

## Cambio climático en Galicia en el siglo XXI: Tendencias y variabilidad en temperaturas y precipitaciones

V. ÁLVAREZ<sup>1</sup>, J. J. TABOADA<sup>1</sup> y M. N. LORENZO<sup>2</sup>

MeteoGalicia. Xunta de Galicia. Santiago de Compostela, Spain.

[victor.alvarez@meteogalicia.es](mailto:victor.alvarez@meteogalicia.es).

EPhysLab, Facultade de Ciencias. Universidade de Vigo. Campus As Lagoas s/n, Ourense, Spain

### RESUMEN

En la actualidad la comunidad científica internacional da por seguro que en las últimas décadas se está produciendo un cambio climático ocasionado por las actividades humanas, esencialmente a través del aumento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera y la transformación en los usos del suelo. A nivel local sin embargo este cambio puede tener diferentes manifestaciones y consecuencias. El ámbito geográfico de este trabajo se ceñirá al noroeste de la península Ibérica, donde anteriormente se han estudiado las tendencias actuales constatando que las temperaturas en promedio tienden a subir, particularmente en primavera y verano mientras que las precipitaciones no presentan una tendencia definida, aunque sí se aprecian cambios intra-anales, con más lluvia en otoño y menos en invierno. El objetivo del presente trabajo será estudiar los cambios y tendencias que puedan tener lugar en el futuro las variables de temperatura y precipitación. Para ello se han utilizado los resultados del proyecto ENSEMBLES en el que se ha ejecutado un conjunto de modelos de previsión climática regional para el futuro. Los resultados indican que la tendencia hacia el incremento de temperatura se mantendrá y que será particularmente notable en verano. Las previsiones de lluvia para el futuro son algo diferentes de las observadas en la actualidad. En este caso los modelos están pronosticando en general primaveras y veranos más secos, lo que hasta ahora no puede ser corroborado con las series de datos. Sin embargo las series actuales sí parecen sugerir un incremento de lluvia en el otoño que solamente algún modelo puntual pronostica. Tampoco la tendencia actual hacia inviernos más secos se ve corroborada por los pronósticos de los modelos para finales del siglo XXI.

*Palabras Clave:* Temperatura, precipitación, modelos de circulación general, modelos regionales.

### 1. Introducción

En las últimas décadas numerosos trabajos han estudiado el sistema climático a nivel mundial, su variabilidad natural y las tendencias asociadas a las actividades humanas. Desde mediados del s. XX se vienen advirtiendo desviaciones en el comportamiento del clima que parecen apoyar la hipótesis de una componente

antropogénica en el cambio climático. Estas desviaciones parecen afectar en particular a las temperaturas y a la distribución de las precipitaciones. Actualmente, parece claro que el incremento de la concentración de gases de efecto invernadero, producido por la actividad industrial, ganadera y forestal entre otras, está introduciendo modificaciones en la evolución del clima que van más allá de las tendencias previas existentes antes de la

Revolución Industrial. El consenso científico, obtenido a través de los diferentes informes del IPCC (Intergovernmental Panel for Climate Change), cuatro hasta la fecha (IPCC 1990; 1996; 2001; 2007) nos informa de que, en términos globales, las temperaturas han subido en las últimas décadas y continuarán haciéndolo en el futuro, debido esencialmente al aumento de gases de efecto invernadero en la atmósfera (IPCC, 2007). Esta conclusión ha llevado a los científicos a definir una nueva época geológica, denominada Antropoceno (Falkowsky, et al., 2000).

Las estimaciones del IPCC nos informan de que, en promedio, las temperaturas han subido  $0.8^{\circ}\text{C}$  sobre el nivel preindustrial durante el último siglo, siendo particularmente notable esta subida a partir de la década de los 70. Sin embargo, este incremento esconde una cierta variabilidad. Así, a nivel europeo las temperaturas parecen haber subido algo más, en torno a  $1^{\circ}\text{C}$ , siendo esta subida más notable en primavera y verano (Castro et al. 2005, EEA 2008). Si ceñimos ese estudio a la región de Galicia-norte de Portugal, es decir el noroeste de la península Ibérica, vemos que ese incremento es incluso superior, ya que a nivel anual la tendencia en las temperaturas de las últimas 3 décadas se sitúa alrededor de los  $0.5^{\circ}\text{C}$  por década (Gómez-Gesteira et al., 2011).

En cuanto a las lluvias, éstas presentan, a nivel general, un comportamiento más variable. Tomando las conclusiones del último informe del IPCC (IPCC, 2007) vemos como a nivel europeo se registran incrementos de lluvia en la zona norte de Europa y tendencia a decrecer las precipitaciones en el área Mediterránea. Para la península Ibérica en concreto los resultados no son concluyentes, en parte debido a los complejos patrones de precipitación en el área (Rodríguez-Puebla et al, 1998).

En cualquier caso un trabajo reciente que ha tenido en cuenta 10 estaciones con datos de calidad entre 1946 y 1998 distribuidas por toda la península Ibérica no ha encontrado tendencias significativas (Klein-Tank et al. 2002). En el caso del noroeste de la península Ibérica los estudios sobre las series de datos de precipitación (Gómez-Gesteira et al., 2011) nos indican que, a nivel anual, no se observan tendencias estadísticamente significativas, aunque si estacionalmente, de forma que las lluvias tienden a aumentar en otoño y a disminuir en invierno. Galicia es una región muy dependiente del ciclo de lluvias anual debido a que su suelo retiene poca agua y por tanto es una región sujeta a la posibilidad de sequías estacionales que podrían incrementarse en un futuro en función de los cambios en las temperaturas y las lluvias.

El objetivo del presente trabajo será examinar la permanencia o no de estas tendencias en el futuro. Para ello se hará uso de modelos climáticos a nivel regional, concretamente de los resultados obtenidos en el proyecto ENSEMBLES, en el que se ejecutó una serie de modelos climáticos a nivel regional, conducidos por diferentes modelos climáticos a nivel global.

Los modelos climáticos globales son una representación matemática de los procesos que tienen lugar entre los componentes de un sistema climático. Se basan en leyes físicas como la conservación del momento o la energía, constituyendo un sistema de ecuaciones diferenciales, complejo y no lineal, que se debe resolver de forma aproximada usando técnicas numéricas. Estas técnicas implican dividir tanto la atmósfera como el océano en celdas tridimensionales dentro de las que se resuelven las ecuaciones diferenciales antes mencionadas. La evolución temporal de las variables resueltas es muy sensible al paso temporal empleado para integrarlas, por lo que si

se modifica el tamaño de las celdas, tendremos también que modificar el paso temporal en el mismo sentido. De esta forma, si se pretende aumentar la resolución espacial de un GCM, se debe disminuir también el paso temporal, lo que se traduce en un incremento enorme en el coste computacional. Un tamaño típico para las dimensiones horizontales de las celdas de un GCM es  $2.5^\circ$  (alrededor de 250 km en latitudes medias). El tamaño de celda de los GCM hace que muchos procesos físicos (de menor resolución) no puedan resolverse de forma explícita, por lo que es necesario introducirlos de manera aproximada empleando parametrizaciones. Para aumentar la resolución de los modelos climáticos globales, se anidan a un modelo climático regional (RCM) de mayor resolución en una parte de la malla del GCM. Al reducir el área de interés se hace que el coste computacional sea más asumible. El RCM toma como condiciones de contorno los valores del GCM en la frontera de la malla anidada. Este hecho conlleva algunos problemas adicionales al tener que establecer una franja de relajación entre la malla del GCM y la frontera del RCM, forzando las ecuaciones de este último a converger suavemente hacia las del GCM en los bordes. Se considera que

un modelo es regional cuando su resolución espacial en la horizontal está por debajo de los 50 km. En la actualidad se pueden ejecutar RCMs con resoluciones no superiores a los 20 km.

En este trabajo se considerarán para el análisis diferentes RCM's anidados a diferentes GCM's. Esto nos permitirá incrementar el rango de valores posibles para las diferentes variables. Debemos recordar que los resultados de los modelos van a depender de los modelos utilizados es decir de las parametrizaciones que se han empleado para simular aquellos procesos que se encuentran por debajo de la escala espacial y temporal del modelo. Se estudiarán tanto los promedios de temperatura media y lluvia como su variabilidad en cada una de las estaciones del año para las últimas décadas del presente siglo (2065-2095) y se comparará con los valores de las últimas décadas del siglo pasado (1965-1995). Para el estudio estacional los meses se agruparon de acuerdo con las estaciones climatológicas estándar: invierno (DEF, diciembre, enero, febrero), primavera (MAM, marzo, abril, mayo), verano (JJA, junio, julio, agosto) y otoño (SON, septiembre, octubre, noviembre).

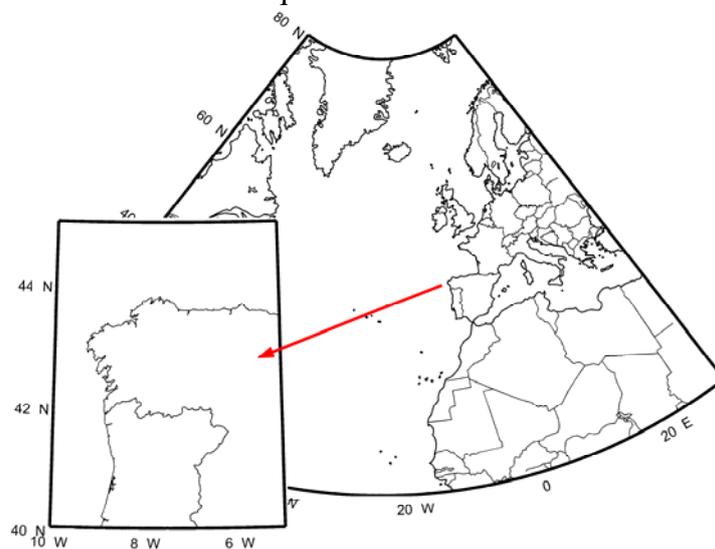


FIG 1. Ubicación geográfica del área de estudio.

