Sierra Nevada. La evaluación de los RRHH nivales de los últimos 5 años se ha estimado en unos 7000 hm<sup>3</sup>/año (Figura 158).

Evaluación de recursos nivales – ASTER - ERHIN (situación a 11 junio 2017)

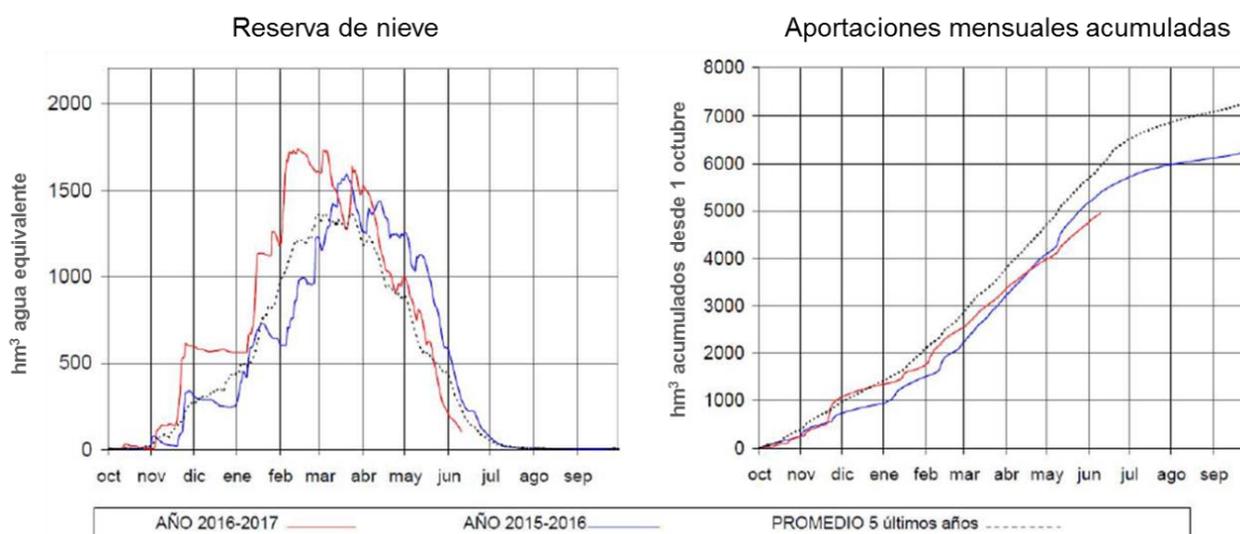


Figura 158. Evaluación de los RRHH nivales en España (Cobos y Moreno 2017).

En este informe se ha llevado a cabo un análisis orientativo del impacto del cambio climático sobre los RRHH procedentes de la fusión de nieve en zonas seleccionadas con cotas superiores a 1.500 metros en la España peninsular (Figura 159). Estas seis

zonas son: Pirineo, Cantábrico, Cordillera Ibérica norte, Cordillera Ibérica sur, Sistema Central y Sistema Bético.

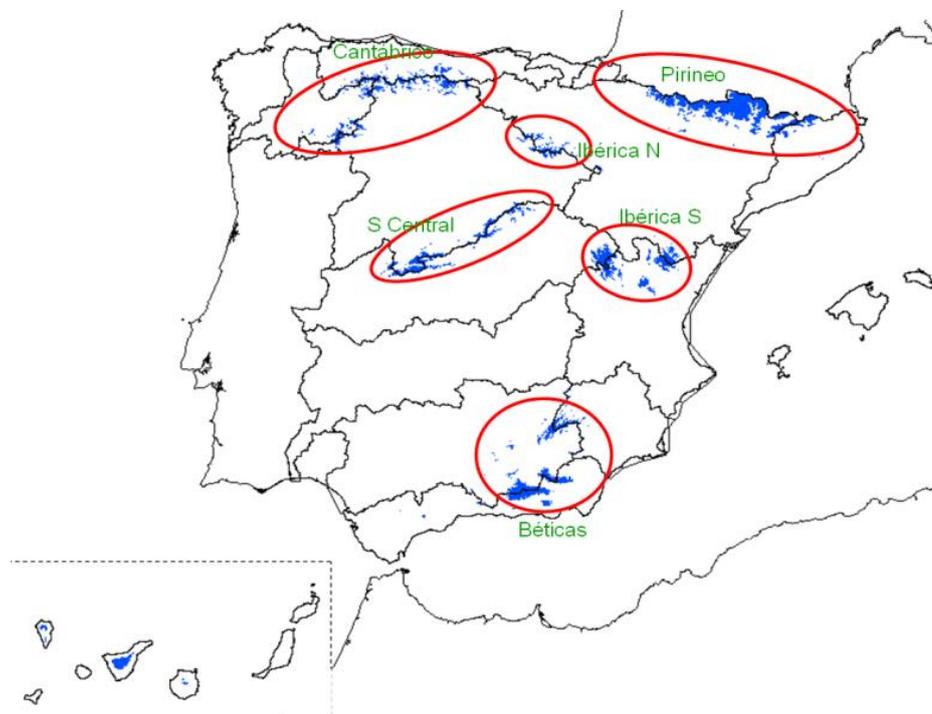


Figura 159. Áreas del territorio español con más de 1.500 metros de altitud

Es un análisis orientativo, cuyos resultados han de tomarse con precaución ya que además de heredar todas las incertidumbres de las proyecciones climáticas con valores de partida sesgados, tienen las de una simulación hidrológica de paso mensual en las que se han simplificado mucho los procesos de PRE en forma de nieve y su fusión.

Tal como se ve en la Figura 158, hay nieve acumulada fundamentalmente entre los meses de noviembre y junio, con el máximo en marzo, mientras que la fusión de nieve se produce básicamente durante los meses de marzo a junio.

Los cambios de TEM estimados en este informe para el siglo XXI son similares en las DDHH con mayores recursos nivales: Ebro, Cantábrico Occidental, Duero y Tajo (Figura 160). Los patrones de cambios son similares en las seis zonas analizadas. Los incrementos de TEM en los meses invernales supondrían un descenso en la relación PRE de nieve/PRE total, con lo que es previsible un descenso de la cantidad de nieve acumulada en esas zonas, que se iría haciendo más acusado conforme avanzara el siglo XXI. Por otro lado, el incremento de TEM en los meses primaverales provocaría un adelanto de la fusión de la nieve acumulada en las seis zonas de montaña. En las gráficas se observa que las TEM del PC en los meses de abril y mayo, cuando más nieve se funde, se alcanzarían antes. En concreto, se adelantarían aproximadamente medio mes para el PI1, un mes para el PI2 y el PI3 según el RCP 4.5 y mes y medio para el PI3 según el RCP 8.5. El pronosticado adelanto significativo de la fusión de nieve conllevaría asimismo el consiguiente adelanto de las puntas de ESC.

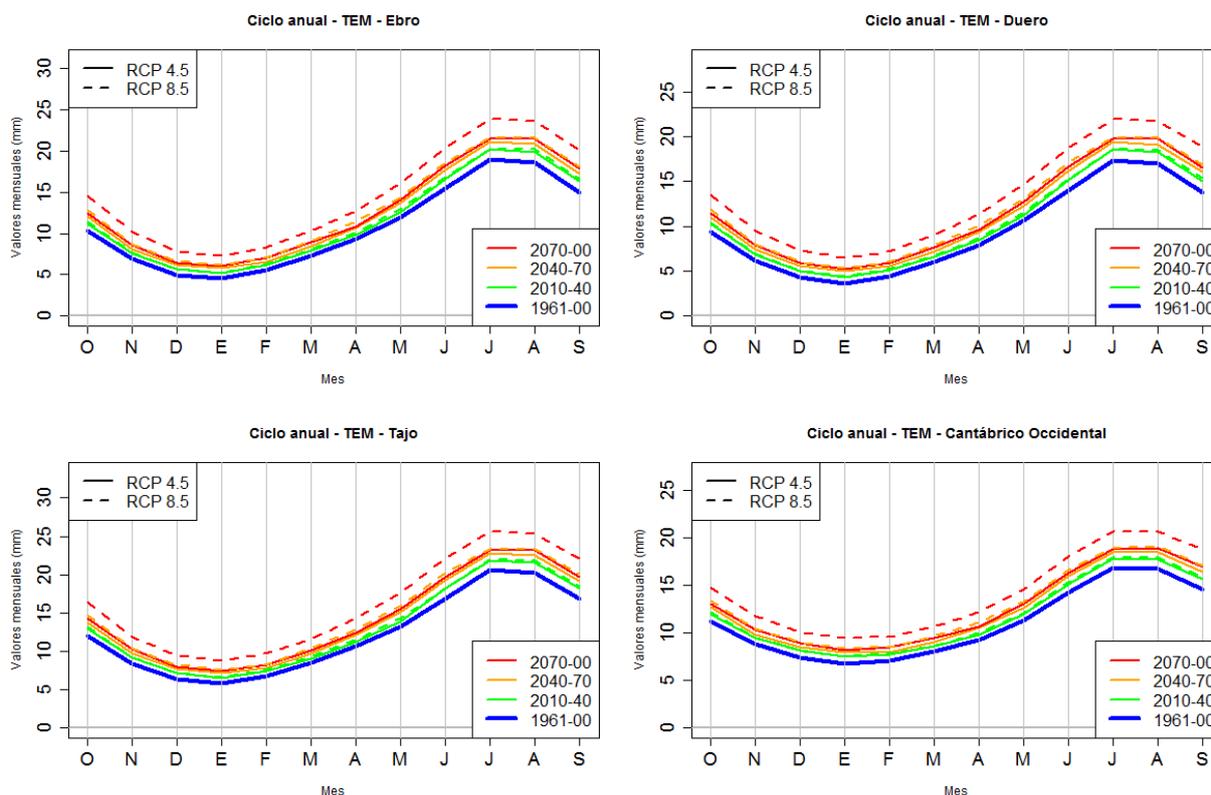
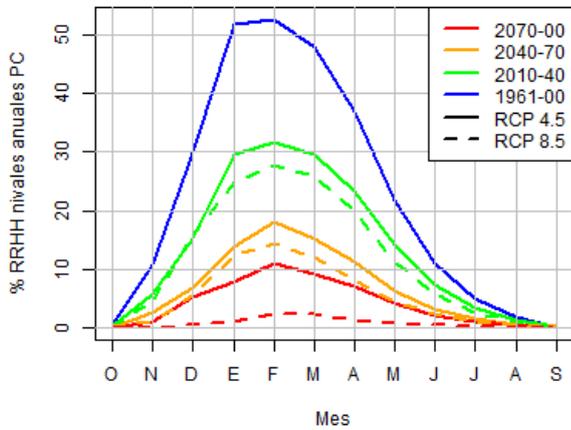


Figura 160. TEM estimadas por el conjunto de proyecciones según los RCP 4.5 y RCP 8.5 durante el PC y los PI en las DDHH con mayores recursos nivales.

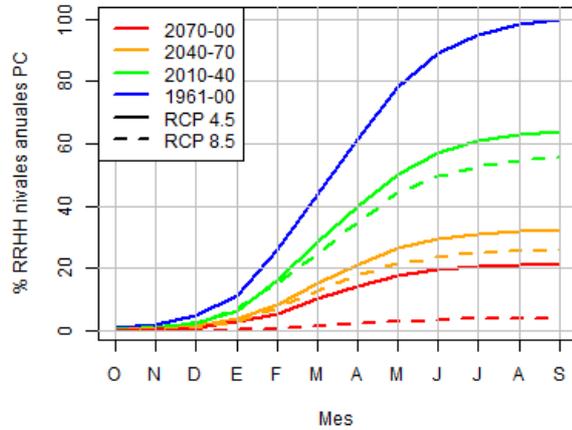
Se han evaluado los cambios en la nieve acumulada y en los RRHH procedentes de la fusión de nieve en cada una de las 6 zonas analizadas. Los resultados se muestran en gráficas que representan la distribución mensual de la nieve acumulada y de los RRHH procedentes de la fusión de la nieve acumulados desde octubre (Figura 161). Se ha representado el promedio de los valores estimados por las proyecciones para cada uno de los dos RCP y cada periodo de estudio (PC y los 3 PI). Los valores se han estandarizado igualando a 100 unidades el total de RRHH nivales del año medio del PC en cada zona.



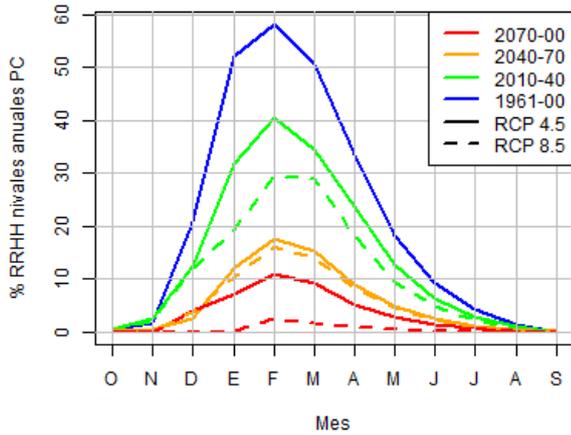
Nieve Acumulada - Pirineo



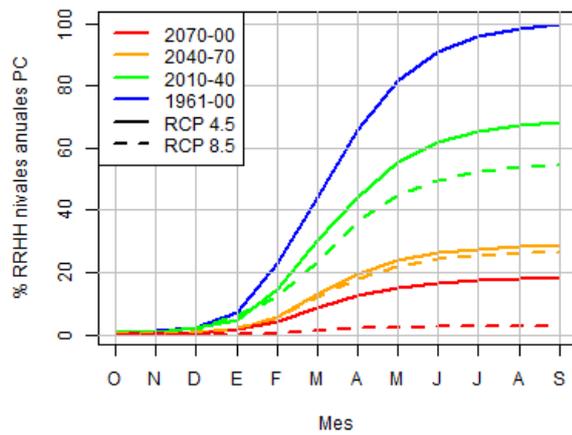
RRHH fusión nieve - Pirineo



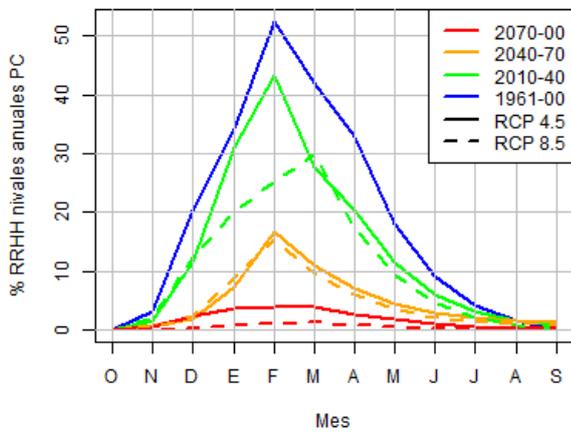
Nieve Acumulada - C. Cantábrica



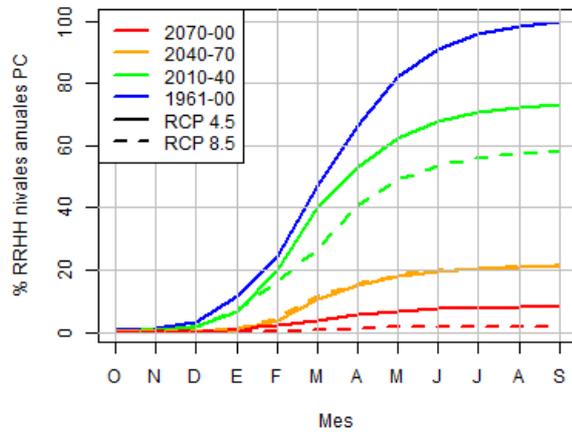
RRHH fusión nieve - C. Cantábrica



Nieve Acumulada - C. Ibérica NO



RRHH fusión nieve - C. Ibérica NO



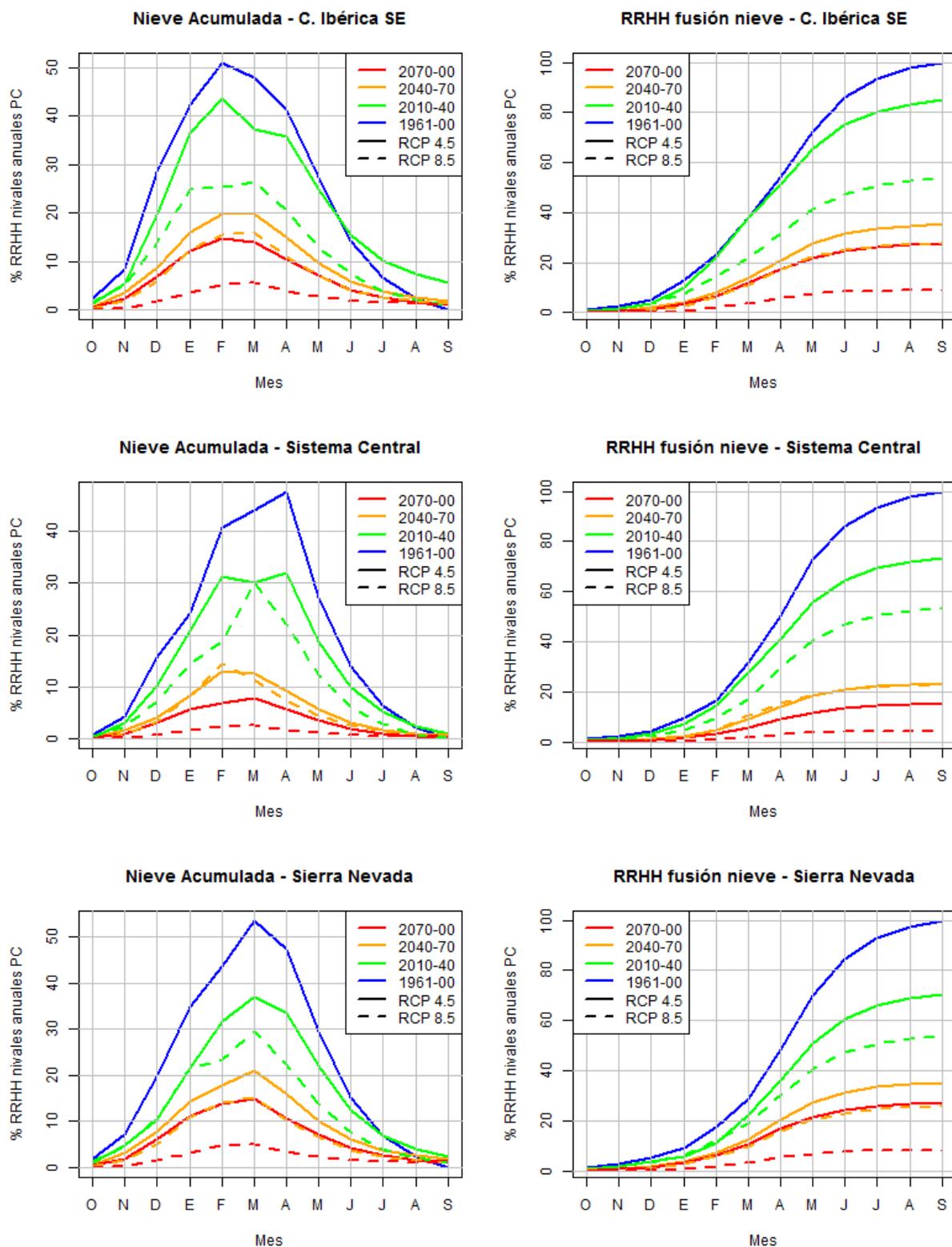


Figura 161. Distribución mensual de la nieve acumulada (izquierda) y de los RRHH procedentes de la fusión de la nieve acumulados desde octubre (derecha) estimados por el conjunto de proyecciones según los RCP 4.5 y RCP 8.5 durante el PC y los PI en las zonas analizadas.



Se observa cómo los modelos no reproducen bien los datos observados sobre la acumulación de nieve de ERHIN ya que adelantan los máximos de acumulación, como es notorio sobre todo en el Pirineo. Esto es síntoma de las dificultades que tienen los modelos en simular estos procesos.

Los resultados expresados en las gráficas indican una disminución muy importante del volumen de nieve acumulada y por lo tanto de los RRHH procedentes de su fusión en los 3 PI respecto al PC en las 6 zonas analizadas. Esa reducción es mayor en el RCP 8.5 que en el RCP 4.5 y mayor cuanto más nos alejamos en el siglo XXI, de manera que apenas habría RRHH nivales para 2070-2100 según el RCP 8.5.

La reducción estimada del volumen máximo de nieve acumulada es como sigue: para el PI1 y RCP 4.5 oscila entre un 16% en el SE de la Cordillera Ibérica y un 42% en el Pirineo; para el PI1 y RCP 8.5 oscila entre un 34% en el Sistema Central y sobre el 45% en el resto de zonas; para el PI2 y RCP 4.5 oscila entre el 60% y el 70%; para el PI2 y RCP 8.5 ronda el 70%; para el PI3 y RCP 4.5 oscila entre el 70% en Sierra Nevada y el 90% en el NO de la Cordillera Ibérica; finalmente, para el PI3 y RCP 8.5 supera el 90%.

El periodo con nieve acumulada se acorta progresivamente hacia finales de siglo en todas las zonas, atrasándose su inicio y adelantándose su final. No se aprecia un claro cambio en la estacionalidad de la nieve acumulada.

La reducción de RRHH nivales sigue las pautas de reducción de nieve acumulada que se acaba de describir. La reducción media anual para el PI1 y RCP 4.5 oscila entre un 15% en el SE de la Cordillera Ibérica y un 36% en el Pirineo, para el PI1 y RCP 8.5 ronda el 45% en todas las zonas, para el PI2 oscila entre el 60% y el 80%, para el PI3 y RCP 4.5 oscila entre el 72% en Sierra Nevada y el 90% en el NO de la Cordillera Ibérica y, finalmente, para el PI3 y RCP 8.5 supera el 90% en todas las zonas.

Al igual que pasa con la acumulación de nieve, también se acorta el periodo de fusión de nieve. Además, en general se aprecia un adelantamiento del proceso de fusión mayoritaria de nieve, siendo por ejemplo muy notorio en el Sistema Central, donde el pico de fusión se adelanta entre 1 y 2 meses según la proyección.

Estos resultados están en la línea con López-Moreno et al. (2009), que utilizaron un balance de energía y un único modelo regional para estudiar el impacto en la nieve en el Pirineo para los últimos 30 años del siglo XXI. Estimaban un adelanto de la fusión en un mes, una disminución de la duración del manto nival de uno a dos meses y una disminución media del manto nival del 24% (SRES B2) al 64% (SRES A2). Además, esa disminución era más acusada en la parte central y oriental del Pirineo.

## 7.6 APORTACIONES

Una variable hidrológica relacionada con la ESC es la aportación, o aportación hídrica (APN), que indica el volumen de agua que circula por el río en un periodo de tiempo dado. Este volumen se ha calculado integrando la ESC de todas las celdas de la cuenca vertiente a cada celda, tal como se comentó en el capítulo 7.1.1. De ese modo, los mapas de ESC reflejan la ESC generada en cada celda, mientras que los mapas de

APN reflejan el caudal que pasa por cada celda de río y que por tanto recoge el agua de las celdas que le vierten agua.

El impacto se ha analizado en aquellas celdas que constituyen los ríos más representativos. Para ello, se han adoptado aquellos ríos que fueron identificados como masas de agua superficiales para la Directiva Marco del Agua. Los criterios seguidos para asignarle el carácter de río a una celda son: celdas en las que la cuenca vertiente es mayor de 10 km<sup>2</sup> o el caudal medio observado es superior a 100 l/s. De ese modo, el mapa de APN diferencia claramente los cauces de los ríos del resto del territorio (Figura 162).

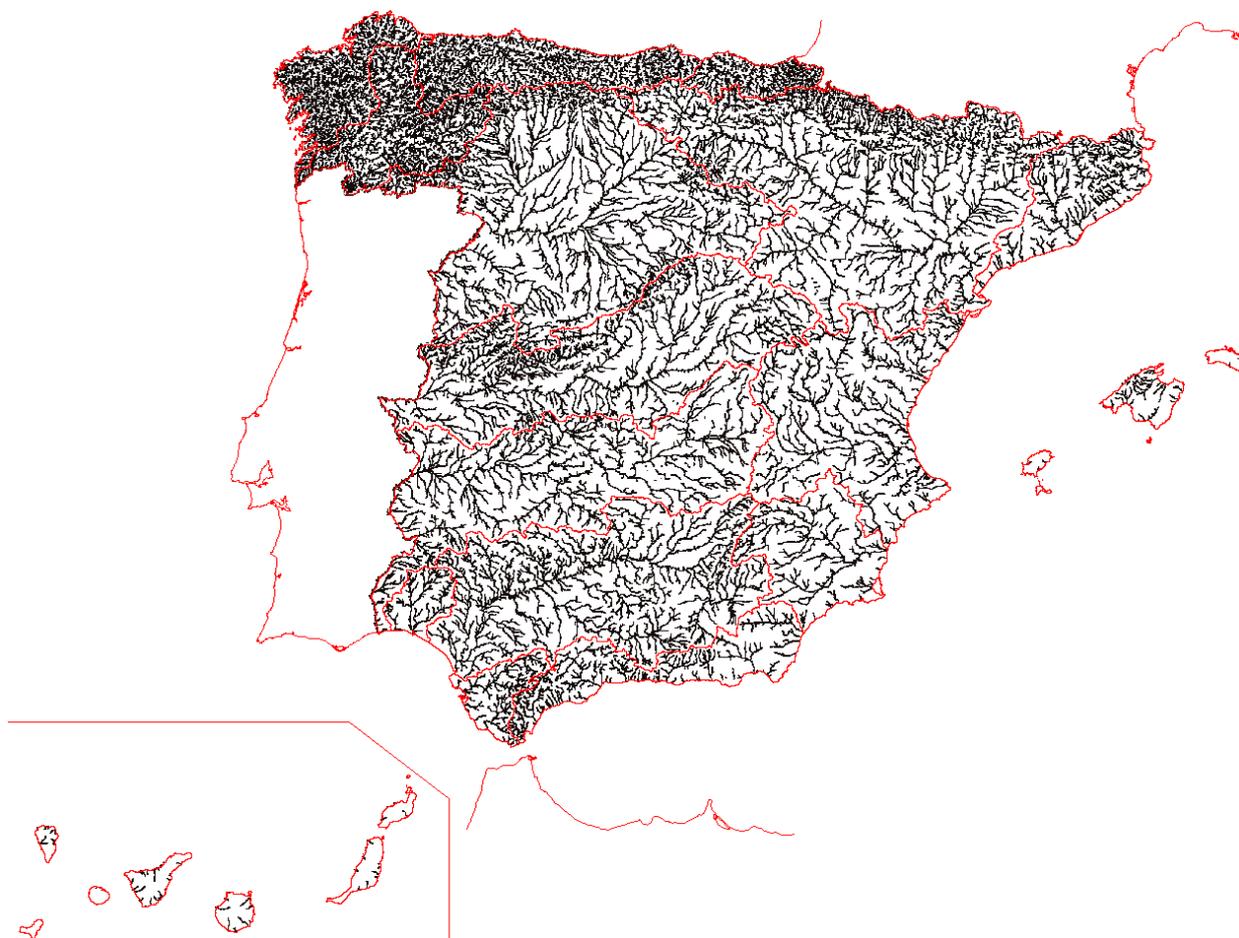


Figura 162. Cauces de río donde se ha analizado la APN en este estudio.

En este apartado se presentan los resultados del análisis de los mapas de APN estimados en los ríos de España por las diferentes proyecciones para cada uno de los 3 periodos de impacto. Lógicamente, los mapas de cambio de aportaciones son similares a los de cambio de ESC, anteriormente comentados, con la particularidad de que los primeros reflejan también la ESC de la cuenca vertiente. Si bien los cálculos se han hecho en todos los ríos de la Figura 162, se ha hecho una extracción de esos ríos para facilitar su visualización en las siguientes figuras de este informe; son celdas en las que la cuenca vertiente es mayor de 50 km<sup>2</sup>. Es por ello que apenas aparecen



cauces fuera del territorio peninsular en dichas figuras (salvo Mallorca); no obstante, los cambios de APN en las celdas no representadas no difieren mucho de los cambios de ESC ya que no se acumula mucha agua al ser la cuenca vertiente inferior a 50 km<sup>2</sup>.

Para el periodo 2010-2040 hay notables diferencias de variación de APN según la proyección climática (Figura 163 y Figura 164). Son generalizadas las reducciones según RA, NA y QA y los aumentos según U4A. El resto dan aumentos en algunas zonas (FA y U8A en la mitad sur y M4A en Levante) y muy ligeros descensos en otras (M4A en el oeste, F4A en SE, F8A en norte y U8A en Levante y Meseta norte). A modo de ejemplo, las variaciones pronosticadas para el Ebro en desembocadura y el RCP 4.5 oscilan entre una reducción superior al 10 % (R4A) a un incremento superior al 10% (U4A). Casi todas las proyecciones dan mayores reducciones de APN en el RCP 8.5, siendo más notable en las proyecciones MA y UA. La excepción la marca la proyección FA, que da mayores aumentos en el RCP 8.5 que en el RCP 4.5 en casi toda la Península, con la excepción de los ríos cantábricos y de cabecera del Ebro.

Las diferencias entre proyecciones siguen patentes en el periodo 2040-2070 (Figura 165 y Figura 166). Los casos más extremos se dan en Gadiana y Guadalquivir, donde se pronostican cambios que oscilan entre reducciones que rondan el -50% (R8A, N8A) a aumentos superiores al 25% (U8A). Hay mayoría de ríos con reducción de APN según las proyecciones RA, NA, QA y MA, con la salvedad de algunos tramos de ríos de Levante. La reducción de APN puede ser superior al 50% en ríos del centro y sur de España según R8A. U8A es la que pronostica mayores aumentos de ESC, siendo superiores al 25% en ríos del centro y SO de España, y entre el 10 y 25% en ríos del norte, mientras que U4A pronostica aumentos en los ríos del centro y sur y descensos en el Levante y menos acusados en ríos del Duero y Tajo. Las proyecciones FA también estiman ascensos en pequeños tramos de ríos del centro y sur y da leves reducciones en ríos del norte y SE.

Para el periodo 2070-2100, la mayoría de las proyecciones, salvo UA, estiman reducción generalizada de APN en los ríos. Las cuencas del centro y sur muestran reducciones en casi todas las proyecciones, superiores al 50% en muchos casos, sobre todo del RCP 8.5; tan sólo discrepan F4A, con pocos cambios, y UA, con aumentos que superan el 25% en algunos tramos de ríos. La reducción de APN también es mayoritaria en los ríos del este peninsular, con reducciones superiores al 50% en el SE que se van amortiguando de sur a norte (RA, FA, Q4A, UA), mientras que los aumentos se restringen básicamente a ríos del Júcar y CCII de Cataluña (F4A, M4A y Q8A). Todas las proyecciones dan reducciones para Baleares. El Ebro muestra reducciones notables en casi todas las proyecciones, desde las más extremas superiores al 50% de RA a las más leves del F4A. Las DDHH del norte tienen reducciones más moderadas; las proyecciones Q8A, R8A y M8A (RCP 8.5) exhiben reducciones superiores al 25% en muchos ríos, mientras que en otro lado, F4A, U4A y U8A no muestran cambios o son de pequeña entidad.

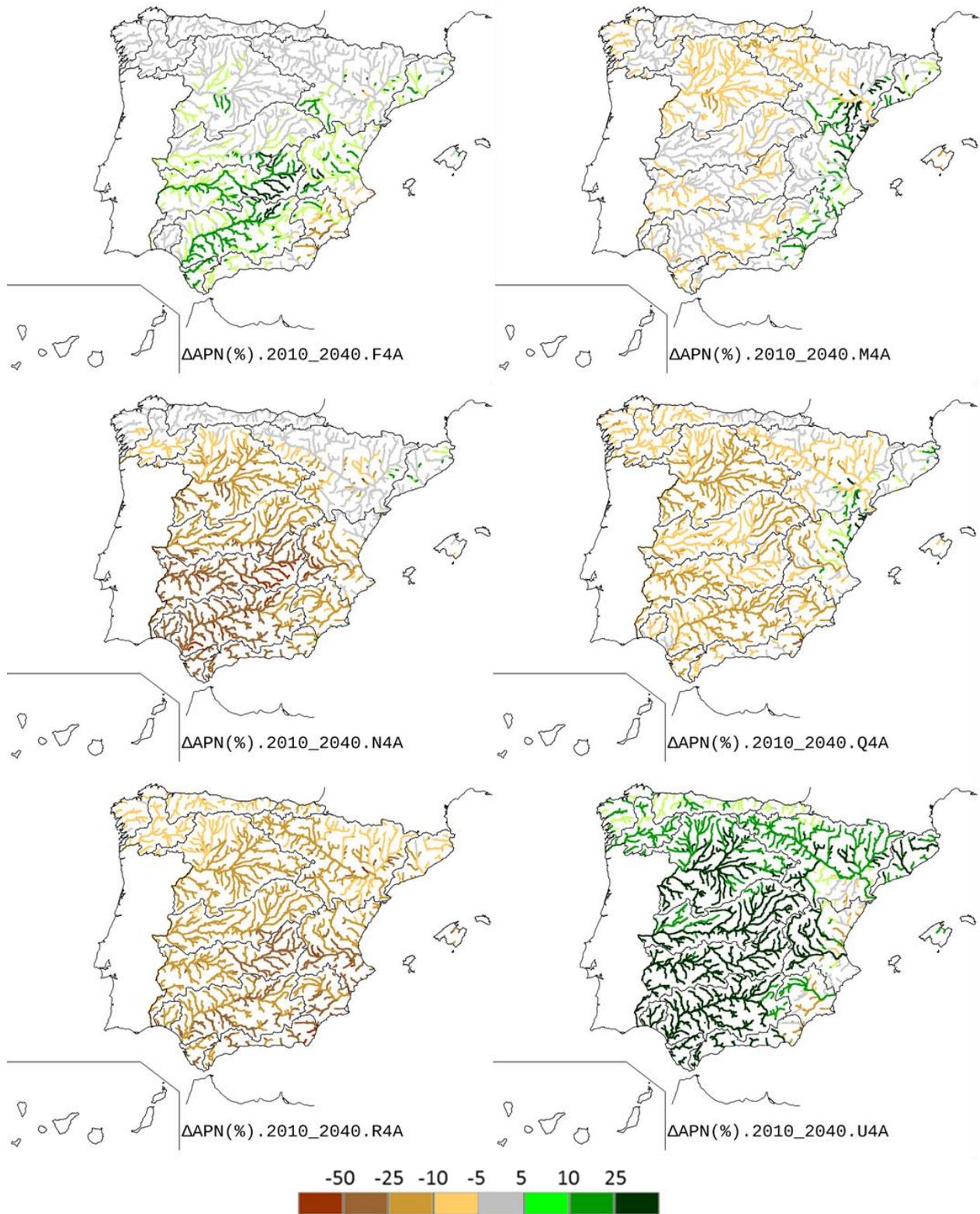


Figura 163.  $\Delta$  (%) APN anual para 2010-2040 según las proyecciones RCP 4.5.

