



Evaluación de los modelos climáticos globales participantes en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC sobre España y la región euroatlántica

María Jesús Casado Calle
José María Martín Herreros
María Asunción Pastor Saavedra
Ernesto Rodríguez Camino



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO



EVALUACIÓN DE LOS MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES PARTICIPANTES EN EL CUARTO INFORME DE EVALUACIÓN DEL IPCC SOBRE ESPAÑA Y LA REGIÓN EUROATLÁNTICA

María Jesús Casado Calle
José María Martín Herreros
María Asunción Pastor Saavedra
Ernesto Rodríguez Camino

AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE
Y MEDIO RURAL Y MARINO

AEMet
Agencia Estatal de Meteorología

2011

Catálogo de publicaciones oficiales
<http://www.060.es>

Edita: Agencia Estatal de Meteorología ©
Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino

ISBN: 978-84-7837-085-6
NIPO: 784-11-009-3
Depósito Legal: M-43957-2011

Maquetación e impresión: Servicios Gráficos Kenaf S.L.

Impreso en papel reciclado al 100% totalmente libre de cloro

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN GENERAL	5
1.1. Introducción	7
1.2. Incertidumbres en las proyecciones climáticas	8
1.3. Evaluación de modelos climáticos	11
1.4. Combinación y pesado de modelos	12
1.5. Evaluaciones previas de los modelos CMIP3 del AR4-IPCC	14
2. EVALUACIÓN DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA	17
2.1. Introducción	19
2.2. Datos	20
2.3. Metodología	21
2.4. Resultados	21
2.4.1. Ciclo anual de precipitación	21
2.4.2. Ciclo anual de temperatura	22
2.4.3. Análisis de la distribución espacial de precipitación	24
2.4.3.1. Anual	24
2.4.3.2. Invierno	25
2.4.3.3. Verano	26
2.4.4. Análisis de la distribución espacial de temperatura	26
2.4.4.1. Anual	26
2.4.4.2. Invierno	27
2.4.4.3. Verano	27
2.5. Conclusiones	28
3. EVALUACIÓN DE LOS MODOS DE VARIABILIDAD	45
3.1. Introducción	47
3.2. Datos	49
3.3. Metodología	49
3.4. Resultados	51
3.4.1. Análisis espacial de los modos de variabilidad	51
3.4.2. Análisis temporal de los modos de variabilidad	58
3.5. Conclusiones	65
4. EVALUACIÓN DE LOS TIPOS DE CIRCULACIÓN	69
4.1. Introducción	71
4.2. Datos	72
4.3. Metodología	73
4.4. Resultados	74
4.4.1. Análisis espacial de los Tipos de Circulación	74
4.4.2. Análisis temporal de los Tipos de Circulación	79
4.4.2.1. Frecuencias de los Tipos de Circulación	79
4.4.2.2. Tiempo medio de residencia de los Tipos de Circulación	88

4.4.2.3. Características de los eventos	92
4.4.2.4. Transiciones y su predecibilidad	97
4.5. Conclusiones	102
5. CONCLUSIONES GENERALES	105
ANEXOS Y REFERENCIAS	113
Anexo A. Tabla resumen de las principales características de los modelos AR4 utilizados	115
Anexo B. Índices estadísticos para la precipitación.	118
Anexo C. Índices estadísticos para la temperatura	119
Anexo D. Diagramas de Taylor de precipitación y temperatura	120
Anexo E. Estadísticas de la MSLP en la región euroatlántica.	123
Anexo F. Modos de variabilidad de los modelos AR4	128
Anexo G. Distribución de las longitudes de eventos en los Tipos de Circulación.	136
Anexo H. Matrices de probabilidades de transición entre Tipos de Circulación.	140
Referencias	146

1.