## 2. Área de Estudio

La Euroregión Galicia-Norte de Portugal se sitúa en el noroeste de la península Ibérica, por lo que se encuentra en las latitudes medias del hemisferio norte, sometida por lo tanto a la circulación predominantemente del oeste (figura 1). Su climatología está dominada en primer lugar por esta circulación que hace que la influencia marítima sea muy notable. En cuanto a los centros de acción se debe tener en cuenta que en invierno, con aire frío, las borrascas tienden a moverse más hacia el sur, afectando por lo tanto al área de estudio, mientras que en verano el aumento de radiación solar hace que el aire frío quede más confinado en latitudes polares, por lo que el anticiclón semipermanente de Azores asciende, tomando la región en su radio de acción y tendiendo por tanto a estabilizar la atmósfera. Por lo tanto en invierno la llegada de frentes cálidos y sobre todo fríos asociados a las borrascas Atlánticas deja abundantes lluvias y vientos predominantemente del sudoeste, mientras que en verano la situación es la contraria, con vientos de nordeste y tiempo predominantemente seco. En las estaciones de transición, otoño y primavera respectivamente, la meteorología es algo más cambiante.

La orografía juega también un papel muy determinante para entender el clima en la Euroregión. Así, la presencia de las Rías Bajas con orientación sudoeste y dos cadenas montañosas, una en el centro de la Comunidad y la otra en el este, dispuestas ambas en orientación Norte-Sur, hacen que la influencia de los diferentes centros de acción sea bastante heterogénea. En general podemos destacar que los vientos predominantes del sudoeste en invierno, que coinciden con la orientación de las Rías, hacen

que el cuadrante suroeste de Galicia dentro de la Euroregión tenga las mayores lluvias acumuladas durante el año con temperaturas relativamente suaves. La zona interior es algo más seca y ahí las temperaturas muestran características más continentales, con inviernos húmedos, pero veranos cálidos, particularmente en el sureste de la Comunidad, con temperaturas máximas en verano en torno a los 30°C. El área más puramente atlántica de la Euro-región se sitúa en el litoral norte, donde los sistemas frontales del invierno no tienen tanta influencia como en la costa sur, pero que sin embargo debido al predominio del viento nordeste que acerca humedad y masas de aire más frío del Cantábrico presenta mayores posibilidades de lluvia y menores temperaturas en verano.

## 3. Datos utilizados

Para llevar a cabo el presente trabajo se han utilizado los resultados de los modelos del proyecto ENSEMBLES uno de cuyos objetivos era desarrollar un conjunto de predicciones de cambio climático para el futuro teniendo en cuenta los últimos desarrollos de modelos tanto de circulación general (GCM's) como modelos regionales (RCM's).

De todas las variables calculadas por los modelos se han utilizado los resultados de la temperatura media superficial y precipitación. Todas las ejecuciones de estos modelos se realizaron bajo el escenario A1B de cambio climático. Los escenarios de emisiones, o más propiamente escenarios socio-económicos de emisión, son suposiciones acerca de la evolución de los forzamientos climáticos en el futuro, considerando distintas hipótesis. En particular estas hipótesis se traducen en suposiciones sobre la evolución de distintos factores socio-económicos que

en última instancia afectan a las emisiones de gases de efecto invernadero. Estas hipótesis se agrupan en cuatro familias denominadas A1, A2, B1 y B2. Los modelos utilizados en el presente trabajo han optado por el A1B, también denominado intermedio. Este escenario supone un crecimiento económico muy rápido, con una población mundial que alcanza un máximo a mediados de siglo y que después desciende, una rápida disponibilidad de tecnologías más eficientes y con menor consumo energético y además una rápida convergencia entre distintas regiones del mundo, facilitada por las mejores comunicaciones debidas a la extensión de las redes. La política energética supuesta en este escenario adopta un equilibrio entre todos los tipos de fuentes de energía, sin depender demasiado de una en particular y supone que la razón de mejora es similar en las tecnologías de suministro de las mismas.

Para el desarrollo del trabajo se han dividido los resultados del proyecto ENSEMBLES en dos subconjuntos. Por un lado hemos considerado tres modelos regionales (RCM's) conducidos por un modelo global (GCM) y por otro hemos considerado tres modelos de circulación general diferentes forzando un solo modelo regional. De esta forma, tendremos un conjunto de 5 casos, puesto que una de las combinaciones GCM-RCM será común a los dos subconjuntos. En la tabla I se indican las combinaciones escogidas GCM-RCM. El objetivo de realizar el estudio en estos dos subconjuntos estriba en estudiar la importancia relativa de los GCM's frente a los RCM's de esta forma podremos ver si a la hora de obtener resultados es más determinante el modelo de circulación general empleado o, por el contrario, el modelo regional juega un papel decisivo en los

resultados. Los modelos de circulación general utilizados en el proyecto ENSEMBLES son los mismos que se utilizaron para el 4º informe de evaluación del IPCC. Evidentemente cada modelo obtiene resultados ligeramente diferentes y en función del área geográfica pueden representar el clima actual con un mayor o menor grado de certeza. Atendiendo a estudios previos (van Ulden and van Oldenborgh, 2006) decidimos utilizar como GCM para conducir los diferentes RCM's el ECHAM5, desarrollado por el Instituto Max Planck de Meteorología de Hamburgo, cuyos resultados en las latitudes medias del Atlántico norte son muy destacables. Una vez escogido el GCM la elección del RCM vino marcada por las posibilidades del proyecto, ya que no se ejecutaron todas las combinaciones posibles de GCM-RCM. En cuanto a la ejecución del mismo RCM con tres diferentes GCM, el RCM escogido fue el RCA, desarrollado en el Rossby Center del centro meteorológico de Suecia. Uno de los GCM escogidos fue el ECHAM5, con lo que una de las combinaciones será repetida, mientras que los otros dos GCM's utilizados fueron el modelo del Hadley Center inglés de alta resolución HADCM3 y el desarrollado por el instituto Bjerknes de Noruega. Una vez más, la elección de estos tres GCM estuvo vinculada a la elección del RCM, puesto que eran las tres únicas posibilidades. En cuanto al acierto relativo que el HADCM3 y el BCM tienen en la simulación del clima actual en nuestra área, cabe decir que el modelo desarrollado por el Hadley Center presenta muy buen comportamiento en nuestra área, mientras que el BCM daría un comportamiento algo peor, pero en todo caso aceptable dentro de los parámetros propuestos por van Ulden and van Oldenborgh.

<b>Un GCM - Diferentes RCM</b>	<b>Diferentes GCM – Un RCM</b>
ECHAM5 - RCA	ECHAM5 -RCA
ECHAM5 -REMO	BCM-RCA
ECHAM5 -HIRHAM	HADCM3-RCA

TABLA 1. Combinaciones de diferentes GCM's y RCM's utilizadas en el presente trabajo

Tal y como hemos dicho, los datos que se analizarán para el futuro serán las medias mensuales de temperatura superficial (TAS) y el flujo de precipitación para el periodo 2065 a 2095. A fin de tener una base de comparación de las ejecuciones futuras con el estado actual se han escogido los resultados de cada pareja GCM-RCM para las tres décadas que van de 1965 a 1995. Se ha extraído el área del dominio de ejecución de cada RCM perteneciente a la Euro-región Galicia-Norte de Portugal: [11° W 4° W] y [40° N 44° N].

Las estimaciones para el comportamiento futuro del clima se hacen en base a las diferencias de las medias de la serie temporal del futuro (periodo 2065-2095) respecto a las de la serie del pasado (periodo 1965-1995). Estas medias nos permiten obtener mapas de diferencias del futuro respecto al pasado, que a su vez nos dan una idea de la variabilidad espacial de las previsiones. En este mismo sentido se tratará de estimar cómo evoluciona la variabilidad temporal comparando las desviaciones típicas de la serie temporal futura respecto a las del pasado. Las medias se hacen tanto sobre el periodo anual como sobre el periodo estacional.

#### 4. Resultados

En la siguiente sección vamos a presentar los resultados obtenidos para las variables de temperatura y precipitación. Los estudios de temperatura han revelado que gran parte de las variaciones en los pronósticos para el periodo 2065-2095 de temperatura son forzadas por el uso de

diferentes modelos de circulación general usados como condiciones de contorno de los modelos regionales. Para un mismo GCM, los cambios observados entre los diferentes modelos regionales son meramente anecdóticos en un área reducida como la de nuestro estudio. No obstante, esto cambia en el caso de la precipitación, donde además de importar el GCM usado como condición de frontera también se observan cambios en los resultados de los distintos RCM's. Esto refleja la alta dependencia que la precipitación tiene de las condiciones locales del área de estudio (orografía, parametrizaciones de convección...), dependencia que no se observó en la temperatura más influenciada por las condiciones de escala sinóptica.

A continuación se presentan los resultados obtenidos tanto para temperatura como para precipitación en escala anual y estacional.

#### 4.1 Temperatura

##### 4.1.1 Anual

En la figura 2 se presentan los mapas de las diferencias de temperatura media, correspondientes a cada uno de los pares GCM-RCM. La columna de la izquierda corresponde al caso de un único modelo global, ECHAM5, con distintos RCM anidados y la columna de la derecha al caso de un solo modelo regional, RCA, forzado por distintos GCM. Estos mapas se han obtenido restando al campo de temperaturas medias anuales del futuro (2065-2095), las temperaturas medias anuales del periodo 1965-1995. La previsión de aumento de temperatura es más uniforme entre los mapas que tienen a

ECHAM5 como modelo global, que entre los que comparten el mismo RCM. Los primeros predicen aumentos para la franja costera de entre 2 y algo menos de 3 °C, mientras que para el interior el aumento de temperatura supera los 3 °C aunque el modelo ECHAM5-HIRHAM difiere un poco de los otros dos, pronosticando aumentos de menor intensidad, tanto en el interior como en la costa. Los modelos que utilizan RCA como modelo regional son menos unánimes puesto que predicen aumentos de temperatura para el interior

que van desde los 2 °C predichos por el modelo BCM-RCA a los 3 - 3.5 °C del ECHAM5-RCA pasando por los 2.5 - 3 °C del HadCM3-RCA. Para la franja costera se mantienen las diferencias, siendo el modelo BMC-RCA el que menos aumento pronostica. De todas formas, y con carácter general es necesario recordar que el modelo BMC como modelo de circulación general es el que peor compara con el clima actual para nuestras latitudes, de los GCM's utilizados en este estudio.