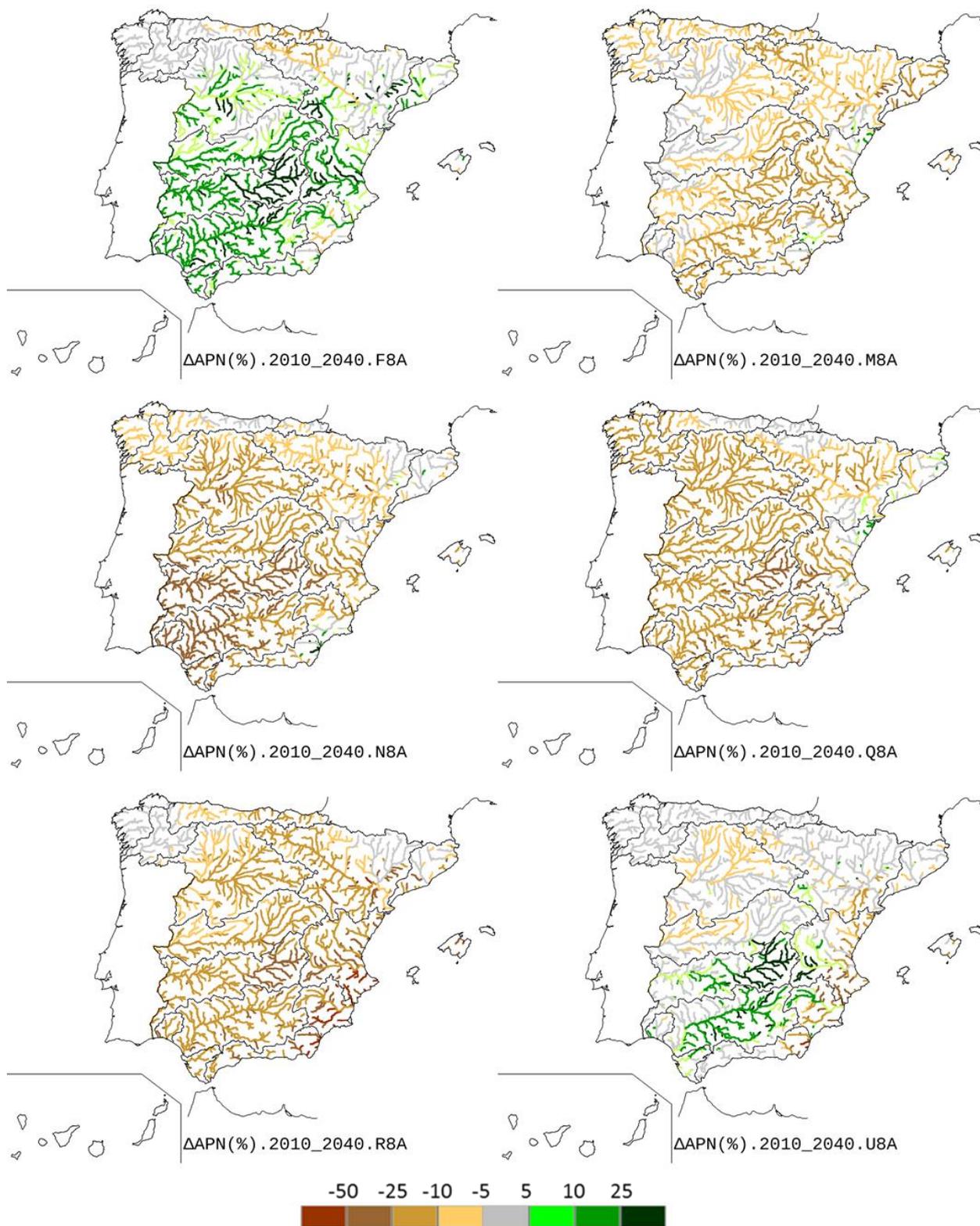


Figura 164.  $\Delta$  (%) APN anual para 2010-2040 según las proyecciones RCP 8.5.

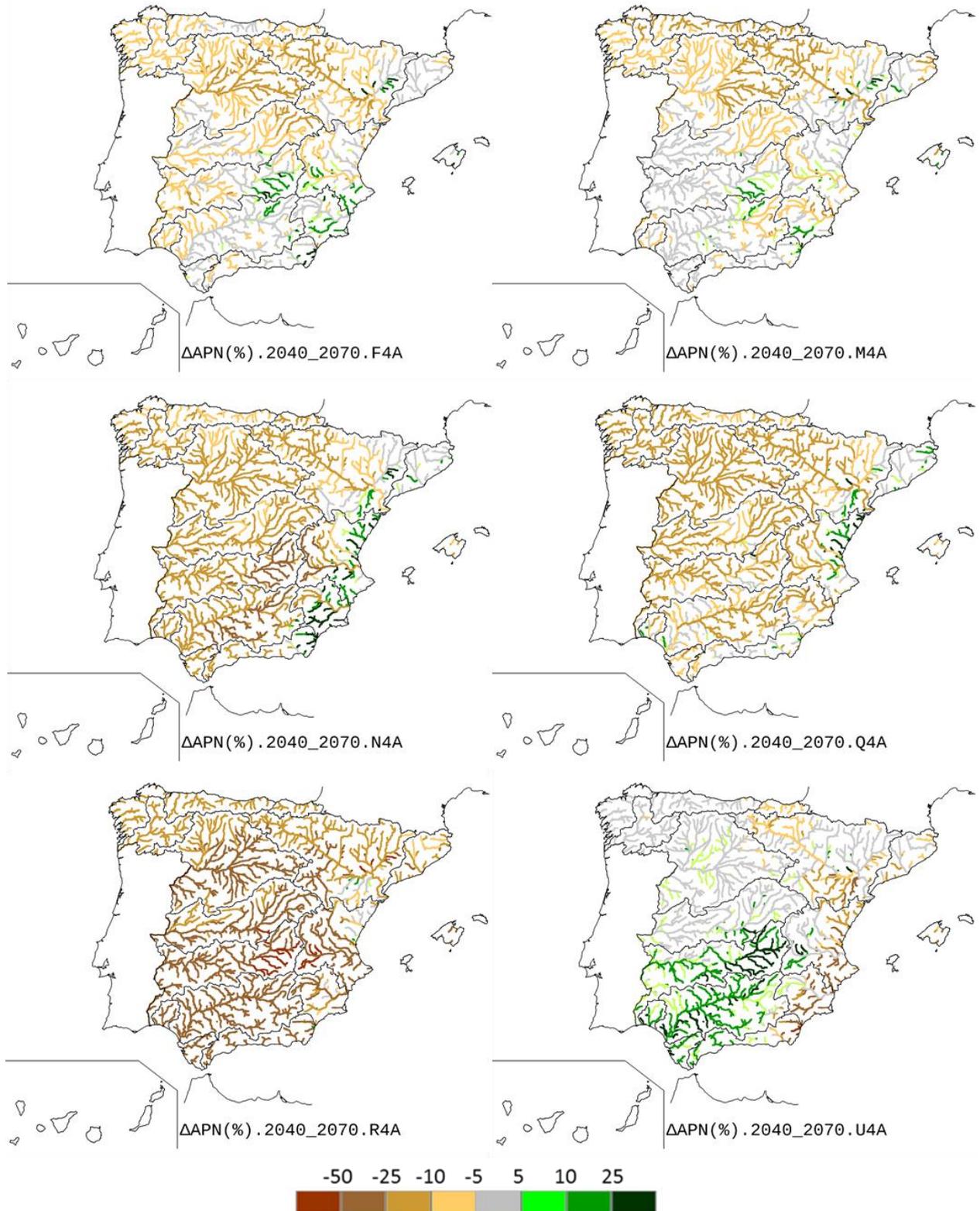


Figura 165.  $\Delta$  (%) APN anual para 2040-2070 según las proyecciones RCP 4.5.

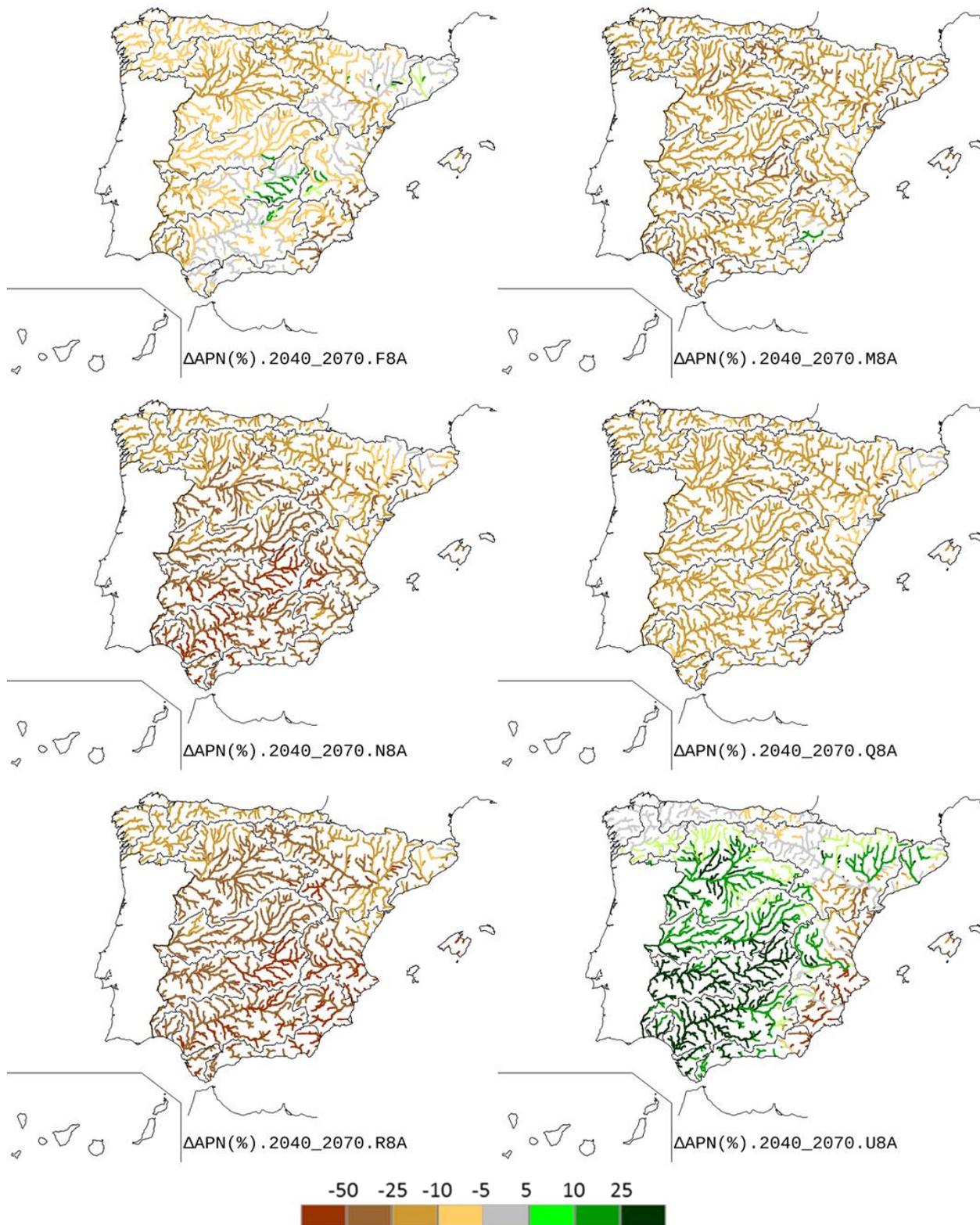


Figura 166.  $\Delta$  (%) APN anual para 2040-2070 según las proyecciones RCP 8.5.

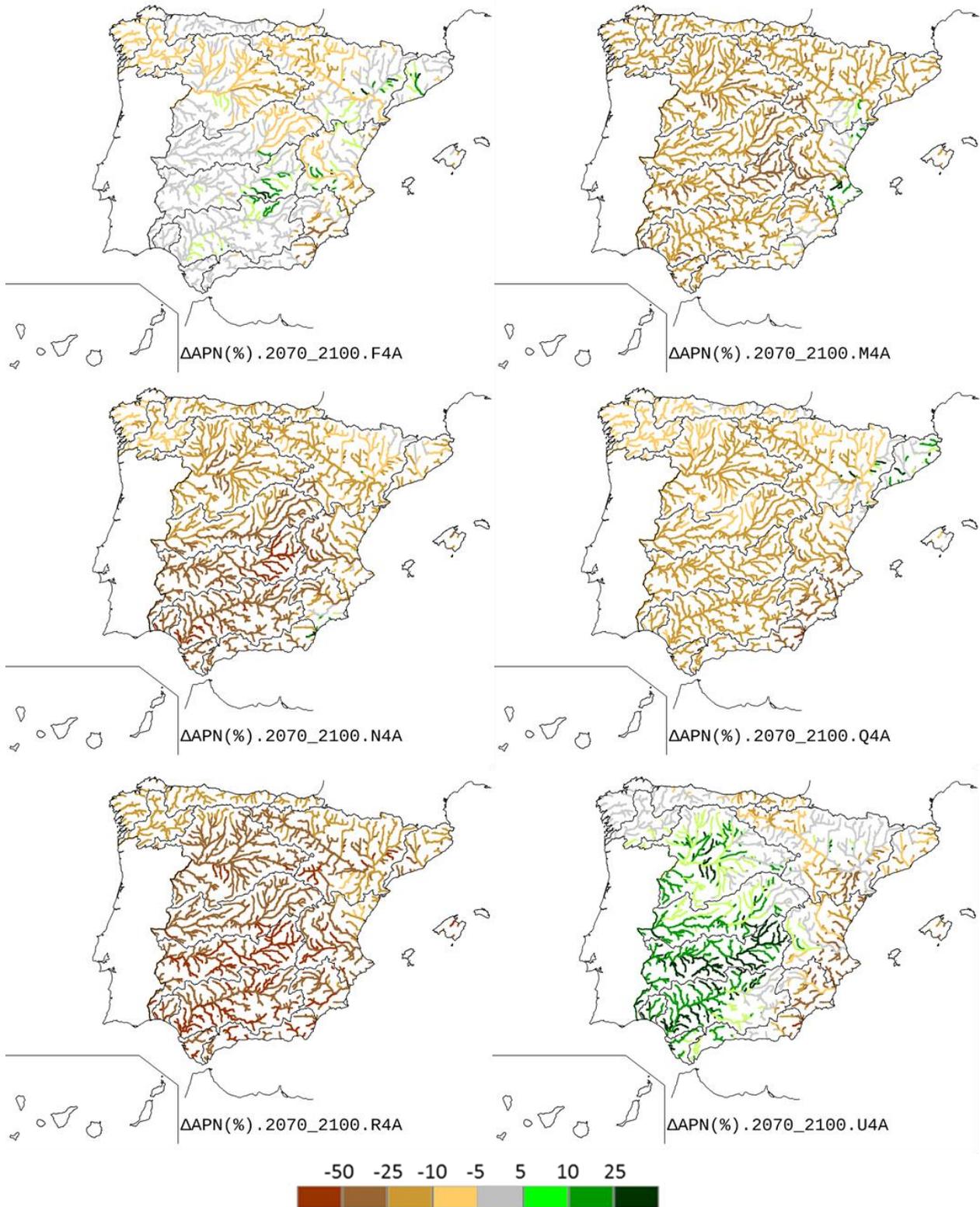


Figura 167.  $\Delta$  (%) APN anual para 2070-2100 según las proyecciones RCP 4.5.

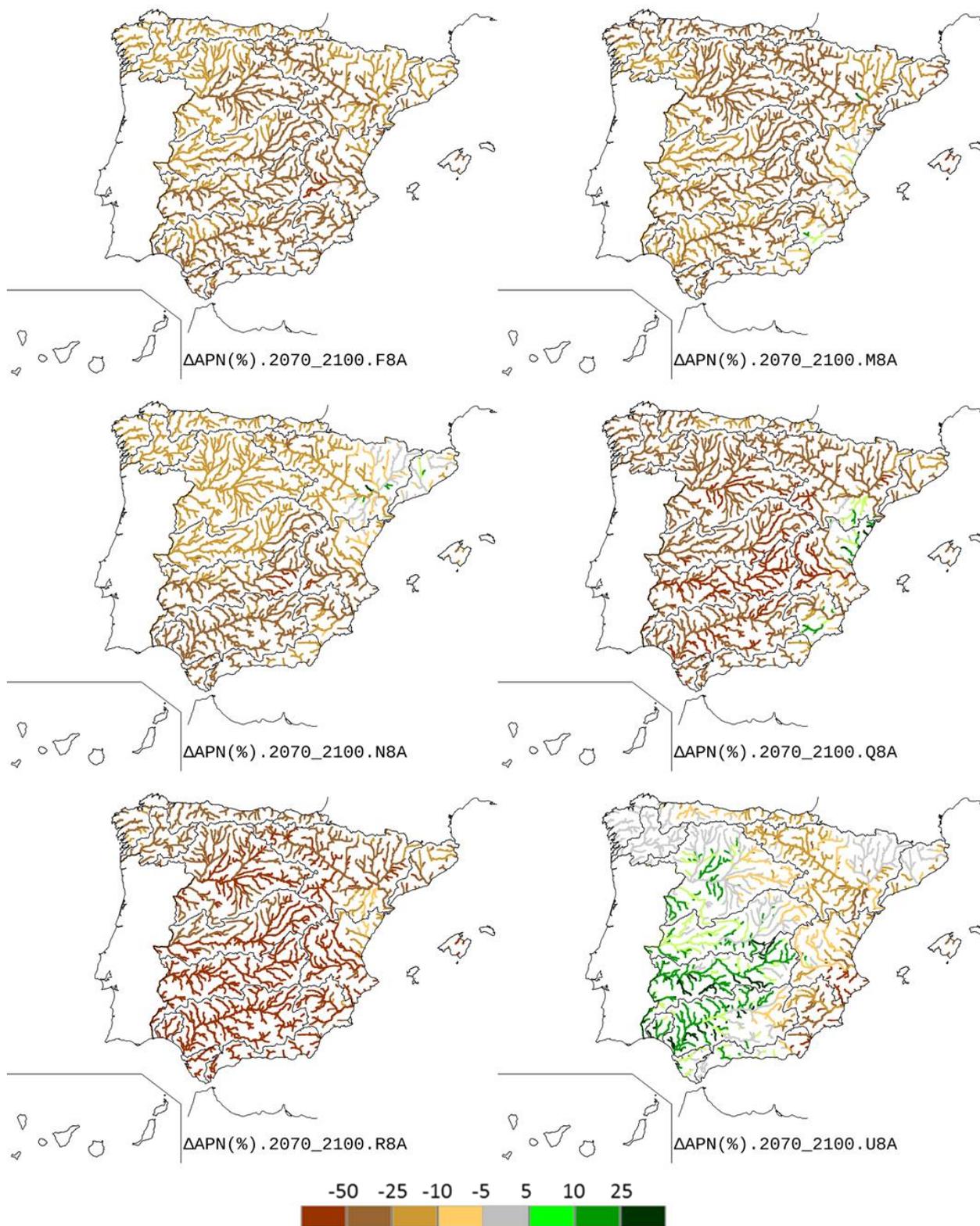


Figura 168.  $\Delta$  (%) APN anual para 2070-2100 según las proyecciones RCP 8.5.

A partir de esos mapas de variación de APN, se pueden obtener las APN de los ríos en régimen natural estimadas para los periodos de impacto según las diferentes



proyecciones analizadas. Para ello, se aplican esos porcentajes de variación a las APN obtenidas mediante la simulación hidrológica en régimen natural de los datos climáticos observados durante el periodo de control 1961-2000. Hay que recalcar que estos valores del PC se han obtenido sin tener en cuenta las alteraciones del régimen hidrológico de origen humano, tales como presas, canalizaciones, trasvases, bombeos. Por lo tanto, son valores que difieren de los aforados.

Se han seleccionado una serie de puntos representativos de la hidrología española donde se ha calculado la APN anual en el PC y en los tres PI del siglo XXI. Se han incluido los resultados de utilizar los cambios de las 12 proyecciones directas (Figura 169).

De nuevo se hace patente que las variaciones de APN son bastantes diferentes según las proyecciones climáticas. El margen de variación es acusado en todos los periodos y en todos los casos representados, siendo mayor hacia el sur.

A modo de ejemplo, las aportaciones en régimen natural del río Ebro a su paso por Zaragoza para el periodo 2010-2040 podrían oscilar en un margen alrededor de los 9000 hm<sup>3</sup>/año actuales, desde unos 7700 hm<sup>3</sup>/año a los 10100 hm<sup>3</sup>/año. Para finales de siglo podrían oscilar desde los aproximadamente 8400 hm<sup>3</sup>/año a descender hasta unos 5000 hm<sup>3</sup>/año. Lógicamente, esta incertidumbre tiene importantes implicaciones prácticas a la hora de elaborar estrategias de planificación para actuar ante el cambio climático.

En general, se pronostica una reducción de la APN anual, que sería más acusada conforme avanzara el siglo XXI. No obstante, hay proyecciones que darían también aumentos de menor entidad, la mayoría durante el PI1, pero también de manera más ocasional durante los periodos posteriores (como por ejemplo en el río Miño en Ourense o el Duero en Zamora). El escenario de emisiones RCP 8.5 da mayores reducciones de RRHH que el RCP 4.5, más patentes hacia finales de siglo.

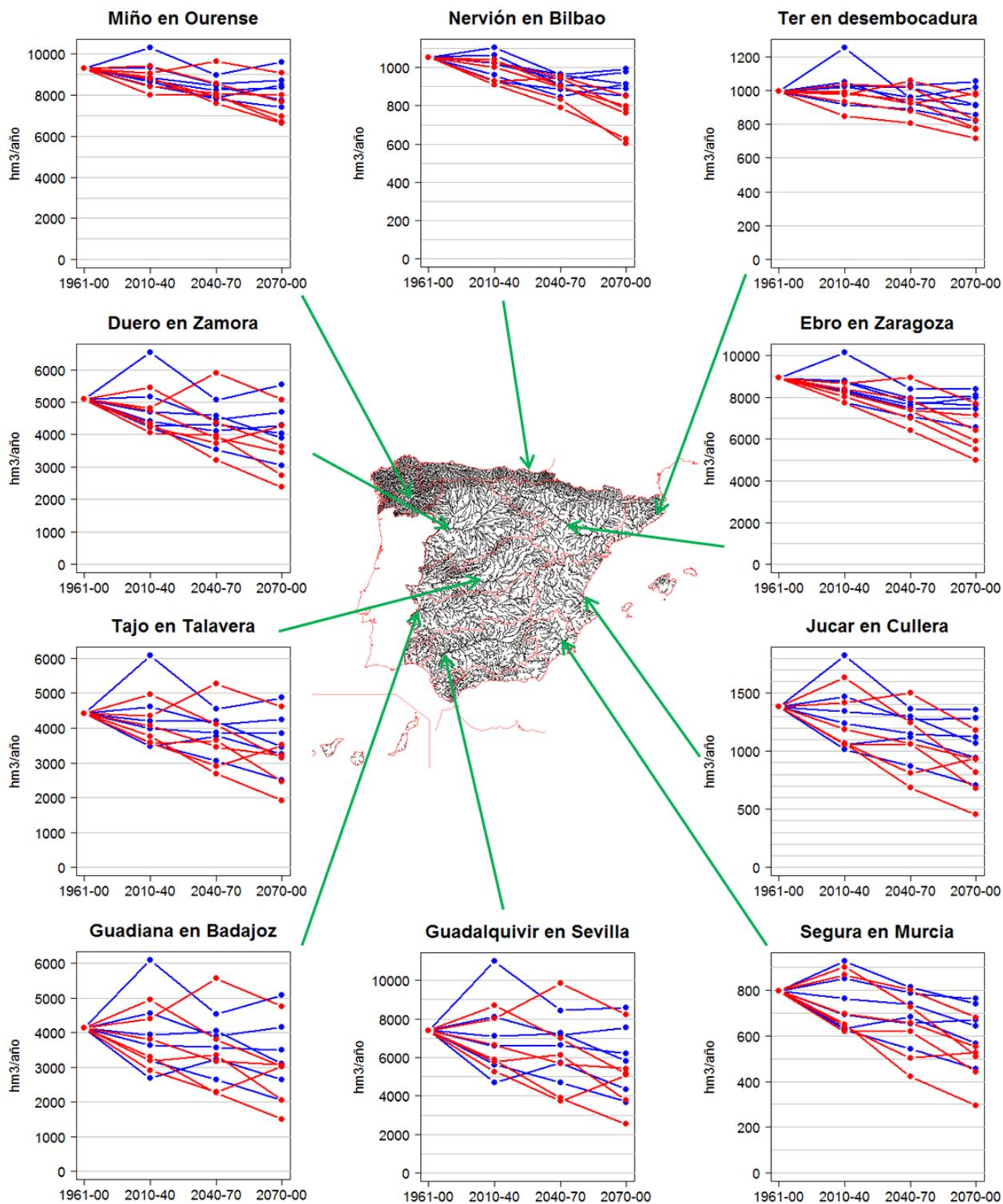


Figura 169. APN anual en algunos puntos fluviales representativos, simulados a partir de datos climáticos observados para el PC y estimados para los tres PI según proyecciones climáticas del RCP 4.5 (azul) y RCP 8.5 (rojo).



## 8 RESUMEN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL IMPACTO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS

### 8.1 RESUMEN

Entre la Figura 170 y la Figura 187 se muestran los cambios porcentuales estimados para las variables PRE, ETP, ETR y ESC en España y en diferentes ámbitos de DDHH para los tres PI con relación al PC. Se observa claramente la incertidumbre reflejada por el rango de resultados de cambio, así como la tendencia general a una reducción de RRHH: reducción de la PRE, aumento de la ETP, ligeras reducciones de ETR y fuertes reducciones de ESC. Las reducciones son mayores conforme avanza el siglo XXI y según el RCP 8.5, siendo la diferencia entre ambos RCP muy clara para el PI3 (2070-00).

En particular, destaca lo siguiente para el conjunto de España (Figura 170):

- Los rangos de variación de los resultados de cambio de PRE son mayores que los de la ETP, lo que indica la mayor incertidumbre en la estimación futura de la PRE que en la de temperaturas, que es de donde se obtiene la ETP. Destaca el amplio rango de los cambios en la PRE para el PI1 y el RCP 4.5.
- La variación de ETP responde sobre todo a la variación de temperaturas. Todas las proyecciones acuerdan un aumento de ETP en todos los periodos y casos. Esa subida es inferior al 10% en el PI1 y va siendo mayor conforme avanza el siglo XXI, indicativo de la mayor incertidumbre de los resultados conforme se alejan en el tiempo. Ese aumento es además mayor en el RCP 8.5 que en el RCP 4.5 en el PI2 y sobre todo en el PI3, donde la diferencia se hace muy notable.
- Los rangos de variación de la ETR son pequeños. Su aumento está debido al aumento de la ETP. Por otro lado, el descenso generalizado de la PRE provoca una disminución en la disponibilidad de agua y por lo tanto un descenso en la ETR.
- Todas las proyecciones estiman un aumento de temperaturas y la mayoría de las proyecciones estiman una reducción de PRE. Dichas características de los valores de partida de este estudio se traducen en una reducción de ETR y de RRHH (HMR, REC y ESC).
- La variación de ESC sigue las pautas de la variación de PRE, modelada por la ETR y la estacionalidad. Eso sí, las variaciones de PRE se acentúan en la ESC, de manera que el rango de cambio de la PRE está ente -24% a +9% y se traduce en un rango de ESC entre -43% y +20%.
- Los rangos de variación de ESC aumentan tanto del RCP 4.5 al RCP 8.5 como hacia finales de siglo, indicativo de una mayor incertidumbre en la estimación del impacto del cambio climático cuanto más nos alejamos en el tiempo y más altas son las emisiones de GEI. La excepción la constituye el amplio rango en el PI1 y RCP 4.5, motivado por el fuerte incremento de ESC según la proyección U4A.

- Los valores medios indican reducciones de ESC, que se acentúan del RCP 4.5 al RCP 8.5 y hacia finales de siglo. Los cambios para los RCP 4.5 y 8.5 son respectivamente del -3% y -7% para 2010-2040, -11% y -14% para 2040-2070 y -13% y -24% para 2070-2100.
- Así pues, hay una débil señal de cambio climático para el PI1 con relación a la incertidumbre de dicho cambio. Así por ejemplo, para el RCP 4.5, el cambio es del -3%, con un margen de variación del 33% (-13% a +20%).

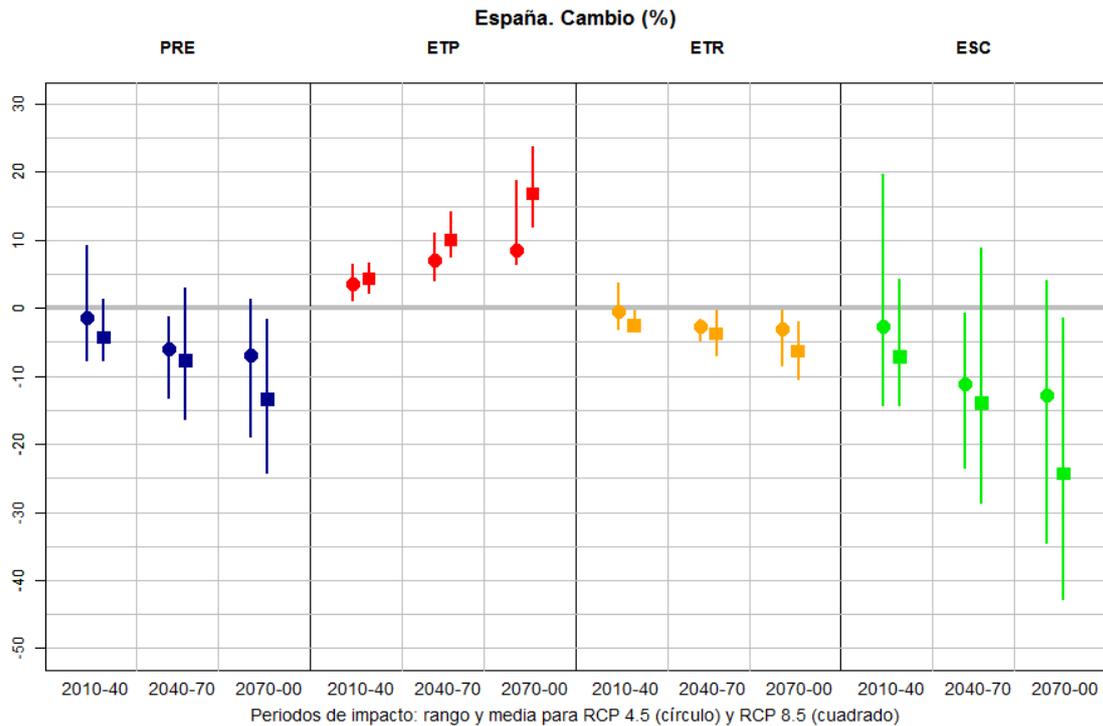


Figura 170. Cambio (%) en las principales variables hidrológicas en los tres PI respecto al PC para el conjunto de España. Rango y media de resultados para RCP 4.5 (círculos) y RCP 8.5 (cuadrados).

Los cambios pronosticados en los diferentes ámbitos de las DDHH se resumen en los gráficos de la Figura 171 a la Figura 187. Destacan los siguientes aspectos:

- La mayoría de las proyecciones pronostican una reducción de PRE en todos los ámbitos, siendo más acusada hacia finales de siglo y en el RCP 8.5. La reducción es más intensa en las DDHH del oeste y centro peninsular y Canarias, mientras que se estiman menores reducciones e incluso incrementos hacia el este peninsular. Por el contrario, las proyecciones UA muestran menores descensos y una polaridad contraria, con los mayores descensos hacia Levante.
- Hay un aumento generalizado y progresivo de la ETP en todos los ámbitos territoriales. Es, en general, mayor en las zonas interiores que en las zonas costeras. Destacan los altos incrementos que se dan en general en las divisorias de aguas de las grandes cuencas hidrográficas, lo que implica un aumento de la ETR allí que hay más disponibilidad de agua y, por lo tanto, una reducción de RRHH.



- Las DDHH más húmedas del norte de España muestran un aumento de ETR, mayor en el RCP 8.5 y mayor conforme avanza el siglo XXI. Está pues más determinado por el aumento de la ETP al haber mayor disponibilidad de agua que en el resto de DDHH. Apenas hay cambios en la ETR en las DDHH de Ebro y CCII de Cataluña, mientras que el resto de DDHH exhiben una disminución de ETR en los tres PI, más acusada hacia finales de siglo, en el RCP 8.5 y hacia el SO de España.
- Todas las DDHH muestran disparidad de resultados de cambio de ESC de las proyecciones, desde aumentos de ESC a fuertes disminuciones, si bien el conjunto de los resultados apunta a una reducción de ESC que se acentúa en el RCP 8.5 y conforme avanza el siglo XXI. La disparidad de resultados aumenta de norte a sur, al igual que lo hace la reducción de ESC estimada como promedio de los cambios de las proyecciones. Destacan el menor impacto en las CCII de Cataluña y las fuertes reducciones y el amplio margen de resultados en los dos archipiélagos.
- Los cambios de ESC son más acentuados que los cambios en PRE. Este grado de acentuación es menor en las DDHH del norte de España, y es máximo en las DDHH del SE de la Península. Eso indica que una misma reducción de PRE causa una mayor reducción de ESC en el SE que en el norte. Este hecho se debe a que las DDHH de norte tienen mucha más PRE, efecto que se ve reforzado por el tipo de sesgo de la PRE, ya que las proyecciones simulan preferentemente más PRE de la observada en las DDHH del norte y menos en las del SE. De ese modo, cuanto más baja es la PRE menos lineal es la relación PRE-ESC, menos ESC se genera, más acentuados son los cambios de ESC y por lo tanto, mayor la incertidumbre de los resultados.

No se observan unos claros patrones de cambio en el ciclo anual de la PRE ni la ESC de España, salvo la tendencia a concentrarse ambas alrededor de febrero en todos los PI y RCP, en contraposición con una reducción al final del verano. Apenas se aprecian cambios en la estacionalidad de la ETP, salvo una menor subida de la ETP en invierno. Los cambios en el ciclo anual de la ETR están determinados por los cambios en la ETP y la disponibilidad de agua; así, se estiman aumentos de la ETR en invierno y descensos de la ETR en verano, determinados por los descensos de la PRE. En invierno se da el mayor aumento de la PRE (o menores descensos) junto con el menor incremento de la ETP. Es en esos meses cuando se dan las precipitaciones de origen atlántico y, por tanto causa una atenuación en la reducción de RRHH, sobre todo hacia el oeste de España.

En resumen, hay que destacar la disparidad de resultados de las proyecciones, desde aumentos de RRHH a fuertes disminuciones, si bien el conjunto de los resultados apunta a una reducción de RRHH que se acentúa en el RCP 8.5 y conforme avanza el siglo XXI.

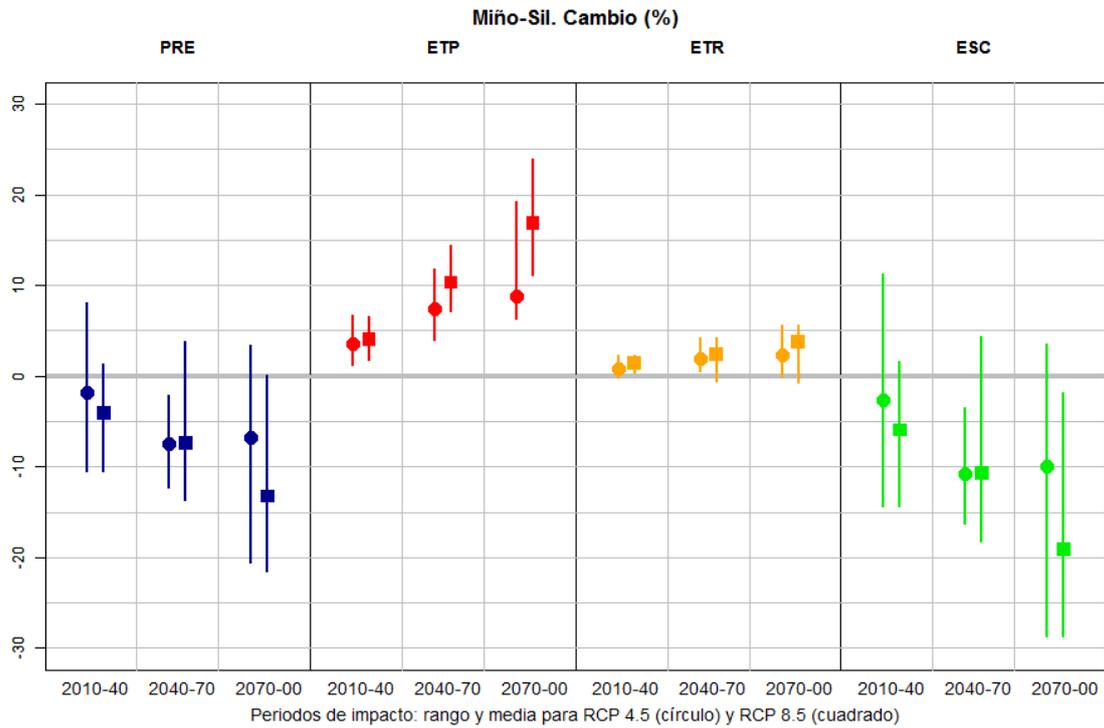


Figura 171. Cambio (%) en las principales variables hidrológicas en los tres PI respecto al PC para la DH del Miño-Sil. Rango y media de resultados para RCP 4.5 (círculos) y RCP 8.5 (cuadrados).