Introducción general

- 1.1. Introducción
- 1.2. Incertidumbres en las proyecciones climáticas
- 1.3. Evaluación de modelos climáticos
- 1.4. Combinación y pesado de modelos
- 1.5. Evaluaciones de los modelos CMIP3 del AR4-IPCC

1.1. INTRODUCCIÓN

El clima y su posible evolución se han convertido en los últimos años en un tema que suscita una gran preocupación tanto en ámbitos académicos como en gubernamentales, debido fundamentalmente a los estudios (singularmente los informes de Grupo Intergubernamental de Expertos de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (IPCC, de sus siglas en inglés)) que alertan de las graves interferencias que las actividades humanas están produciendo en el clima actual y que previsiblemente se agravarán en un futuro próximo. Los datos básicos del estudio de los climas pasados y actual, y del sistema climático en general, lo constituyen los registros observacionales bien sean instrumentales o indirectos (datos proxy).

La base y herramienta fundamental —si bien, no la única— para los estudios relativos a la futura evolución del clima son los modelos climáticos que simulan el funcionamiento del sistema climático. Los modelos climáticos de circulación general acoplados atmósfera océano (AOGCMs, de sus siglas en inglés) son representaciones matemáticas de las leyes físicas y de los procesos que rigen el clima terrestre que se resuelven numéricamente con la ayuda de potentes ordenadores. Los modelos climáticos constituyen las herramientas indispensables para abordar el análisis del clima, facilitando así nuestra comprensión del sistema climático y de las interrelaciones entre sus distintos componentes. Los modelos reproducen más o menos fielmente el comportamiento del sistema climático en la medida en que son capaces de proporcionar simulaciones realistas de los patrones de circulación a gran escala y de otras variables climáticas (VAN ULDEN Y VAN OLDENBORGH, 2006). Los modelos climáticos permiten entender y reproducir los principales procesos que tienen lugar en el sistema climático, integrado por diferentes componentes (atmósfera, océano, criosfera, superficie terrestre, vegetación, etc.) y fuertemente acoplados entre sí. Una vez que los modelos climáticos han sido suficientemente evaluados frente a las observaciones es razonable utilizarlos para realizar estimaciones de la posible evolución del clima de la Tierra. Es, por tanto, absolutamente necesario realizar una evaluación tan exhaustiva como sea posible de los modelos de circulación general antes de su utilización en las estimaciones de la evolución del clima futuro.

El conjunto más reciente de simulaciones climáticas proceden del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 3 (CMIP3, de sus siglas en inglés) (MEEHL ET AL., 2007) a su vez integrado en el Programa Mundial de Investigación del Clima (WCRP, de sus siglas en inglés) y que contribuyó extensamente al Cuarto Informe de Evaluación (AR4, de sus siglas en inglés) del IPCC (<http://www.ipcc.ch>). Los datos CMIP3 relativos al siglo XX proporcionan un conjunto de datos único para analizar de forma comparada la habilidad de los diferentes AOGCMs para reproducir las características esenciales del clima presente y para analizar las incertidumbres de los modelos.

La finalidad principal de este texto es la de proporcionar evaluaciones, fundamentalmente cuantitativas, sobre España y regiones circundantes de los modelos participantes en CMIP3. Con las evaluaciones cuantitativas se puede establecer una ordenación (*ranking*) de los modelos en función de su calidad para representar distintos aspectos del clima sobre la región de interés. El uso de predicciones por con-

juntos (*ensembles*) ha permitido estimar cuantitativamente las incertidumbres de diverso origen en la evolución del sistema climático y ha planteado la cuestión nada trivial de los métodos de combinación y posiblemente pesado de modelos. Sin embargo, este texto solamente se circunscribe al tema de la evaluación cuantitativa regional de los diferentes modelos globales utilizando diferentes métodos y métricas para evaluar los modelos frente a las observaciones del clima actual. Para los temas relacionados con las dificultades asociadas a la combinación y pesado de modelos en proyecciones probabilísticas y cuestiones relacionados se puede consultar KNUTTI ET AL. (2010a y b) e IPCC (2007) y las referencias allí incluidas.

El actual texto desarrolla con más detalle resultados ya publicados (CASADO Y PASTOR, 2011) y en proceso de revisión. El texto se ha estructurado de la siguiente manera: el capítulo 2 está dedicado a la evaluación de la precipitación y temperatura. El capítulo 3 evalúa los modos de variabilidad mientras que el capítulo 4 se centra en los tipos de circulación. El capítulo 5 contiene conclusiones y consideraciones generales acerca del uso de estas evaluaciones.