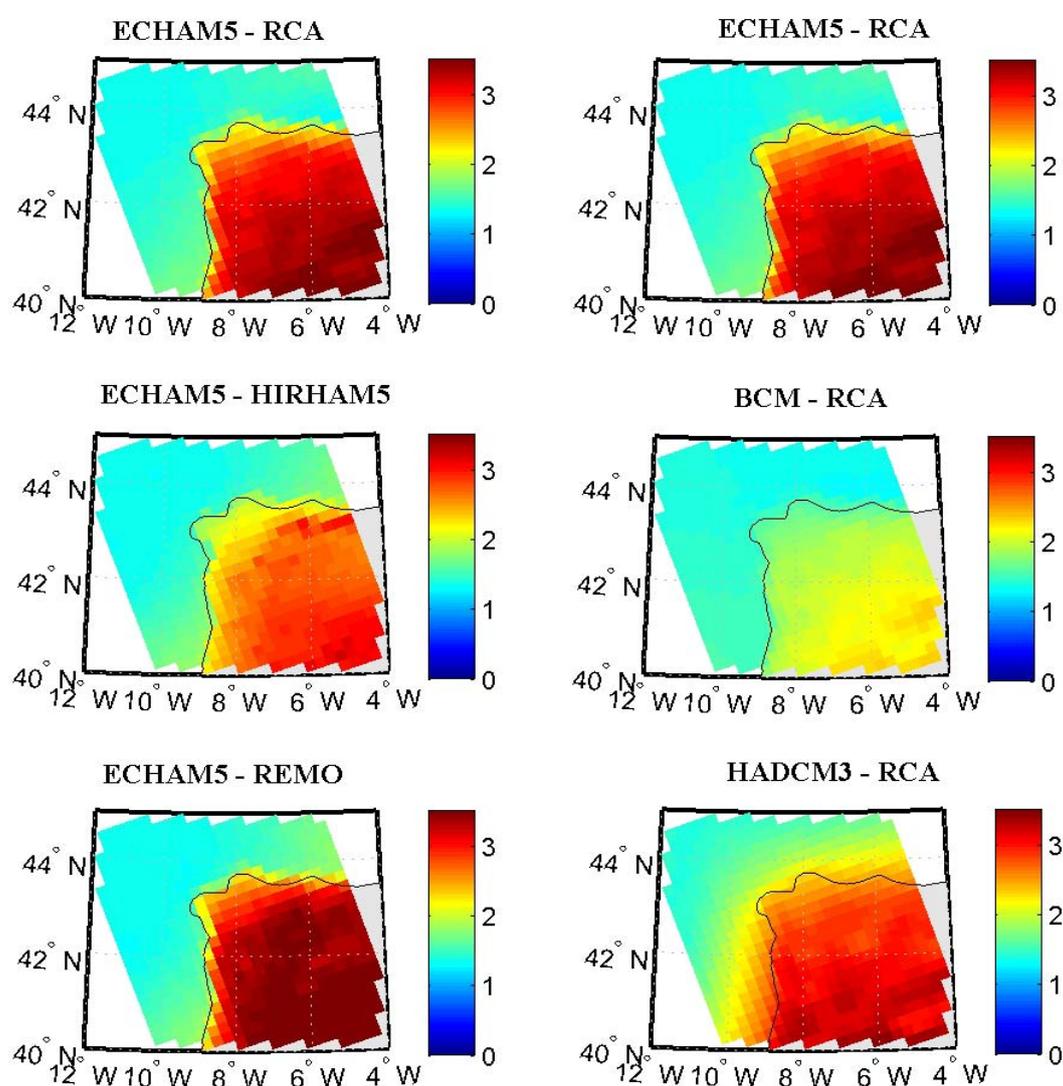


FIG 2. Aumento medio previsto (diferencia de TAS medias) para la serie anual.

4.1 Temperatura  
4.1.1 Anual

En la figura 2 se presentan los mapas de las diferencias de temperatura media, correspondientes a cada uno de los pares GCM-RCM. La columna de la

izquierda corresponde al caso de un único modelo global, ECHAM5, con distintos RCM anidados y la columna de la derecha al caso de un solo modelo regional, RCA, forzado por distintos GCM. Estos mapas se han obtenido restando al campo de temperaturas medias anuales del futuro (2065-2095), las temperaturas medias anuales del periodo 1965-1995. La previsión de aumento de temperatura es más uniforme entre los mapas que tienen a ECHAM5 como modelo global, que entre los que comparten el mismo RCM. Los primeros predicen aumentos para la franja costera de entre 2 y algo menos de 3 °C, mientras que para el interior el aumento de temperatura supera los 3 °C aunque el modelo ECHAM5-HIRHAM difiere un poco de los otros dos, pronosticando aumentos de menor intensidad, tanto en el interior como en la costa. Los modelos que utilizan RCA como modelo regional son menos unánimes puesto que predicen aumentos de temperatura para el interior que van desde los 2 °C predichos por el modelo BCM-RCA a los 3 - 3.5 °C del ECHAM5-RCA pasando por los 2.5 - 3 °C del HadCM3-RCA. Para la franja costera se mantienen las diferencias, siendo el modelo BMC-RCA el que menos aumento pronostica. De todas formas, y con carácter general es necesario recordar que el modelo BMC como modelo de circulación general es el que peor compara con el clima actual para nuestras latitudes, de los GCM's utilizados en este estudio.

En general, de las cinco ejecuciones mostradas, la que mayores aumentos predice es ECHAM5-REMO, mientras que BCM-RCA da los menores incrementos. En cuanto a la variabilidad espacial todos los modelos presentan una franja de transición bien visible entre la costa y el interior, dando aumentos de temperatura más acusados en la zona interior.

Además de detenernos en el análisis de los valores promedio es necesario también tener en cuenta la variabilidad, puesto que los extremos también son muy significativos a la hora de entender la deriva del clima. En este caso en la figura 3, donde se muestra la diferencia de las desviaciones estándar de TAS para la serie anual, podemos ver que existe una tendencia a que la variabilidad aumente hacia el futuro. Los modelos predicen que la variabilidad aumenta respecto a la serie de pasado, siendo ECHAM5-RCA y ECHAM5-REMO los que predicen mayor diferencia, mientras que en BMC-RCA y ECHAM5-HIRHAM5 los aumentos son más modestos. Esto quiere decir que los extremos de temperatura podrían tener aumentos mayores a los observados en el análisis de los valores medios. Además es importante observar que donde se producen los mayores aumentos de variabilidad es en la zona interior, donde hemos visto que también pueden producirse los mayores aumentos de temperatura en valor absoluto (ver figura 2). Esto podría ser particularmente peligroso en la estación veraniega por el previsible aumento de olas de calor debido a los aumentos en los extremos.

#### 4.1.2 Invierno

En la figura 4 se pueden ver las diferencias entre las temperaturas medias de invierno de los dos períodos (1965-1995 y 2065-2095) para las cinco combinaciones GCM-RCM escogidas. En general podemos decir que el aumento de la temperatura media será poco acusado durante la estación invernal. Las combinaciones que sugieren un cambio mayor serían las que tienen a ECHAM5 como modelo de circulación general, además de la combinación HADCM3-RCA. En estos casos, el incremento en promedio estaría alrededor de 2 °C, con valores algo más altos en el interior, mientras

que en la combinación BCM-RCA estas diferencias quedarían alrededor de 1.5 °C tanto en la costa como en el interior. Por tanto, con carácter general,

deberíamos esperar un incremento en las temperaturas medias del invierno cercano o incluso algo superior a los 2 °C.

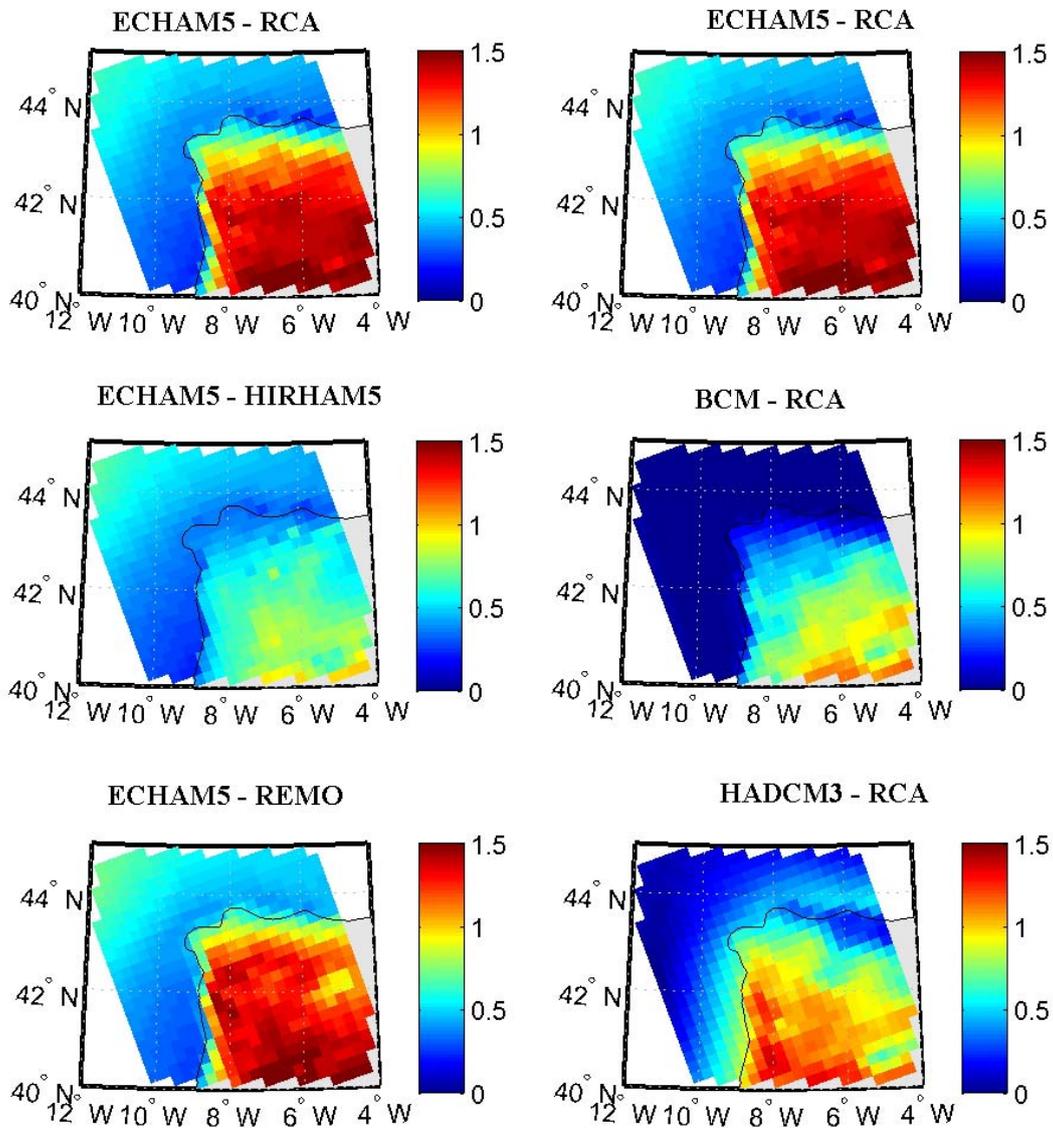


FIG 3. Diferencia de las desviaciones estándar de TAS para la serie anual.