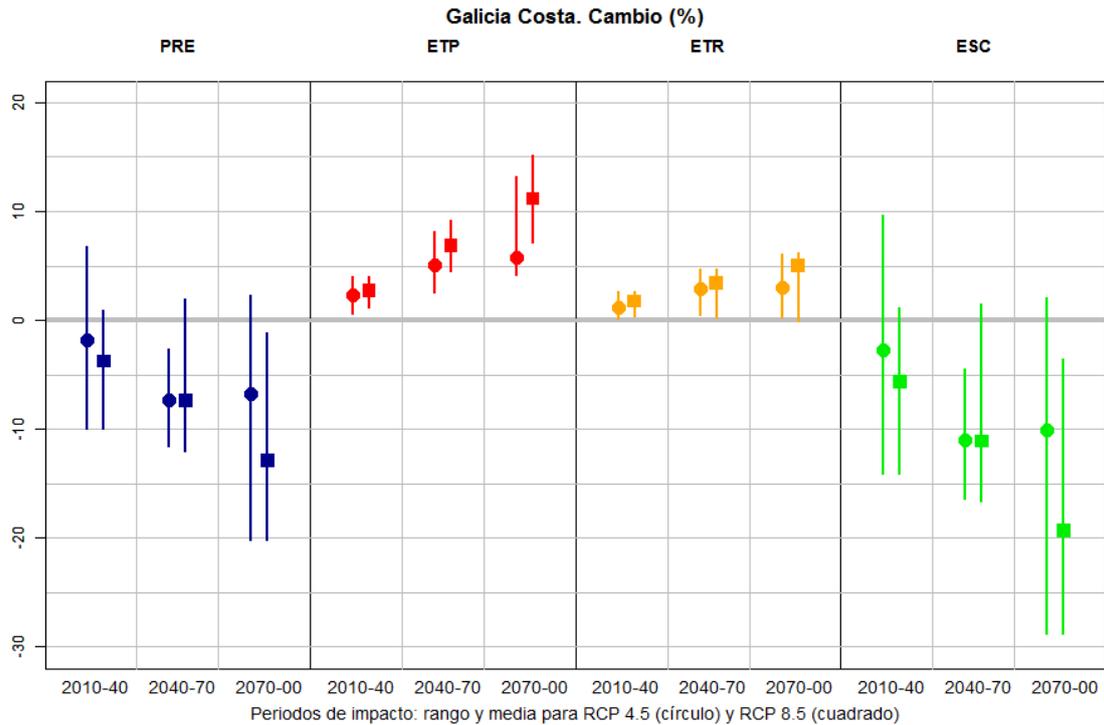


Figura 172. Cambio (%) en las principales variables hidrológicas en los tres PI respecto al PC para la DH de Galicia Costa. Rango y media de resultados para RCP 4.5 (círculos) y RCP 8.5 (cuadrados).

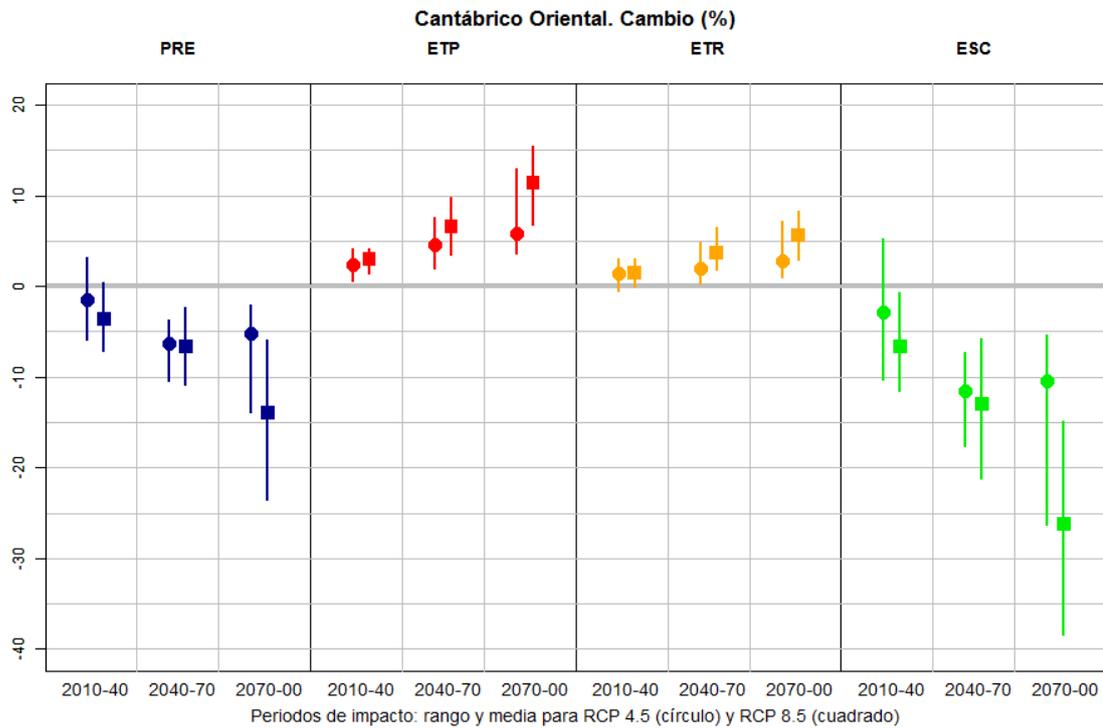


Figura 173. Cambio (%) en las principales variables hidrológicas en los tres PI respecto al PC para la DH del Cantábrico Oriental. Rango y media de resultados para RCP 4.5 (círculos) y RCP 8.5 (cuadrados).

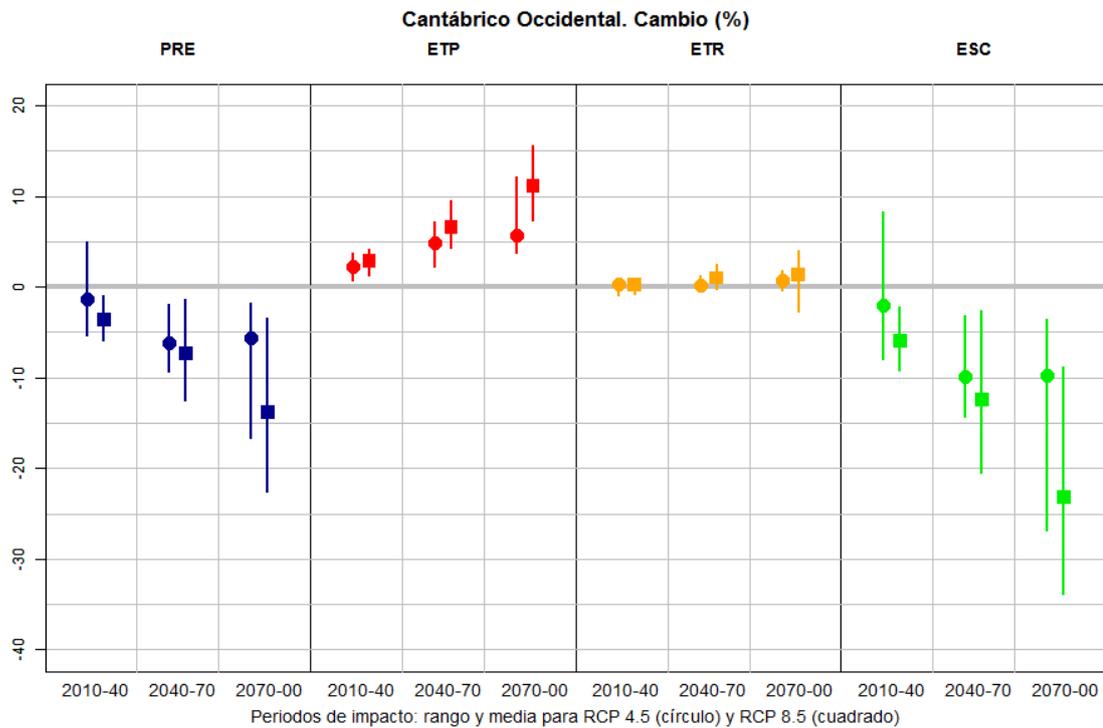


Figura 174. Cambio (%) en las principales variables hidrológicas en los tres PI respecto al PC para la DH del Cantábrico Occidental. Rango y media de resultados para RCP 4.5 (círculos) y RCP 8.5 (cuadrados).

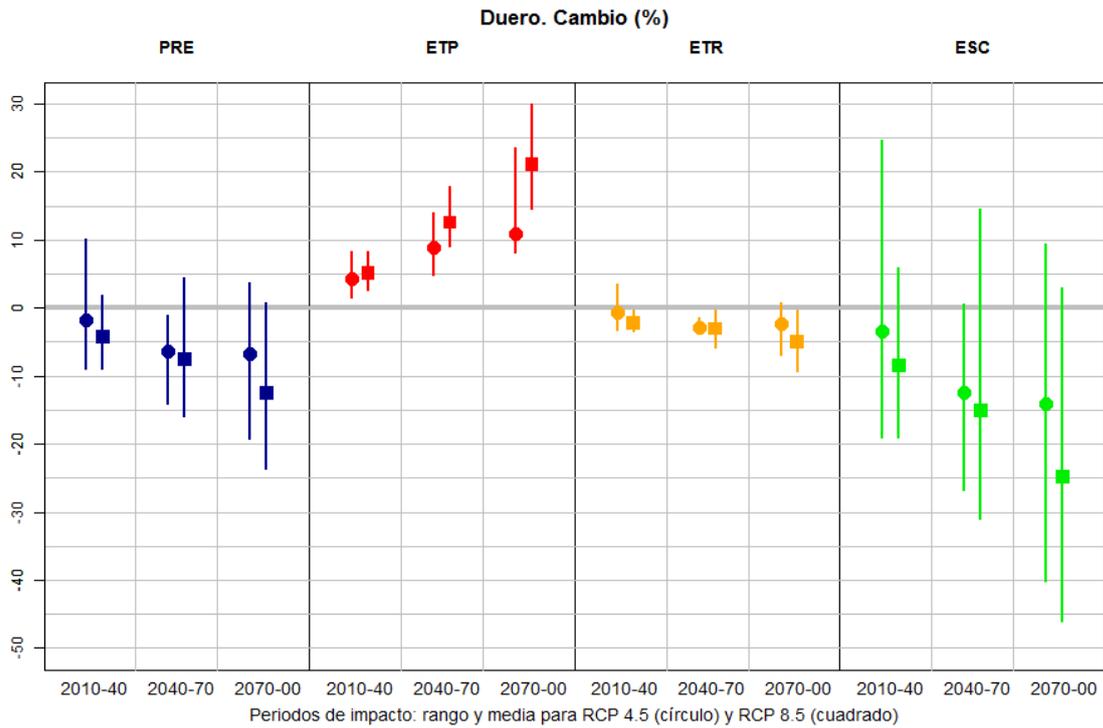


Figura 175. Cambio (%) en las principales variables hidrológicas en los tres PI respecto al PC para la DH del Duero. Rango y media de resultados para RCP 4.5 (círculos) y RCP 8.5 (cuadrados).

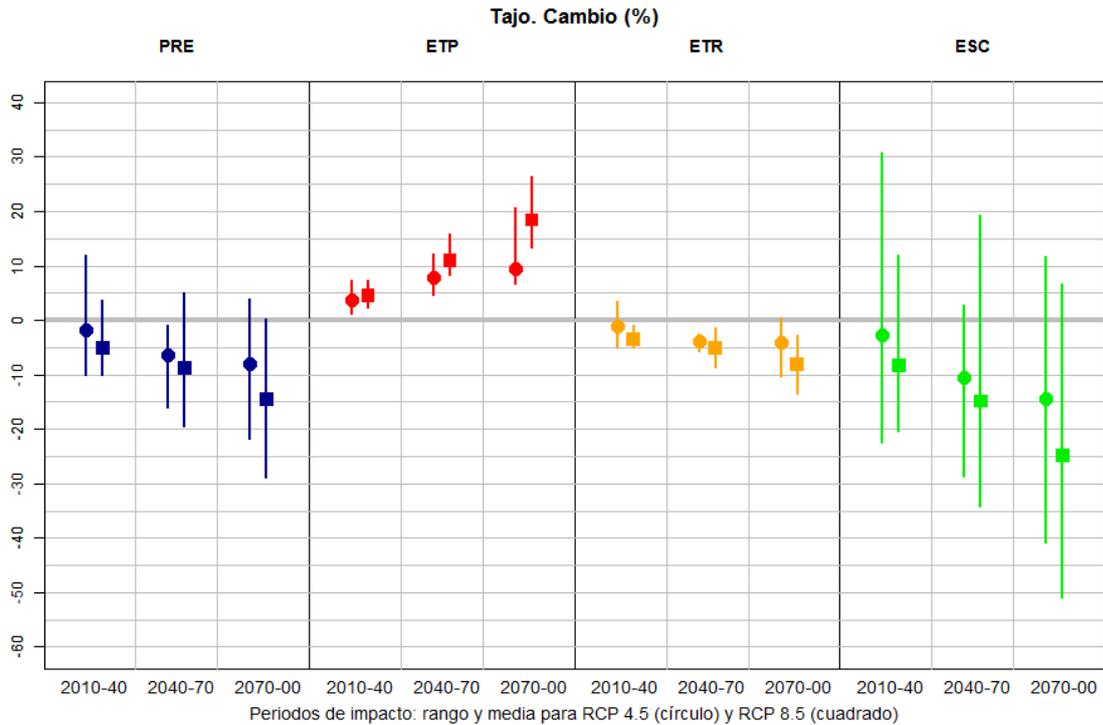


Figura 176. Cambio (%) en las principales variables hidrológicas en los tres PI respecto al PC para la DH del Tajo. Rango y media de resultados para RCP 4.5 (círculos) y RCP 8.5 (cuadrados).

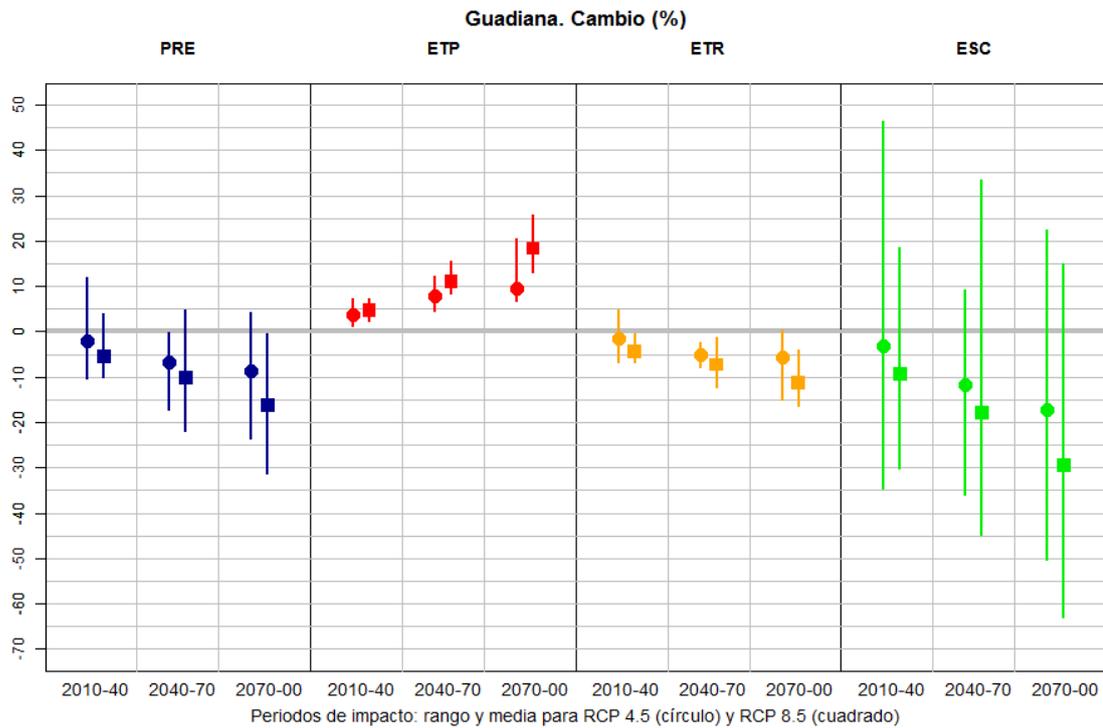


Figura 177. Cambio (%) en las principales variables hidrológicas en los tres PI respecto al PC para la DH del Guadiana. Rango y media de resultados para RCP 4.5 (círculos) y RCP 8.5 (cuadrados).

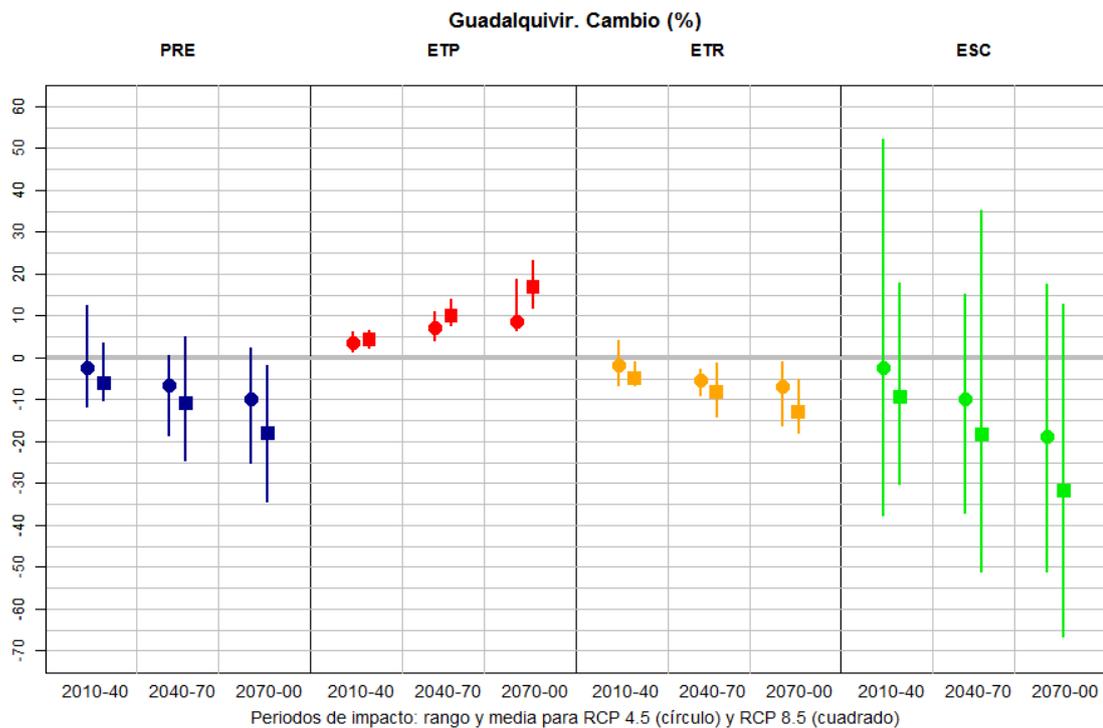


Figura 178. Cambio (%) en las principales variables hidrológicas en los tres PI respecto al PC para la DH del Guadalquivir. Rango y media de resultados para RCP 4.5 (círculos) y RCP 8.5 (cuadrados).

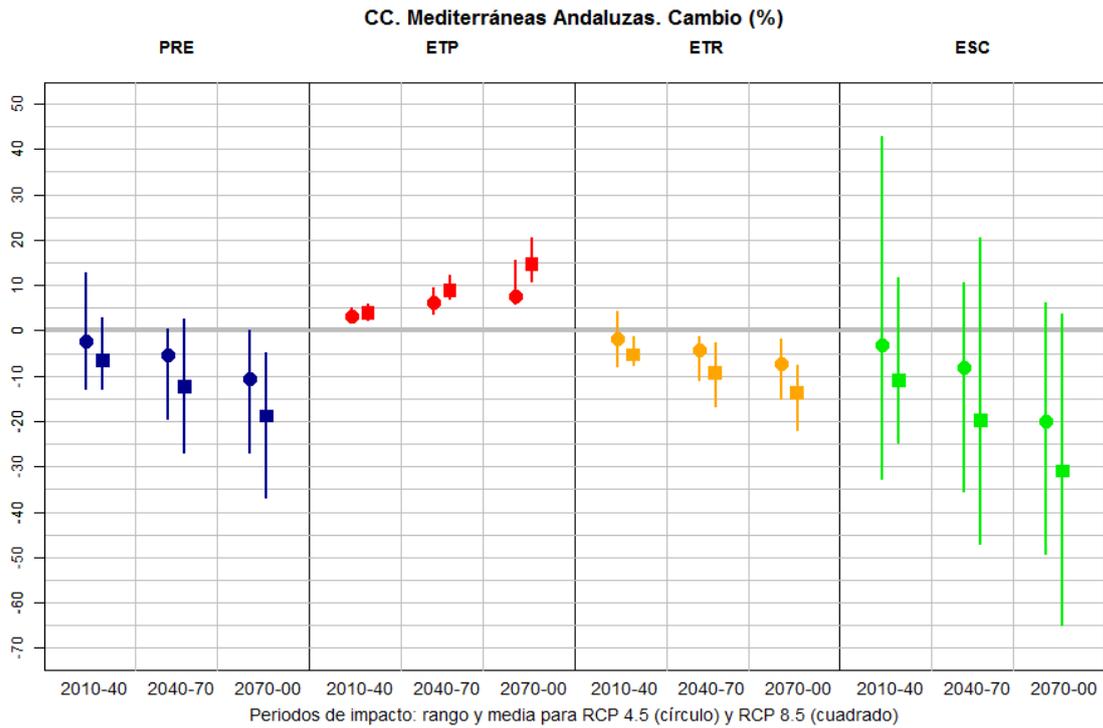


Figura 179. Cambio (%) en las principales variables hidrológicas en los tres PI respecto al PC para la DH de las CC. Mediterráneas Andaluzas. Rango y media de resultados para RCP 4.5 (círculos) y RCP 8.5 (cuadrados).

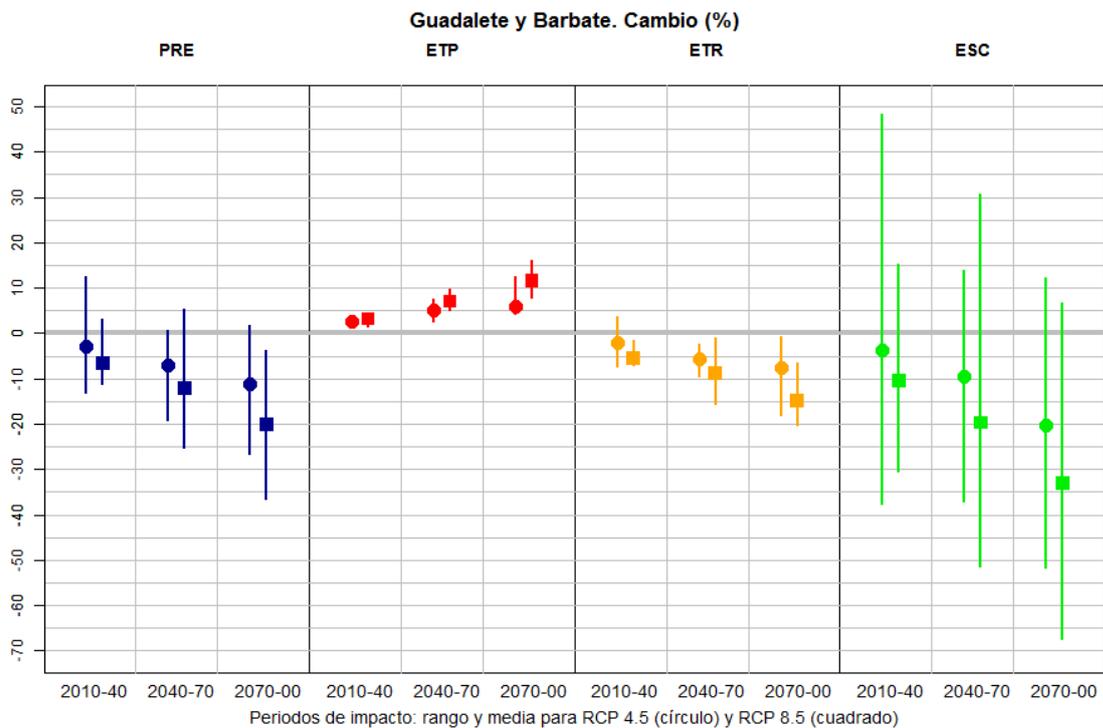


Figura 180. Cambio (%) en las principales variables hidrológicas en los tres PI respecto al PC para la DH del Guadalete y Barbate. Rango y media de resultados para RCP 4.5 (círculos) y RCP 8.5 (cuadrados).

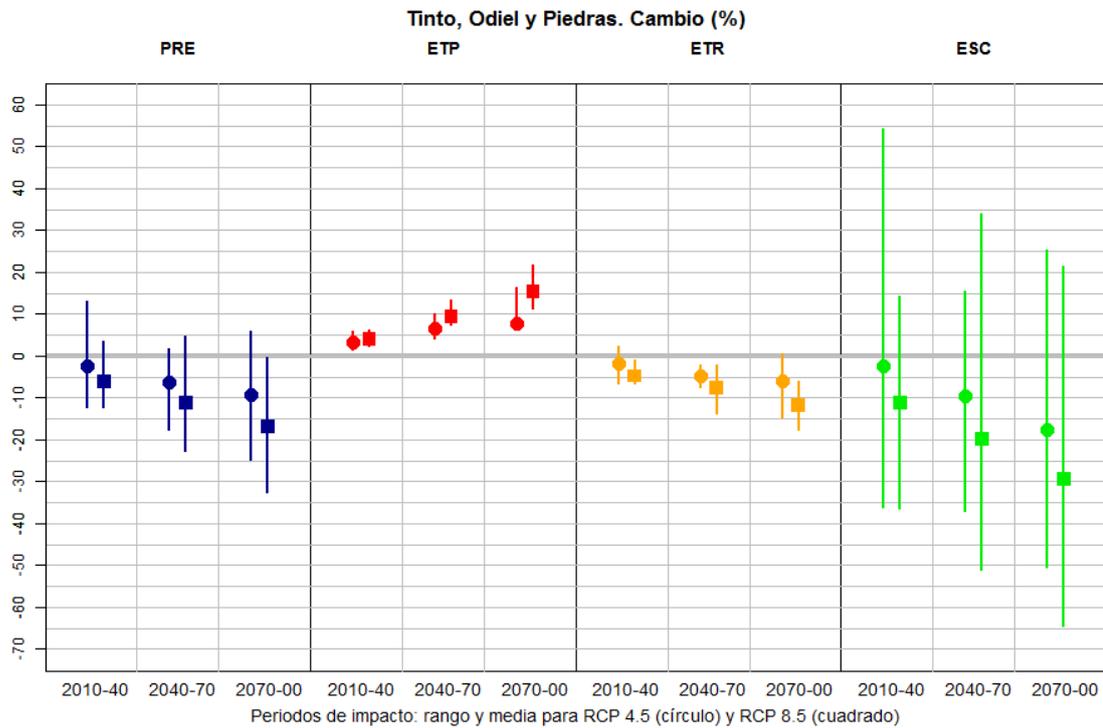


Figura 181. Cambio (%) en las principales variables hidrológicas en los tres PI respecto al PC para la DH del Tinto, Odiel y Piedras. Rango y media de resultados para RCP 4.5 (círculos) y RCP 8.5 (cuadrados).

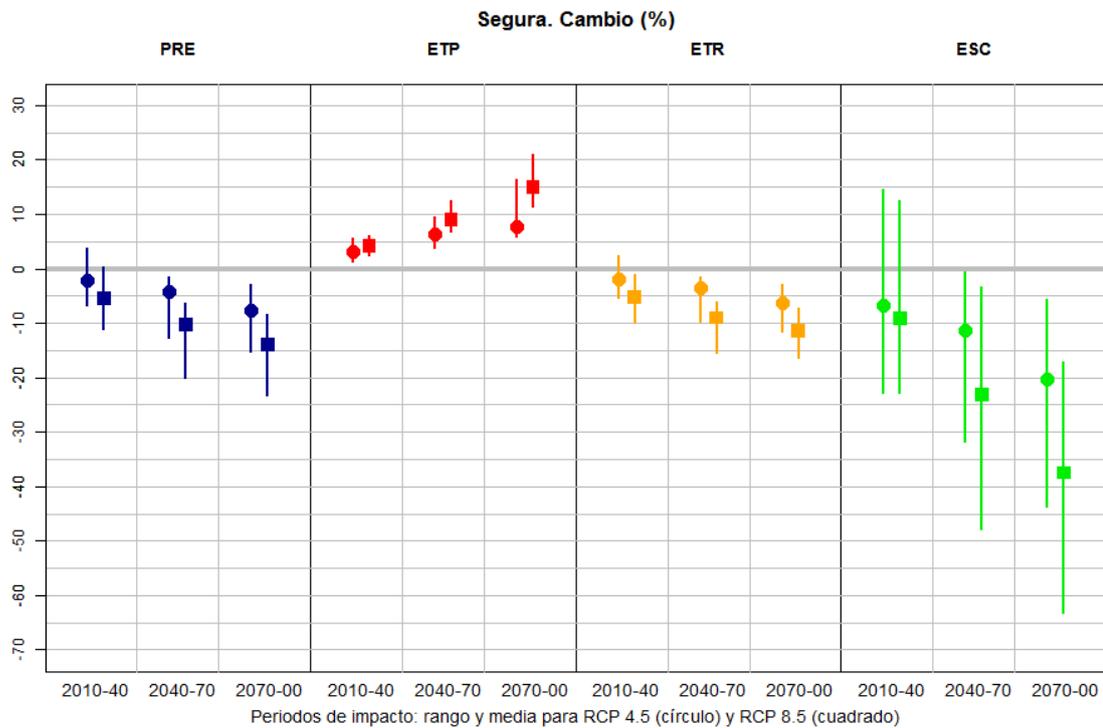


Figura 182. Cambio (%) en las principales variables hidrológicas en los tres PI respecto al PC para la DH del Segura. Rango y media de resultados para RCP 4.5 (círculos) y RCP 8.5 (cuadrados).

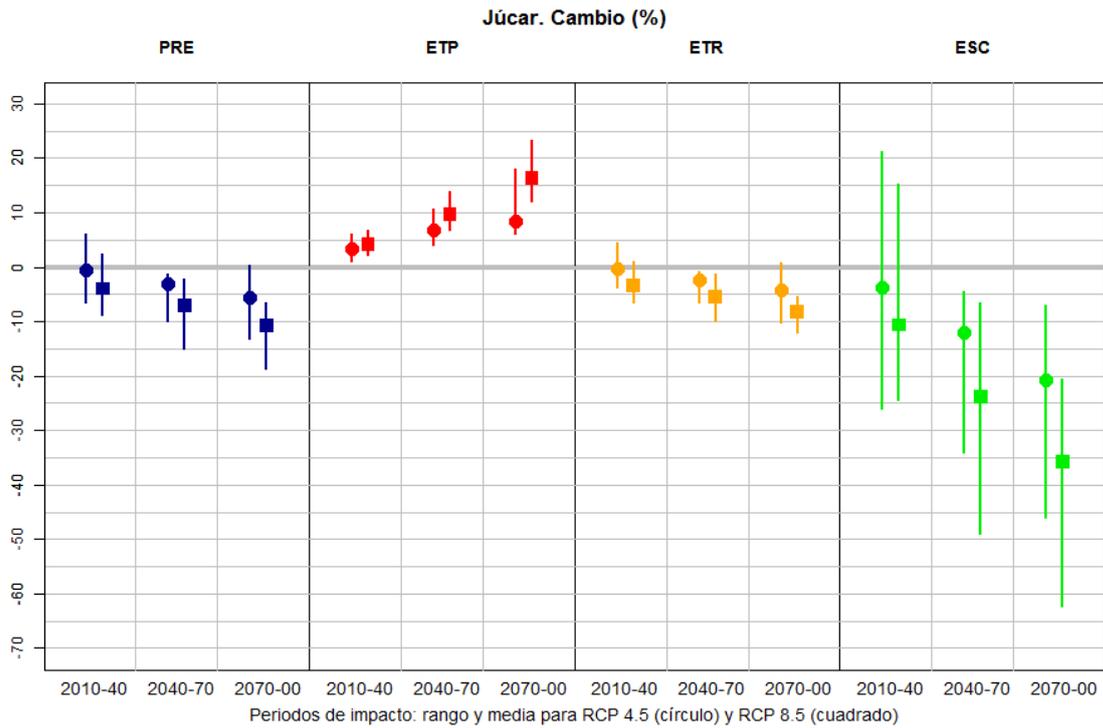


Figura 183. Cambio (%) en las principales variables hidrológicas en los tres PI respecto al PC para la DH del Júcar. Rango y media de resultados para RCP 4.5 (círculos) y RCP 8.5 (cuadrados).

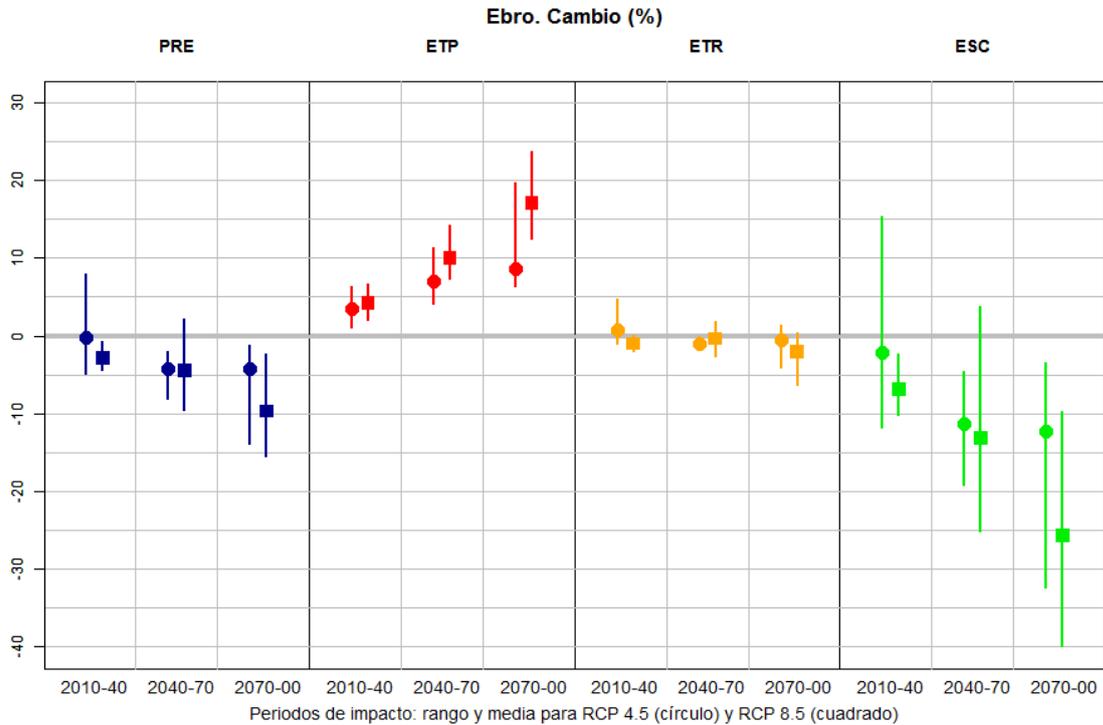


Figura 184. Cambio (%) en las principales variables hidrológicas en los tres PI respecto al PC para la DH del Ebro. Rango y media de resultados para RCP 4.5 (círculos) y RCP 8.5 (cuadrados).

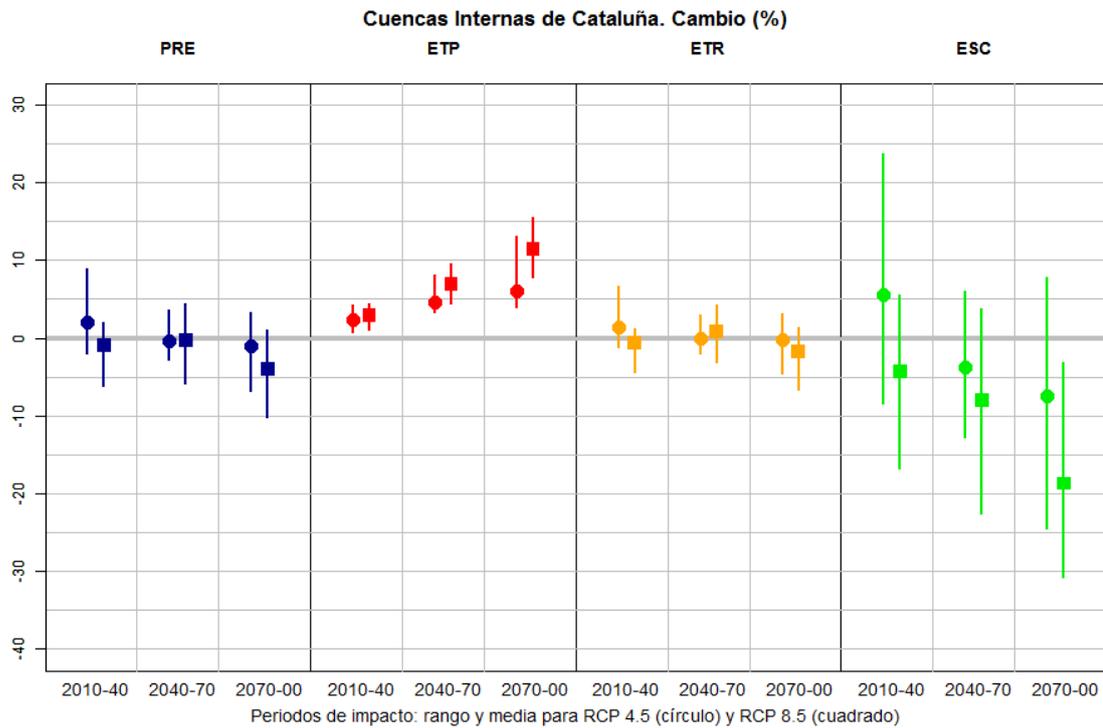


Figura 185. Cambio (%) en las principales variables hidrológicas en los tres PI respecto al PC para la DH de las CCII de Cataluña. Rango y media de resultados para RCP 4.5 (círculos) y RCP 8.5 (cuadrados).