1.2. INCERTIDUMBRES EN LAS PROYECCIONES CLIMÁTICAS

A pesar de las mejoras en las simulaciones de los modelos climáticos, todavía existen diferencias significativas entre unos modelos y otros, habiendo quedado ya bien establecido que los estudios deberán utilizar un gran número de modelos para explicar las incertidumbres asociadas a los mismos (SHERIDAN Y LEE, 2010). Precisamente, en el seno de la comunidad dedicada a la investigación del clima, esta cuestión ha sido determinante para multiplicar los esfuerzos tendentes hacia una adecuada cuantificación de todas las fuentes de incertidumbres. SCHWIERZ ET AL. (2006) han revisado las diferentes fuentes de incertidumbre que afectan a las proyecciones climáticas.

Las proyecciones climáticas o estimaciones de la evolución futura del clima de la Tierra en escalas temporales decenales y seculares vienen afectadas por diferentes fuentes de incertidumbres. Las fuentes de incertidumbres en las proyecciones climáticas proceden de las diferentes etapas asociadas a su proceso de generación, comenzando con los forzamientos naturales de origen volcánico o solar, pasando por el establecimiento de los escenarios alternativos de posibles evoluciones en las emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles, que afectan al forzamiento radiativo, continuando con los modelos climáticos que proyectan el clima futuro y hasta los algoritmos que proyectan las evoluciones a escala regional. Estas incertidumbres se pueden describir en forma jerárquica o de cascada (MITCHELL Y HULME, 1999), de tal forma que, cada paso conducente a la generación de proyecciones regionales hereda todas las incertidumbres de los pasos anteriores, asunto de capital importancia en estudios de impacto o de reducción de escala (SHERIDAN Y LEE, 2010).

En el vértice de todas las incertidumbres se sitúan los forzamientos externos de tipo natural. Entre estos se pueden mencionar los cambios en la radiación solar que llega a la cima de la atmósfera y las emisiones de aerosoles de compuestos de azufre procedentes de las grandes erupciones volcánicas que alcanzan la estratosfera

y tienen un tiempo de permanencia de unos pocos años. Este último efecto se manifiesta principalmente como un aumento de la reflexión de la radiación solar incidente constituyendo, por tanto, un forzamiento radiativo negativo. Los forzamientos naturales se consideran impredecibles y no están contemplados patrones de evolución al menos en las escalas temporales aquí consideradas.

A continuación en la pirámide de las incertidumbres se sitúa la evolución futura de la emisión de los gases de efecto invernadero y aerosoles así como los cambios de usos de suelo; factores que afectarán al forzamiento radiativo en la atmósfera. Obviamente esta evolución futura dependerá de la marcha de la economía, del desarrollo tecnológico, de las fuentes energéticas disponibles y del patrón de consumo energético, de la demografía, etc. y de las decisiones políticas que afecten a la evolución de los anteriores puntos. Como esta evolución no es predecible, al menos según los modelos físico-matemáticos que simulan los procesos del sistema climático, se recurre a utilizar una serie de escenarios plausibles de futura evolución de los anteriores factores de tipo socio-económico. Para ello se utiliza la colección de escenarios de evolución de emisiones propuestos por el IPCC (NAKICENOVIC ET AL., 2000). Estos mismos escenarios de emisión se han utilizado en el tercer y cuarto informes de evaluación del IPCC. En el quinto informe (AR5), que estará disponible en el año 2014, ya no se emplearán los escenarios SRES, que aunque sencillos, son difíciles de defender desde una perspectiva científica. Los nuevos escenarios (MOSS ET AL., 2010) se basan en la idea de Caminos de Concentración Representativos (Representative Concentration Pathways (RCP), en la literatura en inglés).