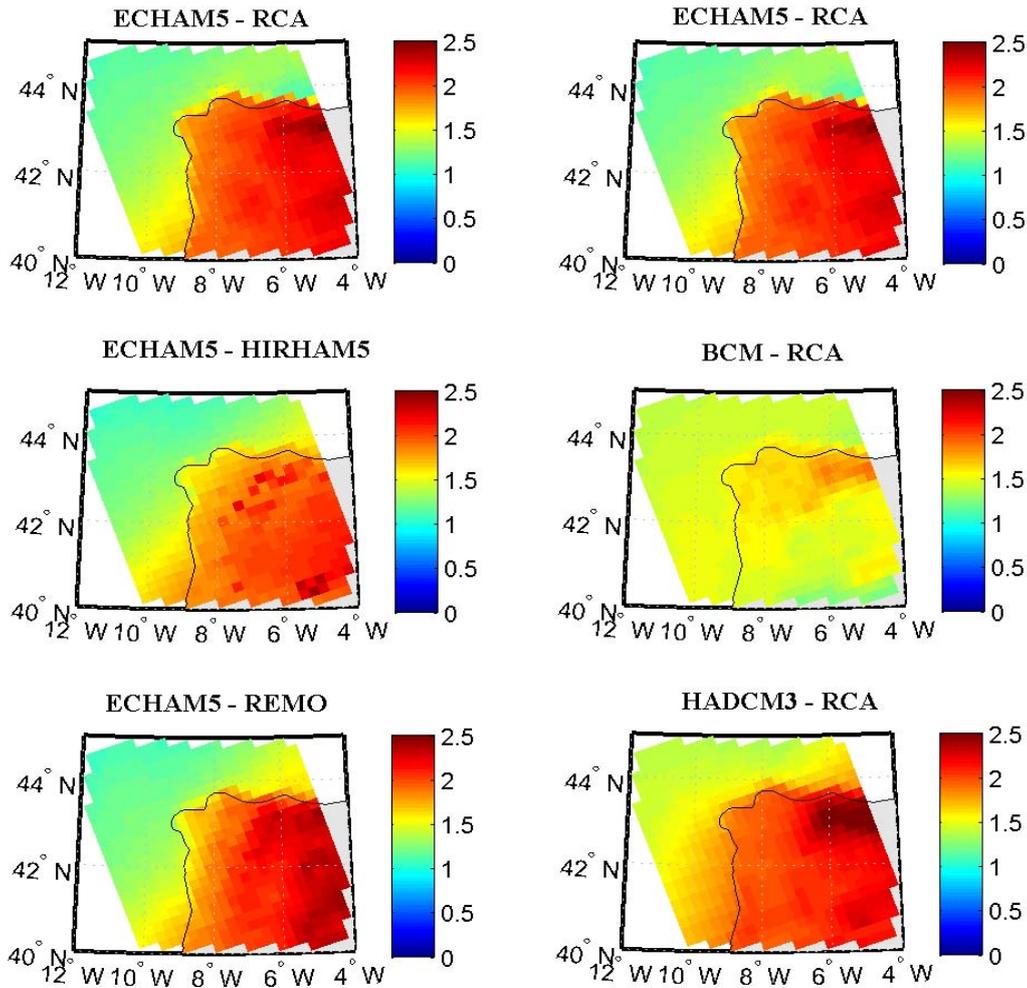


FIG 4. Aumento medio previsto (diferencia de TAS medias) para la serie temporal de invierno.

#### 4.1.3 Primavera

En el análisis de los mapas de diferencias de temperatura media para la primavera (figura 5) se observa que las tendencias son similares a las del invierno. En este caso, la combinación GCM-RCM que nos da una mayor diferencia de temperaturas entre el pasado y el futuro es la combinación ECHAM5-REMO, seguida de ECHAM5-HIRHAM5, que incluso lo supera en áreas de la cordillera Cantábrica. El modelo BCM, en combinación con el modelo regional RCA, es el que presenta valores más

bajos, tal y como ocurría en el invierno. En este último caso las máximas diferencias apenas superan los 2 °C tanto en la costa como en el interior. Es interesante ver cómo durante la primavera el uso de diferentes RCMs provoca cambios apreciables, aun siendo conducidos por el mismo GCM. Así por ejemplo, la combinación ECHAM5-RCA nos da aumentos de temperatura sensiblemente inferiores a las combinaciones ECHAM5-REMO y ECHAM5-HIRHAM5.

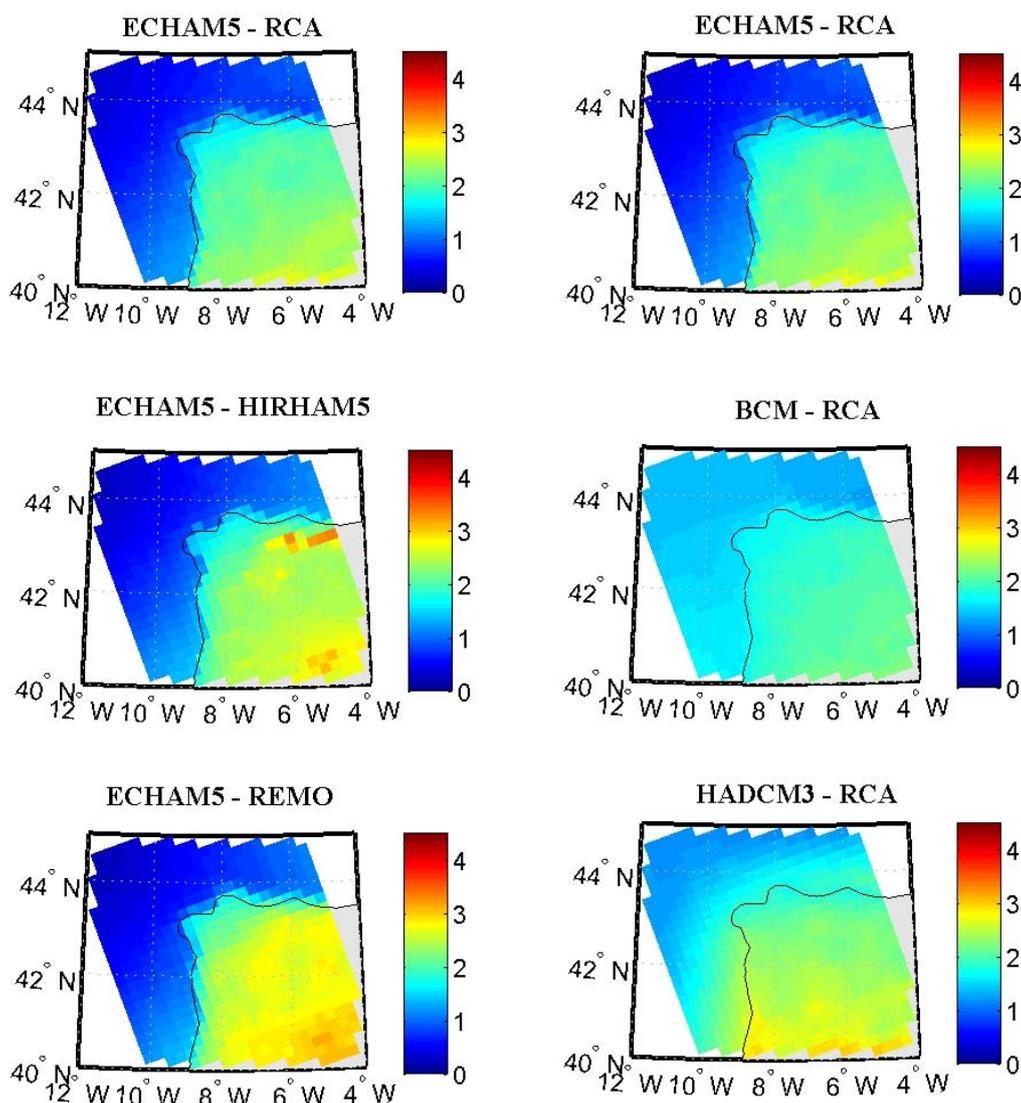


FIG 5. Aumento medio previsto (diferencia de TAS medias) para la serie temporal de primavera.

#### 4.1.4 Verano

Las diferencias previstas para la estación de verano (figura 6) son bastante superiores a las obtenidas para el invierno o la primavera. Las combinaciones ECHAM5-RCA y ECHAM5-REMO vuelven a ser las que mayores diferencias de temperatura pronostican, seguidas muy de cerca por HADCM3-RCA. Los valores más bajos de nuevo vuelven a ser dados por la combinación BCM-RCA, lo que indica que el modelo BCM es el que presenta en general un menor aumento de temperaturas medias para el futuro. En el caso del verano, el incremento de temperaturas pronosticado es

considerablemente mayor al de invierno y primavera superando los 3 °C en la zona costera y los 5 °C en el interior para el caso más extremo dado por la combinación ECHAM5-REMO. Estas diferencias quedan más próximas a los 2-3 °C en el caso del modelo BCM-RCA.