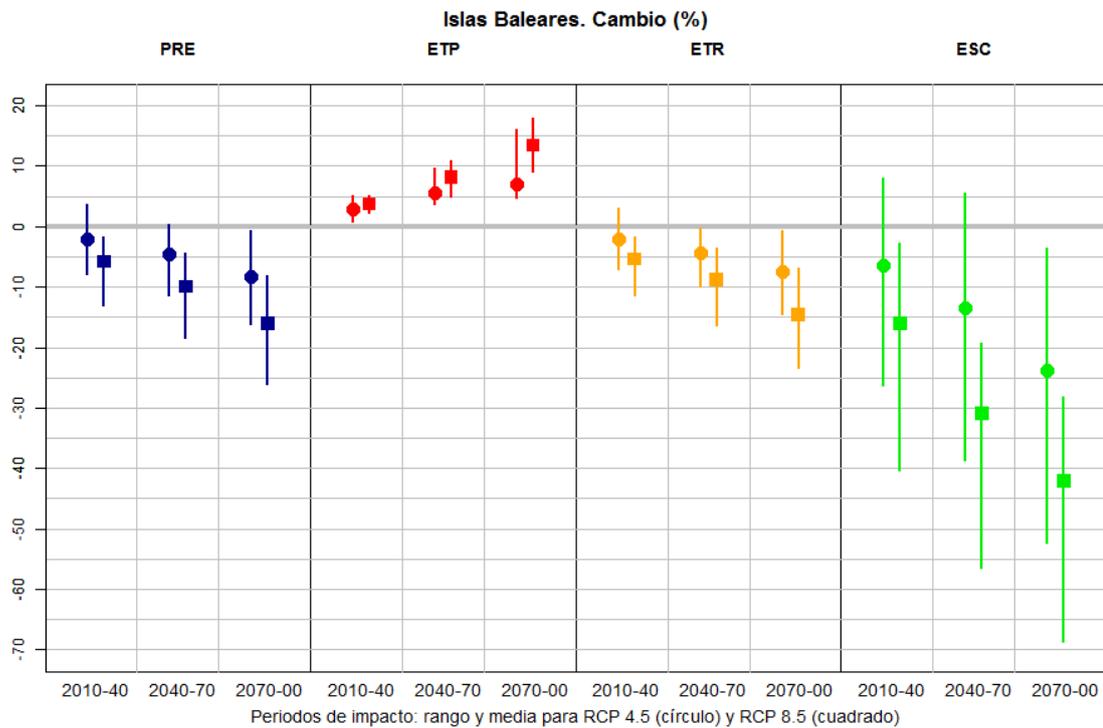


Figura 186. Cambio (%) en las principales variables hidrológicas en los tres PI respecto al PC para la DH de las Islas Baleares. Rango y media de resultados para RCP 4.5 (círculos) y RCP 8.5 (cuadrados).

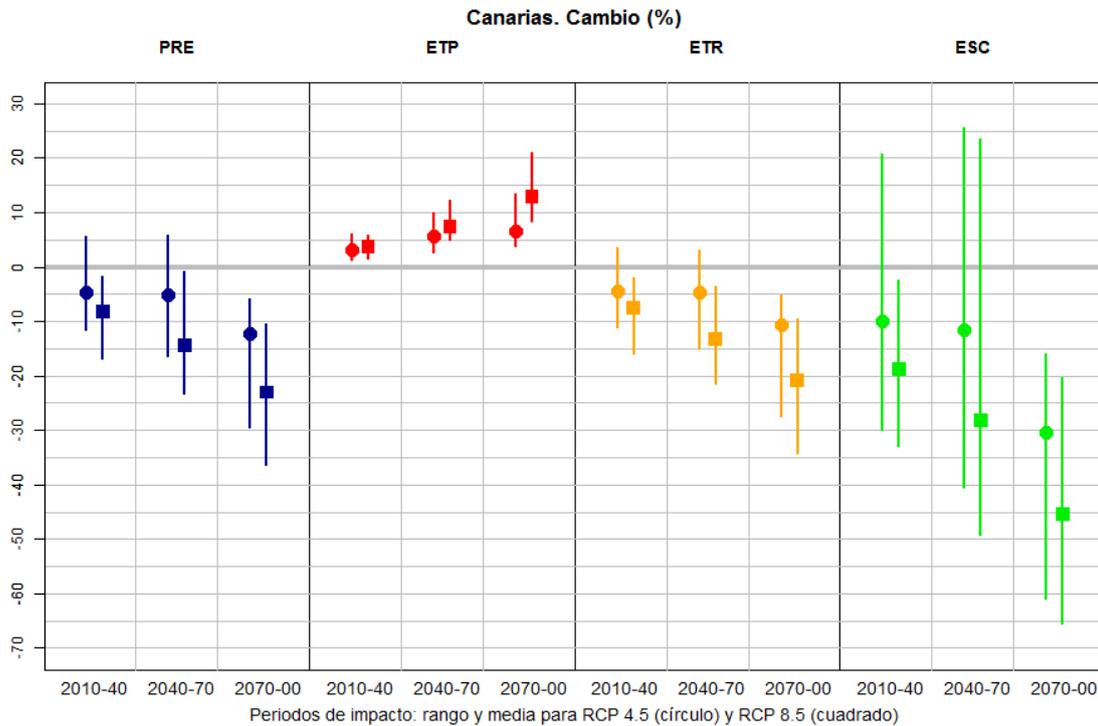


Figura 187. Cambio (%) en las principales variables hidrológicas en los tres PI respecto al PC para las DDHH de Canarias. Rango y media de resultados para RCP 4.5 (círculos) y RCP 8.5 (cuadrados).

## 8.2 COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS DEL INFORME CEDEX 2010

En este capítulo se comparan los resultados del presente estudio con los de otro estudio anterior (CEDEX 2010). Se presentan los cambios (%) de cada variable hidrológica en cada uno de los tres PI respecto al PC. Ambos estudios tienen el mismo ámbito y temática.

Las principales diferencias radican en que las proyecciones regionalizadas para España fueron obtenidas de MCG del TAR (IPCC 2001) en el primer estudio (CEDEX 2010) y del AR5 (IPCC 2013) en el presente estudio, por lo que éste supone una actualización del anterior, tanto en los MCG como en los escenarios de emisiones de GEI.

Los nuevos MCG utilizados en este estudio son más avanzados, complejos y completos que los del anterior estudio, tal como se ha indicado en el capítulo 2 del presente informe.

Por otro lado, los escenarios de emisiones son diferentes. En CEDEX (2010) se utilizaban los SRES A2 y B2, mientras que ahora se utilizan los RCP 4.5 y 8.5. En la Figura 3 se puede ver la comparativa entre ellos. El escenario de emisiones RCP 8.5 puede compararse con el SRES A2, si bien RCP 8.5 supone niveles más altos de CO<sub>2</sub> equivalente en la atmósfera. El escenario de emisiones RCP 4.5 es más moderado y

puede compararse al SRES B2, si bien RCP 4.5 supone niveles más bajos de CO<sub>2</sub> para el último tercio del siglo XXI.

Los PI son los mismos en ambos estudios. El PC es diferente, pues es 1961-1990 en CEDEX 2010 y 1961-2000 en el presente estudio. No obstante, esta diferencia del PC no es relevante, puesto que el PC siempre hace referencia a los valores simulados y no los observados. Los valores simulados no recogen ni las tendencias ni los ciclos observados sino que intentan reflejar la situación estadística del clima presente.

En la Tabla 27 se muestran los cambios porcentuales estimados en las principales variables hidrológicas para los tres PI respecto al PC para el conjunto de España, así como los resultados del estudio anterior del CEDEX (2010) para su comparación.

Tabla 27. Rango y media de  $\Delta$  en las variables hidroclimáticas en España en cada PI y escenario de emisiones según el presente estudio y comparación con el de CEDEX 2010.

ESPAÑA		Presente Estudio						CEDEX 2010					
		RCP 4.5			RCP 8.5			SRES B2			SRES A2		
		Mx	Med	Mn	Mx	Med	Mn	Max	Med	Min	Max	Med	Min
PRE (%)	2010-2040	9	-2	-8	1	-4	-8	-3	-6	-10	0	-5	-11
	2040-2070	-1	-6	-13	3	-8	-16	-3	-8	-12	-4	-9	-16
	2070-2100	1	-7	-17	-2	-14	-24	-2	-9	-14	2	-17	-28
TEM (°C)	2010-2040	1.5	0.9	0.4	1.6	1.0	0.5	1.9	1.6	1.4	1.8	1.5	1.2
	2040-2070	2.6	1.6	0.9	3.4	2.3	1.7	3.0	2.5	2.0	3.4	2.9	2.5
	2070-2100	3.2	2.0	1.5	5.6	3.9	2.8	4.4	3.6	2.7	5.8	4.8	4.0
ETP (%)	2010-2040	6	3	1	7	4	2	8	7	6	6	6	6
	2040-2070	11	7	4	14	10	8	14	12	10	14	13	12
	2070-2100	14	9	6	24	17	12	19	15	13	28	21	19
ETR (%)	2010-2040	4	-1	-3	0	-3	-3	-3	-5	-8	1	-3	-7
	2040-2070	-2	-3	-5	0	-4	-7	-1	-6	-10	-2	-6	-10
	2070-2100	0	-3	-5	-2	-6	-11	0	-7	-12	2	-12	-24
HMR (%)	2010-2040	2	-2	-3	0	-2	-4	0	-2	-4	0	-2	-4
	2040-2070	-2	-4	-6	-2	-5	-9	-1	-3	-4	-2	-3	-6
	2070-2100	-1	-5	-10	-4	-8	-12	-2	-3	-5	-2	-6	-7
REC (%)	2010-2040	15	-3	-13	1	-7	-13	-2	-8	-15	-2	-8	-18
	2040-2070	-2	-11	-22	4	-14	-28	-5	-12	-18	-8	-15	-27
	2070-2100	1	-13	-28	-6	-24	-40	-8	-16	-24	-3	-27	-41
ESC (%)	2010-2040	20	-3	-13	4	-7	-14	1	-8	-18	-2	-8	-22
	2040-2070	-1	-11	-23	9	-14	-29	-5	-11	-21	-8	-16	-34
	2070-2100	4	-13	-31	-1	-24	-43	-1	-14	-28	0	-28	-40

La mayoría de las proyecciones dan en ambos casos un descenso de PRE, más acusado conforme avanza el siglo y en los escenarios SRES A2 y RCP 8.5. Los cambios medios son menos marcados en el estudio actual. Así, para 2010-2040 son del -2% (RCP 4.5) frente al -6% (SRES B2) y del -4% (RCP 8.5) frente al -5% (SRES



A2). Los cambios estimados en la PRE oscilan en un amplio rango en ambos casos, sobre todo en el estudio actual para el PI1 que está entre +9% y -8%, mayor que en CEDEX (2010), que está entre -3% y -11%. Este mayor rango en el estudio actual está condicionado por una proyección (U4A) que da un fuerte incremento (+9%) y que sube la media del conjunto de proyecciones para el RCP 4.5 (-2%). Las mayores discrepancias con relación a los resultados del informe anterior se deben a las proyecciones UA que dan incrementos notables de PRE en el P1 - RCP 4.5 y en el P2 - RCP 8.5.

Hay bastante similitud con relación a los cambios de TEM. El rango de aumentos de TEM del estudio actual es del 0.4 °C al 5.6 °C. Los aumentos medios son alrededor del 1% para 2010-2040 para ambos RCP, 1.6 °C (RCP 4.5) y 2.3 °C para 2040-2070 (RCP 8.5) y 2 °C (RCP 4.5) y 3.9 °C (RCP 8.5) para 2070-2100. Los aumentos de TEM son inferiores a los estimados en el informe anterior (CEDEX 2010), en medio grado en el PI1 y hasta en más de un grado posteriormente.

Las proyecciones del RCP 8.5 dan mayores subidas de ETP que las respectivas del RCP 4.5. Los aumentos de la ETP de este estudio son de hasta un 7% inferiores a los del estudio CEDEX 2010. Las diferencias son mayores entre el RCP 4.5 y el SRES B2 que entre el RCP 8.5 y el SRES A2.

Los cambios en la ETR estimados en este estudio son menores y tienen una menor horquilla de variación que los de CEDEX (2010). La mayor diferencia se da para el PI3 entre el SRES A2 (-24%) y el RCP 8.5 (-11%). En ambos casos dominan las reducciones de ETR, motivadas en gran medida por la reducción de PRE. Los menores valores del presente estudio se deben fundamentalmente a un menor aumento de TEM, y por lo tanto de ETP, en las nuevas proyecciones.

La pérdida de humedad en el suelo se indica mediante la diferencia entre los porcentajes de humedad del suelo (HMR). Apenas hay diferencias entre los resultados de ambos estudios, siendo algo mayores las pérdidas de HMR en el estudio actual. La pérdida de humedad se acentúa ligeramente hacia finales del siglo XXI, con valores máximos inferiores al 12%.

La REC y la ESC tienen variaciones muy similares entre sí y están muy relacionadas con las variaciones de PRE.

Los cambios medios de ESC pronosticados para el conjunto de España son similares en ambos estudios, con sólo tres diferencias a destacar. La primera es una menor reducción según el presente estudio para el RCP 4.5 durante el PI1. El presente estudio estima variaciones que oscilan entre +20% y -13% con media del -3% para el PI1 y RCP 4.5. Son valores que difieren de los obtenidos en CEDEX 2010, con valores más bajos, rango más corto y una media inferior, del -8%. La proyección U4A da notables aumentos de PRE y es la que influye en gran medida en esas diferencias. La segunda es una menor reducción según el presente estudio para el PI2 y RCP 8.5. El rango en el presente estudio va del +9% a -29%, con media del -14%. Son valores mayores que los del anterior informe y vienen motivados por el incremento de PRE de la proyección U8A. La tercera es una menor reducción según el presente estudio para el RCP 8.5 durante el PI3 (reducción del 24% ahora frente al 28% en el estudio anterior).



La comparación entre los resultados medios para los diferentes ámbitos territoriales de las DDHH se muestra de la Figura 188 a la Figura 191. También se incluyen en esas figuras los resultados para el conjunto de España. Tal como se indicó en el capítulo de metodología, la comparación se realiza para cada variable hidrológica de interés y cada ámbito territorial de las DDHH. No se incluyen las DDHH de Tinto, Odiel y Piedras y de Guadalete y Barbate ya que no estaban individualizadas en el informe anterior al formar parte de las DDHH del Guadalquivir y CC. Mediterráneas Andaluzas respectivamente. Es por ello, que los ámbitos de estas dos últimas no son plenamente coincidentes, pero se han mantenido para su comparación. También se han equiparado los ámbitos del Cantábrico Occidental con el Cantábrico y los del Cantábrico Oriental con los del País Vasco del informe anterior. Las islas Canarias se han agrupado en un único ámbito. Ceuta y Melilla se integran en las Cuenca Mediterráneas Andaluzas.

De la comparación entre ambos estudios se desprenden las siguientes conclusiones con relación a los cambios de PRE (Figura 188 y Tabla 27):

- Mayor homogeneidad entre los resultados de las DDHH en el nuevo estudio, sobre todo en PI1. La DH CCII de Cataluña destaca ahora entre los demás ámbitos por su reducido impacto en todos los PI.
- Menor impacto (reducción menor) en RCP 4.5 que en SRES B2, sobre todo hacia el sur.
- En el PI1: menor impacto en RCP 8.5 que en SRES A2 en el Cantábrico, igual hacia el sur y bastante mayor hacia el este.
- Conforme avanza el siglo XXI, el impacto es menor en RCP 8.5 que en SRES A2 en todos los ámbitos, siendo la diferencia entre ambos escenarios de emisiones mayor hacia el sur.
- En las DDHH de Segura y Júcar, el estudio actual pronostica una mayor reducción de PRE para el RCP 8.5 que el estudio de CEDEX 2010 para el SRES A2. Esta diferencia es muy acusada en el PI1 y se va atenuando hacia final de siglo.



CEDEX

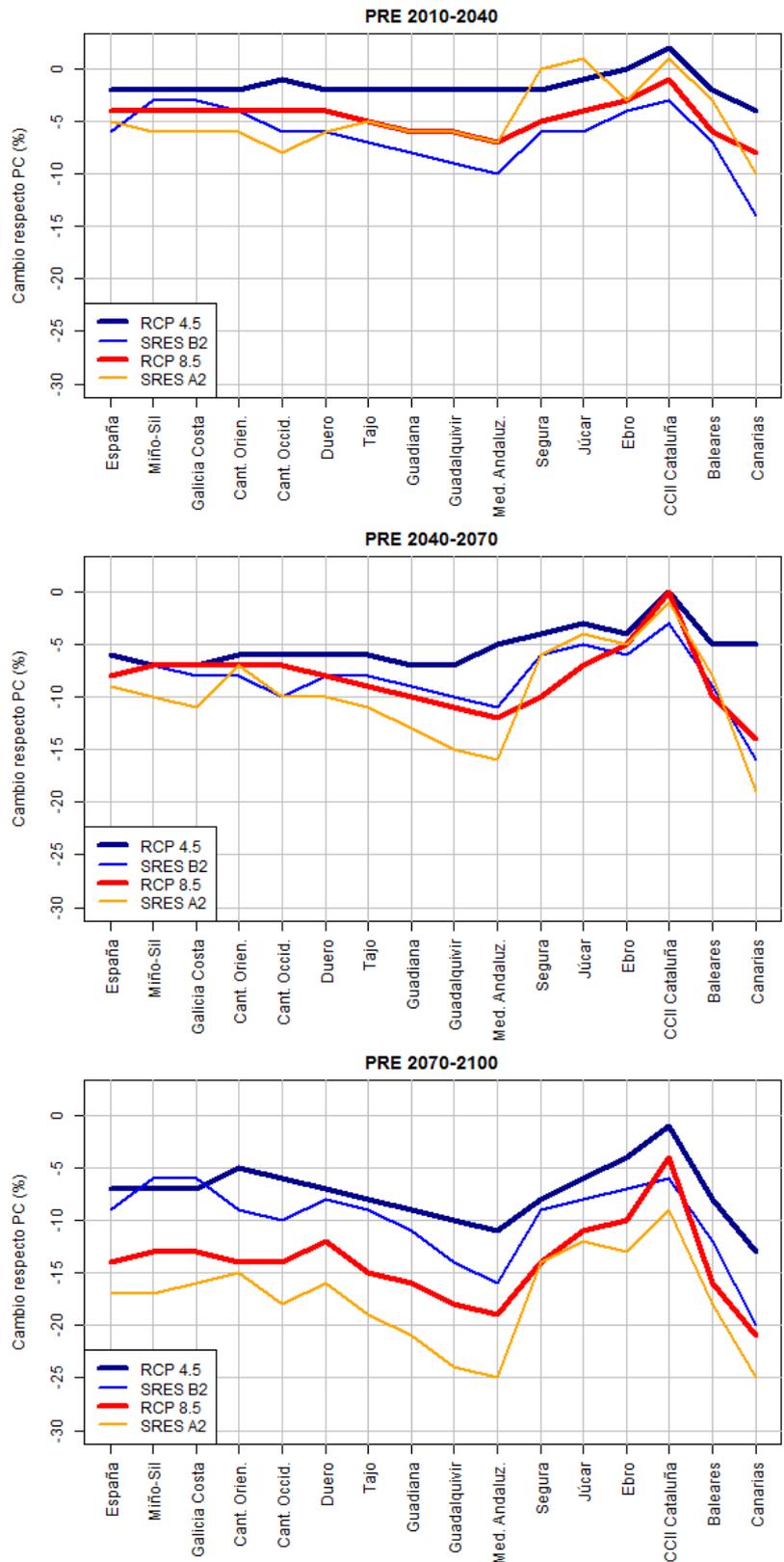


Figura 188. Comparativa de cambios de PRE entre CEDEX 2010 (SRES) y el presente estudio (RCP).



De la comparación entre ambos estudios se desprenden las siguientes conclusiones con relación a los cambios de ETP (Figura 189):

- Menor aumento de ETP en todos los ámbitos según el presente estudio.
- Las diferencias son más patentes en el PI3.
- Las diferencias son más evidentes en las DDHH del norte de España.
- Se observan similares patrones de cambio, siendo los mayores aumentos de ETP en Miño-Sil, Duero y Ebro.
- El menor aumento de ETP en el estudio actual se debe a que las proyecciones utilizadas en el presente estudio consideran un menor aumento de temperaturas que las de CEDEX 2010 (Tabla 27). Los cambios para RCP 4.5 son menores que los del SRES B2 y los del RCP 8.5 menores que los del SRES A2. Estas diferencias se hacen más notables en el PI3.



CEDEX

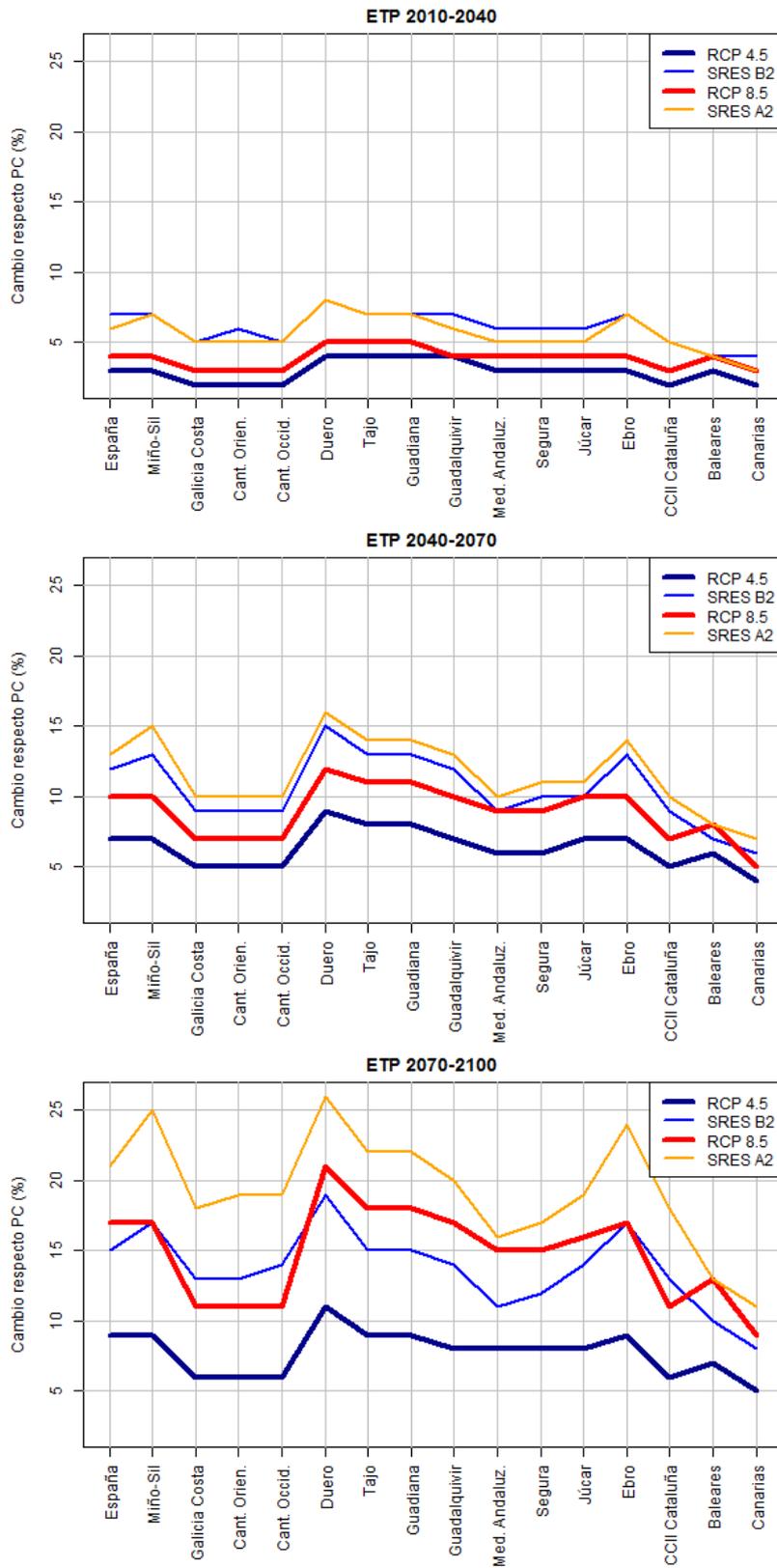


Figura 189. Comparativa de cambios de ETP entre CEDEX 2010 (SRES) y el presente estudio (RCP).



De la comparación entre ambos estudios se desprenden las siguientes conclusiones con relación a los cambios de ETR (Figura 190):

- Se pronostica una menor reducción, o mayor aumento, de ETR en el estudio actual. Esto es contrario a las diferencias de ETP y es debido a que hay una menor reducción de PRE en el estudio actual (Figura 188 y Tabla 27) y a que las proyecciones simulan más PRE de la observada en las zonas más lluviosas, por lo que hay más agua disponible para ser susceptible de evaporación.
- En el anterior estudio había un mayor rango de variaciones de ETR debido a que había proyecciones que daban PRE por encima y por debajo de la observada. La ETR se aproxima a la ETP en Galicia en el actual estudio ya que se simula mucha PRE y baja ETP. La ETR tiende a seguir las pautas de la ETP (suben) pero más suavizada por la disponibilidad de agua que marca la PRE. No pasa lo mismo con el anterior estudio, con una PRE simulada menor y una ETP mucho mayor, por lo que la ETR era muy sensible a los cambios de PRE y ETP. Las diferencias entre las variaciones de ETR de ambos estudios son consecuencia en gran medida del sesgo de las proyecciones.
- Esta menor reducción de la ETR en el estudio actual es más evidente en las cuencas occidentales y menos notable hacia el este de España. Las diferencias más notables se dan en el NO de España; había una reducción de ETR según el anterior estudio, mientras que ahora hay un incremento.
- Las diferencias se hacen más patentes hacia finales de siglo, siendo muy notorias en el PI3.
- Las diferencias mencionadas afectan de manera similar tanto a la comparación del RCP 4.5 con SRES B2 como a la del RCP 8.5 con SRES A2.



CEDEX

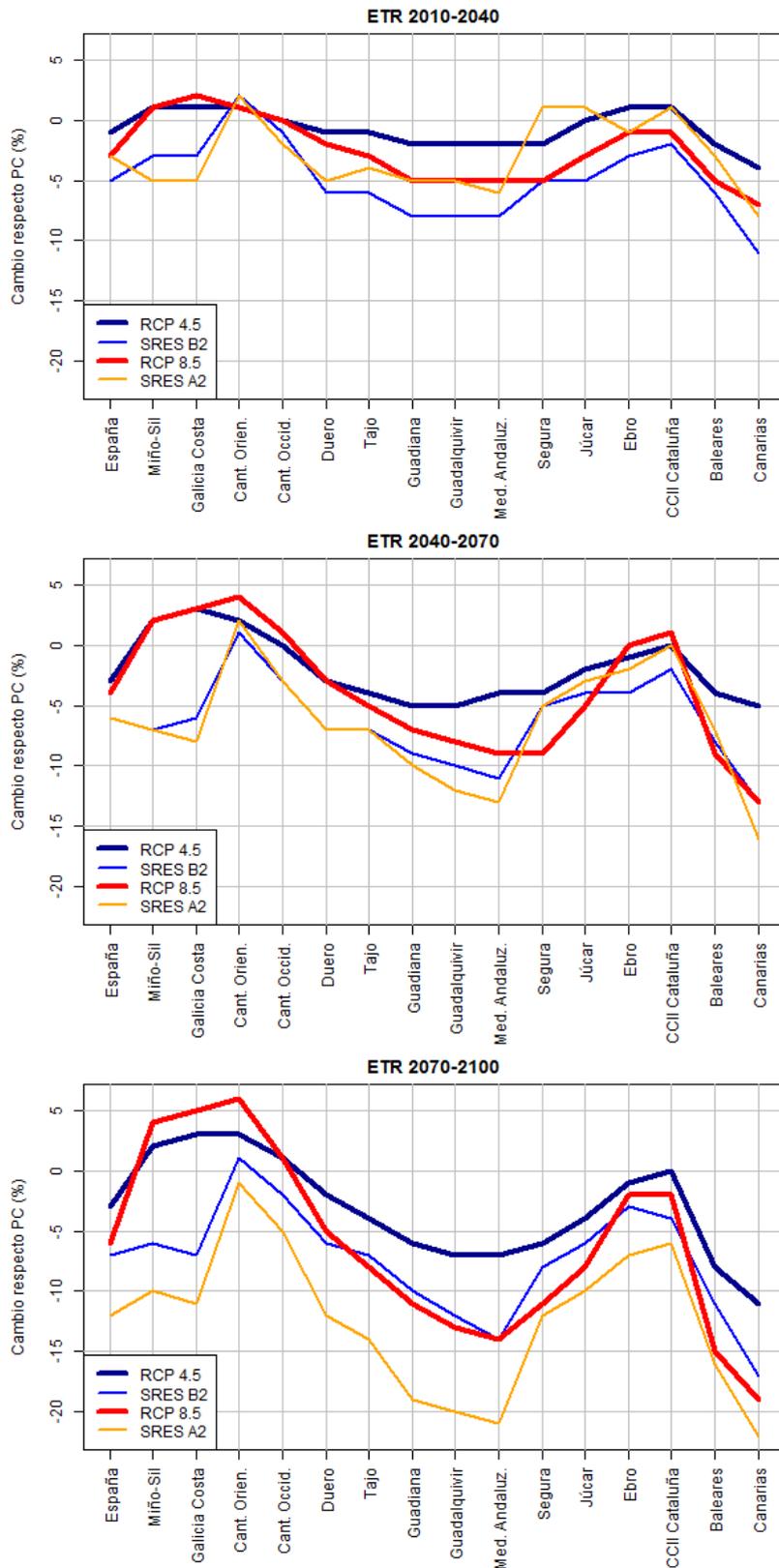


Figura 190. Comparativa de cambios de ETR entre CEDEX 2010 (SRES) y el presente estudio (RCP).

De la comparación entre ambos estudios se desprenden las siguientes conclusiones con relación a los cambios de ESC (Tabla 28 y Figura 191):

- Durante el PI1, los cambios del RCP son más similares entre ámbitos que los del SRES. El RCP 4.5 da reducciones mucho menores que su equivalente SRES B2 en todos los ámbitos, salvo en las DDHH gallegas que dan cambios parecidos. El RCP 8.5 da en general similares reducciones que su equivalente SRES A2, salvo en las cantábricas con menores reducciones para RCP 8.5, y en Júcar, CCII de Cataluña y, especialmente, Baleares con mayores reducciones para RCP 8.5. Hay que indicar que el RCP 8.5 es más desfavorable (reducción de ESC más acusada) que el RCP 4.5 en todos los ámbitos territoriales, tal como cabría esperar; sin embargo, eso no ocurre con los SRES ya que el SRES B2 es más desfavorable que el SRES A2 en muchos ámbitos, sobre todo hacia el este y sur.
- Durante el PI2, el RCP 4.5 da, en general, menores reducciones que el SRES B2, especialmente en Canarias, y algo mayores en las DDHH gallegas, Duero y Tajo. El RCP 8.5 da cambios similares al SRES A2 en el norte, Segura y Ebro, menores reducciones en las cuencas del sur (con diferencias muy grandes del Guadiana hacia el sur) y mayores en las del Júcar, CCII de Cataluña y Baleares.
- La comparativa durante el PI3 es similar a la del PI2. El estudio actual estima en general menores reducciones de ESC para el escenario de emisiones más desfavorable. Así, las reducciones son mucho menores en el RCP 8.5 que en el SRES A2 en las grandes cuencas atlánticas y del sur peninsular. Por el contrario, son mayores en Segura, Júcar y Baleares. Los cambios son más parecidos entre los escenarios menos desfavorables, destacando que el estudio actual da una mayor reducción en las DDHH gallegas y menor en las Cantábricas, las del sur, NE y Canarias.

Tabla 28. Tabla comparativa de  $\Delta$  ESC (%) entre CEDEX 2010 (SRES) y el presente estudio (RCP).

$\Delta$ ESC (%)	2010-2040				2040-2070				2070-2100			
	RCP 4.5	SRES B2	RCP 8.5	SRES A2	RCP 4.5	SRES B2	RCP 8.5	SRES A2	RCP 4.5	SRES B2	RCP 8.5	SRES A2
España	-3	-8	-7	-8	-11	-11	-14	-16	-13	-14	-24	-28
Miño-Sil	-3	-3	-6	-6	-11	-7	-11	-12	-10	-6	-19	-21
Galicia Costa	-3	-3	-6	-6	-11	-8	-11	-12	-10	-5	-19	-19
Cantábrico Oriental	-3	-10	-7	-12	-12	-16	-13	-16	-10	-20	-26	-30
Cantábrico Occidental	-2	-10	-6	-13	-10	-16	-12	-16	-10	-17	-23	-29
Duero	-3	-7	-9	-8	-13	-9	-15	-17	-14	-13	-25	-31
Tajo	-3	-8	-8	-8	-11	-9	-15	-19	-14	-15	-25	-35
Guadiana	-3	-9	-9	-12	-12	-11	-18	-27	-17	-20	-30	-42
Guadalquivir	-2	-13	-10	-11	-10	-12	-18	-28	-19	-24	-32	-43
C Med Andaluzas	-3	-16	-11	-12	-8	-15	-20	-30	-20	-27	-31	-41
Segura	-7	-13	-9	-10	-11	-14	-23	-21	-20	-21	-38	-33
Júcar	-4	-12	-11	-5	-12	-13	-24	-18	-21	-24	-36	-32
Ebro	-2	-9	-7	-9	-11	-13	-13	-14	-12	-16	-26	-28
CCII de Cataluña	6	-7	-4	0	-4	-9	-8	-4	-8	-16	-19	-21
Islas Baleares	-7	-15	-16	-4	-13	-20	-31	-15	-24	-23	-42	-31
Canarias	-6	-25	-14	-18	-10	-28	-25	-32	-26	-34	-34	-41



CEDEX

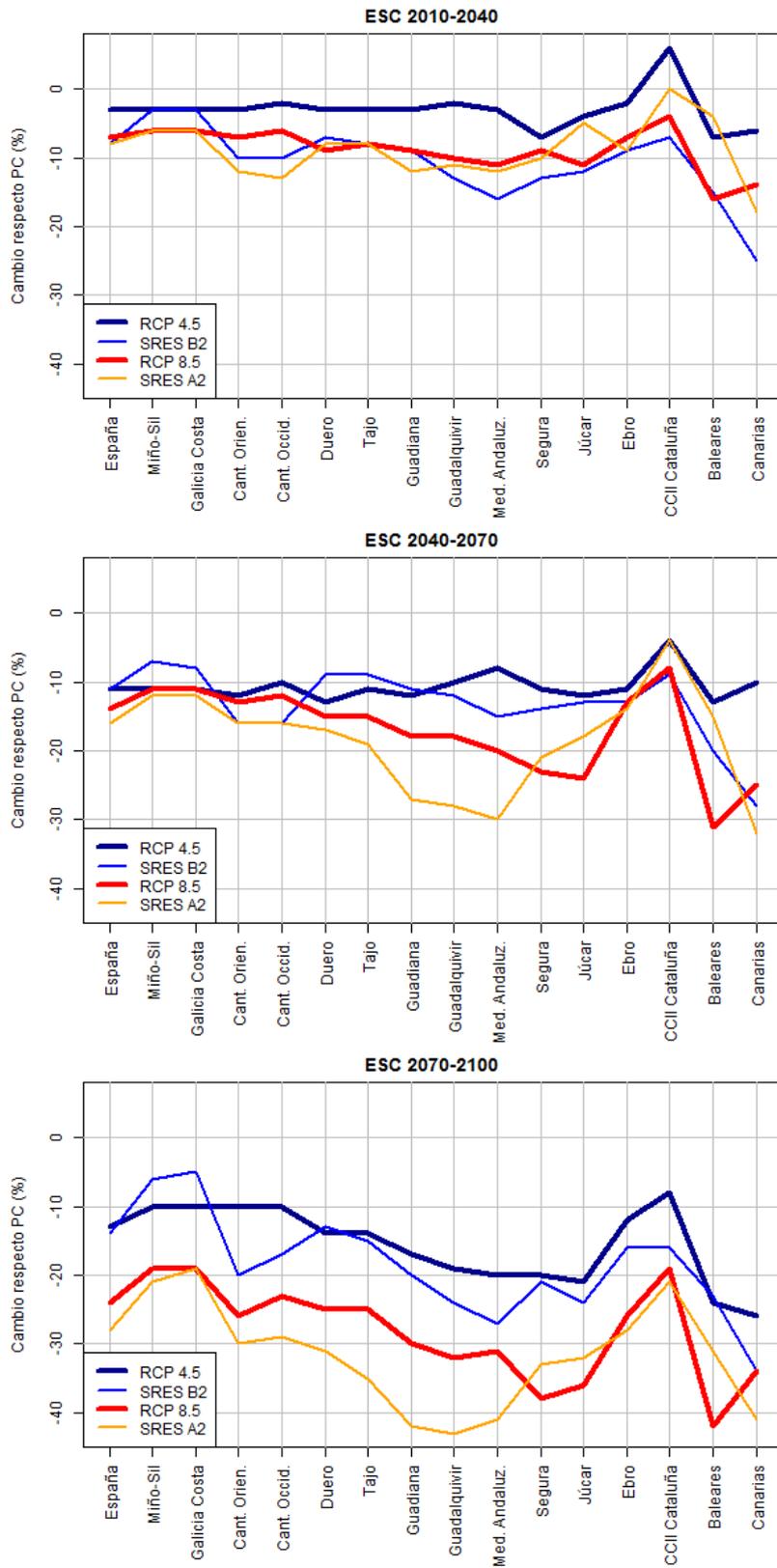


Figura 191. Comparativa de cambios de ESC entre CEDEX 2010 (SRES) y el presente estudio (RCP).