A las incertidumbres relativas a la evolución futura de las emisiones hay que añadir las asociadas a la forma en que esas emisiones afectan a las concentraciones de gases de efecto invernadero, puesto que no se conoce exactamente el destino final de las emisiones o, lo que es lo mismo, no se conoce plenamente el ciclo del carbono. Este es un punto clave, ya que algunos procesos implicados en el ciclo del carbono (equilibrio oceánico del dióxido de carbono, por ejemplo) son dependientes de la temperatura, que, a su vez, es sensible a las concentraciones de dióxido de carbono.

Las mismas herramientas utilizadas para generar las proyecciones climáticas, es decir, los modelos acoplados atmósfera océano de circulación general (AOGCMs, de sus siglas en inglés) muestran también en su nivel actual de desarrollo muchas incertidumbres. Los diferentes AOGCMs son distintas formulaciones de las ecuaciones que describen los distintos componentes del sistema climático, considerando distintas mallas, resoluciones, esquemas numéricos, parametrizaciones de procesos físicos, etc. Las simulaciones de cambio climático producidas con distintos AOGCMs con los mismos escenarios de cambio climático muestran una considerable dispersión, reflejando distintas representaciones de la sensibilidad del clima a cambios en el forzamiento externo (sensibilidad climática), y, por lo tanto, un alto nivel de incertidumbre, que depende en gran medida de las regiones, estaciones, variables, etc. Los mismos procesos simulados por los AOGCMs incluyen incertidumbres. De hecho, con el paso de los años la modelización del sistema climático ha ido añadiendo subsistemas adicionales, a la vez que ganaba en complejidad. Por ejemplo, gran parte de las simulaciones realizadas en los últimos años suponían que la vegetación era constante en el tiempo y permanecía invariable en simulaciones se-

culares de cambio climático antropogénico (IPCC, 2007). En la realidad, la vegetación, que lógicamente depende de las condiciones climáticas que son cambiantes, tiene también capacidad para afectar al clima, y como tal debería simularse. Gran parte de las incertidumbres provenientes de los modelos globales tienen su origen en los procesos de retroalimentación que o bien no son suficientemente conocidos o bien tienen diferentes formulaciones en los diferentes AOGCMs. Este es el caso de la retroalimentación debida a las nubes, a los procesos ligados al ciclo del carbono, a los aerosoles, a los procesos en los que intervienen la nieve y los hielos marinos y a los procesos debidos a la liberación de metano.

Bajo el nombre de incertidumbres estructurales se incluyen las incertidumbres asociadas a la absoluta falta de conocimiento de algún proceso que afecte al sistema climático. A modo de ejemplo se puede mencionar el relativamente reciente papel de la “circulación de aguas profundas” como posible agente de cambio climático abrupto. De ahí, la complejidad creciente de las simulaciones del sistema climático que incluyen cada vez más subsistemas y procesos que en los primitivos modelos no estaban contemplados, añadiendo a su vez nuevas incertidumbres.

Las distintas técnicas de regionalización (estadísticas y dinámicas) contribuyen a la incertidumbre con fuentes de error adicionales. Los métodos estadísticos sufren, en su capacidad predictiva, la limitación específica debida a que las relaciones entre las variables a gran escala y las variables locales no tienen por qué mantenerse frente a cambios en el clima. De hecho las relaciones entre ambas variables se establecen en un periodo relativamente corto observacional y se prescriben para situaciones futuras que pueden distar bastante en el tiempo. Los modelos climáticos regionales (RCMs, de sus siglas en inglés) añaden fuentes adicionales a las de los AOGCMs con los que son forzados. La incertidumbre en el forzamiento radiativo asociada a la distribución espaciotemporal de aerosoles tiene una relevancia especial a escala regional debido a la heterogeneidad del forzamiento y a su respuesta. Otro aspecto que incide de forma importante en estas escalas son las variaciones en usos de suelo y el realismo en los modelos de suelo. La evaluación de incertidumbres a escala regional se complica adicionalmente por la baja relación de la señal de respuesta frente a la variabilidad climática interna. Este es el caso de variables, como la precipitación, no directamente relacionadas con el forzamiento externo, y cuya estimación en sí misma posee ya unas incertidumbres que dependen de otros factores meteorológicos. Los modelos de impacto en los diferentes sectores sensibles a las condiciones climáticas (p. ej., sector hidrológico, agrícola, energético, etc.) añaden fuentes adicionales de incertidumbre que hay que estimar y acotar a la hora de determinar los impactos.