Es necesario destacar que el aumento observado en el promedio de temperaturas se encuentra ligado a que las temperaturas extremas sean más altas y más frecuentes que las actuales, por lo que las probabilidades de eventos extremos tipo ola de calor se incrementarán en el futuro con respecto al periodo 1965-1995. Tomando el caso

particular de la combinación más desfavorable ECHAM5-REMO, un aumento superior a los 5 °C en promedio asociado a un aumento en la variabilidad, significaría que

temperaturas superiores a los 40 °C en puntos de la provincia de Ourense pasarían a ser relativamente frecuentes en verano.

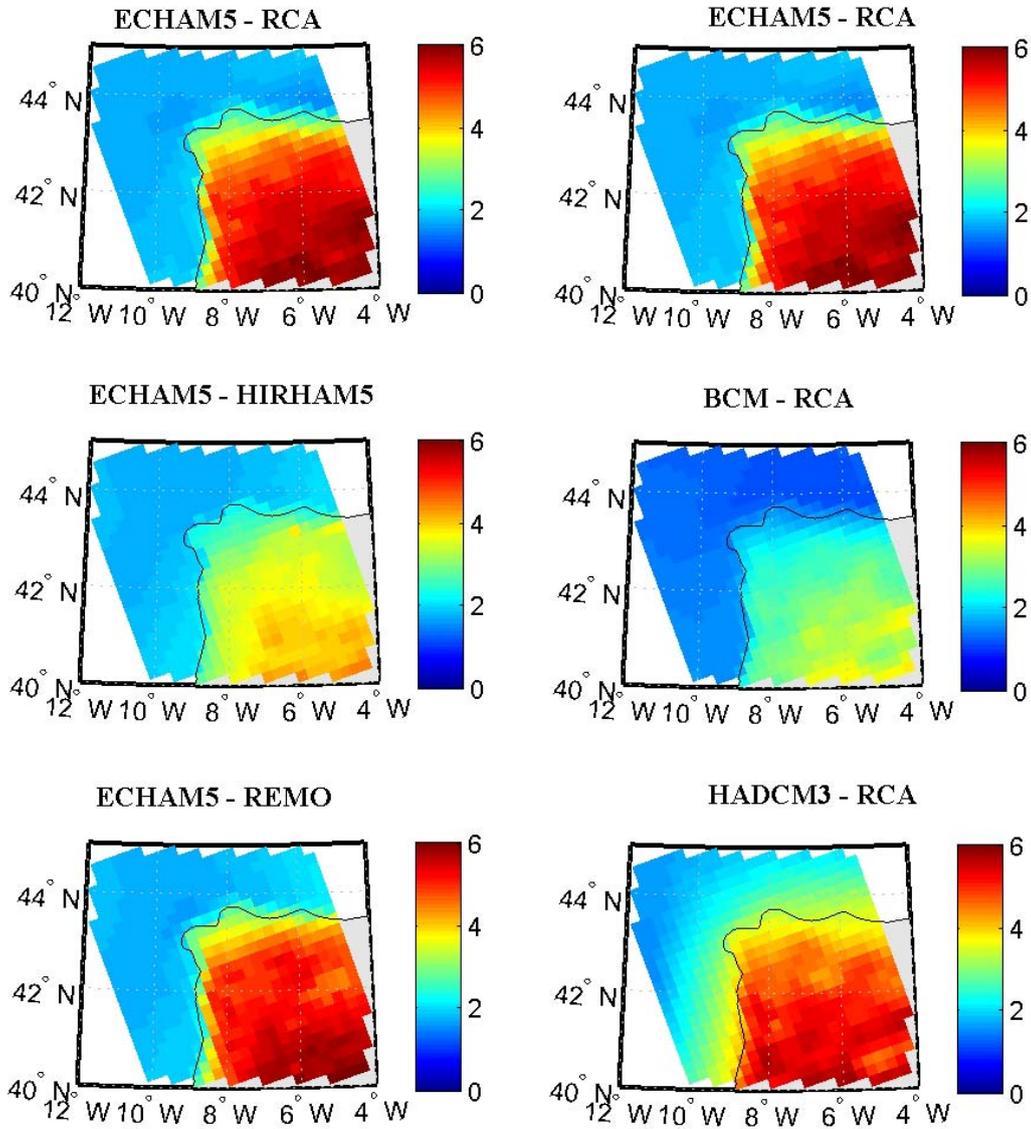


FIG 6. Aumento medio previsto (diferencia de TAS medias) para la serie temporal de verano.

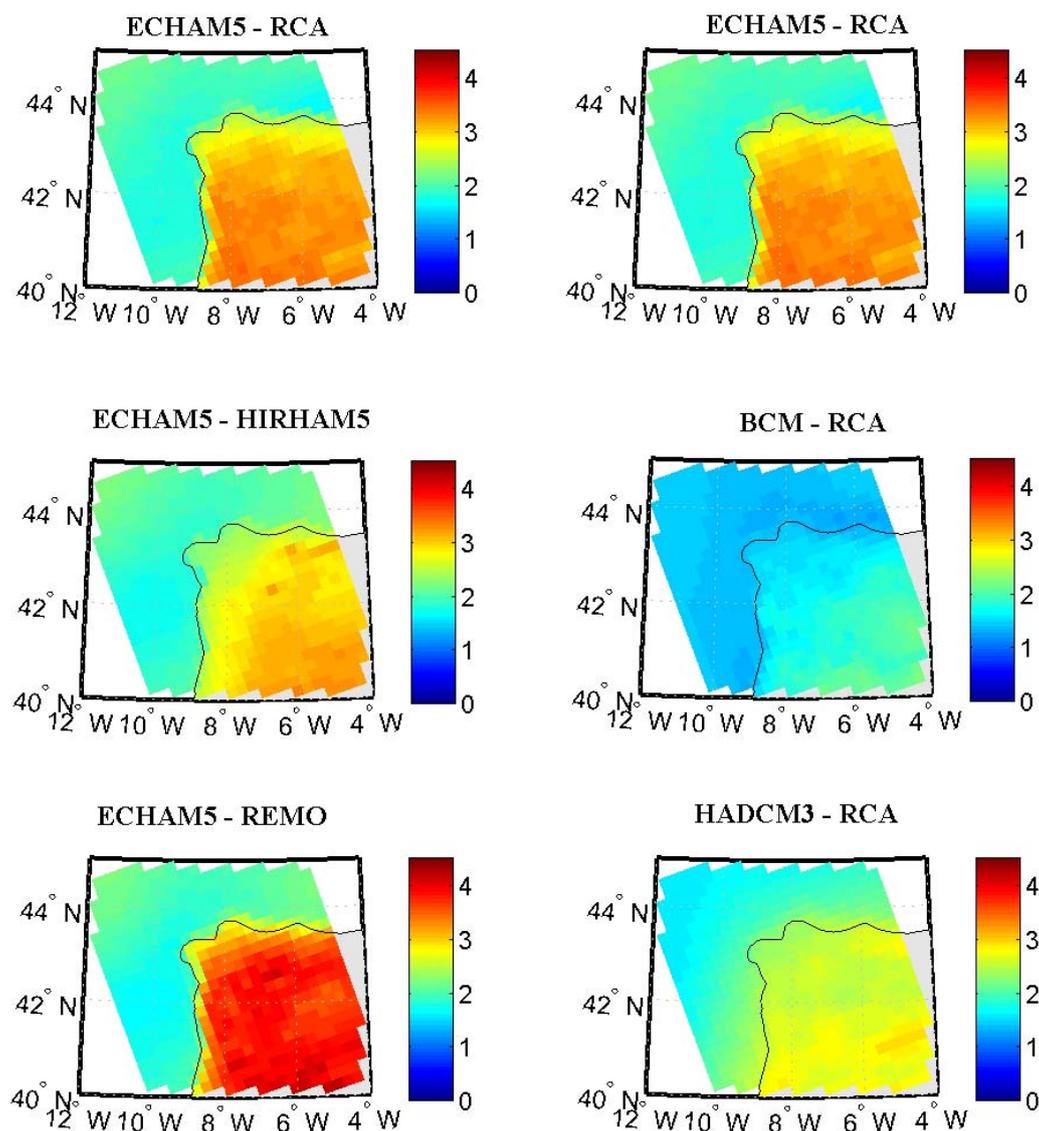


FIG 7. Aumento medio previsto (diferencia de TAS medias) para la serie temporal de otoño.

#### 4.1.5 Otoño

Por último, en el otoño aunque el aumento esperado es menor que en el verano, supera en 1 o 2 °C al pronosticado para invierno o primavera. De todas las combinaciones GCM-RCM, la que predice mayores calentamientos en otoño es ECHAM5-REMO que se confirma de esta forma como la combinación que a lo largo del año mayores incrementos de temperatura pronostica, mientras que BCM-RCA predice los cambios más modestos. En el caso de ECHAM5-REMO los cambios están alrededor de

los 4 °C en el interior, siendo algo menores en la costa, mientras que en el caso más suave, BCM-RCA, las diferencias estarían alrededor de los 2 °C.

#### 4.2 Precipitación

En el caso de la precipitación, se observa una mayor dispersión en los resultados obtenidos por los diferentes modelos regionales incluso aunque sean forzados por un mismo modelo global a diferencia de lo que ocurría en el caso de la temperatura donde las diferencias entre los resultados de las ejecuciones

forzadas con un mismo GCM eran muy pequeñas. Esto puede deberse a que las variaciones de temperaturas son conducidas principalmente por cambios en la escala sinóptica, mientras que en los episodios de precipitación cobra una

mayor relevancia el papel de las condiciones locales (orografía, parametrizaciones, ...), particularmente en los episodios de lluvia convectiva.