- La DH CCII de Cataluña destaca ahora entre los demás ámbitos por su reducido impacto, motivado por una escasa variación de ESC en la zona pirenaica (Figura 47 a Figura 52). Este hecho contrasta con la reducción acusada que hay en las Baleares, próxima a la anterior.

Tal como se ha visto a lo largo de este informe, las horquillas de variación de los resultados del estudio actual son mayores que los del anterior. Dicho de otro modo, la dispersión de los valores de impacto sobre los RRHH es mayor en el estudio actual. Esto se debe a que el estudio actual ha considerado proyecciones que recogen una mayor variabilidad climática; incluyendo en concreto algunas (UA) que da mayores aumentos de PRE.

En general, el estudio actual pronostica una reducción de RRHH más atenuada que el estudio anterior de 2010 y una mayor similitud de los cambios entre diferentes ámbitos territoriales.

### 8.3 INCERTIDUMBRES EN LOS RESULTADOS Y EN SU APLICACIÓN

Los resultados presentados en este informe están sujetos a las incertidumbres propias de los estudios de impacto del cambio climático, que derivan de que el clima es un sistema caótico no lineal que depende de un elevado número de factores, por lo que es muy difícil su simulación y más todavía su pronóstico. Las fuentes de incertidumbre están ligadas a los escenarios de emisiones de GEI, a los MCG, a los procesos de regionalización y a los modelos hidrológicos (Mitchell y Hulme, 1999). La incertidumbre se refleja en dos características de los resultados: el sesgo de las proyecciones climáticas y la disparidad de resultados de las proyecciones.

En este trabajo se ha evaluado el impacto tomando en consideración un conjunto de proyecciones climáticas lo más amplio y variado posible con el objetivo de recoger gran parte de la variabilidad de las hipótesis climáticas y reflejar la incertidumbre.

La comparación entre los valores climáticos de partida simulados para el PC y los valores climáticos observados para el PC ha revelado que hay un sesgo importante en la PRE simulada. La mayoría de las proyecciones sobrevalora la PRE en las DDHH del oeste peninsular y la infravaloran en las DDHH del este peninsular y en los archipiélagos. Este sesgo de la PRE simulada tiene unas importantes connotaciones en la evaluación de los RRHH. La influencia en los resultados de impacto es menor en las zonas donde se sobrestima la PRE ya que coincide con una mayor PRE y por lo tanto donde la relación entre la PRE y la ESC es más lineal. Por el contrario, el sesgo influye más en las zonas donde se infravalora la PRE y donde además hay una baja PRE, por lo que una hipotética reducción de PRE en los PI respecto al PC supondría una reducción más acusada de ESC, tanto más acusada cuanto más se infravalorara la PRE. Así pues, este sesgo añade más incertidumbre a los resultados de impacto obtenidos en las zonas del este peninsular y en los archipiélagos.

Los resultados de mayor aplicación de este estudio son las variaciones porcentuales de valores estadísticos medios de variables hidroclimáticas pronosticados para cada uno de los periodos futuros de 30 años (PI) con relación a un periodo de control de 39 años



(PC), tanto de valores anuales, mensuales o estacionales<sup>1</sup>. Estas variaciones se han calculado de manera distribuida para todo el territorio de España y de manera agregada para cada ámbito considerado (básicamente Demarcaciones Hidrográficas).

Las variaciones se han estimado para cada una de las 12 proyecciones. Es importante recalcar que el PC va desde octubre de 1961 a septiembre de 2000 y que sus valores medios corresponden a variables simuladas y nunca a variables observadas o registradas, por lo que los valores estadísticos medios para el PC difieren de una proyección climática a otra y con los observados. Esto implica que el valor anual corregido de una variable de RRHH (ej.: ESC) puede ser diferente del que se obtiene si se suman los valores estacionales corregidos por los porcentajes de cambio estacional. Lo mismo pasa al aplicar los porcentajes por zonas o por un conjunto de ellas. Esas diferencias son debidas al sesgo de las proyecciones climáticas, o diferencia entre los valores observados y los simulados por las proyecciones climáticas en el PC y son indicativas de su grado de fiabilidad. Por otra parte, el hecho de que una proyección simule bien los datos observados en el PC tampoco asegura que sea fiable, pero al menos no habría un argumento para invalidar la proyección. La corrección del sesgo por métodos habituales (ej.: método delta) soluciona esas diferencias pero es otra fuente de incertidumbres y da una falsa sensación de fiabilidad de los resultados, tal como se ha indicado en el apartado 5.2.5.

Un aspecto crítico es cómo aplicar estas variaciones porcentuales, o cómo trasladar esas variaciones a porcentajes correctores que tengan en cuenta el cambio climático en el futuro.

Lo más sencillo e intuitivo es aplicar esos porcentajes a los valores obtenidos en la simulación de RRHH que se basa en valores climáticos, físicos e hidrológicos observados (ej.: a las series de APN obtenidas de un modelo hidrológico de precipitación – aportación). De ese modo, se obtendrían unos RRHH corregidos por los porcentajes de cambio debido al CC.

No obstante, no es evidente la forma de tratar esas variaciones porcentuales debido al sesgo de los valores climáticos de las proyecciones de partida, a la incertidumbre de los resultados, a las diversas proyecciones y RCP estudiadas, a la variabilidad natural del clima y a la representatividad del PC y de los PI.

Primeramente hay que decidir cómo tratar el conjunto de proyecciones climáticas. Debido al sesgo de las proyecciones y a su incertidumbre, es conveniente tomar un valor que represente al conjunto de las mismas en vez del de una sola. A falta de métodos validados de ponderación, se considerará que las proyecciones son equiprobables<sup>2</sup>. En estos casos se suele utilizar la media aritmética para evaluar el

---

<sup>1</sup> Otros resultados son las tendencias de evolución anual, que indican las variaciones año a año de los valores anuales, mensuales o estacionales futuros (2010-2100) con relación a los valores estadísticos medios de las variables hidroclimáticas del PC.

<sup>2</sup> Se ha sugerido en algunos estudios ponderar los resultados en función del sesgo de la proyección. Las repercusiones que tiene la infravaloración de las PRE simuladas en el Levante podría sugerir dar más peso a aquellas proyecciones que mejor ajustan la PRE y menor a aquellas que tengan un fuerte sesgo, incluso rechazarlas.



impacto del conjunto de proyecciones, ya que es más sencillo utilizar un único valor y ya que está empíricamente demostrado que los errores sistemáticos procedentes de las fuentes de incertidumbre tienden a contrarrestarse cuando se promedian los resultados de un amplio conjunto de proyecciones.

Se puede tomar la media del RCP 4.5, del RCP 8.5 o de ambos. Debido a que el RCP 8.5 supone un cambio mayor que se traduce en una reducción mayor de RRHH en España, adoptar el promedio del RCP 8.5 implicaría apostar por el lado de la seguridad, pero podría suponer la realización de medidas más drásticas y costosas. Contrariamente, adoptar el promedio del RCP 4.5 implicaría aceptar un mayor riesgo pero se podrían ejecutar las medidas de adaptación y mitigación más fácilmente. Según el acuerdo de la cumbre de cambio climático de París de 2015, se indicaba que el RCP más probable sería el 6.0, intermedio entre los dos anteriores. Con objeto de simplificar y teniendo en cuenta la incertidumbre en los pronósticos futuros del cambio climático, otra opción sería aplicar la media de los resultados de ambos RCP, ya que el RCP 8.5 supondría cambios más drásticos que el RCP 6.0 y el RCP 4.5 menos.

Otro aspecto que surge habitualmente es la determinación de los horizontes futuros en los que evaluar el impacto del cambio climático. Habida cuenta de las incertidumbres y de que el tiempo meteorológico es cambiante, no tiene sentido evaluar el impacto para un año futuro concreto, sino para un periodo lo suficientemente largo para poder considerarse representativo. El clima es el conjunto de características meteorológicas de una zona. Por ello, la determinación del clima precisa conocer la variación meteorológica durante un periodo suficientemente dilatado, no inferior a 30 años, tal como indica la Organización Meteorológica Mundial (Trewin 2007). La adopción de un periodo de control lo más amplio posible se fundamenta en el hecho de que el clima tiene una alta variabilidad natural. Esta variabilidad significa que un año concreto puede ser inusualmente cálido o frío, o seco o húmedo, y por lo tanto no sería un punto de referencia para medir el clima. De ese modo, la evaluación del impacto de cambio climático para un horizonte futuro no significa tomar los resultados para un año concreto sino los de un periodo amplio de un mínimo de 30 años centrado en ese año u horizonte concreto. Utilizar las medias estadísticas de periodos es lo más sencillo y habitual (California Department of Water Resources 2010, Seattle Public Utilities 2013).

Derivado del sesgo de los valores climáticos de partida surge la duda sobre la representatividad del PC. Para este estudio, el PC se ha establecido en los 39 años hidrológicos que van de 1961 a 2000 intentando abarcar el mayor periodo posible para los que hay valores de las proyecciones climáticas puestas a disposición pública por AEMET. Los porcentajes de cambio se refieren a cambios sobre ese PC. No obstante, las características climáticas de las proyecciones en ese PC difieren considerablemente, sobre todo en el caso de la PRE, de las características climáticas observadas. En particular, las proyecciones no recogen las tendencias negativas de la PRE observada en dicho periodo ni tampoco los ciclos secos-húmedos. La cuestión radica en qué significa el PC de los valores proyectados, si los valores climáticos proyectados para el periodo 1961-2000 representan los valores climáticos observados en dicho periodo o más bien representan la situación "actual", el clima actual. No hay criterios para pensar que los porcentajes de cambio hubieran sido sustancialmente diferentes si el PC en vez de 1961-2000 hubiera sido 1961-1990 o 1951-2000 por



ejemplo, ya que dependería de que las series climáticas simuladas recogieran o no la tendencia negativa de las series observadas, básicamente de PRE.

Ello está relacionado con el origen de las tendencias negativas en las series observadas, especialmente si el descenso de PRE o ESC de las últimas décadas está relacionado o no con el cambio climático. Suponer una u otra hipótesis conllevaría diferentes maneras de aplicar los resultados de impacto y por lo tanto tendría implicaciones en la estimación de los valores futuros.

#### 8.4 APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS EN LA PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA

Uno de los campos fundamentales en los que se aplican los resultados de evaluaciones de impacto del cambio climático en los RRHH es la planificación hidrológica. Si bien el conjunto de las variables del ciclo hidrológico caracterizan los RRHH de una zona, son las variables ESC y APN las que mejor los definen y tienen mayor utilidad práctica.

Según la normativa actual, los planes hidrológicos de cuenca se han de hacer cada 6 años. Los siguientes han de aprobarse en 2021 y deberán considerar dos horizontes temporales futuros: 2027 y 2039. La Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH) (MARM 2008) establece que en el análisis del horizonte temporal a largo plazo, correspondiente en los próximos planes al año 2039, debe tenerse en cuenta el posible efecto del cambio climático sobre los RRHH naturales de la DH.

La IPH establece además que las series de RRHH que se deben utilizar en la elaboración de los planes hidrológicos son la serie larga de observaciones del periodo histórico (1940-2006<sup>1</sup>) y la serie corta del periodo histórico (1980-2006). El motivo de esta circunstancia es la tendencia negativa que experimentan los RRHH de la serie larga, por lo que son mayores que los de la serie corta.

Por otro lado, el impacto evaluado en este estudio se ha expresado como cambios de propiedades estadísticas medias de periodos futuros de 30 años con relación a un PC de 39 años. Habida cuenta de los valores disponibles, se tomaron los periodos futuros de impacto 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100.

En el anterior informe del CEDEX (2010) se equiparó la situación climática del PC de los valores de las proyecciones con la de los datos observados. Por ello, se dieron porcentajes de cambio para cada DH según la relación existente entre los RRHH evaluados con datos observados del PC y la serie de RRHH utilizada para los planes hidrológicos de cuenca. Así por ejemplo, un porcentaje de cambio del -8% en ESC para España según SRES B2 para el periodo 2011-2040 respecto al PC 1961-1990, suponía aplicar un cambio del -5% a los RRHH de 1940-2006 (Tabla 29). Esta menor reducción, -5% frente al -8%, se debe a que el periodo 1961-1990 es ligeramente más húmedo que el 1940-2006.

---

<sup>1</sup> Tal como ya se ha comentado anteriormente, los periodos temporales considerados en este estudio corresponden a años hidrológicos y se indican con el primer y último año natural, por lo que 1940-2006 sería 1940/41-2005/06.

Tabla 29. Porcentaje de cambio para considerar el efecto del cambio climático según la IPH (horizonte 2027), CEDEX 2010 y el presente informe (2010-2040 en relación a 1940-2006).

DDHH - Ámbito <sup>1</sup>	IPH-LBAE	CEDEX 2010		Presente Informe	
		SRESB2	SRESA2	RCP 4.5	RCP 8.5
España	-5	-5	-6	-3	-7
Miño-Sil	-3	-2	-5	-4	-7
Galicia Costa	-2	-4	-7	-4	-7
Cantábrico Oriental	-2	-9	-11	-4	-8
Cantábrico Occidental	-2	-8	-11	-2	-6
Duero	-6	-5	-7	-5	-10
Tajo	-7	-7	-7	-5	-10
Guadiana	-11	-2	-6	1	-5
Guadalquivir	-8	-8	-6	0	-7
Cuencas Mediterráneas Andaluzas	-7	-7	-4	1	-7
Guadalete y Barbate				3	-4
Tinto, Odiel y Piedras				3	-7
Segura	-11	-8	-5	-8	-11
Júcar	-9	-12	-3	-8	-15
Ebro	-5	-5	-5	-1	-5
Cuencas Internas de Cataluña	-5	-7	0	7	-3
Islas Baleares	-7	-34	-25	-29	-36
Canarias	-10	-28	-20	-12	-20

Al aplicar el mismo procedimiento a los resultados de este informe, se obtendrían los porcentajes de cambio para el periodo 2010-2040 que figuran en las dos últimas columnas de la Tabla 29. Los resultados se diferencian de los que aparecen en la Tabla 23 y Tabla 24 en función de la diferencia de ESC de los datos observados en el periodo 1961-2000 y en el 1940-2006<sup>2</sup>. El periodo 1961-2000 tiene una ESC similar a la del 1940-2006 para el conjunto de España, un poco mayor en las cuencas del Guadiana y de Andalucía y un poco menor en el SE y Canarias. Sorprende Baleares, ya que el periodo 1961-2000 es un 24% más seco que el 1940-2006, lo que unido a las previsiones desfavorables de impacto para el PC da unos porcentajes de cambio muy drásticos, como también ocurría en CEDEX 2010. Hay que tomar con mucha precaución estos porcentajes de cambio en Baleares y Canarias ya que la escasez de datos sobre series de PRE y de caudales en los archipiélagos durante los primeros

<sup>1</sup> Las actuales DDHH de las CC. Mediterráneas Andaluzas, Guadalete y Barbate y Tinto, Odiel y Piedras estaban juntas en la DH de las CC.II. de Andalucía en CEDEX 2010.

<sup>2</sup> Hay que indicar que con ese procedimiento se obtienen los mismos resultados para un periodo futuro (ej. 2010-2040) si se aplican los porcentajes de cambio sobre las series del periodo largo o sobre las del periodo corto (o las de cualquier otro). Eso es debido a que dichos porcentajes incluyen ya la relación entre las ESC observadas del periodo de control con la del periodo corto o largo.



años de la década de 1940 y los bajos caudales de agua superficial arrojan mucha incertidumbre en los resultados de la interpolación e imposibilitan una fiable calibración de los caudales simulados.

Por otro lado, en el estudio actual destacan las menores reducciones estimadas para las DDHH cantábricas según los dos RCP, para las DDHH de Andalucía según el RCP 4.5 y para la DH de las CCII de Cataluña también según RCP 4.5. En el lado contrario, en el estudio actual se dan reducciones para el RCP 8.5 algo mayores para el Duero y Tajo y, sobre todo, destacan las fuertes reducciones para el Segura y Júcar para el RCP 8.5. Hay que tener en cuenta que en el estudio actual, los porcentajes de cambio para el RCP 8.5 indican reducciones de ESC mayores que para el RCP 4.5, tal como era previsible según las emisiones de GEI asociadas a ambos RCP. Sin embargo, no ocurre lo mismo con los SRES ya que hay reducciones mayores estimadas para el SRES B2 que para el A2 en varias DDHH del sur y este de España.

En la Tabla 29 aparecen también los porcentajes dados en el LBAE para el año 2030 y el escenario 1 (aumento de 1°C en la temperatura media anual), que fueron luego adoptados en la IPH para considerar el efecto del cambio climático en el horizonte de planificación 2027 en las cuencas intercomunitarias.

Como se ha dicho antes, los próximos planes hidrológicos de cuenca que se aprueben para el 2021 deberán tener en cuenta el cambio climático para calcular los RRHH en el horizonte de planificación a largo plazo, del año 2039. Por lo tanto, se considera que lo más adecuado y sencillo es que se adopten los porcentajes intermedios que resultan para el periodo PI1 (2010-2040) y el periodo PI2 (2040-2070), puesto que el año 2039 está prácticamente en la frontera entre ambos. La incorporación del efecto del cambio climático supone aplicar a las series de ESC 1940-2006 (periodo indicado en la IPH) los porcentajes que se muestran en la Tabla 30 (media de los cambios del PI1 y PI2).

Tabla 30. Porcentaje de cambio a aplicar a las series de ESC 1940-2006 para considerar el efecto del cambio climático en el horizonte 2039.

Cambios para 2039 vs. 1940-2006	RCP 4.5	RCP 8.5
España	-7	-11
Miño-Sil	-8	-10
Galicia Costa	-9	-10
Cantábrico Oriental	-8	-11
Cantábrico Occidental	-6	-9
Duero	-9	-13
Tajo	-9	-13
Guadiana	-3	-10
Guadalquivir	-4	-12
Cuencas Mediterráneas Andaluzas	-1	-11
Guadalete y Barbate	0	-9
Tinto, Odiel y Piedras	-1	-11
Segura	-11	-18
Júcar	-12	-21
Ebro	-5	-9
Cuencas Internas de Cataluña	2	-5



Los porcentajes de cambio de series anuales de una DH se pueden aplicar a todas las series de la DH, simplificando su uso al considerar la incertidumbre inherente a los estudios de cambio climático. No obstante, podría ser conveniente aplicar diferentes porcentajes cuando haya diferencias relevantes en los cambios estimados en diferentes zonas dentro de una DH, tal como plantean Marcos-García y Pulido-Velázquez (2017) en la DH del Júcar, donde la reducción de RRHH pronosticada sería mayor en cabecera que en las subcuencas mediterráneas. La aplicación informática que acompaña a este informe posibilita la obtención de porcentajes de cambio para aquellas zonas que determine el usuario, de manera que se pueden aplicar los resultados de este estudio también a otras subzonas dentro del ámbito territorial de una DH.



**CEDEX**



## 9 IMPACTO EN EL RÉGIMEN DE SEQUÍAS

### 9.1 METODOLOGÍA

El impacto se ha reflejado como cambio en el periodo de retorno de las sequías en cada uno de los PI con respecto al PC. Para evaluar el periodo de retorno de las sequías se ha seguido la metodología propuesta por Salas et al (2005), de la universidad de Colorado (USA), a partir de estudios previos de Fernández y Salas (1999a, 1999b) y de Shiau y Shen (2001) que desarrollan la teoría de rachas propuesta por Yevjevich (1967). Esta es la metodología aplicada en los últimos años en los estudios sobre sequías llevados a cabo en el CEH (CEDEX 2010, Álvarez-Rodríguez et al. 2015).

A continuación se explican los 5 pasos seguidos. Esta metodología se ha llevado a cabo básicamente mediante programación en el lenguaje R-stats.

El primer paso ha sido la obtención de la serie de ESC mensuales para cada ámbito geográfico, cada proyección y cada periodo. Los ámbitos son el conjunto de España y cada una de las DDHH (Canarias se han agrupado en una y Ceuta y Melilla se han integrado en las Cuencas Mediterráneas Andaluzas). La serie mensual se ha obtenido promediando los valores obtenidos por la simulación hidrológica en cada celda del ámbito geográfico y en cada mes del periodo de análisis. En total se han obtenido 864 series mensuales; 48 por cada ámbito geográfico, correspondientes a 12 proyecciones por 4 periodos (el PC de 468 meses y los 3 PI de 360 meses).

El segundo paso ha sido la generación de series sintéticas siguiendo la metodología de Box-Jenkins (Box et al. 1994). Debido a que las series mensuales son de apenas 30 o 39 años (360 o 468 meses), se ha procedido a generar series sintéticas de 6000000 meses que conserven sus propiedades estadísticas aplicando el modelo ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average). Se han utilizado series mensuales en vez de series anuales en este modelo por la conveniencia de disponer de series lo más largas posibles que extiendan la autocorrelación. Previamente, se ha procedido a estacionarizar cada serie, filtrando para ello la componente estacional, el sesgo (y anular la heterocedasticidad) y la tendencia de cada serie mensual. Luego se ha procedido a estimar los órdenes de los modelos autorregresivo y de media móvil y los parámetros a partir de las series mensuales. Para ello se ha utilizado la función *auto.arima* del paquete *forecast* de R-Stats (Hyndmann y Khandakar 2008), que elige de manera automática los órdenes autorregresivo y de media móvil y los parámetros. En aquellos casos en los que la función *auto.arima* daba resultados sospechosos, se reevaluó el proceso de manera individual y se reasignaron los órdenes del modelo. Para ello, se utilizó la función *arima* y se asignaron los órdenes a partir de los gráficos de autocorrelación y de autocorrelación parcial de la serie objeto de reanálisis. Posteriormente se ha generado la serie sintética con la función *arima.sim* del paquete *stats* de R-Stats. Finalmente, se ha recuperado el sesgo y la componente estacional.

El tercer paso es la identificación de sequías. A partir de la serie mensual se ha elaborado una serie anual de 500000 valores. La identificación de sequías se realiza a partir de las series anuales en vez de las mensuales por el carácter plurianual de las sequías y para trabajar con la información más relevante. De ese modo, se dispone de

una serie de ESC sintéticas para cada ámbito, cada periodo y cada proyección. Sobre cada serie de 50000 años se han identificado las sequías como las rachas de años seguidos cuyo valor de ESC es inferior al umbral elegido. Se ha elegido como umbral la mediana de los valores de ESC de la serie sintética de cada periodo, de cada ámbito y proyección (Figura 192). Por lo tanto, el umbral de sequía es distinto en cada periodo y por ello, lo que se analiza es el impacto en el régimen de sequías; en su distribución de frecuencias.

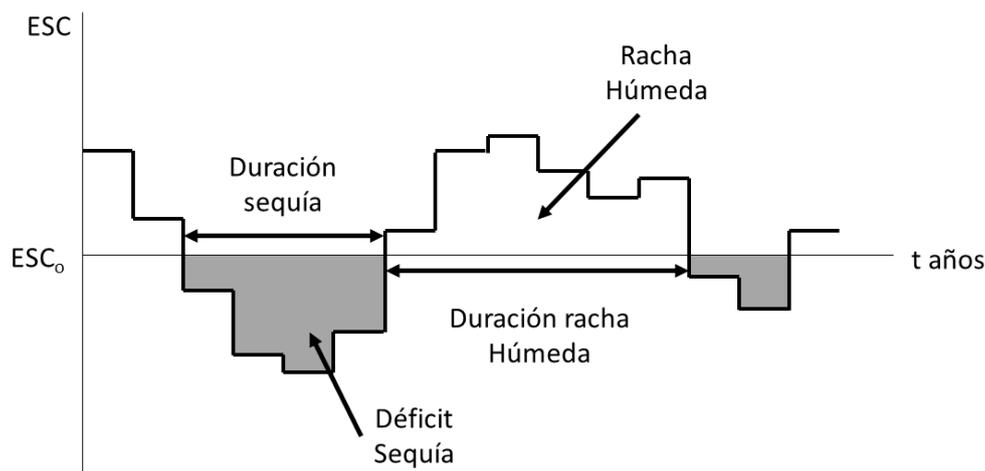


Figura 192. Concepto y definición de racha de sequías ( $ESC_0 = \text{umbral}$ ).

El cuarto paso es el ajuste de la función de distribución de probabilidad a las series de sequías. Las sequías tienen dos características de interés: la duración y el déficit. La duración se expresa en años y el déficit es la suma de los déficits de cada año de la sequía, entendido el déficit de cada año como la diferencia entre el umbral (mediana) y la ESC de ese año. Se utiliza el déficit medio, obtenido como el déficit dividido entre el número de años de la sequía. La función de distribución de densidad bivariada ( $f_{D,L}(d,l)$ ) de duración  $L$  y déficit acumulado de sequía  $D$  puede expresarse como el producto de la distribución condicionada del déficit de  $D$  de una duración dada ( $f_{D,L}(d)$ ) por la distribución marginal de la duración de la sequía  $L$  ( $f_L(l)$ ) (Ecuación 12).

Ecuación 12

$$f_{D,L}(d,l) = f_{D|L}(d)f_L(l)$$

La duración es una variable discreta y se asume que sigue una distribución geométrica. Por otro lado, el déficit es una variable continua y se asume que sigue una distribución gamma. Mediante integración de la función de densidad se obtiene la función de distribución que permite obtener la probabilidad acumulada para una sequía de cualquier déficit ( $D > D_0$ ) y una duración dada ( $L = L_0$ ) (Ecuación 13).

Ecuación 13

$$F_{D,L}(d,l) = P[D > D_0, L = L_0]$$

Primeramente, las sequías se han agrupado en categorías según la duración en años. Se han elegido 5 categorías para duraciones de 1, 2, 3, 4 y 5 años. Así, cada categoría consiste en una serie de valores de déficit para sequías de una duración dada. A cada categoría se le ajusta la misma distribución gamma. Los parámetros de la distribución gamma se obtienen aplicando el método de máxima verosimilitud a la serie de cada categoría.

Después se calcula la probabilidad de obtener las sequías de cada categoría. Para ello, se ajusta la distribución geométrica a la serie de 0 y 1 que determinan la existencia o no de años de sequía y se calcula la probabilidad para sequías de una categoría o duración dada. El parámetro de la distribución geométrica de cada periodo es 0.5 (el umbral es la mediana de cada periodo).

A continuación se eligen unos valores de déficit y, para cada valor de déficit y de duración se obtiene la probabilidad acumulada, multiplicando la probabilidad de esa duración (aplicando la distribución geométrica) por la probabilidad de un déficit mayor que el dado (aplicando la distribución gamma).

Finalmente, se calcula el periodo de retorno en años ( $T$ ). La dificultad radica en obtener la probabilidad anual de una sequía de  $n$  años. Por ello, Salas et al. (2005) proponen que  $T$  sea la media de los tiempos interarribo, medidos como el tiempo entre el inicio de cada sequía. Considerando que el tiempo medio de interarribo es la multiplicación del número medio de sequías de cualquier déficit por la media de su tiempo interarribo, se llega a la siguiente fórmula (Ecuación 14):

Ecuación 14

$$T = \frac{p_{01} + p_{10}}{p_{01}p_{10}P(D > D_0, L = L_0)}$$

siendo  $p_{01}$  la probabilidad de que ocurra un año húmedo tras uno seco y  $p_{10}$  la probabilidad de que ocurra un año seco tras uno húmedo

Debido a que las series sintéticas se han generado con un proceso ARIMA, se puede considerar además que la distribución anual de sequías sigue un proceso de Bernoulli. De ese modo, la probabilidad de que a un año de sequía le siga un año húmedo ( $p_{01}$ ) es igual a la probabilidad de tener un año húmedo y la probabilidad de que a un año húmedo le siga un año seco ( $p_{10}$ ) es igual a la probabilidad de tener un año seco, por lo que  $p_{01} + p_{10} = 1$ , y quedaría (Ecuación 15):

Ecuación 15

$$T = \frac{1}{p_1 p_0 P(D > D_0, L = L_0)}$$

siendo  $p_1$  y  $p_0$  las probabilidades de tener un año húmedo y seco respectivamente

El quinto paso es la representación gráfica de la peligrosidad de sequías. Cada gráfico se refiere a sequías de una duración dada. En el informe se han incluido los gráficos para sequías de duración 2 y 5 años, proyección y ámbito. En abscisas se indica el déficit acumulado medio y en ordenadas el periodo de retorno en años. Se han representado las curvas para cada el PC y cada PI. El impacto del cambio climático en



el régimen de sequías se obtiene de la comparación de las curvas de cada PI con relación a la curva del PC. Hay que tener en cuenta que, en este estudio, las sequías están definidas con respecto a la mediana de cada periodo, lo que implica que los gráficos indican cambios en el régimen de sequías, en su distribución estadística.

## 9.2 RESULTADOS

En la Figura 193 y Figura 194 se muestran los gráficos sobre los cambios en la frecuencia de sequías de 2 y 5 años para el conjunto de España según las distintas proyecciones y RCP. Como era previsible, los  $T$  para un déficit mínimo dado son superiores para una sequía de 5 años que para una de 2 años, puesto que es más improbable una sequía larga con un déficit medio anual que una sequía corta con ese mismo déficit medio anual.

Se pronostica que, en general, las sequías en España se hagan más frecuentes conforme avanza el siglo XXI. Así, para el RCP 4.5, las sequías de 2 años de duración serán más frecuentes (menor  $T$  para un mismo déficit) en el PI3 (cuatro proyecciones) y PI2 (dos proyecciones) y menos frecuentes en el PC (tres proyecciones) y PI1 (tres proyecciones). Lo mismo ocurre con las sequías de 5 años de duración, si bien éstas tienen un mayor  $T$  para el mismo déficit medio anual que las de 2 años.

De manera semejante, para el RCP 8.5, las proyecciones F8A, M8A, Q8A y U8A disminuyen el  $T$  para el mismo déficit en los PI respecto al PC y además es menor el  $T$  para los PI más lejanos (la curva azul del PC está por arriba y la roja por debajo). La proyección N8A no muestra apenas cambios. La proyección R8A da los mayores  $T$  para el PI1 y los menores para el PI2 mientras que no hay cambios destacables entre el PC y PI3. Se observa cómo las proyecciones NA apenas pronostican un cambio en la frecuencia de sequías en ninguno de los periodos futuros.

La diferencia entre ambos RCP no está marcada ni es del mismo signo en todas las proyecciones. Así por ejemplo, la proyección U8A da sequías más frecuentes que U4A, mientras que N8A da sequías menos frecuentes que N4A. Las diferencias son más confusas en el resto de proyecciones.

En el anexo 4 se han puesto los gráficos de cambio en el régimen de las sequías en los diferentes ámbitos de las DDHH. En las figuras siguientes se muestran los gráficos de ámbitos representativos de los climas españoles: Galicia-Costa, Tajo, Guadalquivir, Segura, Ebro y CCII de Cataluña (Figura 195 a Figura 206).

Al igual que se veía para el conjunto de España, en las DDHH del norte y en concreto en la DH de Galicia-Costa, la mayoría de las proyecciones pronostican un aumento de la frecuencia de sequías cuánto más nos alejamos en el tiempo. Para el RCP 4.5 (Figura 195), la mayoría de las proyecciones dan los mayores  $T$  para el PC y los menores para el PI3 o PI2. La excepción la constituye la proyección U4A, con una alta frecuencia de sequías en el PC, tanto de 2 como de 5 años de duración. Un patrón similar de cambios se observa para el RCP 8.5 (Figura 196), con la salvedad de que la proyección U8A ya no da el PC como el periodo con más frecuencias de sequías. Al igual que ocurría para el conjunto de España, la diferencia entre ambos RCP no está marcada ni es del mismo signo en todas las proyecciones. Así, las sequías del PI3 son más frecuentes en el RCP 8.5 que en el RCP 4.5 según QA o UA, pero menos según FA, MA o RA, o las del PI2 son menos frecuentes según N8A que según N4A.



Las DDHH del Duero, Tajo y Guadiana dan resultados similares. Las curvas para el Tajo están mucho más tendidas que las del norte, lo que indica un régimen más propenso a sequías (Figura 197 y Figura 198). Una sequía de 2 años de duración y un déficit mayor del 40% anual tiene un  $T$  de unos 100 años para el PC en la DH del Tajo, mientras que es de unos 1000 años en Galicia-Costa. La DH del Tajo sigue la tónica general: casi todas las proyecciones muestran un mayor  $T$  en el PC y el menor en el PI3. La excepción más clara la da N4A, que da un alto  $T$  en el PI3. Con relación a las diferencias entre ambos RCP, todas las proyecciones auguran un futuro con sequías más frecuentes según el RCP 8.5.

La DH del Guadalquivir es representativa de las DDHH del sur de la Península. Las curvas para el Guadalquivir están todavía más tendidas que las del Tajo, indicando mayor frecuencia de sequías (Figura 199 y Figura 200). De hecho, el  $T=100$  años subiría su cuantil a un déficit de aproximadamente el 50% para el PC. Las sequías siguen los cambios generales en casi todos los casos, con aumento de su frecuencia conforme avanza el siglo XXI, con excepciones como las de las proyecciones NA que muestran pocos cambios o son menos claros, o las de las proyecciones RA que dan un descenso de la frecuencia de sequías en el PI1 respecto al PC para sequías de 2 y 5 años y en ambos RCP. Los cambios son más patentes con las sequías de 5 años. Las sequías son más frecuentes según el RCP 8.5 que el RCP 4.5, lo cual es más notorio durante el PI3. La excepción son las proyecciones RA, que dan una ligera mayor frecuencia a las sequías del RCP 4.5.

Las curvas para el SE de España, en concreto para la DH del Segura, están menos tendidas que las del Guadalquivir y más o menos como las del Tajo; el  $T=100$  años correspondería a un déficit de aproximadamente el 35% para el PC (Figura 201 y Figura 202). Casi todas las proyecciones siguen la tónica general de una mayor frecuencia de sequías conforme avanza el siglo XXI. Hay excepciones, como los escasos cambios según RA o NA o la baja frecuencia para las sequías en el PI3 según las proyecciones QA. Apenas hay ligeras diferencias entre ambos RCP, ya que tan solo se aprecia un aumento de la frecuencia de sequías de 5 años en algunas proyecciones para el PI2 y PI3.

La DH del Ebro presenta características similares a las del norte de España, con sequías menos frecuentes que en el resto de ámbitos (Figura 203 y Figura 204). Así, una sequía de dos años de duración con un déficit anual mínimo del 20% en el PC tendría un periodo de retorno  $T$  de unos 100 años aproximadamente. La mayoría de proyecciones pronostica un aumento de la frecuencia de sequías conforme avanza el siglo, pero hay bastantes discrepancias. Entre ellas destacan los contrarios cambios según U4A o los escasos cambios según R4A. Algo similar ocurre para el RCP 8.5, con escasos o contrarios cambios según N8A, R8A o U8A. No se aprecian diferencias consistentes entre ambos RCP, ya que unas proyecciones dan un ligero aumento de la frecuencia de sequías para el RCP 8.5 con relación al RCP 4.5 (QA y UA) y otras al revés (MA y NA).

Las CCII de Cataluña es la DH en la que se estima una menor reducción de RRHH (Figura 205 y Figura 206). Incluso se estima un aumento para el PI1 y RCP 4.5. La frecuencia de sequías es bastante similar a la de la DH del Segura. Hay bastantes discrepancias entre proyecciones ya que no se muestra tan clara la tendencia a



**CEDEX**

aumentar las sequías conforme avanza el siglo XXI. Tan sólo las proyecciones NA y MA muestran dicha tendencia, mientras que RA y UA muestran comportamientos opuestos. Tampoco se observa que la frecuencia de sequías aumente en el RCP 8.5 con relación al RCP 4.5, sino más bien al contrario. Baleares muestra resultados similares a los de las CCII de Cataluña, con discrepancias entre proyecciones, donde es difícil interpretar un patrón común de cambio en el régimen de sequías.