Una fuente adicional de incertidumbre en las proyecciones de clima futuro surge como consecuencia de los efectos de la variabilidad natural. Para un cierto periodo en el futuro (p. ej., 2071-2100), la variabilidad natural puede reforzar el cambio de origen antropogénico o bien contrarrestarlo. Es importante, por lo tanto, considerar la variabilidad en los estudios de impacto y adaptación al cambio climático. Al no poderse predecir la variabilidad natural del clima de manera determinista en largas escalas temporales, es razonable hacer uso de un *ensemble* de experimentos, cada uno partiendo de distintas condiciones iniciales para el sistema océano-at-

mósfera. Los efectos de la variabilidad natural son mayores a medida que la escala temporal disminuye, siendo más importantes en las escalas anuales y decenales.

1.3. EVALUACIÓN DE MODELOS CLIMÁTICOS

Como se ha descrito en la sección anterior los mismos modelos climáticos globales constituyen una de las posibles fuentes de incertidumbres que afecta a las proyecciones futuras de la evolución del clima. Todos los modelos poseen una serie de capacidades y limitaciones que son necesarias conocer y evaluar previamente a su utilización para generar estimaciones de la evolución del clima. El proceso de analizar un modelo y comparar los resultados del modelo con las observaciones es lo que habitualmente se conoce por evaluación de un modelo.

El proceso de evaluación puede realizarse bien cualitativamente, utilizando diagnósticos, o bien cuantitativamente mediante el uso de métricas. Un diagnóstico es una magnitud derivada de la salida de un modelo, a menudo utilizada para comparar con observaciones o con las salidas de otros modelos. Entre los ejemplos de diagnósticos se incluyen los mapas espaciales, las series temporales, las distribuciones de frecuencias, la sensibilidad climática, etc. Una métrica es una medida estadística cuantitativa del acuerdo entre una magnitud simulada y la misma magnitud observada que puede utilizarse para evaluar el grado de calidad de los modelos individuales. Una métrica puede estar referida a un proceso específico para cuantificar cómo de bien dicho proceso está representado en un modelo. El término métrica se utiliza en este contexto como un sinónimo de “medida”. En este texto, se utilizan también como métricas índices estadísticos clásicos. En general, puede decirse que una métrica es una magnitud derivada de un diagnóstico (KNUTTI ET AL., 2010a).

No es una cuestión obvia discriminar los modelos “buenos” de los “malos” para asignar una credibilidad a las proyecciones climáticas en las escalas seculares. Mientras que en predicción numérica del tiempo, la medida de la bondad y habilidad de los modelos está relativamente bien definida (aunque existen también diferentes índices de verificación), en el caso de los modelos climáticos es mucho más difícil definir un único índice o métrica para las proyecciones a escala secular (KNUTTI, 2008). Cada modelo tiende a simular mejor unos aspectos del sistema climático mientras que otros los simula más defectuosamente. Los diferentes modelos simulan diferentemente el sistema climático en función de la región, de la variable, de la escala temporal, de la estación del año, del estadístico que se considere para estimar el clima, etc. Todos los modelos tienen sus fortalezas y debilidades, de ahí que el calificar como “bueno” o “malo” un modelo depende mucho de su posterior aplicación.

Los modelos atmosféricos utilizados en la predicción a corto (2-3 días) y medio (7-10 días) plazo se utilizan rutinariamente de forma operativa y pueden verificarse con un pequeño retardo de días frente a lo que sucedió realmente. Las estadísticas acumuladas de las verificaciones proporcionan información sobre la calidad de un modelo o sistema de predicción particular. En las simulaciones de cambio climático los modelos se utilizan para hacer proyecciones de posibles cambios futuros en escalas decenales y seculares que no se corresponden con situaciones análogas precisas del pasado. Sin em-

bargo, aunque las verificaciones de clima futuro no son en general posibles, siempre se puede aumentar la confianza en un modelo mediante evaluaciones de las simulaciones del modelo en periodos instrumentales históricos o paleoclimáticas.