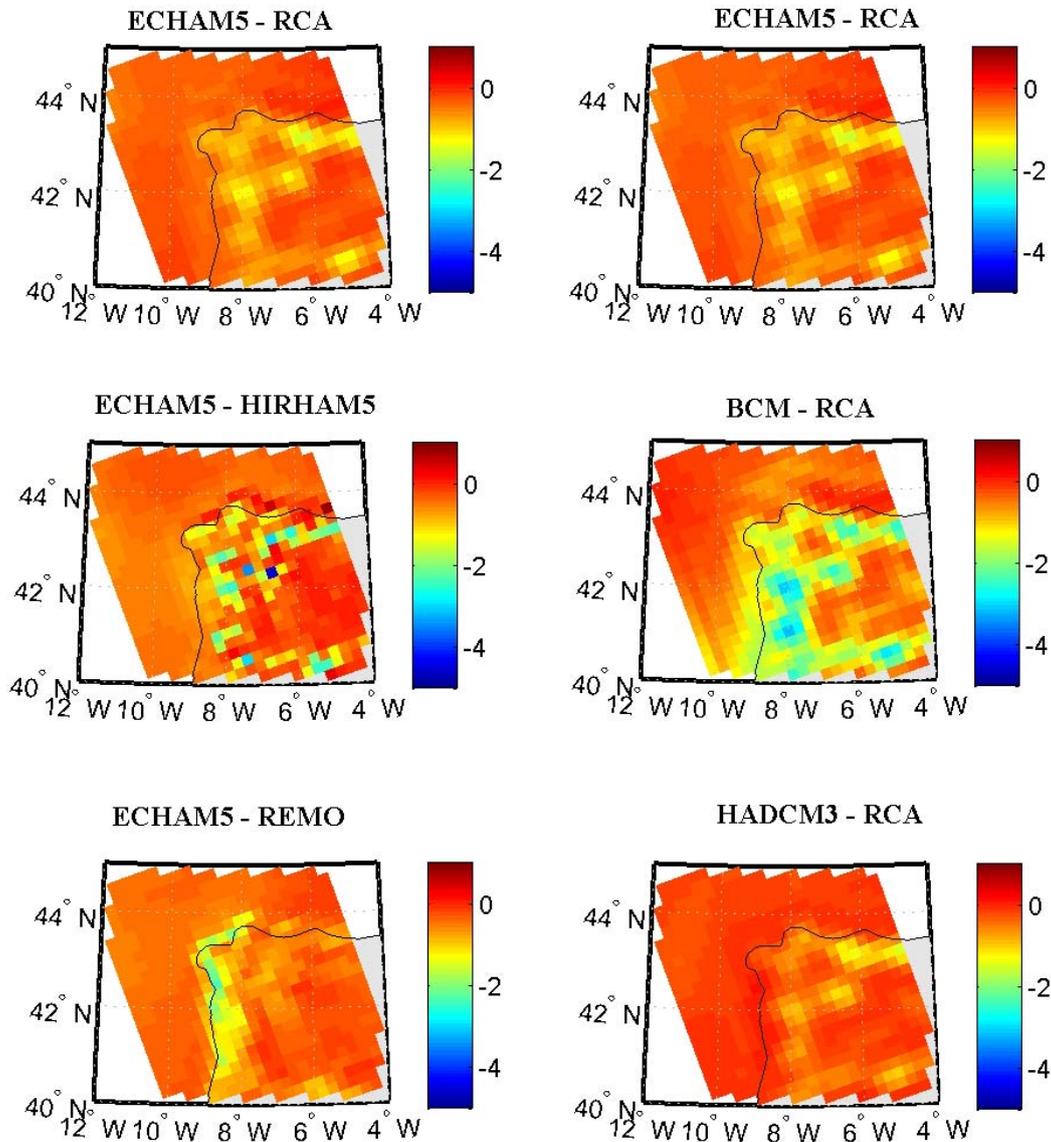


FIG 8. Diferencia media prevista (diferencia de PR medias) de precipitación para la serie anual.

#### 4.2.1 Anual

En la figura 8 se representan los mapas de diferencia de flujo de precipitación media anual para cada una de las parejas GCM-RCM. Se observa que las ejecuciones con el mismo GCM (ECHAM5) difieren bastante entre sí, al contrario de lo que ocurriría con la temperatura. Esto sugiere que parte de la variabilidad espacial es introducida

por cada RCM anidado. Así, por ejemplo, la combinación ECHAM5-RCA no parece marcar tendencias de lluvia muy significativas a largo plazo. Sin embargo, ECHAM5-REMO presenta una tendencia significativa a que los acumulados de lluvia anuales disminuyan en las zonas costeras hacia finales del próximo siglo, en comparación con los valores que esa

misma combinación de modelos obtiene para el clima actual. La combinación ECHAM5-HIRHAM5 no tiene un patrón espacial demasiado coherente, mostrando puntos de intensa disminución de lluvia, mezclados con otros en los que apenas habría diferencias. Las ejecuciones que tienen al modelo RCA como modelo regional

pronostican en general pocos cambios o ligeros descensos en los acumulados de lluvia anual, excepto en el caso en el que se ejecuta anidado con el BCM como modelo general. En este último caso, la disminución de las lluvias es más acusada.

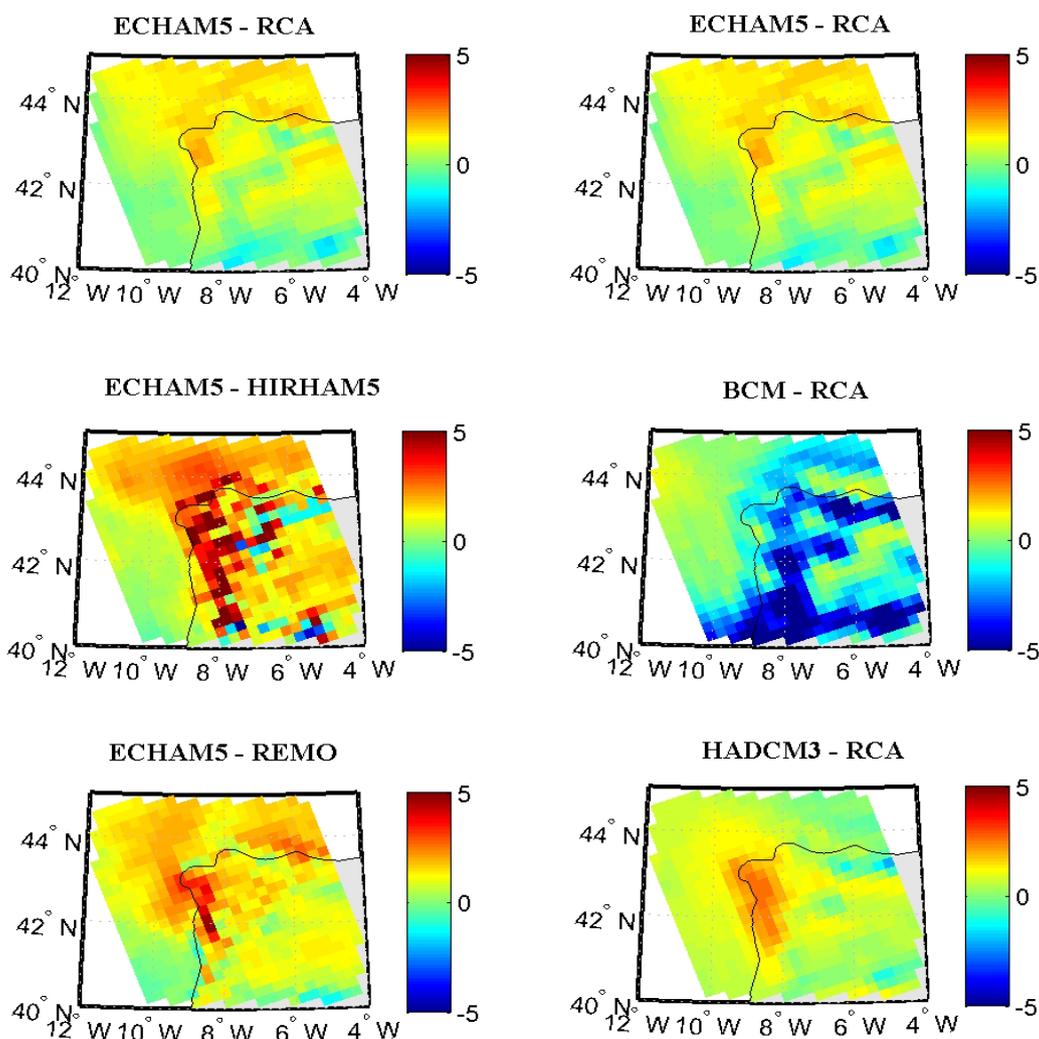


FIG 9. Diferencia media prevista de precipitación para la serie temporal de invierno.

#### 4.2.2 Invierno

En cuanto al comportamiento esperado para el invierno (figura 9), se pueden apreciar significativas diferencias entre todas las combinaciones GCM-RCM. Así, las combinaciones ECHAM5-RCA, ECHAM5-REMO y HADCM3-RCA estarían pronosticando un aumento de lluvias en la vertiente atlántica de la región de estudio y ligeros descensos en zonas de interior.

Esto posiblemente pueda estar asociado a la aparición durante esta estación de más situaciones de componente sur, que suelen acumular más lluvias en esta área. Por otro lado, la combinación BMC-RCA daría déficit de lluvia bastante importante prácticamente en todas las áreas de la región de estudio, mientras que la combinación ECHAM5-HIRHAM5 no resulta fácil de analizar debido a que no se obtiene ningún

patrón espacial significativo, aunque parece inclinarse hacia un aumento de

precipitación más acusado en el área oeste y noroeste de la región de estudio.