Los resultados en Canarias reflejan la alta incertidumbre de analizar series de ESC tan bajas ya que las proyecciones dan resultados poco definidos.

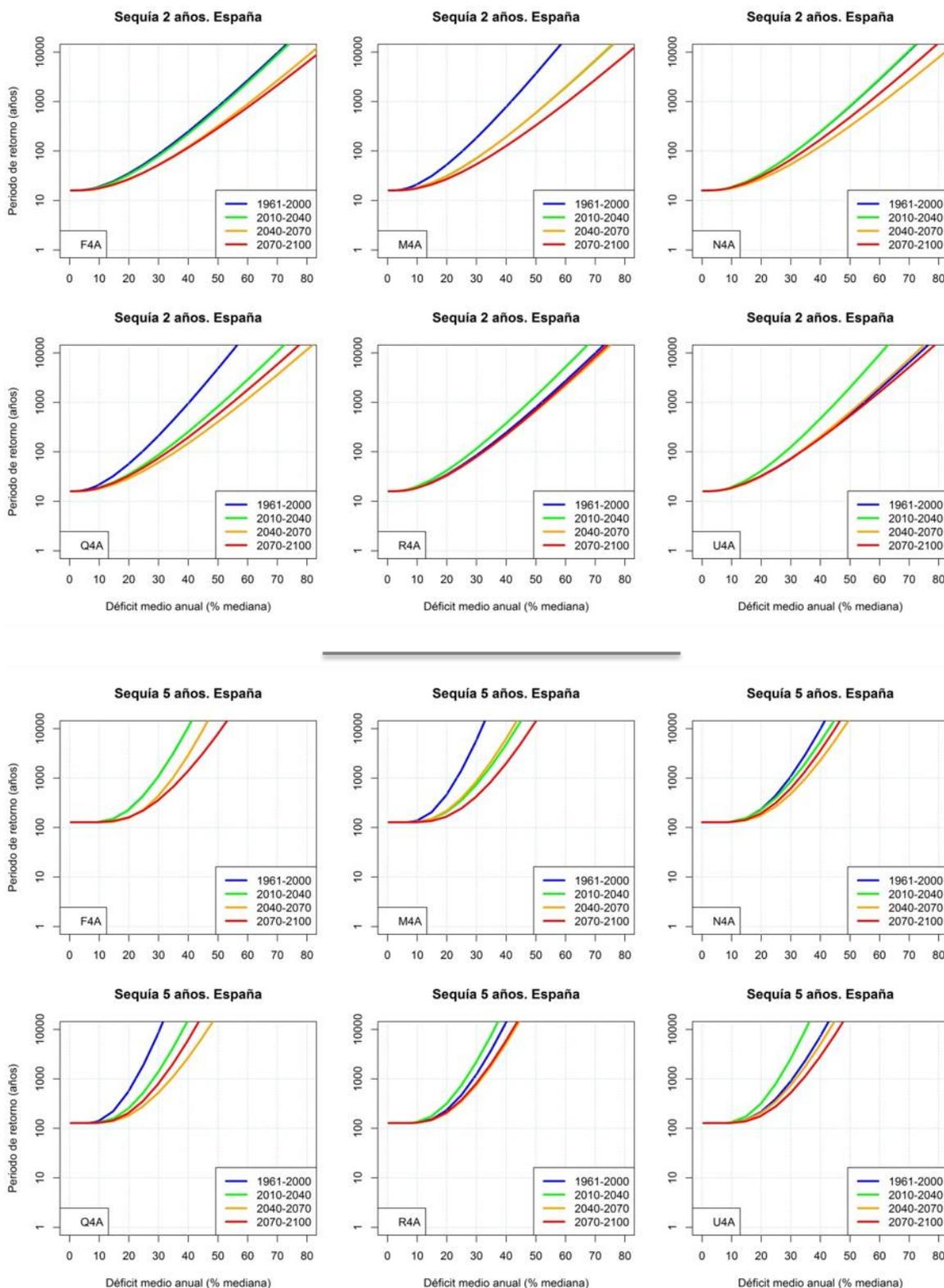


Figura 193. Periodo de retorno de sequías en España para diferentes déficits medios anuales y duración 2 años (arriba) y 5 años (debajo) para el PC y los tres PI según cada una de las proyecciones RCP 4.5.

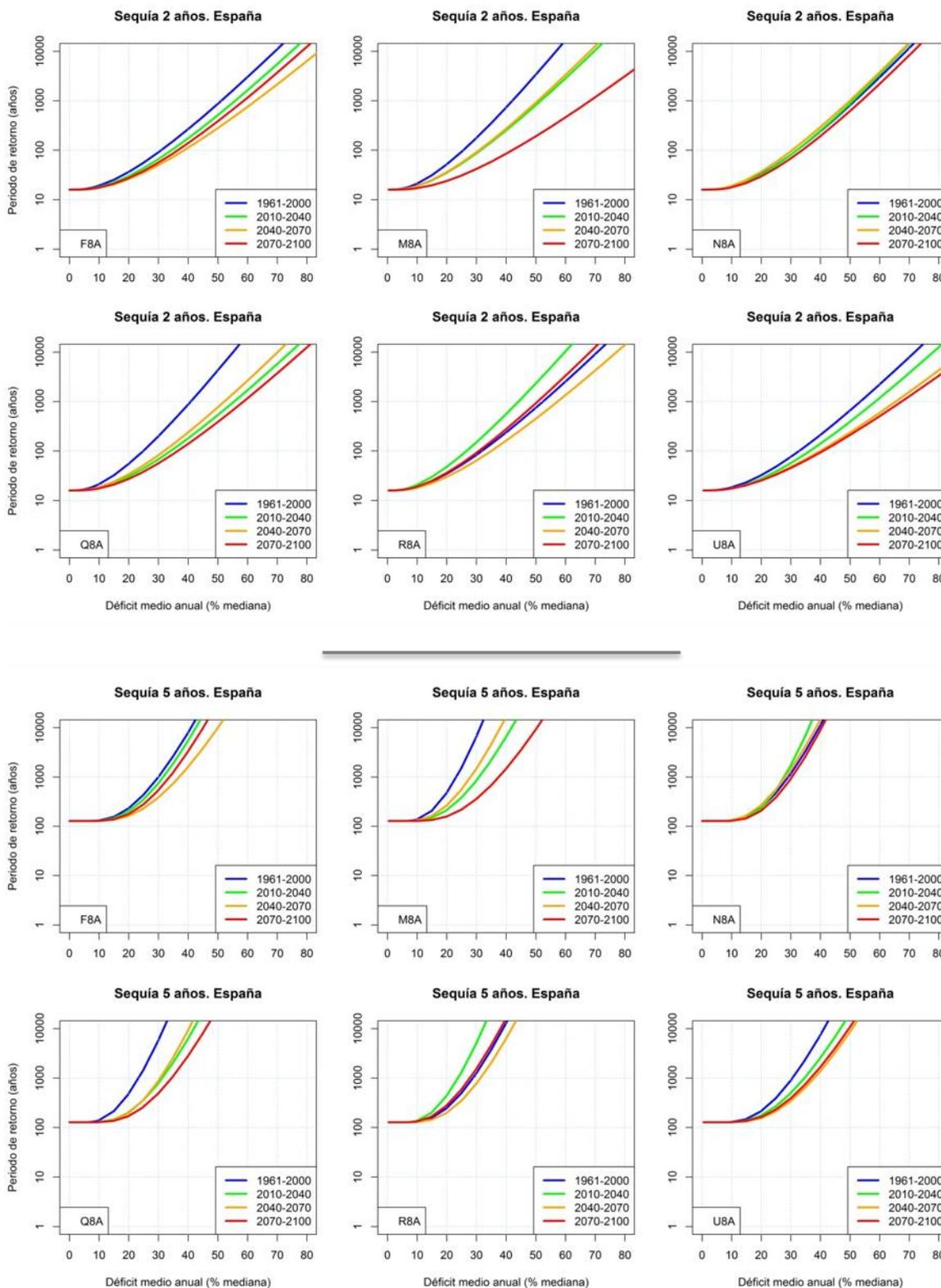


Figura 194. Periodo de retorno de sequías en España para diferentes déficits medios anuales y duración 2 años (arriba) y 5 años (debajo) para el PC y los tres PI según cada una de las proyecciones RCP 8.5.

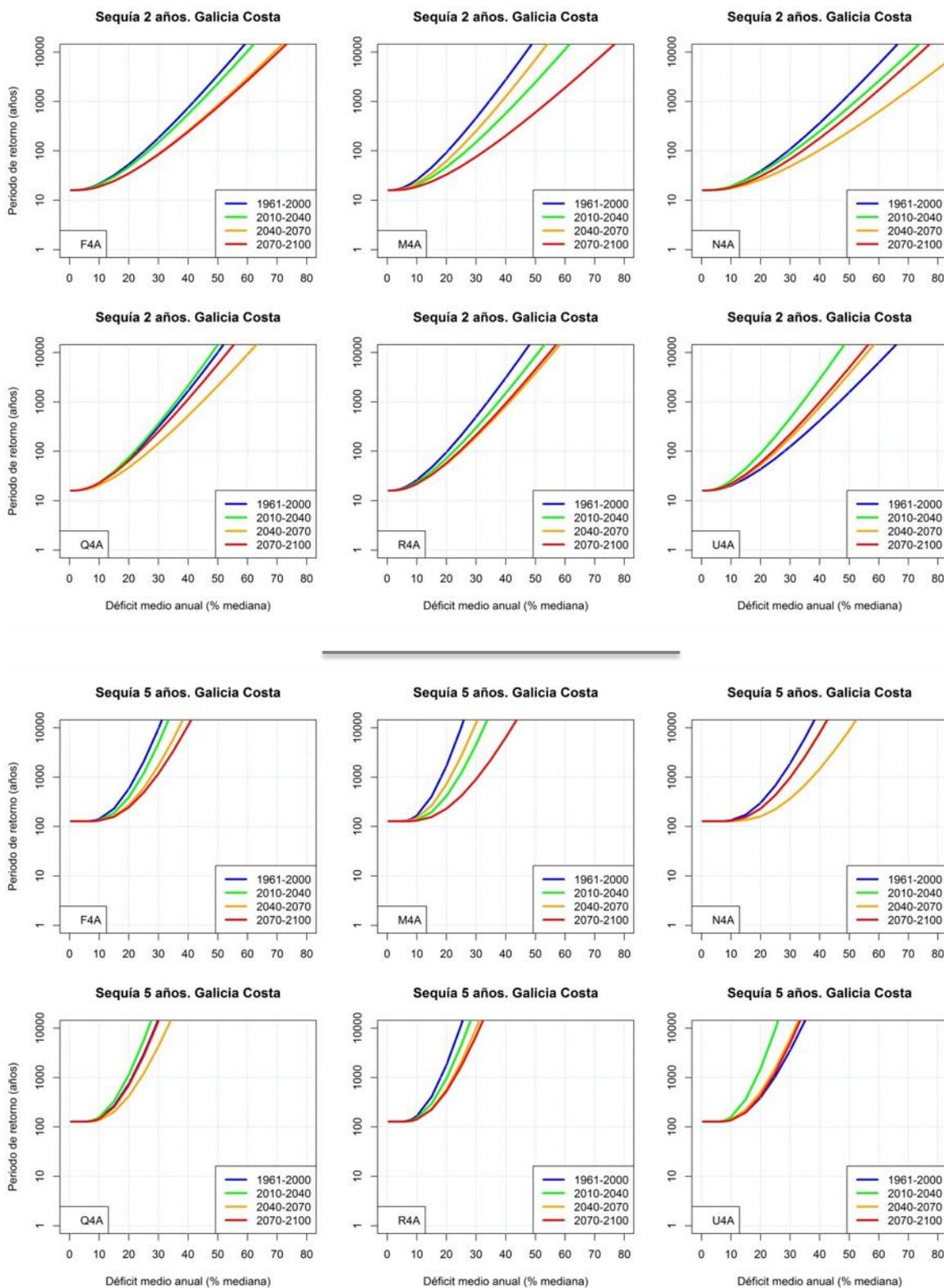


Figura 195. Período de retorno de sequías en Galicia Costa para diferentes déficits medios anuales y duración 2 años (arriba) y 5 años (debajo) para el PC y los tres PI según cada una de las proyecciones RCP 4.5.

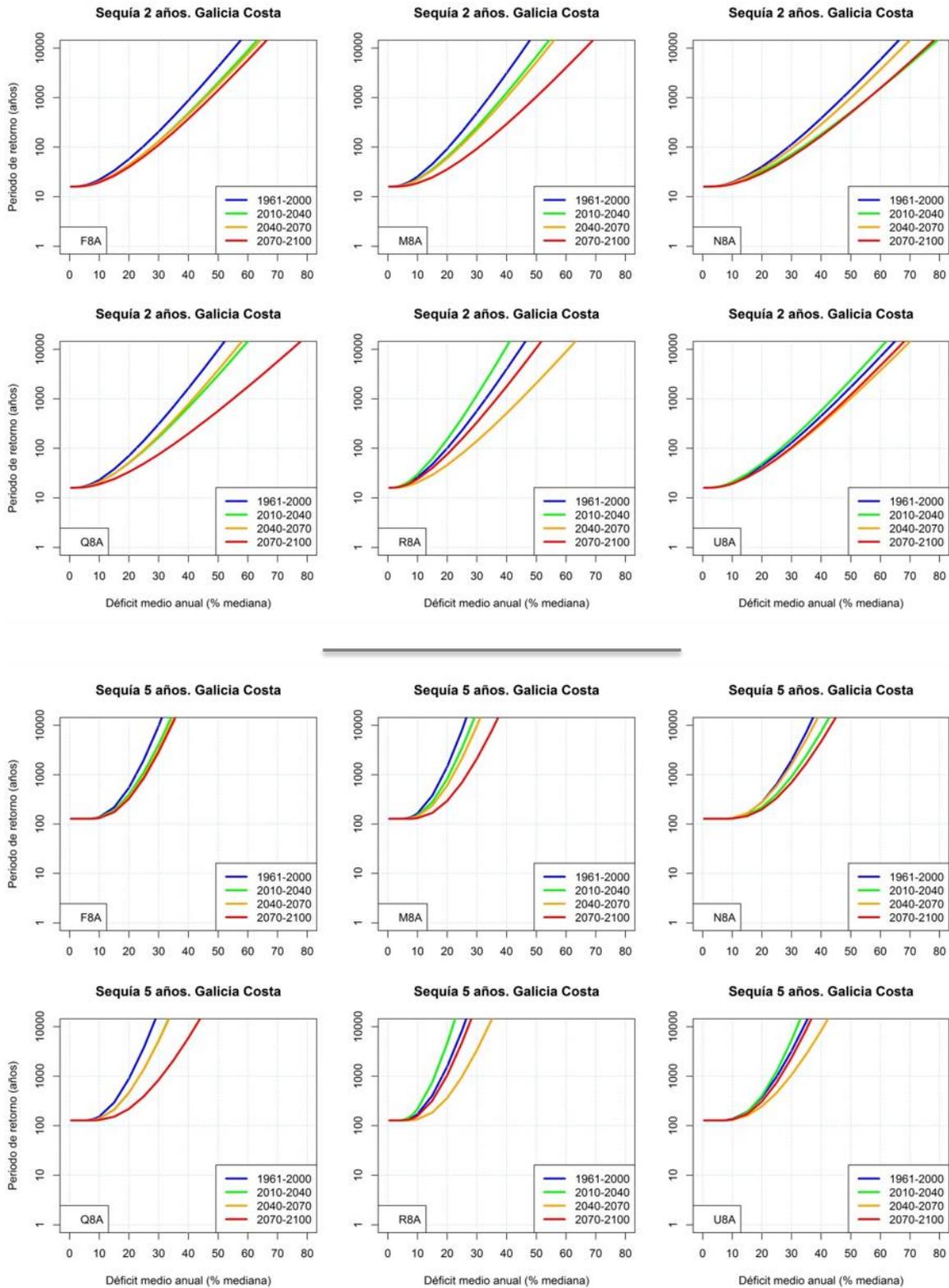


Figura 196. Periodo de retorno de sequías en Galicia Costa para diferentes déficits medios anuales y duración 2 años (arriba) y 5 años (debajo) para el PC y los tres PI según cada una de las proyecciones RCP 8.5.

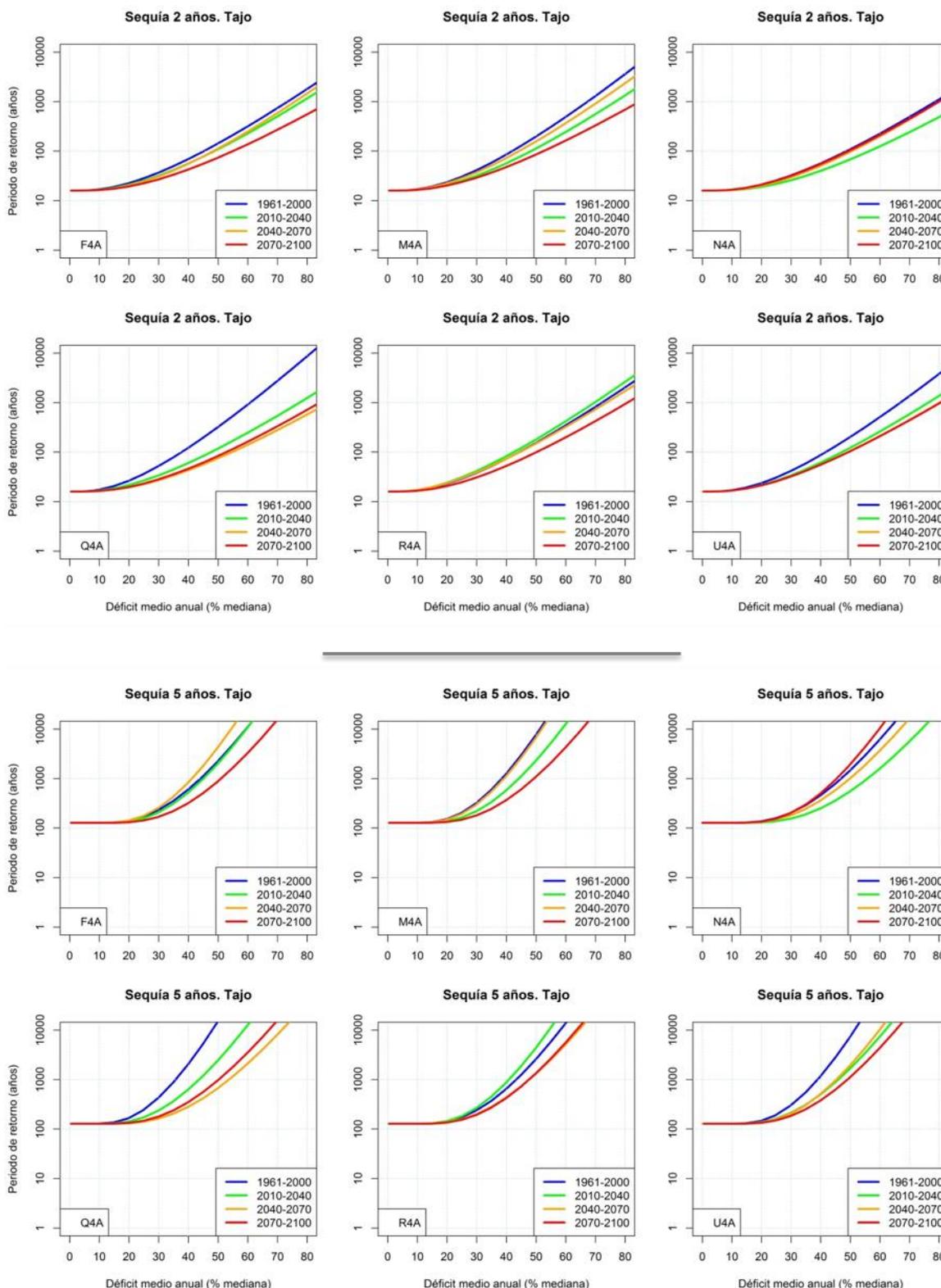


Figura 197. Período de retorno de sequías en el Tajo para diferentes déficits medios anuales y duración 2 años (arriba) y 5 años (debajo) para el PC y los tres PI según cada una de las proyecciones RCP 4.5.

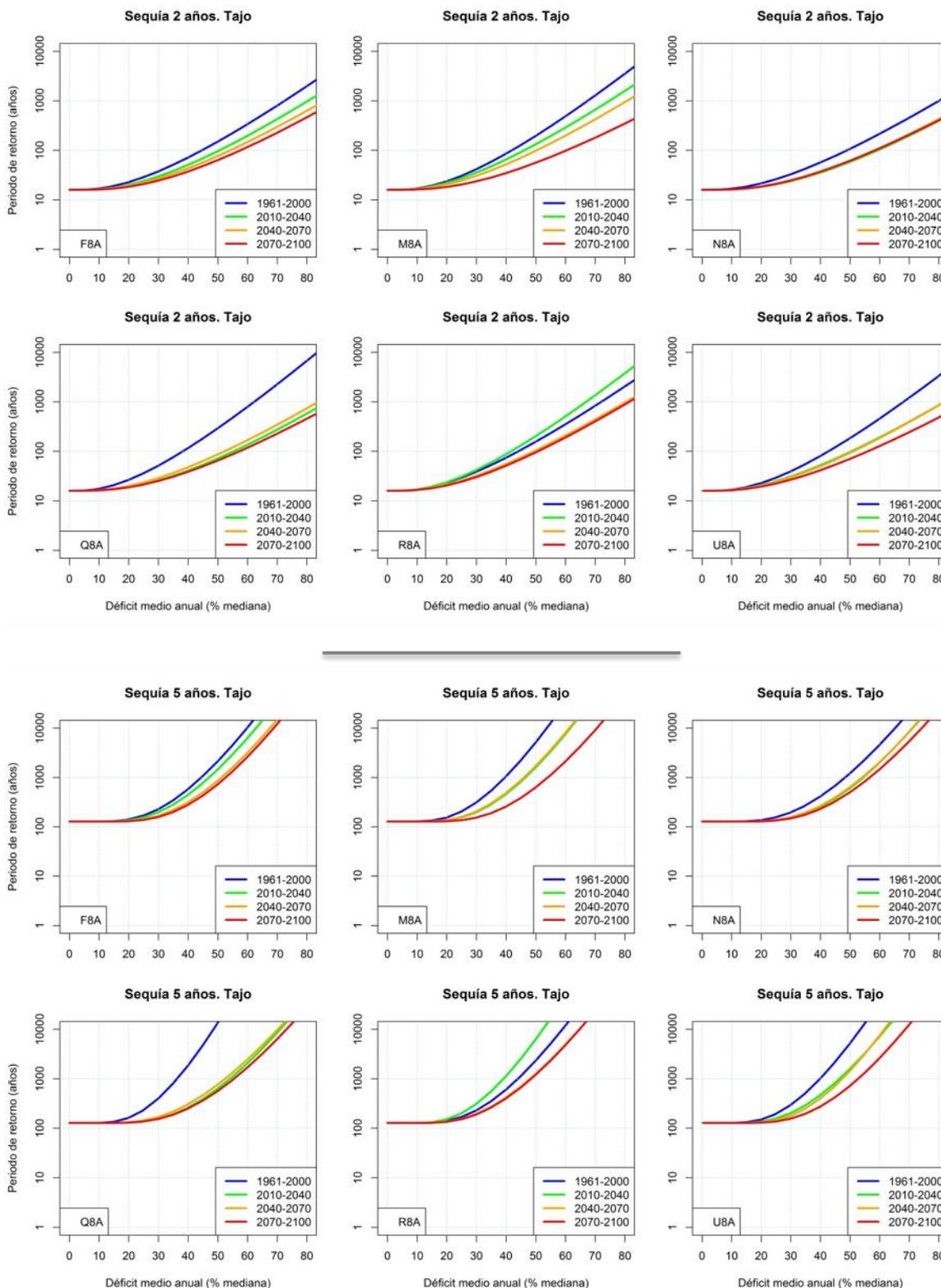


Figura 198. Periodo de retorno de sequías en el Tajo para diferentes déficits medios anuales y duración 2 años (arriba) y 5 años (debajo) para el PC y los tres PI según cada una de las proyecciones RCP 8.5.

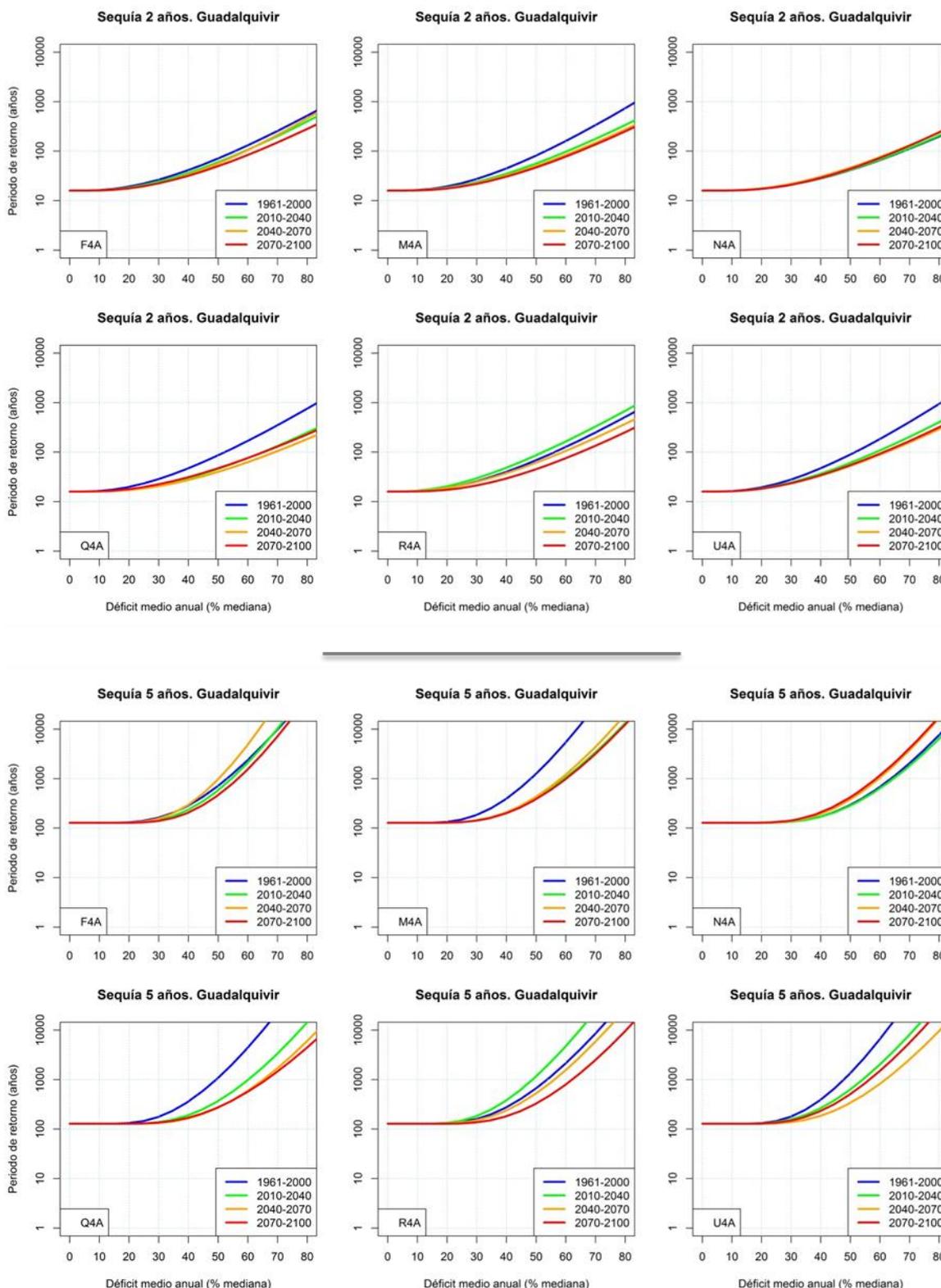


Figura 199. Periodo de retorno de sequías en el Guadalquivir para diferentes déficits medios anuales y duración 2 años (arriba) y 5 años (debajo) para el PC y los tres PI según cada una de las proyecciones RCP 4.5.

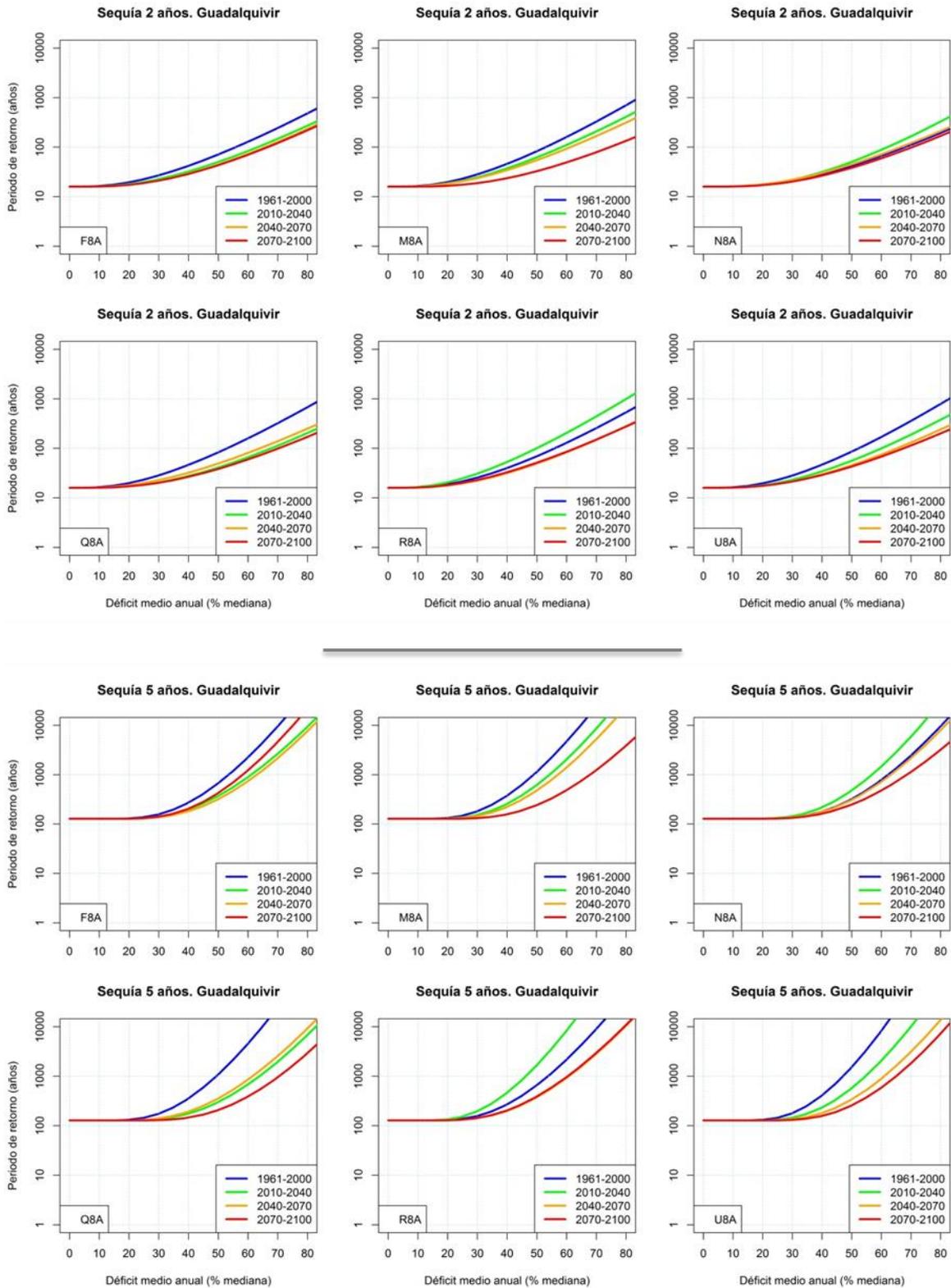


Figura 200. Periodo de retorno de sequías en el Guadalquivir para diferentes déficits medios anuales y duración 2 años (arriba) y 5 años (debajo) para el PC y los tres PI según cada una de las proyecciones RCP 8.5.

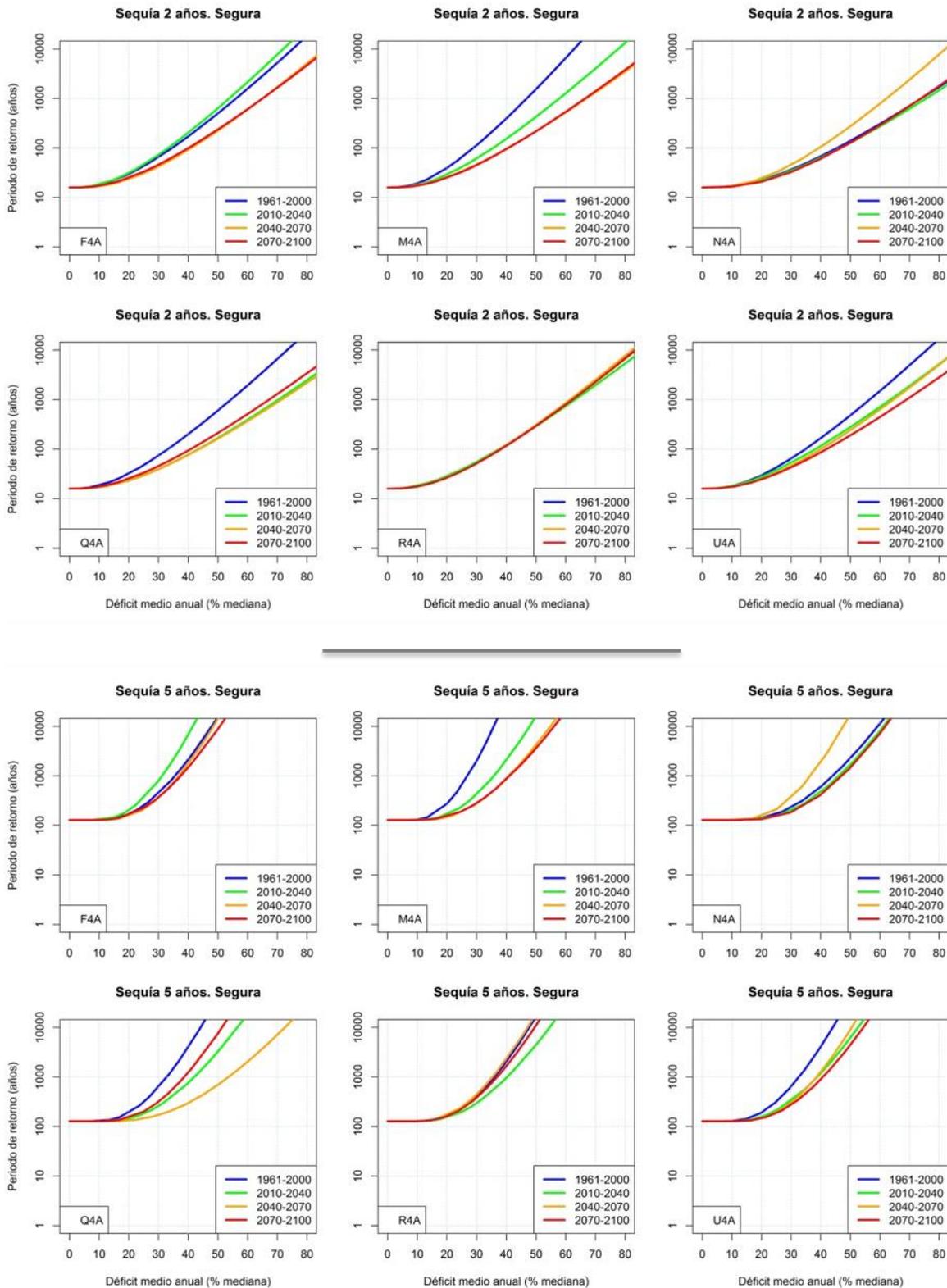


Figura 201. Periodo de retorno de sequías en el Segura para diferentes déficits medios anuales y duración 2 años (arriba) y 5 años (debajo) para el PC y los tres PI según cada una de las proyecciones RCP 4.5.