Existen diferentes formas de evaluar los modelos, si bien casi todas se pueden agrupar en evaluaciones a nivel de los componentes del modelo y en evaluaciones a nivel de la totalidad del sistema, donde el foco se centra en las salidas del modelo total (IPCC, 2007). La evaluación de un modelo y, por lo tanto, la confianza que depositamos en él, proviene de distintas líneas, siendo la conjunción de todas las líneas o enfoques la que realmente incrementa nuestra confianza en el modelo en cuestión.

Las evaluaciones restringidas a los diferentes componentes del modelo permiten comprobar mediante tests estandarizados, p. ej., los métodos numéricos utilizados, las diferentes parametrizaciones físicas, etc. Estas evaluaciones se realizan con frecuencia en el marco de proyectos que involucran además comparaciones, bien entre componentes de un subsistema del sistema climático (p. ej., parametrización de la radiación o de la convección en el subsistema atmósfera) o entre los subsistemas mismos de un modelo climático global.

Las evaluaciones del sistema en su totalidad se aplican al modelo climático global con todos sus subsistemas (atmósfera, océano, superficie, terrestre, hielos marinos, etc.) acoplados entre sí. Esta evaluación permite estudiar el comportamiento y calidad del sistema completo, independientemente de la calidad de cada uno de sus subsistemas y de los componentes de los mismos. En este caso, se evalúa además el acoplamiento entre componentes y subsistemas. No es inhabitual que sistemas constituidos por subsistemas de un alto grado de calidad se degraden al acoplarse entre ellos inadecuadamente o con un ajuste (*tuning*) defectuoso o insuficiente.

Las evaluaciones de los modelos se realizan en periodos correspondientes bien al clima presente o bien a climas pasados. En general, los diferentes modelos se han utilizado para simular el cambio climático observado durante el siglo XX, si bien los cambios en los forzamientos (p. ej., radiación solar, actividad volcánica, etc.) no se conocen perfectamente en dicho periodo.

Las evaluaciones de los modelos globales del clima se realizan también en diferentes escalas temporales, así permiten conocer las capacidades de los mismos para simular la variabilidad climática a gran escala en rangos temporales que abarcan desde la escala sinóptica hasta la decenal y secular. Es muy importante conocer la capacidad de los modelos climáticos para simular con precisión los modos de variabilidad de baja frecuencia que condicionan fuertemente el clima en muchas regiones. Este es el caso, por ejemplo, de Europa Occidental, y de la Península Ibérica en particular, cuyas precipitaciones están correlacionadas con la fase e intensidad del patrón de la Oscilación del Atlántico Norte.

1.4. COMBINACIÓN Y PESADO DE MODELOS

Idealmente, los diferentes métodos de evaluación de modelos se basan en el cálculo de métricas cuantitativas que proporcionan una idea de la precisión con la que los modelos climáticos simulan el clima contemporáneo o pasado. Estos cálculos per-

miten establecer una ordenación o *ranking* de los modelos que se comparan por su calidad según el método cuantitativo de evaluación que se considere. Una cuestión que no tiene una fácil respuesta es la relación entre la precisión de las simulaciones del clima presente o pasado y la precisión de las proyecciones futuras de cambio climático. Ha habido algunos intentos de utilizar métricas basadas en observaciones para ponderar la fiabilidad de los diferentes modelos que contribuyen en una proyección probabilística basada en *ensembles* multimodelo. Sin embargo, en muchos casos las relaciones entre las métricas más obvias de magnitudes observables y las proyecciones son débiles o inexistentes (KNUTTI, 2010a). Suele ser, en general, menos problemático simplemente eliminar de un *ensemble* multimodelo los modelos que peor simulan, normalmente porque son incapaces de reproducir procesos importantes o porque físicamente no son plausibles, que llegar a un acuerdo acerca del mejor modelo (GIORGI Y MEARN, 2002).