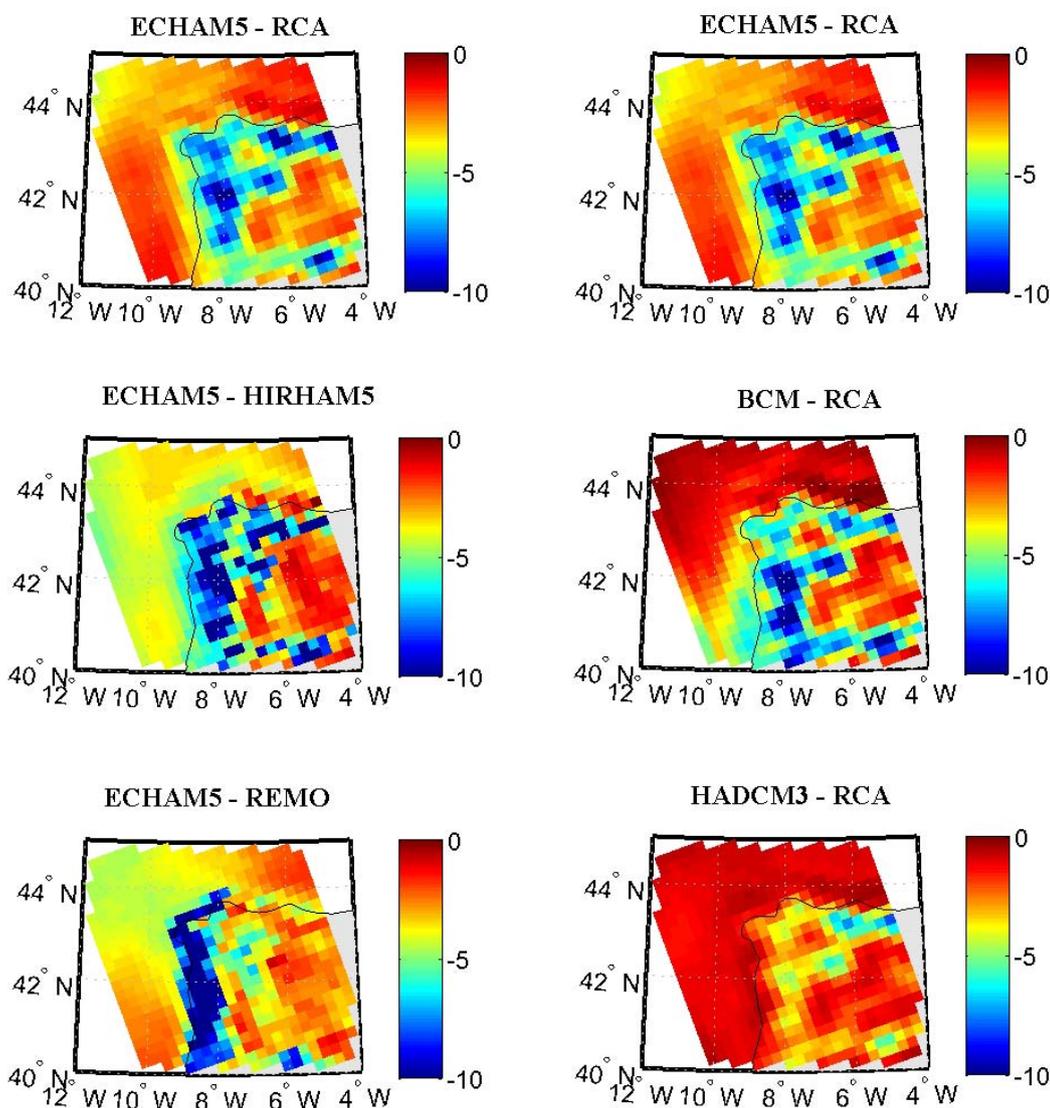


FIG 10. Diferencia media prevista de precipitación para la serie temporal de primavera.

#### 4.2.3 Primavera

En la figura 10 se observa que las primaveras serán más secas para el periodo 2065-2095 que en el periodo de referencia 1965-1995. Todos los modelos están de acuerdo en que la disminución del flujo de precipitación será alta, superándose en algunos casos los 5 mm por día. El modelo que predice menor disminución de lluvias es HadCM3-RCA, en el que esta disminución tendrá lugar principalmente en el interior y será

menos importante en la costa. Sin embargo el resto de combinaciones sugieren que las primaveras serán también secas en la costa. En particular, el comportamiento del modelo ECHAM5-REMO sugiere un déficit de lluvias muy acusado en el oeste, mientras que sería menos notable en el resto de Galicia. Esto podría estar asociado a una disminución de situaciones de sur y suroeste.

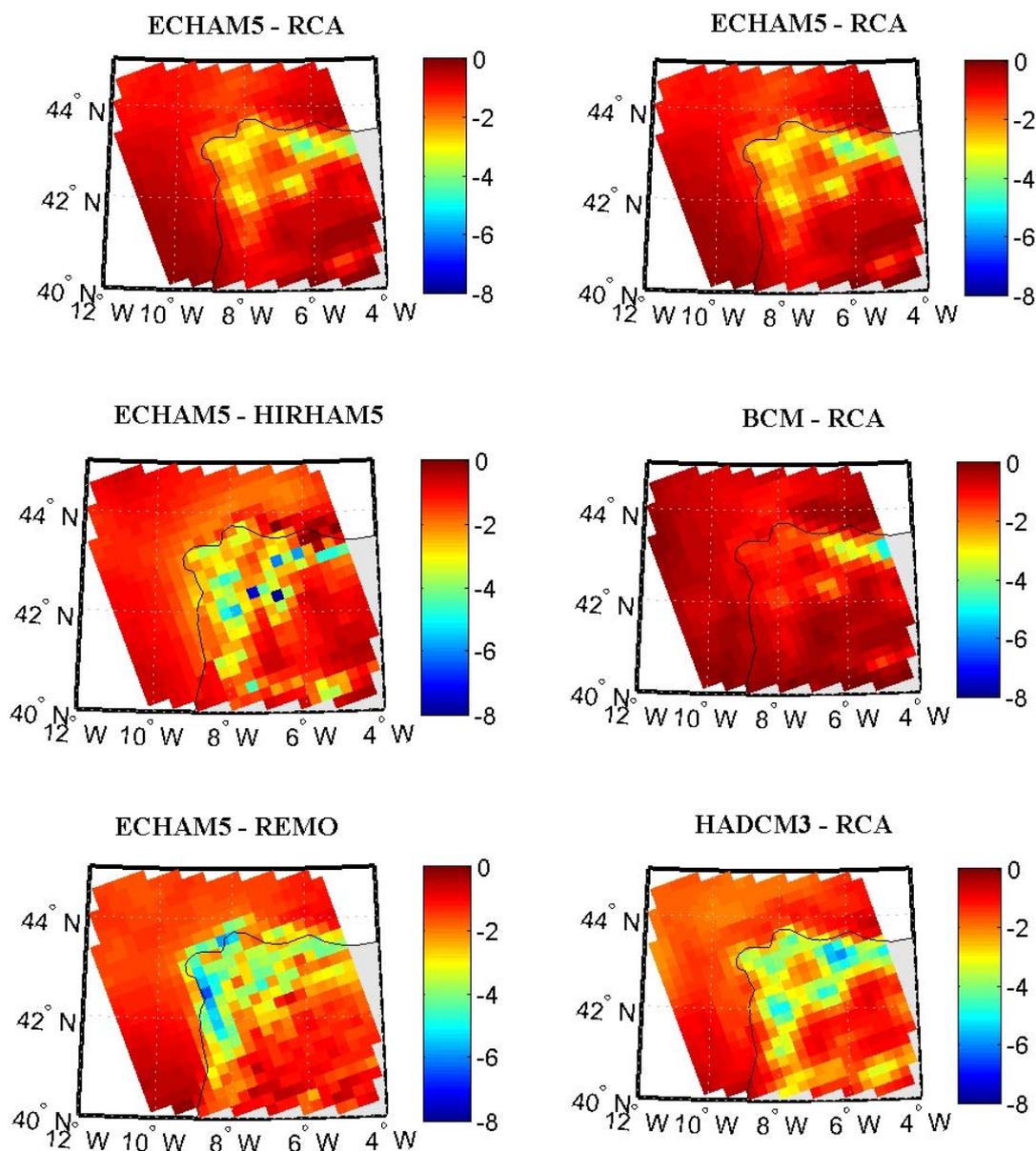


FIG 11. Diferencia media prevista de precipitación para la serie temporal de verano.

Combinando las previsible disminuciones de lluvia con los aumentos de temperatura que muestran los modelos, se puede ver que en general y bajo el escenario A1B serían de esperar primaveras más secas y cálidas, lo cual tendría serias implicaciones en muchos sectores tales como el agrícola o el de suministro de agua durante el verano.

#### 4.2.4 Verano

La figura 11 muestra las disminuciones de precipitación esperadas para el verano. Se puede decir que los veranos

serán también más secos aunque, en general, con disminuciones diarias de menor entidad que en la serie temporal de primavera, pero se debe tener en cuenta que los veranos son más secos que las primaveras, de forma que una disminución en torno a 1 mm/m<sup>2</sup> por día, significa disminuir la tasa de lluvia en torno a 30 mm por mes, lo que en muchos puntos del interior quiere decir que apenas se producirían lluvias en la época estival. El modelo que pronostica un mayor déficit de lluvia en los veranos de finales del siglo XXI será la

combinación ECHAM5-REMO, que vuelve a dar un patrón similar al de primavera, es decir, un déficit mayor en la costa oeste que en el resto de la Comunidad. Al contrario, la combinación HADCM3-RCA pronostica menor déficit de lluvia y más concentrado en zonas de interior, lo que lleva a la predicción de diferentes patrones de circulación por ambos modelos. El modelo BMC-RCA es el que pronostica un déficit menos acusado de lluvia. La consideración de estos resultados junto con el hecho de que los modelos están dando un aumento muy significativo de las temperaturas, parece sugerir que en las últimas décadas del siglo los veranos serán muy secos y cálidos en el interior, siendo a su vez vendrán precedidos por primaveras que ya habrían sido secas y cálidas.

#### 4.2.5 Otoño

Para el otoño, los resultados (figura 12) presentan comportamientos similares a los observados en los periodos estacionales previos. Así, ECHAM5-HIRHAM5 vuelve a mostrar un patrón espacial muy desorganizado y ECHAM5-REMO sugiere déficit de lluvia en la vertiente atlántica. El comportamiento de BMC-RCA muestra un déficit de lluvia muy acusado en toda la parte oeste de Galicia que es la parte de Galicia más influenciada por el paso de los frentes atlánticos. En zonas del Cantábrico e interior, la disminución parece ser menor. ECHAM5-REMO y HADCM3-RCA son los modelos que menores diferencias de lluvia presenta y además muestran un comportamiento muy homogéneo. HADCM3-RCA pronostica que las lluvias podrían incluso aumentar en el área atlántica y disminuir muy ligeramente en el resto de la región de estudio.