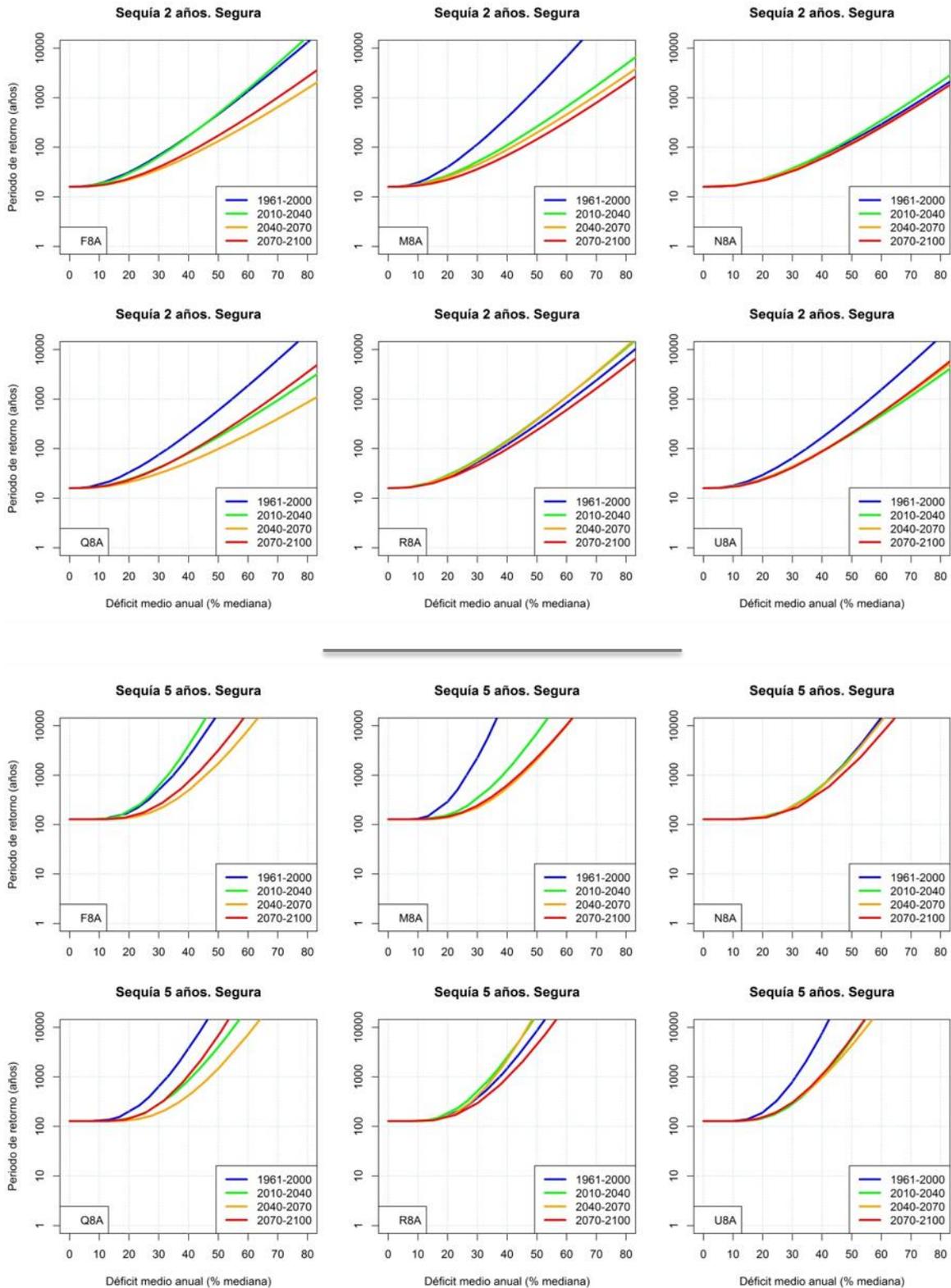


Figura 202. Periodo de retorno de sequías en el Segura para diferentes déficits medios anuales y duración 2 años (arriba) y 5 años (debajo) para el PC y los tres PI según cada una de las proyecciones RCP 8.5.

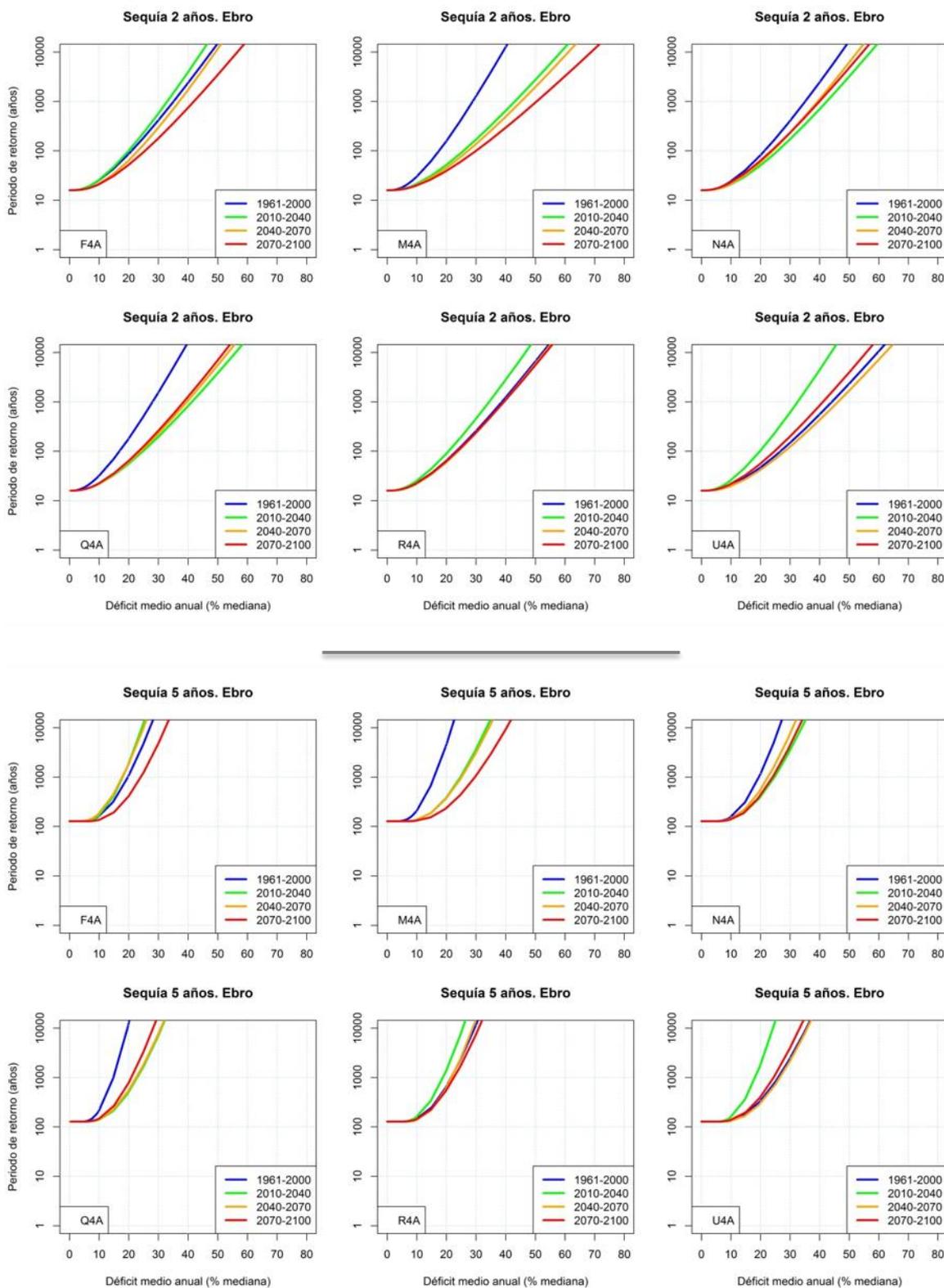


Figura 203. Periodo de retorno de sequías en el Ebro para diferentes déficits medios anuales y duración 2 años (arriba) y 5 años (debajo) para el PC y los tres PI según cada una de las proyecciones RCP 4.5.

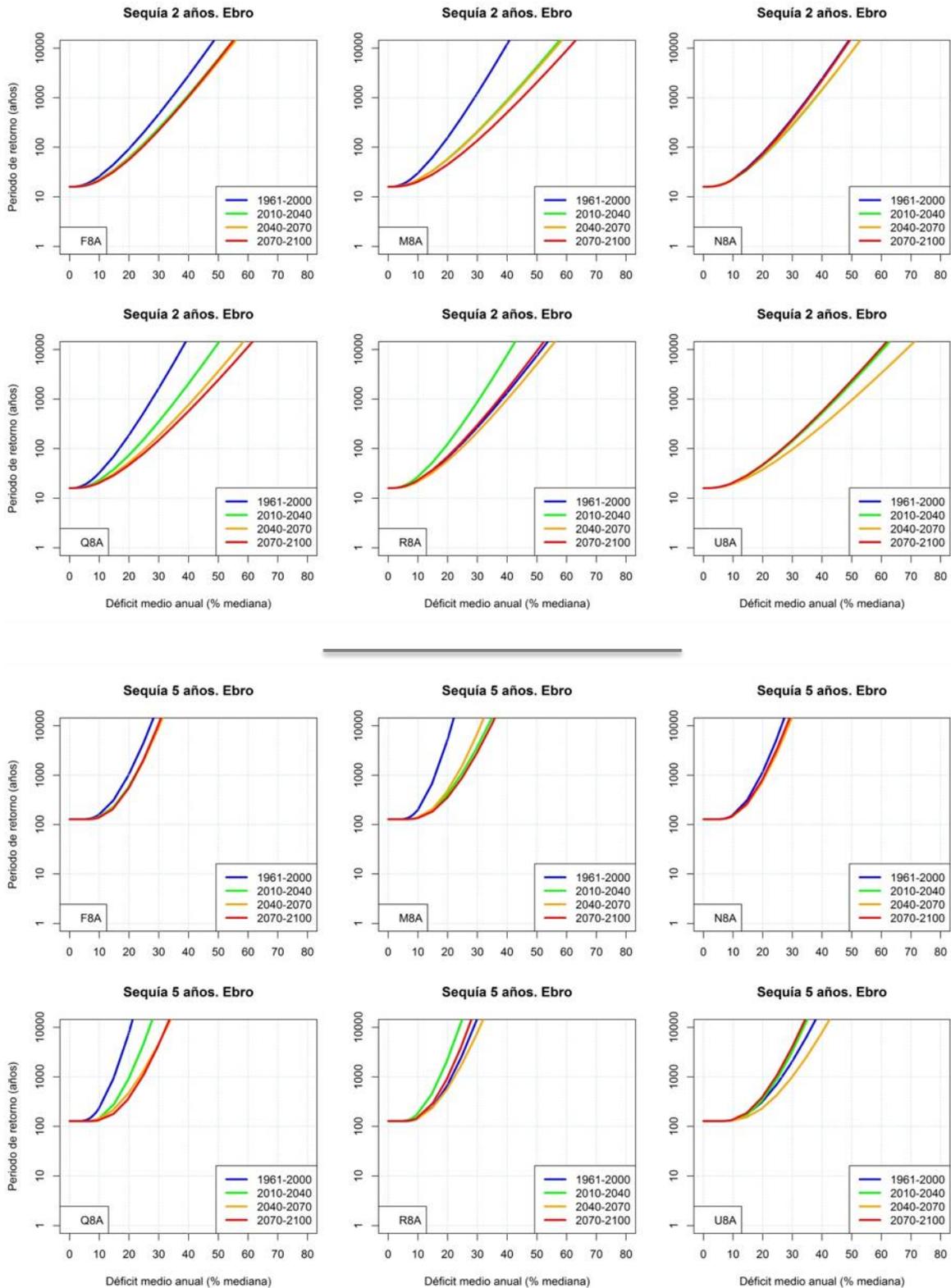


Figura 204. Periodo de retorno de sequías en el Ebro para diferentes déficits medios anuales y duración 2 años (arriba) y 5 años (debajo) para el PC y los tres PI según cada una de las proyecciones RCP 8.5.

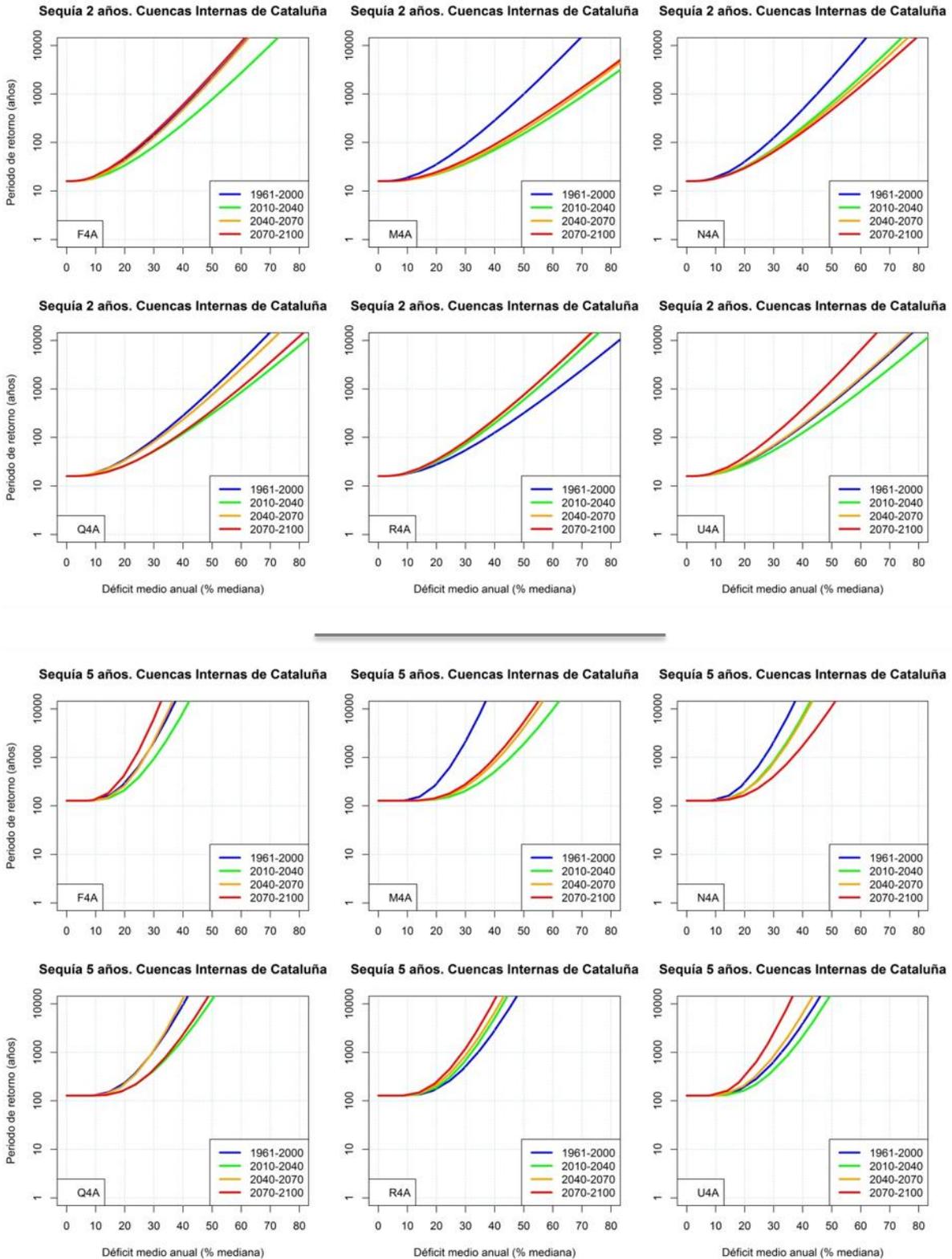


Figura 205. Periodo de retorno de sequías en las Cuencas Internas de Cataluña para diferentes déficits medios anuales y duración 2 años (arriba) y 5 años (debajo) para el PC y los tres PI según cada una de las proyecciones RCP 4.5.

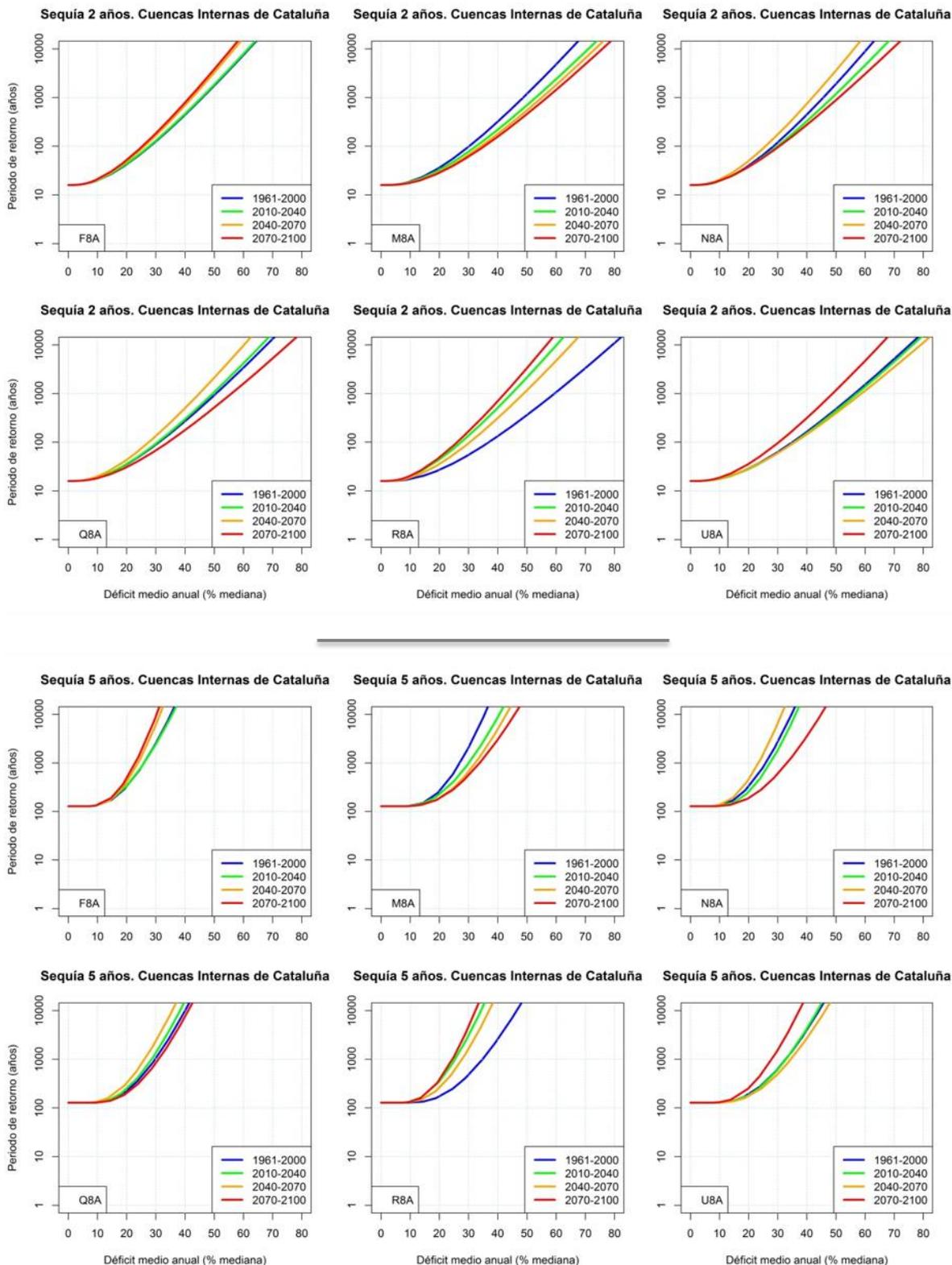


Figura 206. Periodo de retorno de sequías en las Cuencas Internas de Cataluña para diferentes déficits medios anuales y duración 2 años (arriba) y 5 años (debajo) para el PC y los tres PI según cada una de las proyecciones RCP 8.5.



## 10 CONCLUSIONES

### 10.1 ACTUALIZACIÓN DEL TRABAJO ANTERIOR CEDEX 2010.

Este informe contiene los resultados principales de la evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España. Supone una actualización de otro anterior llevado a cabo por el CEDEX (2010). La actualización ha consistido básicamente en utilizar unas nuevas proyecciones climáticas, resultado de simular con los nuevos modelos climáticos de circulación general y con los nuevos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero que fueron usados para elaborar el 5º Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) del año 2013. El anterior informe (CEDEX 2010) partía de modelos climáticos de circulación general y escenarios de emisiones usados en el 3er informe del IPCC del año 2001.

Los modelos climáticos de circulación general de donde parten las proyecciones utilizadas en este informe son modelos del sistema terrestre desarrollados por diferentes centros climatológicos mundiales, más completos que los modelos acoplados atmósfera-océano utilizados en CEDEX (2010). Los modelos del sistema terrestre incluyen además la representación de varios ciclos bioquímicos como aquéllos implicados en el ciclo del carbono, del azufre o del ozono.

Los RCP son los nuevos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero del último informe de evaluación del IPCC y son los que se han considerado en este informe. Sustituyen a los escenarios SRES que se utilizaron en anteriores informes de evaluación del IPCC y en CEDEX 2010 y que se definían respecto a diferentes evoluciones en las condiciones socioeconómicas globales. Los RCP se refieren exclusivamente a la estimación de emisiones y forzamiento radiativo y pueden contemplar los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XXI.

La metodología utilizada en el presente estudio ha sido la misma que la utilizada en CEDEX 2010. El ámbito de estudio ha variado ligeramente ya que en el presente estudio se han incluido aquellas zonas fronterizas de Portugal y Francia que vierten agua a España.

### 10.2 VALORES CLIMÁTICOS DE PARTIDA

Los valores climáticos de partida determinan en gran medida los resultados de cualquier estudio de impacto del cambio climático.

Los valores climáticos de partida para este estudio han consistido en 12 proyecciones climáticas regionalizadas para España y puestas a disposición pública por la Agencia Estatal de Meteorología. Son 6 conjuntos de valores diarios simulados de precipitación y temperaturas máximas y mínimas para el periodo 2010-2100 del RCP 4.5 y otros 6 para el RCP 8.5, incluyendo además los correspondientes valores simulados para el periodo de control 1961-2000.

La selección de esas 12 proyecciones se llevó a cabo a partir de la información disponible e intentando abarcar la variabilidad de las simulaciones climáticas según



criterios consensuados con la Agencia Estatal de Meteorología y la Oficina Española de Cambio Climático.

La comparación con los valores climáticos observados durante el periodo de control reveló un buen ajuste de los valores de temperaturas simuladas, pero hay un peor ajuste de los valores de precipitación. Ninguna proyección reproduce la tendencia negativa de la precipitación observada. El sesgo de las proyecciones en la estimación de la precipitación anual para España oscila entre -16% y +17%, si bien está polarizado espacialmente, de este a oeste, con notables diferencias entre zonas así como entre proyecciones. La mayoría de las proyecciones sobreestiman la precipitación en las grandes cuencas atlánticas. Por otro lado, las proyecciones infravaloran la precipitación en las cuencas de la vertiente mediterránea y en los archipiélagos. El patrón del ciclo anual de la precipitación se recoge a grandes rasgos, salvo en las cuencas mediterráneas lo que, añadido a la infravaloración de la precipitación, incide en la incertidumbre de los resultados en esas cuencas.

El ajuste de las nuevas proyecciones derivadas del 5º y último informe del IPCC, que han sido utilizadas en este estudio, no mejora sustancialmente el de las proyecciones derivadas del 3º Informe del IPCC que fueron utilizadas en el anterior informe del CEDEX (2010).

El sesgo de los valores climáticos de partida detectado en este estudio condiciona en gran medida la simulación hidrológica y es un indicativo de la incertidumbre de los resultados de la evaluación del impacto. Este sesgo de la precipitación simulada tiene unas importantes connotaciones en la evaluación de los recursos hídricos por la relación no lineal que existe entre la precipitación y la escorrentía, sobre todo en zonas con baja precipitación y donde ésta se infravalora, como es el caso del Levante peninsular y archipiélagos, por lo que sus resultados son allí más inciertos. Sin embargo, se ha optado por no corregir el sesgo con objeto de no alterar las relaciones entre las variables de partida y de evitar otra fuente de incertidumbre.

### **10.3 IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS**

Se han evaluado los impactos del cambio climático en los recursos hídricos para cada una de las 12 proyecciones o hipótesis climáticas seleccionadas.

A partir de los valores climáticos de partida se obtuvieron los mapas mensuales de precipitación y evapotranspiración potencial (ETP) de cada una de las 12 proyecciones, que son la entrada del modelo hidrológico de SIMPA. Esos mapas mensuales se generaron mediante procesos de interpolación y de cálculo de la ETP.

El modelo SIMPA, desarrollado por el CEDEX, se ha utilizado para obtener los mapas mensuales de las principales variables terrestres del ciclo hidrológico, básicamente: humedad del suelo, evapotranspiración real (ETR), recarga subterránea, escorrentía y aportación hídrica en los ríos.

La evaluación del impacto del cambio climático en cada variable hidrológica se ha expresado fundamentalmente mediante cambios del valor medio anual alcanzado en cada uno de los tres periodos del siglo XXI, 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100, respecto al periodo de control 1961-2000. También se han evaluado la variación del ciclo anual en esos tres periodos y las tendencias en la evolución de los cambios



anuales durante el siglo XXI. La comparación se ha realizado entre valores simulados futuros y del periodo de control obtenidos a partir de los valores climáticos de partida sin corregir su sesgo, por lo que no se han utilizado los valores observados como referencia en el periodo de control.

Los cambios detectados en las proyecciones analizadas presentan las siguientes características generales:

- Hay una gran disparidad de resultados según las proyecciones, síntoma de incertidumbre de los resultados.
- La incertidumbre es mayor en el Levante peninsular y archipiélagos.
- Las proyecciones del modelo climático MRI.CGCM3 son las más favorables, ya que son las que pronostican un mayor incremento de recursos hídricos en la mayor parte de España, salvo en Levante. En el lado contrario, las proyecciones del modelo climático MIROC.ESM son muy desfavorables al pronosticar grandes reducciones de recursos hídricos. El resto de proyecciones dan, con carácter general, reducciones de recursos hídricos.
- En general se pronostica una reducción de recursos hídricos que se irá acentuando conforme avance el siglo XXI, por lo que será más acusada en el último periodo de impacto (2070-2100).
- La reducción de recursos hídricos es más notable en el RCP 8.5 que en el RCP 4.5, haciéndose más marcada esta diferencia conforme avanza el siglo XXI.
- Hay una tendencia a aumentar los recursos hídricos en los meses alrededor de febrero, en detrimento de los meses de verano.

Se estiman mayoritariamente descensos de precipitación, siendo mayores estos descensos en el cuadrante SO de la Península y en los archipiélagos. Para el conjunto de España, la media de los cambios para los RCP 4.5 y 8.5 son respectivamente del -2% y -4% para 2010-2040, -6% y -8% para 2040-2070 y -7% y -14% para 2070-2100.

Los cambios en la ETP responden a los cambios de temperaturas. Se estiman aumentos de ETP en todos los ámbitos y estaciones climáticas según todas las proyecciones, con muy contadas excepciones. Los aumentos serán menores en las zonas de costa que en las de interior. Para el conjunto de España, la media de los cambios para los RCP 4.5 y 8.5 son respectivamente del 3% y 4% para 2010-2040, 7% y 10% para 2040-2070 y 9% y 17% para 2070-2100.

Los cambios en la ETR responden a los cambios de ETP, pero sobre todo a los de precipitación, que determina el agua disponible para ser evaporada. Por ello, se estiman aumentos de ETR en el norte húmedo y zonas montañosas de las divisorias de aguas y descensos generalizados en el resto de España. Para el conjunto de España, la media de los cambios para los RCP 4.5 y 8.5 son respectivamente del -1% y -3% para 2010-2040, -3% y -4% para 2040-2070 y -3% y -6% para 2070-2100.

Los cambios en la humedad del suelo responden en gran medida a los cambios de precipitación y a la disponibilidad de agua. Los mayores descensos se pronostican para el invierno y zonas húmedas del norte-Atlánticas y de divisorias de aguas. Por el contrario, se estiman pocos descensos en verano y en la España seca (Canarias,



Levante). Para el conjunto de España, la media de los cambios con relación al contenido medio de agua en el suelo para los RCP 4.5 y 8.5 son respectivamente del -2% y -2% para 2010-2040, -4% y -5% para 2040-2070 y -5% y -8% para 2070-2100.

Los cambios en la recarga de los acuíferos responden en gran medida a los cambios de precipitación, pero agudizándolos. De ese modo, se estiman descensos generalizados en la recarga para el siglo XXI, si bien hay grandes discrepancias entre las estimaciones según la proyección climática. Las disminuciones son más acusadas hacia el sur y sobre todo en los archipiélagos. Son menos acusadas, incluso con aumentos, en el norte y NE de la Península. Para el conjunto de España, la media de los cambios para los RCP 4.5 y 8.5 son respectivamente del -3% y -7% para 2010-2040, -11% y -14% para 2040-2070 y -13% y -24% para 2070-2100.

La escorrentía es la variable que mejor caracteriza los recursos hídricos de una zona y tiene mayor aplicación práctica. La Tabla 31 resume los principales resultados de este estudio.

Tabla 31. Cambio de escorrentía en cada ámbito hidrográfico. Se indican los valores máximo (Mx), mínimo (Mn) y el promedio (Med) para cada RCP. Los colores reflejan la gradación del cambio.

ESCORRENTÍA Cambio Anual (%)		RCP 4.5			RCP 8.5		
		Mx	Med	Mn	Mx	Med	Mn
España	2010-2040	20	-3	-13	4	-7	-14
	2040-2070	-1	-11	-23	9	-14	-29
	2070-2100	4	-13	-31	-1	-24	-43
Miño-Sil	2010-2040	11	-3	-10	2	-6	-14
	2040-2070	-3	-11	-16	4	-11	-18
	2070-2100	4	-10	-21	-2	-19	-29
Galicia Costa	2010-2040	10	-3	-10	1	-6	-14
	2040-2070	-4	-11	-16	2	-11	-17
	2070-2100	2	-10	-19	-4	-19	-29
Cantábrico Oriental	2010-2040	5	-3	-10	-1	-7	-12
	2040-2070	-7	-12	-18	-6	-13	-21
	2070-2100	-5	-10	-17	-15	-26	-38
Cantábrico Occidental	2010-2040	8	-2	-8	-2	-6	-9
	2040-2070	-3	-10	-14	-3	-12	-21
	2070-2100	-4	-10	-18	-9	-23	-34
Duero	2010-2040	25	-3	-15	6	-9	-19
	2040-2070	1	-13	-27	15	-15	-31
	2070-2100	9	-14	-36	3	-25	-46
Tajo	2010-2040	31	-3	-22	12	-8	-20
	2040-2070	3	-11	-29	19	-15	-34
	2070-2100	12	-14	-40	7	-25	-51
Guadiana	2010-2040	46	-3	-35	18	-9	-30
	2040-2070	9	-12	-36	33	-18	-45
	2070-2100	22	-17	-50	15	-30	-63
Guadalquivir	2010-2040	52	-2	-38	18	-10	-30
	2040-2070	15	-10	-37	35	-18	-51
	2070-2100	18	-19	-51	13	-32	-67
ESCORRENTÍA Cambio Anual (%)		RCP 4.5			RCP 8.5		
		Mx	Med	Mn	Mx	Med	Mn
Cuenca Mediterráneas Andaluzas	2010-2040	43	-3	-33	12	-11	-25
	2040-2070	11	-8	-36	20	-20	-47
	2070-2100	6	-20	-49	4	-31	-65
Guadalete y Barbate	2010-2040	48	-4	-38	15	-11	-31
	2040-2070	14	-10	-37	31	-20	-51
	2070-2100	12	-20	-52	7	-33	-67
Tinto, Odiel y Piedras	2010-2040	54	-2	-36	14	-11	-36
	2040-2070	15	-10	-37	34	-20	-51
	2070-2100	25	-18	-50	21	-29	-65
Segura	2010-2040	15	-7	-22	12	-9	-23
	2040-2070	-1	-11	-32	-3	-23	-48
	2070-2100	-6	-20	-43	-17	-38	-63
Júcar	2010-2040	21	-4	-26	15	-11	-25
	2040-2070	-4	-12	-34	-7	-24	-49
	2070-2100	-7	-21	-46	-20	-36	-62
Ebro	2010-2040	15	-2	-12	-2	-7	-10
	2040-2070	-5	-11	-19	4	-13	-25
	2070-2100	-3	-12	-25	-10	-26	-40
Cuenca Internas de Cataluña	2010-2040	24	6	-9	6	-4	-17
	2040-2070	6	-4	-13	4	-8	-22
	2070-2100	8	-8	-20	-3	-19	-31
Islas Baleares	2010-2040	8	-7	-26	-3	-16	-40
	2040-2070	6	-13	-39	-19	-31	-56
	2070-2100	-4	-24	-52	-28	-42	-69
Canarias	2010-2040	25	-6	-27	7	-14	-32
	2040-2070	22	-10	-26	14	-25	-46
	2070-2100	-11	-26	-44	3	-34	-60

Los cambios estimados en la escorrentía muestran en primer lugar grandes discrepancias según las proyecciones. Los rangos de variación para el conjunto de España van del -14% a +20% para 2010-2040, -29% a +9% para 2040-2070 y -43% a +4% para 2070-2100. Promediando los resultados de las proyecciones para España, se estiman siempre descensos de escorrentía; los cambios para los RCP 4.5 y 8.5 son respectivamente del -3% y -7% para 2010-2040, -11% y -14% para 2040-2070 y -13% y



-24% para 2070-2100. En general, hay una reducción de recursos hídricos más intensa hacia el sur peninsular y en los archipiélagos y menor reducción, o incluso aumento en algunas zonas del este peninsular.

Con relación al estudio precedente, los resultados de impacto del presente estudio son más coherentes con los escenarios de emisiones, tienen más continuidad espacial y pronostican, en general, menores reducciones de recursos hídricos para el siglo XXI.

#### **10.4 IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL RÉGIMEN DE SEQUÍAS**

Se pronostica de manera general una reducción de recursos hídricos en España conforme avance el siglo XXI y por lo tanto un aumento de la escasez de agua en España.

Por otro lado, también se pronostica un cambio en el régimen de sequías para cada periodo de impacto futuro con relación al periodo de control. La mayoría de las proyecciones climáticas muestran un futuro en el que las sequías serían más frecuentes, acusándose ese efecto cuanto más nos alejamos en el siglo XXI. No obstante, hay proyecciones que no muestran tan clara esa señal, especialmente en cuencas del Levante y Canarias.

Se aprecian escasas diferencias entre los resultados aportados por ambos escenarios de emisiones, si bien las sequías tenderían a ser más frecuentes para el escenario RCP 8.5, sobre todo para los últimos periodos del siglo XXI.



**CEDEX**



## 11 EQUIPO DE TRABAJO

El presente informe ha sido elaborado por el Área de Hidrología del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. El director del trabajo ha sido Luis Miguel Barranco Sanz, director de programa de dicho Área. El atlas cartográfico y la aplicación que lo gestiona han sido elaborados con la participación de María del Carmen Angel Martínez, Coordinadora de Programa Científico-Técnico, y Ricardo Herrero Santos, Jefe del Área de Ingeniería de Sistemas.

Madrid, julio 2017

El Director del trabajo,

Luis Miguel Barranco Sanz  
Doctor en Geología  
Director de Programa

Examinado y conforme,

Carmen Mirta Dimas Suárez  
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Jefe del Área de Hidrología

Vº Bº

Antonio Jiménez Álvarez  
Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Director de Estudios de Agua y Medio Ambiente



**CEDEX**



## 12 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEMA (2008). *Impacts of Europe's changing climate - 2008 indicator-based assessment*. Informe AEMA N° 4/2008. AEMA, Copenhague.
- AEMA (2017). *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. An indicator-based report*. Informe AEMA N° 1/2017. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- AEMET (2008). *Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España*. Agencia Estatal de Meteorología. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. ISBN: 978-84-8320-470-2.
- AEMET (2016). *Proyecciones climáticas para el siglo XXI*. <http://escenarios.aemet.es/>. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. (acceso 16-07-2016).
- Alfieri, L.; Feyen, L.; Dottori, F. y Bianchi, A. (2015). Ensemble flood risk assessment in Europe under high end climate scenarios. *Global Env. Change*, 35: 199-212.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo*. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO riego y drenaje 56. Roma.
- Álvarez-Rodríguez, J. (2011). *Estimación de la distribución espacial de la precipitación en zonas montañosas mediante métodos geoestadísticos*. Tesis Doctoral, Univ. Politécnica, Madrid.
- Álvarez-Rodríguez, J.; Barranco, L.M. y Potenciano de las Heras, Á. (2012). *Evaluación del Impacto del Cambio Climático en los Recursos Hídricos de España*. Monografía del CEDEX, M-116. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento. ISBN: 978-84-7790-533-2, NIPO: 163-12-011-1.
- Álvarez-Rodríguez, J.; Barranco, L.M.; Villaverde, J. y Potenciano de las Heras, Á. (2015). *Caracterización hidrológica de sequías*. Monografía del CEDEX, M-127. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento. ISBN: 978-84-7790-563-9, NIPO: 163-15-006-1.
- Álvarez-Rodríguez, J.; Sánchez, A.; Quintas, L. (2005). SIMPA, a GRASS based tool for Hydrological Studies. *International Journal of Geoinformatics*, 1 (1). Association for Geoinformation Technology. Proceedings of the FOSS/GRASS Users Conference, Bangkok, Tailandia, 12-14 September 2004.
- Arenillas, M.; Cobos, G. y Navarro, J. (2008). Datos sobre la nieve y los glaciares en las cordilleras españolas. El programa EHRIN (1984-2008). Dirección General del Agua, Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. [http://www.mapama.gob.es/es/agua/publicaciones/Libro\\_ERHIN\\_tcm7-190926.pdf](http://www.mapama.gob.es/es/agua/publicaciones/Libro_ERHIN_tcm7-190926.pdf) (acceso 5-6-2017).
- Arnell, N.W. (2003). Effects of IPCC SRES emissions scenarios on river runoff: a global perspective. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 7 (5): 619-641.
- Ayala, F.J. (1996). Reducción de los Recursos Hídricos en España por el posible Cambio Climático. *Tecnoambiente*, 64: 43-48.