La utilización de *ensembles* multimodelo, es decir, de *ensembles* basados en AOGCMs desarrollados en diferentes centros de modelización, se utiliza para las proyecciones/predicciones climáticas tanto en las escalas estacional/interanual como en la secular. En la medida que los errores de simulación de los diferentes AOGCMs son independientes, se puede esperar que la media del *ensemble* verifique mejor que cada uno de los modelos individuales proporcionando la “mejor estimación” de la predicción. Los resultados en muchos casos han demostrado que esto es así tanto en la verificación en la escala estacional (PALMER ET AL., 2004; HAGEDORN ET AL., 2005) como en las simulaciones largas del clima actual (LAMBERT Y BOERT, 2001; GLECKLER ET AL., 2008; REICHLER Y KIM, 2008).

El proyecto ENSEMBLES (véase <http://ensembles-eu.metoffice.com/>) ha tenido como principal objetivo la estimación de las incertidumbres en las proyecciones climáticas. Para ello, ha desarrollado un sistema de predicción por conjuntos (*ensembles*) basado en modelos climáticos globales y regionales sobre Europa con el fin de generar una estimación probabilística objetiva de la incertidumbre del clima futuro desde las escalas estacionales a las seculares. En relación con los modelos regionales de clima, se ha realizado en el proyecto una exploración, basada en índices de verificación frente a observaciones, de pesos para los distintos modelos que permitan su combinación de una forma más razonable que la simple equiprobabilidad como se venía utilizando hasta ahora. Con los modelos globales no se ha hecho ningún intento en el proyecto de ponderación de los distintos modelos para la combinación del *ensemble* multimodelo.

Experiencias previas con RCMs en el proyecto PRUDENCE (véase <http://prudence.dmi.dk/>) han mostrado que no existe un solo modelo que sea superior a los otros para todas las variables, estaciones, regiones y estadísticos (CHRISTENSEN Y CHRISTENSEN, 2007; JACOB ET AL., 2007). En consecuencia, la información procedente de los *ensembles* multimodelo posee un valor que puede incrementarse mediante una ponderación basada en la calidad y prestaciones de los modelos incluidos en el *ensemble*.

En el caso de proyecto ENSEMBLES y para los RCMs se diseñó de forma exploratoria un conjunto de pesos basados en las simulaciones con los RCMs forzados por ERA40 y una rejilla de observaciones (HAYLOCK ET AL., 2008). Dado el carác-

ter preliminar de la metodología, se exploraron diferentes formas de combinar las métricas con el fin de estudiar la robustez de la metodología. De hecho, existe un grado considerable de subjetividad tanto en la elección de las métricas como en la asignación de pesos en su combinación. Las métricas de evaluación se seleccionaron específicamente en virtud de los objetivos específicos de las prestaciones de los RCMs que añaden valor a las proyecciones de cambio climático. Entre las métricas que se seleccionaron se incluyen (KJELLSTRÖM ET AL., 2010):

- Circulación de gran escala y regímenes de tiempo.
- Señal mesoescalar de temperatura y precipitación.
- PDFs de precipitación y temperatura diaria (SÁNCHEZ ET AL., 2009).
- Extremos de temperatura y precipitación.
- Tendencias de temperatura.
- Ciclo anual de temperatura y precipitación.

Las últimas cinco de estas métricas se definieron en ENSEMBLES para todo el continente europeo y para algunas subregiones tanto en la escala temporal estacional como en la anual. La filosofía general que subyace en la combinación de métricas para producir pesos es que los modelos “buenos” obtengan buenos índices en todas las métricas consideradas. Esto evita que haya efectos de compensación de sesgos que afecten a algunas, pero no a todas, de las medidas consideradas.

Para combinar las métricas, la propuesta realizada en el proyecto ENSEMBLES se basaba en asignar a las métricas individuales un valor entre 0 y 1 y combinarlas de forma multiplicativa. También podía asignarse un exponente distinto a las métricas para tener en cuenta que unas métricas pueden ser más relevantes que otras o que existe un solapamiento de algún tipo entre las métricas: $w_{RCM} = \prod_{i=1}^6 f_i^{n_i}$. Un valor cero en el exponente implica un pesado igual de todos los RCMs con lo que la información procedente de las métricas no se utiliza. Un valor uno en el exponente implica que cada métrica se pondera de igual forma y, por lo tanto, se consideran igualmente importantes.