Estas ejecuciones para el otoño vuelven a sugerir que el comportamiento previsto para la lluvia en Galicia presenta una alta incertidumbre, puesto

que modelos en los que el déficit de lluvia sería muy acusado en la vertiente atlántica (BMC-RCA) conviven con otros en los que incluso podría darse un incremento de lluvia estas áreas (HADCM3-RCA).

## 5. Conclusiones

En el presente trabajo se han estudiado los cambios que se esperan en la región Galicia Norte de Portugal para la segunda mitad del siglo XXI en temperatura media y precipitación. Los estudios se han hecho sobre cinco ejecuciones de modelos regionales del proyecto ENSEMBLES bajo el escenario A1B, considerado como el escenario intermedio entre los propuestos por el IPCC. Los resultados muestran en primer lugar que el downscaling dinámico que se realiza en el proyecto ENSEMBLES tiene una importancia significativa en el caso de la precipitación, pero no es tan importante en el caso de las temperaturas. En este último caso, diferentes modelos regionales acoplados con el mismo modelo de circulación general aportan algunos detalles, pero no dan demasiadas diferencias con respecto a lo que predice el modelo global. En el caso de la lluvia sin embargo, los diferentes modelos regionales sí son capaces de dar información diferente a la que se obtendría solamente con el modelo global.

Los resultados para temperatura muestran que, en general, los modelos predicen aumentos en el promedio anual algo más intensos en el interior que en la costa, pero que, en promedio, estarían en torno a los 3 °C en el interior y los 2 °C en la costa. Sin embargo, estos incrementos no se repartirán por igual a lo largo del año, sino que se producirán con mayor intensidad en verano, estación en la que los incrementos de temperatura podrían llegar a superar los

5 °C en el interior. Estas tendencias confirmarían las tendencias observadas

con las series de datos existentes en la actualidad.

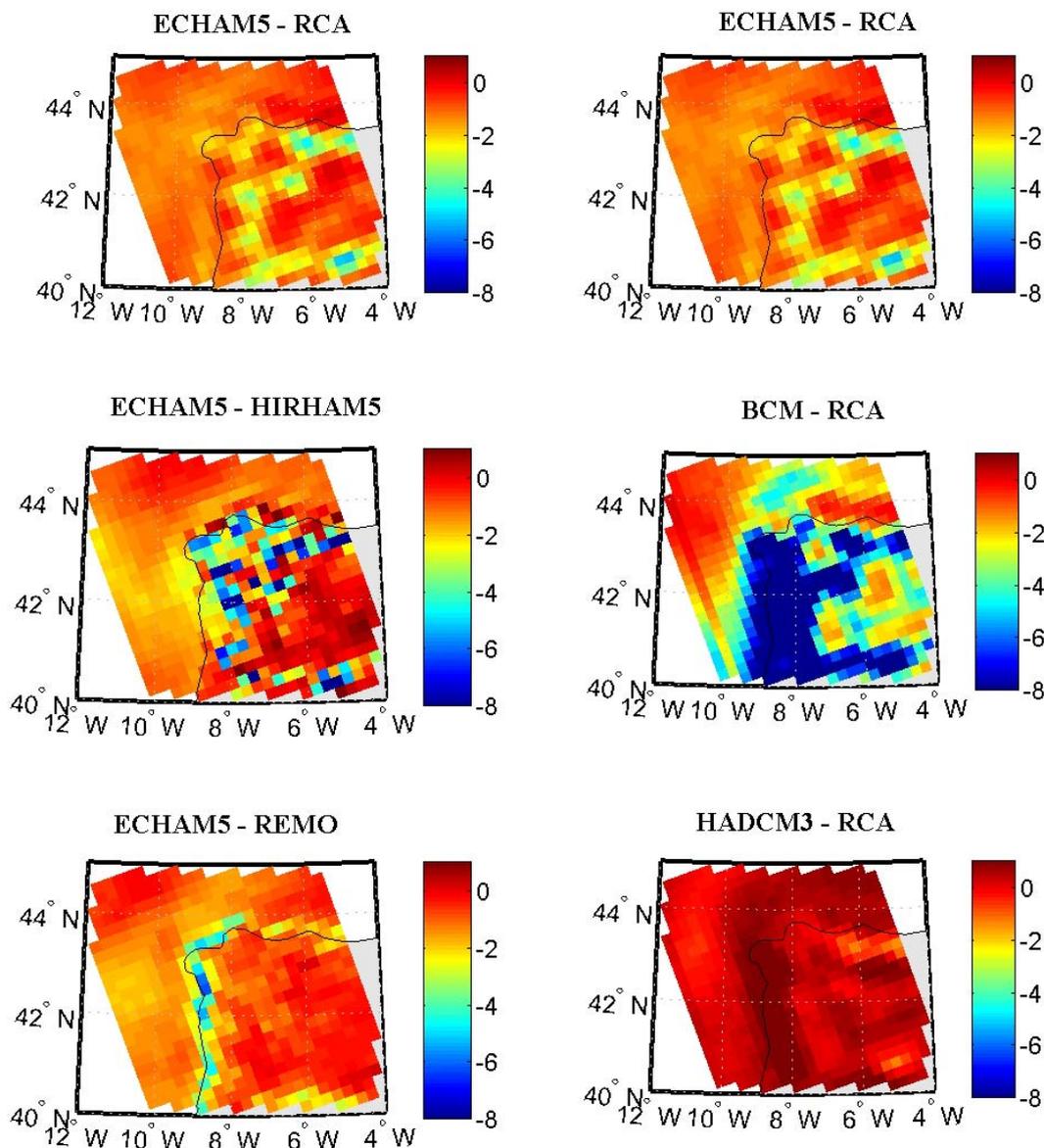


FIG 12. Diferencia media prevista de precipitación para la serie temporal de otoño.

En cuanto a las lluvias, en general podemos decir que los modelos tienden a pronosticar menos lluvias a lo largo del año, si bien, en general, la incertidumbre en este caso es mucho mayor que en el caso de las temperaturas. Esto queda de manifiesto en el hecho de que los comportamientos difieren mucho entre las diferentes combinaciones GCM-RCM. En general, podemos esperar que todas las estaciones tiendan a ser más secas

aunque en invierno y otoño algunos modelos pronostican un aumento de las lluvias. En este caso, los cambios observados no continúan las tendencias observadas hasta la actualidad, que si nos informan de tendencias positivas en otoño, pero hasta el momento no muestran las tendencias negativas de verano y primavera. En general, estas variaciones en la distribución anual de las lluvias anuncian un clima más extremo en Galicia, puesto que el

aumento esperado de las temperaturas en primavera y verano, combinado con el déficit de lluvia que se podría producir en esas estaciones daría lugar a olas de calor y sequías más intensas y prolongadas que en la actualidad.

Consideramos que estos resultados son significativos a la hora de valorar el impacto que el cambio climático tendrá en una región como la Eurorregión Galicia-Norte de Portugal en diferentes ámbitos y sectores. En el futuro se deberá ampliar este trabajo teniendo en cuenta otros factores tales como cambios en los patrones de presión o geopotencial que pueden confirmar los cambios encontrados en este trabajo.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la "Xunta de Galicia" bajo el proyecto 10PXIB383169PR. J.J. Taboada agradece la financiación del Departamento de Medioambiente de la Xunta de Galicia.

### Referencias

- Castro M., J. Martín-Vide J. y S. Alonso, 2005: El clima de España: pasado, presente y escenarios de clima para el siglo XXI. En: Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático. Informe del Ministerio de Medio Ambiente.
- EEA Report, 2008: Impacts of Europe's changing climate - 2008 indicator-based assessment. EEA Report No 4/2008 European Environment Agency, Copenhagen.
- Falkowski P, R.J. Scholes, E. Boyle, J. Canadell, D. CanPeld, J. Elser, N. Gruber, K. Hibbard, P. Hogberg, S. Linder, F.T. Mackenzie, B. Moore III, T. Pedersen, Y. Rosenthal, S. Seitzinger, V. Smetacek, W. Steffen, 2000: The Global Carbon Cycle: A Test of Our Knowledge of Earth as a System. *Science*, 290, 2891- 296.
- Gómez-Gesteira M., L. Gimeno., M. deCastro., M.N. Lorenzo., I. Alvarez, R. Nieto, J.J. Taboada, A.J.C. Crespo, A.M. Ramos, I. Iglesias, J.L. Gomez-Gesteira, F.E. Santo, D. Barriopedro, I.F. Trigo, 2011: The state of climate in NW Iberia. *Climate Research*, 48, 109-144.
- IPCC 1990: Scientific Assessment of Climate Change-Report of Working Group I. Houghton J.T., G.J. Jenkins, J.J. Ephraums (eds). Cambridge University Press, UK
- IPCC 1996: Climate Change 1995: The science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton J.T., L.G. Meira Filho, B.A. Callender, N. Harris, A. Kattenberg, K. Maskell (eds). Cambridge University Press, UK
- IPCC 2001: Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C.A. Johnson (eds). Cambridge University Press, UK
- IPCC 2007: Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon S, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller (eds) Cambridge University Press, UK
- Klein-Tank A.M.G., J.B. Wijngaard, G.P. Können, R. Böhm, G. Demarée, A. Gocheva, M. Mileta, S. Pashiardis, L. Hejkrlik, C. Kern-Hansen, R. Heino , P. Bessemoulin, G. Müller-Westermeier, M. Tzanakou, S. Szalai, T. Pálsdóttir, D.

Fitzgerald, S. Rubin, M. Capaldo, M. Maugeri, A. Leitass, A. Bukantis, R. Aberfeld, A.F.V. van Engelen, E. Forland, M. Matus, F. Coelho, C. Mares, V. Razuvaev, E. Nieplova, T.A. Cegnar, J. López, B. Dahlström, A. Moberg, W. Kirchhofer, A. Ceylan, O. Pachaliuk, L.V. Alexander, P. Petrovic. 2002: Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *International Journal of Climatology*, 22, 1441-1453.

Rodríguez-Puebla C., A.H. Encinas, S. Nieto, J. Garmendia. 1998: Spatial and temporal patterns of annual precipitation variability over the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 18, 299–316.

Van Ulden A. P., G.J. Van Oldenborgh 2006: Large-scale atmospheric circulation biases and changes in global climate model simulations and their importance for climate change in Central Europe. *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 863-881.