CEDEX

- Balairón, L.; Álvarez, J.; Borrel, E.; Delgado, M. (2003). Water Resources Assessment in Honduras. XI World Water Congress. *Ingeniería Civil*, 131: 49-61.
- Barranco, L.M. (2011). *Evaluación del impacto hidrológico del cambio climático en España. Valoración de las proyecciones climáticas*. Tesis Doctoral, Univ. Complutense, Madrid.
- Barranco, L.M.; Álvarez-Rodríguez, J.; Olivera, F.; Potenciano, Á.; Quintas, L. y Estrada, F. (2014). Assessment of the expected runoff change in Spain using climate simulations. *J. Hydrol. Eng.*, 19 (7), 1481–1490.
- Bates, B.C.; Kundzewicz, Z.W.; Wu, S. y Palutikof, J.P. (eds.) (2008). *El Cambio Climático y el Agua*. Documento Técnico VI del Panel Intergubernamental del Cambio Climático, Secretaría del IPCC, Ginebra.
- Berg, P.; Feldmann, H. y Panitz H.J. (2012). Bias correction of high resolution regional climate model data. *J. Hydrol.*, 448-449: 80-92.
- Bovolo, C.I. et al. (2011). Climate Change, Water Resources and Pollution in the Ebro Basin: Towards an Integrated Approach. *The Handbook of Environmental Chemistry, 13/2011 (The Ebro Basin)*: 295-329, Doi: 10.1007/698\_2010\_86.
- Box, G.E.P.; Jenkins, G.M. y Reinsel, G. (1994). *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Prentice-Hall.
- Bozkurt, D. y Sen, O.L. (2013). Climate change impacts in the Euphrates-Tigris Basin based on different model and scenario simulations. *J. Hydrol.*, 480 (0), 149-161.
- Budyko, M.I. (1974). *Climate and life*. Academic Press, San Diego, CA, USA
- Cabezas, F. (2004). Cambio climático y recursos hídricos en la planificación hidrológica. *Ingeniería y territorio*, 68: 10-15.
- Cabezas, F.; Estrada, F. y Estrela, T. (1999). Algunas contribuciones técnicas del libro Blanco del Agua en España. *Ingeniería Civil*, 115: 79-96.
- Calbó et al. (2016). Projeccions climàtiques i escenaris de futur. En: *Tercer informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. Institut d'Estudis Catalans, Generalitat de Catalunya: 113-133.
- California Department of Water Resources (2010). *Climate Change Characterization and Analysis in California Water Resources Planning Studies. Final Report*. [http://www.water.ca.gov/climatechange/docs/DWR\\_CCCStudy\\_FinalReport\\_Dec23.pdf](http://www.water.ca.gov/climatechange/docs/DWR_CCCStudy_FinalReport_Dec23.pdf) (acceso 4-05-2017).
- Candela, L.; Tamoh, K. y Olivares, G. (2012). Modelling impacts of climate change on water resources in ungauged and data-scarce watersheds. Application to the Siurana catchment (NE Spain). *Science of the Total Environment*, 440: 253-260.
- CEDEX (2010). *Estudio de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua. Ficha 1: Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural*. Informe Técnico Centro de Estudios Hidrográficos - CEDEX, Tomo único, clave CEDEX 42-407-1-001. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento.



- CEDEX (2013). *Evaluación de los recursos hídricos en España*. <http://www.mapama.gob.es/es/agua/temas/evaluacion-de-los-recursos-hidricos/evaluacion-recursos-hidricos-regimen-natural/> (acceso 21-04-2017).
- CIEMAT (2000). *Propiedades edafológicas de los suelos españoles*. Base de Datos en formato digital. Ministerio de Economía, Industria y Competitividad.
- Cobos, G. y Moreno, M. (2017). Tendencias en la fusión nival en el Pirineo y su implicación en las inundaciones. Comunicación en la Jornada sobre inundaciones y cambio climático, Dirección General del Agua, Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid 21 de junio de 2017, <http://www.mapama.gob.es/es/agua/formacion/GRI-Jornada-Taller-inundaciones-CC-Madrid.aspx> (acceso 30-6-2017).
- Corzo, F.; Bastos, M.; Domínguez, J.A. y González, F. (2013). *Plan de Adaptación al Cambio Climático de Extremadura del sector Recursos Hídricos*. Gobierno de Extremadura.
- Chirivella, V. (2010). *Caracterización de los futuros escenarios climáticos en la Comunidad Valenciana: propuestas de mejora para la evaluación de la oferta y demanda de recursos hídricos*. Tesis Doctoral, Univ. Politécnica de Valencia, ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Delgado, J. et al. (2010). Modelling the hydrological response of a Mediterranean medium-sized headwater basin subject to land cover change: The Cardener River basin. *Journal of Hydrology*, 383: 125-134.
- Ehret, U.; Zehe, E.; Wulfmeyer, V.; Warrach-Sagi, K. y Liebert, J. (2012). Should we apply bias correction to global and regional climate model data?. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9): 3391-3404.
- Estrela, T.; Cabezas, F. y Estrada, F. (1999). La evaluación de recursos hídricos en el Libro Blanco del Agua en España. *Ingeniería del Agua*, 6 (2): 125 - 138.
- Estrela, T. y Quintas, L. (1996). El Sistema Integrado de Modelización Precipitación Aportación, SIMPA. *Ingeniería Civil*, 104: 43-52.
- Fernández, B. y Salas, J. (1999a). Return period and risk of hydrologic events. I: Mathematical formulation" *J. Hydrologic Eng.*, 4(4), 297-307.
- Fernández, B. y Salas, J. (1999b). Return period and risk of hydrologic events. II: Applications. *J. Hydrologic Eng.*, 4(4), 308-316.
- Fernández, P. (2002). *Estudio del impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos: Aplicación en diecinueve pequeñas cuencas en España*. Tesis Doctoral, Univ. Politécnica de Madrid, ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Gardner, L.R. (2009). Assessing the effect of climate change on mean annual runoff. *J. Hydrol.*, 379 (3-4), 351-359.
- Garrote, L.; de Lama, B. y Martín, F. (2007). Previsiones para España según los últimos estudios de cambio climático. En: *El Cambio Climático y sus consecuencias en el Sector del Agua*, Aqualia - Univ. Rey Juan Carlos: 3-15.



CEDEX

- Garrote, L.; Rodríguez, I. y Estrada, F. (1999). Una evaluación de la capacidad de regulación de las cuencas de la España peninsular. *VI Jornadas Españolas de Presas*, 2: 645-656.
- GRASS Development Team (2015). Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://grass.osgeo.org> (acceso 11-08-2015).
- Hargreaves, G.H. y Allen, R.G. (2003). History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129 (1): 53-63.
- Hernández, L. (2007). *Efectos del cambio climático en los sistemas complejos de recursos hídricos. Aplicación a la cuenca del Júcar*. Tesis Doctoral, Univ. Politécnica de Valencia, ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Hyndman, R.J. y Khandakar, Y. (2008). Automatic time series forecasting. The forecast package for R. *Journal of Statistical Software*, 26 (3).
- IGME (2000). *Mapa hidrogeológico de España 1:1000000*. Ministerio de Economía, Industria y Competitividad. Original de 1991.
- IGN (2000). Image & CORINE Land Cover 2000. Ministerio de Fomento. <http://www.ign.es/ign/layoutIn/corineLandCover.do> (acceso 14-02-2011).
- INM (1995). *Informe de España sobre el Cambio Climático. Convenio Marco sobre el Cambio Climático de Naciones Unidas*. Agencia Estatal de Meteorología. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.
- IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA..
- Jiménez Cisneros, B.E.; Oki, T.; Arnell, N.W., Benito, G.; Cogley, J.G.; Döll, P.; Jiang, T. y Mwakalila, S.S. (2014). Freshwater resources. En: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: 229-269.
- Junta de Andalucía (2012). *Estudio Básico de Adaptación al Cambio Climático Sector Recursos Hídricos*. Consejería de Medio Ambiente.
- Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods*. [Griffin, C. (ed.)], Londres.
- Kilsby, C.G.; Tellier, S.S.; Fowler, H.J. y Howels, T.R. (2007). Hydrological impacts of climate change on the Tejo and Guadiana Rivers. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11: 1175-1189.
- Koutsoyiannis, D. (2013). Hydrology and change. *Hydrological Sciences Journal*, 58 (6), 1177-1197.
- Kundzewicz, Z.W. et al. (2007). Freshwater resources and their management. En: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of*



- Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Parry, M.L.; Canziani, O.F.; Palutikof, J.P.; van der Linden, P.J. y Hanson, C.E. (eds.)], Cambridge Univ. Press, Cambridge: 173-210.
- Leander, R.; Buishand, A.T.; van den Hurk, B.J.J.M. y de Wit, M.J.M. (2008). Estimated changes in flood quantiles of the river Meuse from resampling of regional climate model output. *J. Hydrol.*, 351 (3-4), 331–343.
- Lehner, B.; Czisch, G. y Vassolo, S. (2005). The impact of global change on the hydropower potential of Europe: A model-based analysis. *Energy Policy*, 33: 839-855.
- López-Moreno, J.L.; Goyette, S. y Beniston, M. (2009). Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees: Horizontal spatial variability and vertical gradients. *Journal of Hydrology*, 374: 384-396.
- Manzano, A. (2010). Ejemplos de modelización hidrológica del régimen medio de los ríos catalanes en escenarios futuros. En: *Agua y Cambio Climático. Diagnóstico de los impactos previstos en Cataluña*. Agencia Catalana del Agua, Generalidad de Cataluña: 127-141.
- Marcos-García, P. y Pulido-Velázquez, M. (2017). Cambio climático y planificación hidrológica: ¿es adecuado asumir un porcentaje único de reducción de aportaciones para toda la demarcación?. *Ingeniería del Agua* 21 (1): 35-52.
- MARM (2008). ORDEN ARM/2656/2008 del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica. BOE, 22 de septiembre de 2008, nº 229: 38472-38582. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.
- Martínez, E. (2010). Evaluación del impacto producido por el cambio climático sobre los recursos hídricos de varias cuencas piloto catalanas y navarras. *Tecniberia*, 26: 49-51.
- Mas-Pla et al. (2016). Recursos hidrológicos. En: *Tercer informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. Institut d'Estudis Catalans, Generalitat de Catalunya : 161-187.
- Milly, P.C.D.; Dunne, K.A. y Vecchia, A.V. (2005). Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438 (7066), 347-350.
- MIMAM (2000a). *Libro Blanco del Agua en España*. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. ISBN: 9788483201282..
- MIMAM (2000b). *Documentación Técnica del Plan Hidrológico Nacional*. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.
- Mitchell, T.D. y Hulme, M. (1999). Predicting regional climate change: living with uncertainty. *Progress in Physical Geography*, 23 (1): 57-78.
- Molina, J.L.; Pulido-Velázquez, D.; García-Aróstegui, J.L. y Pulido-Velázquez, M. (2013). Dynamic Bayesian Networks as a Decision Support tool for assessing Climate Change impacts on highly stressed groundwater systems. *Journal of Hydrology*, 479: 113–129.



CEDEX

- Ortuño, F.; Jódar, J. y Carrera, J. (2009). Canvi climàtic i recàrrega d'aquífers a Catalunya. En: *Aigua i canvi climàtic. Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya*. Agència Catalana de l'Aigua, Generalitat de Catalunya: 143-152.
- Pascual, D. et al (2014). Impacts of climate change on water resources in the Mediterranean Basin. *Hydrological Sciences Journal*. DOI: 10.1080/02626667.2014.947290.
- Pernía, J.M. y Fornés, J.M. (2008). *Cambio climático y agua subterránea. Visión para los próximos decenios*. Instituto Geológico y Minero de España.
- R Development Core Team (2015). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org> (acceso 11-08-2015).
- Rodríguez, I. (2004). *Sensibilidad de los sistemas de explotación de recursos hídricos frente al cambio climático en España*. Tesis Doctoral, Univ. Politécnica de Madrid, ETS Ingerieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Ruiz García, J.M. (1999). *Modelo distribuido para la Evaluación de Recursos Hídricos*. Ministerio de Fomento. Monografía del CEDEX, M-67, Publicación de la Tesis Doctoral. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento.
- Quintas, L. (1996). La base de datos hidrológicos HIDRO del CEDEX. *Ingeniería Civil*, 104, 117–126.
- Quiroga, S.; Garrote, L.; Iglesias, A.; Fernández-Haddad, Z.; Schlickerrieder, J.; de Lama, B.; Mosso, C. y Sánchez-Arcilla, A. (2011). The economic value of drought information for water Management under climate change: a case study in the Ebro basin. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11: 643–657. Doi:10.5194/nhess-11-643-2011.
- Salas, J.D.; Fu, C.J.; Cancelliere, A.; Dustin, D.; Bode, D.; Pineda, A. y Vincent, E. (2005). Characterizing the severity and risk of drought in the Poudre River, Colorado. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(5): 383-393.
- Samper, J. y Álvarez, D. (2005). *Evaluación de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos del río Ebro*. Oficina de Planificación Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Ebro, Dirección General del Agua, Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.
- Seattle Public Utilities (2013). *2013 Water System Plan: Our Water. Our Future. Vol 1*. <http://www.seattle.gov/util/MyServices/Water/AbouttheWaterSystem/Plans/WaterSystemPlan/index.htm> (acceso 4-05-2017).
- Shiau, J.T. y Shen, H.W. (2001). Recurrence analysis of hydrologic droughts of differing severity. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127(1): 30-40
- Sperna Weiland, F.C.; van Beek, L.P.H.; Weerts, A.H. y Bierkens, M.F.P. (2012). Extracting information from an ensemble of GCMs to reliably assess future global runoff change. *J.Hydrol.*, 412-413 (0), 66-75
- Témez, J.R. (1977). *Modelo matemático de transformación "precipitación-aportación"*. ASINEL.



- Teutschbein, C. y Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 456: 12-29.
- Trewin, B.C. (2007). *Función de las normales climatológicas en un clima cambiante*. OMM, nº 43. [Baddour, O.y Kontongomde, H. (eds.)].
- Volodin, E.M.; Dianskii, N.A. y Gusev, A.V. (2010). Simulating present-day climate with the INMCM4.0 coupled model of the atmospheric and oceanic general circulations. *Atmos. Ocean. Phys.* 46: 414-431. doi:10.1134/S000143381004002X
- Wilby, R.L.; Charles, S.P.; Zorita, E.; Timbal, B.; Whetton, P. y Mearns, L.O. (2004). *Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods*. IPCC Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Analysis (TGICA).
- Wilby, R.L.; Dawson, C.W. y Barrow, E.M. (2002). SDSM - a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environ. Modell. Softw.*, 17: 145-157.
- Yevjevich, V. (1967). *An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts*. Hydrology Paper 23, Colorado State University, Fort Collins, USA.
- Zambrano-Bigiarini, M.; Majone, B.; Bellin, A.; Bovolo, C.I.; Blenkinsop, S. y Fowler, H.J. (2011). Hydrological Impacts of Climate Change on the Ebro River Basin . *The Handbook of Environmental Chemistry, 13/2011 (The Ebro Basin)*: 47-75. Doi: 10.1007/698\_2010\_85.



**CEDEX**



### 13 GLOSARIO DE TÉRMINOS

Las definiciones de los términos de este glosario se han recopilado de diferentes documentos técnicos, nacionales e internacionales. Algunos términos se han definido de acuerdo al concepto reflejado en este trabajo, que pueden ser ligeramente diferente del habitual.

**Aerosoles.** Conjunto de partículas sólidas o líquidas presentes en el aire, de tamaño comprendido entre 0.01 y 10  $\mu\text{m}$ , que permanecen en la atmósfera durante varias horas o más. Los aerosoles pueden ser de origen natural o antropogénico. Pueden influir en el clima directamente, dispersando y absorbiendo radiación, o indirectamente, actuando como núcleos de condensación de nubes o modificando las propiedades ópticas y el período de vida de las nubes (véase efecto indirecto de los aerosoles).

**Albedo.** Fracción de radiación solar reflejada por una superficie u objeto. El albedo de los suelos puede adoptar valores altos, como en las superficies cubiertas de nieve, o bajos, como en las superficies cubiertas de vegetación y los océanos.

**Cambio climático.** Importante variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un período prolongado (normalmente decenios o incluso más). El cambio climático se puede deber a procesos naturales internos o a cambios del forzamiento externo, o bien a cambios persistentes antropogénicos en la composición de la atmósfera o en el uso de las tierras. Se debe tener en cuenta que la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC), en su Artículo 1, define 'cambio climático' como: 'un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables'. La CMCC distingue entre 'cambio climático' atribuido a actividades humanas que alteran la composición atmosférica y 'variabilidad climática' atribuida a causas naturales.

**Efecto invernadero.** Mecanismo mediante el cual los gases de efecto invernadero atrapan calor en el sistema superficie-troposfera. Los gases de efecto invernadero absorben eficazmente la radiación infrarroja térmica emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera a causa de los propios gases, y por las nubes. La radiación atmosférica se emite en todas direcciones, incluida hacia la superficie de la Tierra.

**Emisiones de gases de efecto invernadero.** En el contexto de cambio climático, se entiende por emisiones la liberación de gases de efecto invernadero y/o sus precursores y aerosoles en la atmósfera, en una zona y un período de tiempo específicos.

**Escenario climático.** Representación plausible y a menudo simplificada del clima, basada en un conjunto internamente coherente de relaciones climatológicas, que se construye para ser utilizada de forma explícita en la investigación de las consecuencias potenciales del cambio climático antropogénico, y que sirve a menudo de insumo para las simulaciones de los impactos. En este trabajo, se ha denominado escenario climático al resultado de simular el clima global con un MCG que se ha forzado con un escenario de emisiones.

**Escenario de emisiones.** Representación plausible de la evolución futura de las emisiones de sustancias que son, en potencia, radiativamente activas (por ejemplo, gases de efecto invernadero o aerosoles). En el AR5 se han definido cuatro nuevos escenarios de emisión, denominados Sendas Representativas de Concentración (RCP), que se definen por su forzamiento radiativo total para el año 2100 que varía desde 2.6 a 8.5  $\text{W/m}^2$ . Algunos de los nuevos RCP pueden contemplar los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XXI.

**ESM.** Son Modelos del Sistema Terrestre (del inglés, Earth System Models) más completos que los MCGAO ya que incluyen la representación de varios ciclos bioquímicos como aquéllos implicados en el ciclo del carbono, del azufre o del ozono.

**Estacionariedad.** En términos estadísticos, se define un proceso estocástico estacionario como aquella sucesión ordenada de variables aleatorias cuya función de distribución es invariable. En este trabajo, se ha utilizado el término estacionariedad para describir el comportamiento de aquella serie temporal invariable en el tiempo, ya que no presenta tendencias crecientes ni decrecientes significativas.



**Forzamiento radiativo.** Variación, expresada en  $W/m^2$ , de la irradiación neta (la descendente menos la ascendente) en la tropopausa. El forzamiento radiativo se calcula manteniendo fijas en un valor no perturbado todas las propiedades de la troposfera y dejando que las temperaturas estratosféricas, una vez perturbadas, se reajusten hasta alcanzar el equilibrio dinámico radiativo. Los cambios se miden en relación con el año 1750.

**Gas de efecto invernadero.** Gases integrantes de la atmósfera, de origen natural y antropogénico, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de ondas del espectro de radiación infrarroja emitido por la superficie de la Tierra, la atmósfera, y las nubes. Esta propiedad causa el efecto invernadero. El vapor de agua ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), óxido nitroso ( $N_2O$ ), metano ( $CH_4$ ), y ozono ( $O_3$ ) son los principales gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre. Además existe en la atmósfera una serie de gases de efecto invernadero totalmente producidos por el hombre, como los halocarbonos y otras sustancias que contienen cloro y bromuro, de las que se ocupa el Protocolo de Montreal. Además de los anteriores, el Protocolo de Kyoto aborda otros gases de efecto invernadero, como el hexafluoruro de azufre ( $SF_6$ ), los hidrofluorocarbonos (HFC), y los perfluorocarbonos (PFC).

**Incertidumbre.** Una expresión del grado de desconocimiento de un valor, como por ejemplo el futuro estado del sistema climático.

**Modelos Climáticos Globales o Modelos de Circulación General (MCG).** Modelos matemáticos que simulan el clima en el conjunto del planeta, aportando valores de diferentes variables climáticas en cada una de las celdas tridimensionales en las que se discretiza el globo terráqueo.

**Modelos de Circulación General Atmósfera-Océano (MCGAO).** Son aquellos MCG en los que se han acoplado los componentes atmosféricos y oceánicos, si bien se simulan la dinámica de los componentes físicos del sistema climático (atmósfera, océano, tierra y capa de hielo). En el módulo atmosférico, por ejemplo, se resuelven ecuaciones que describen la evolución a gran escala del impulso, el calor y la humedad. Se resuelven ecuaciones similares con respecto a los océanos. La resolución de la parte atmosférica de un modelo típico es de aproximadamente 250 km en línea horizontal y de alrededor de 1 km en línea vertical por encima de la capa límite. La resolución de un modelo oceánico corriente oscila aproximadamente entre 200 y 400 m en línea vertical, con una resolución horizontal de unos 100 km. Han evolucionado hacia los MCG ESM.

**Periodo de control.** Periodo utilizado para contrastar los datos observados (medidos) y simulados, así como la referencia para evaluar los cambios en periodos futuros. En este trabajo se utiliza como periodo de control el comprendido entre los años 1961-2000.

**Periodo de impacto.** Periodo de años futuros en los que se analiza el impacto del cambio climático con relación al periodo de control. En este trabajo se utilizan tres periodos de impacto: 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100.

**Proyección climática.** También llamada *proyección* en este trabajo. Es un escenario climático regionalizado, el resultado de una simulación climática producida al regionalizar los resultados de utilizar un modelo climático global forzado con un escenario de emisiones. En este trabajo, la proyección comprende simulaciones tanto futuras (periodos de impacto) como pasadas (periodo de control) y se ha denominado *proyección* porque se proyecta el resultado de una simulación global a una escala de detalle.

**Recursos hídricos.** Agua dulce existente que puede desempeñar diferentes funciones, desde ambientales a ser usada directamente por el ser humano.

**Régimen alterado.** Régimen hidrológico de un río en el que intervienen condicionantes debidos a la actividad antrópica (regulación, extracción-aporte, o cualquier acción derivada de asentamientos humanos que impacte o altere el régimen hidrológico natural).

**Régimen natural.** Régimen hidrológico de un río en el que no intervienen condicionantes debidos a la actividad antrópica (regulación, extracción-aporte, o cualquier acción derivada de asentamientos humanos que impacte o altere el régimen hidrológico natural).

**Regionalización.** Técnicas de proyección regional (“downscaling”) que trasladan los resultados obtenidos por los modelos climáticos globales a regiones de más detalle considerando las características locales, como la orografía, influencia oceánica, usos de suelo, etc.



**Simulación climática.** Representación numérica del sistema climático basada en las propiedades físicas, químicas, y biológicas de sus componentes, sus interacciones y procesos de respuesta, que incluye todas o algunas de sus propiedades conocidas. El sistema climático se puede representar por simulaciones de diferente complejidad; es decir, que para cualquier componente o combinación de componentes se puede identificar una 'jerarquía' de simulaciones, que varían en aspectos como el número de dimensiones espaciales, el punto en que los procesos físicos, químicos o biológicos se representan de forma explícita, o el nivel al que se aplican las parametrizaciones empíricas. Junto con las simulaciones generales de circulación atmosférica y oceánica y de los hielos marinos se obtiene una representación completa del sistema climático. Existe una evolución hacia simulaciones más complejas con química y biología activas. Las simulaciones climáticas se aplican, como herramienta de investigación, para estudiar y simular el clima, pero también por motivos operativos, incluidas las previsiones climáticas mensuales, estacionales e interanuales.

**Simulación hidrológica.** Representación numérica del sistema hidrológico basada en las propiedades físicas, hidrológicas y climáticas de sus componentes, sus interacciones y procesos de respuesta, que incluye todas o algunas de sus propiedades conocidas. En este trabajo, la simulación de procesos hidrológicos se ha llevado a cabo con el modelo SIMPA (Sistema Integrado para la Modelización Precipitación Aportación) del CEH.

**Sistema climático.** Sistema muy complejo que consiste en cinco componentes principales: la atmósfera, la hidrosfera, la criosfera, la superficie terrestre y la biosfera, y las interacciones entre ellas. El sistema climático evoluciona en el tiempo bajo la influencia de su propia dinámica interna debido a forzamientos externos (por ejemplo, erupciones volcánicas, variaciones solares) y forzamientos inducidos por el hombre, tales como la composición cambiante de la atmósfera y el cambio en el uso de las tierras.

**Variabilidad del clima.** La variabilidad del clima se refiere a las variaciones en el estado medio y otros datos estadísticos (como las desviaciones típicas, la ocurrencia de fenómenos extremos, etc.) del clima en todas las escalas temporales y espaciales, más allá de fenómenos meteorológicos determinados. La variabilidad se puede deber a procesos internos naturales dentro del sistema climático (variabilidad interna o natural), o a variaciones en los forzamientos externos antropogénicos (variabilidad externa). Véase también *Cambio climático*.



**CEDEX**



## 14 ABREVIACIONES

En negrita se muestran los símbolos, caracterizados por tener una unidad de medida.

En cursiva se muestran los símbolos que representan parámetros o condiciones iniciales del modelo hidrológico y de ETP.

En rojo se muestran las abreviaciones de las proyecciones utilizadas en este trabajo.

<b><math>\Delta</math></b>	Cambio, variación, incremento de la variable (%)
AEMET	Agencia Estatal de Meteorología
<i><b>Alfa (<math>\alpha</math>)</b></i>	Parámetro de descarga o coeficiente de agotamiento del acuífero en el modelo hidrológico (días <sup>-1</sup> )
<b>APN</b>	Aportación Hídrica (hm <sup>3</sup> )
AR4	Cuarto Informe de Evaluación del IPCC del año 2007
AR5	Quinto Informe de Evaluación del IPCC del año 2013
<b>C</b>	Parámetro Coeficiente de excedente en el modelo hidrológico
CCII	Cuencas Internas
CEDEX	Centro de estudios y Experimentación de Obras Públicas
CEH	Centro de Estudios Hidrográficos.
CMIP5	Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5 utilizados en el AR5
DH / DDHH	Demarcación Hidrográfica / Demarcaciones Hidrográficas.
<b>DT</b>	Desviación Típica o Estándar.
<b>EMR</b>	Error medio relativo (%).
<b>ESC</b>	Escorrentía total (mm). Incluye la superficial (ESC sup) y la subterránea (ESC sub)
ESM	Modelos MCG del Sistema Terrestre (del inglés, Earth System Models)
<b>ETP</b>	Evapotranspiración potencial (mm)
<b>ETR</b>	Evapotranspiración real (mm)
<b>F4A</b>	Proyección climática CNRM-CM5 – RCP 4.5 – Anaemet. Esta proyección es fruto de regionalizar mediante análogos el resultado de forzar el MCG CNRM-CM5 con el escenario de emisiones RCP 4.5.



<b>F8A</b>	Proyección climática CNRM-CM5 – RCP 8.5 – Anaemet. Esta proyección es fruto de regionalizar mediante análogos el resultado de forzar el MCG CNRM-CM5 con el escenario de emisiones RCP 8.5.
<b>FA</b>	Proyecciones climáticas F4A y F8A.
<b>GEI</b>	Gases de efecto invernadero
<b><math>H_{max}</math></b>	Parámetro Capacidad de almacenamiento o humedad máxima del suelo en el modelo hidrológico (mm)
<b><math>H_o (H_{i-1})</math></b>	Parámetro humedad máxima inicial del suelo en el modelo hidrológico (mm)
<b>HMR</b>	Humedad del suelo relativa a la humedad máxima (%).
<b>HMS</b>	Humedad del suelo (mm).
<b><math>I_{max}</math></b>	Parámetro Capacidad de infiltración o de recarga máxima del acuífero en el modelo hidrológico (mm/mes)
<b>IPCC</b>	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
<b>IPH</b>	Instrucción de Planificación Hidrológica
<b>Kuso</b>	Coefficientes de cultivo para obtener la ETP del cultivo real
<b>LBAE</b>	Libro Blanco del Agua en España
<b>M4A</b>	Proyección climática MPI.ESM.MR – RCP 4.5 – Anaemet. Esta proyección es fruto de regionalizar mediante análogos el resultado de forzar el MCG MPI.ESM.MR con el escenario de emisiones RCP 4.5.
<b>M8A</b>	Proyección climática MPI.ESM.MR – RCP 8.5 – Anaemet. Esta proyección es fruto de regionalizar mediante análogos el resultado de forzar el MCG MPI.ESM.MR con el escenario de emisiones RCP 8.5.
<b>MA</b>	Proyecciones climáticas M4A y M8A.
<b>MCG</b>	Modelo de Circulación General o Modelo Climático Global
<b>MCGAO</b>	Modelo de Circulación General acoplado Atmósfera-Océano
<b>N4A</b>	Proyección climática inmcm4 – RCP 4.5 – Anaemet. Esta proyección es fruto de regionalizar mediante análogos el resultado de forzar el MCG inmcm4 con el escenario de emisiones RCP 4.5.
<b>N8A</b>	Proyección climática inmcm4 – RCP 8.5 – Anaemet. Esta proyección es fruto de regionalizar mediante análogos el resultado de forzar el MCG inmcm4 con el escenario de emisiones RCP 8.5.



<b>NA</b>	Proyecciones climáticas N4A y N8A.
<b>OECC</b>	Oficina Española del Cambio Climático
<b>PC</b>	Periodo de control 1961-2000 que se utiliza para comparar los valores simulados con los valores observados y para ser la situación desde la que se evalúa el impacto del cambio climático. Abarca desde octubre de 1961 a septiembre de 2000
<b>PF</b>	Periodo futuro donde hay valores climáticos simulados. Abarca desde el año 2006 al 2100
<b>PI</b>	Cada uno de los 3 periodos de impacto de 30 años en los que se evalúa el impacto del cambio climático: PI1, PI2 y PI3.
<b>PI1</b>	El PI 2010-2040, que abarca desde octubre de 2010 a septiembre 2040
<b>PI2</b>	El PI 2040-2070, que abarca desde octubre de 2040 a septiembre 2070
<b>PI3</b>	El PI 2070-2100, que abarca desde octubre de 2070 a septiembre 2100
<b>PRE</b>	Precipitación (mm)
<b>Q4A</b>	Proyección climática bcc-csm1-1 – RCP 4.5 – Anaemet. Esta proyección es fruto de regionalizar mediante análogos el resultado de forzar el MCG bcc-csm1-1 con el escenario de emisiones RCP 4.5.
<b>Q8A</b>	Proyección climática bcc-csm1-1 – RCP 8.5 – Anaemet. Esta proyección es fruto de regionalizar mediante análogos el resultado de forzar el MCG bcc-csm1-1 con el escenario de emisiones RCP 8.5.
<b>QA</b>	Proyecciones climáticas Q4A y Q8A.
<b>R4A</b>	Proyección climática MIROC.ESM – RCP 4.5 – Anaemet. Esta proyección es fruto de regionalizar mediante análogos el resultado de forzar el MCG MIROC.ESM con el escenario de emisiones RCP 4.5.
<b>R8A</b>	Proyección climática MIROC.ESM – RCP 8.5 – Anaemet. Esta proyección es fruto de regionalizar mediante análogos el resultado de forzar el MCG MIROC.ESM con el escenario de emisiones RCP 8.5.
<b>RA</b>	Proyecciones climáticas R4A y R8A.
<b>RCP</b>	Sendas Representativas de Concentración: escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero considerados en el AR5
<b>REC</b>	Recarga de los acuíferos (mm)



RRHH	Recursos Hídricos
SIMPA	Sistema Integrado para la Modelización Precipitación Aportación
SRES	Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones de GEI (Special Report on Emission Scenarios). Por extensión, cada uno de los Escenarios contemplados en dicho Informe.
<i>T</i>	Periodo de retorno (años)
TAR	Tercer Informe de Evaluación del IPCC el año 2001
TEM	Temperatura media (°C)
TMN	Temperatura mínima. Si es mensual, es la media de las temperaturas mínimas diarias (°C)
TMX	Temperatura máxima. Si es mensual, es la media de las temperaturas máximas diarias (°C)
U4A	Proyección climática MRI.CGCM3 – RCP 4.5 – Anaemet. Esta proyección es fruto de regionalizar mediante análogos el resultado de forzar el MCG MRI.CGCM3 con el escenario de emisiones RCP 4.5.
U8A	Proyección climática MRI.CGCM3 – RCP 8.5 – Anaemet. Esta proyección es fruto de regionalizar mediante análogos el resultado de forzar el MCG MRI.CGCM3 con el escenario de emisiones RCP 8.5.
UA	Proyecciones climáticas U4A y U8A.
$V_o (V_{i-1})$	Parámetro capacidad máxima inicial del acuífero en el modelo hidrológico (mm)



## 15 ANEXOS

Este informe incluye anexos que se adjuntan exclusivamente en formato digital en el DVD que se acompaña.

### 15.1 ANEXO 1. TENDENCIAS Y CAMBIO DE ESTADÍSTICOS PARA CADA PROYECCIÓN.

En este anexo se presenta un conjunto de figuras que muestran una serie de gráficos con la evolución anual de los valores de las principales variables hidrológicas. Cada figura consta de tres gráficos que representan:

- La evolución anual de los valores absolutos de cada una de las principales variables hidrológicas (PRE, ETP, ETR, REC y AES).
- Diagramas de cajas del PC y de cada uno de los PI.
- La evolución anual de los cambios de cada variable durante cada año del PF respecto a la media del PC.

### 15.2 ANEXO 2. TENDENCIAS PARA EL CONJUNTO DE PROYECCIONES.

En este anexo se presentan las gráficas de la tendencia del  $\Delta$  (%) de PRE, ETP, ETR, REC y ESC del año 2010 al 2099 para los RCP 4.5 y 8.5 en cada ámbito territorial (DDHH y España).

### 15.3 ANEXO 3. ESTADÍSTICOS DE VALORES ABSOLUTOS.

En este anexo se muestran los estadísticos de los valores absolutos anuales y estacionales obtenidos para cada variable hidrológica, cada DH, cada proyección y cada periodo:

- Media: valor medio para el periodo.
- DS (DT): desviación típica o estándar.
- CS: coeficiente de sesgo.
- Q1: percentil 25.
- Q2: percentil 50 o mediana.
- Q3: percentil 75.
- IQR: rango intercuartílico.
- Máx: valor máximo.
- Mín: valor mínimo.

### 15.4 ANEXO 4. GRÁFICOS DE CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE SEQUÍAS

En este anexo se incluyen los gráficos que representan los resultados de la evaluación del impacto del cambio climático en el régimen de sequías en los diferentes ámbitos territoriales de España.



En cada gráfica se muestra el cambio en la frecuencia de sequías de 2 o 5 años de duración, según cada una de las proyecciones estudiadas en este trabajo, tanto para el RCP 4.5 como para el RCP 8.5. El cambio se ilustra mediante curvas que expresan la relación entre el periodo de retorno de sequías y el mínimo déficit medio anual para cada uno de los tres periodos de impacto futuros frente al periodo de control.

### **15.5 ANEXO 5. ATLAS CARTOGRÁFICO.**

En este anexo se presenta el atlas cartográfico, en respuesta a la tarea requerida en la Encomienda fruto de este trabajo, denominada: “Elaboración del atlas cartográfico de resultados mediante la composición de los mapas medios mensuales de las variables consideradas”.

Los objetivos del atlas son suministrar los mapas que mejor resumen los resultados del estudio y facilitar su consulta y análisis.

Por ello, el atlas contiene una selección de los mapas más ilustrativos, habida cuenta del gran número de mapas generados en este trabajo y que la mayoría son básicamente mapas de trabajo.

Los mapas están organizados en una base de datos geográfica y se ha desarrollado una aplicación informática que facilita su visualización, consulta y análisis. La aplicación se ha desarrollado en el entorno del sistema de información geográfica (SIG) QGIS. Se ha elegido QGIS al ser éste un SIG tipo ráster, acorde con los mapas GRASS, y ser gratuito y de libre difusión, de manera que puede utilizarse fácilmente por cualquier tipo de interesado sin precisarse requerimientos económicos.