La metodología de pesado explorada en el proyecto ENSEMBLES (CHRISTENSEN ET AL., 2009) es solamente un primer intento de aproximación al tema, aunque parece ser capaz de enfatizar las similitudes y diferencias en este caso de los distintos RCMs.

1.5. EVALUACIONES PREVIAS DE LOS MODELOS CMIP3 DEL AR4-IPCC

Los modelos climáticos son las herramientas que se utilizan para la obtención de las proyecciones de clima futuro. Cuanto más próximas a la realidad sean las simulaciones del clima presente, realizadas por los modelos, más confianza se tendrá en sus proyecciones, de ahí la importancia que tiene la evaluación de los modelos para poner en conocimiento de sus desarrolladores sus habilidades y defectos. La necesidad de evaluación de los modelos se puso ya de manifiesto con los proyectos de Intercomparación de modelos, AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project), GATES (1992) y GATES ET AL. (1999); CMIP (Coupled Model Intercomparison Project), MEEHL ET AL. (2000 y 2005b); y (CMIP3), MEEHL ET AL. (2007), entre otros.

Los objetivos de estos proyectos han sido comparar y evaluar los resultados de diferentes modelos de forma sistemática y tratar de identificar las razones de sus diferencias.

En general, las evaluaciones de los modelos globales que se encuentran en la bibliografía y entre las que destacan las realizadas por COLLINS ET AL. (2006); JOHNS ET AL. (2006); DELWORTH ET AL. (2006); WATTERSON (1996); TAYLOR (2001); KNUTTI ET AL. (2006 y 2008); PIANI ET AL. (2005); SHUKLA ET AL. (2006); REICHLER Y KIM (2008) entre otros, se caracterizan por haber analizado la habilidad de los modelos climáticos para simular variables climáticas en escalas mensuales, estacionales o anuales. La desventaja de utilizar valores medios, mensuales o estacionales, es que estos pueden esconder sesgos y errores sistemáticos que, sin embargo, podrían ser identificados si se utilizase dato diario.

La evaluación realizada en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC se ha centrado principalmente en analizar la capacidad general de los modelos considerando solamente su comportamiento global medio. En este sentido es importante tener en cuenta que una “buena” simulación del valor medio no asegura que otras propiedades de los datos estén bien simuladas (KHARIN Y ZWIERS, 2000; ZWIERS Y ZHANG, 2003; SCHAEFFER ET AL., 2005; KHARIN Y ZWIERS, 2005), por lo que se hace necesario realizar evaluaciones regionales y a distintas escalas temporales.

Una evaluación a escala diaria será muy valiosa no solo para subsanar en parte los inconvenientes citados anteriormente, sino también porque el clima en escalas diarias de tiempo tiene un impacto directo sobre la salud (TRIGO ET AL., 2005) y las actividades humanas (por ejemplo, la agricultura, LUO ET AL., 2005). Otro aspecto a tener en cuenta son los eventos extremos; estudios recientes de FRICH ET AL. (2002), KIKTEV ET AL. (2003) Y ALEXANDER ET AL. (2006) utilizan índices climáticos extremos para explorar la frecuencia y gravedad de los fenómenos climáticos extremos, siendo estos de gran importancia para la comunidad de impactos.

Entre las evaluaciones realizadas en el Cuarto Informe del IPCC, encontradas por los autores en la bibliografía, y realizadas con dato mensual cabe destacar, por un lado, aquellas que analizan la habilidad de los modelos de simular los modos de variabilidad climática en el Atlántico y Pacífico norte como STONER ET AL. (2009) Y HANDORF Y DETHLOFF (2009), y, por otro lado, las que evalúan distintas variables de los modelos como FAGGIAN Y GIORGI (2009) quienes evalúan la temperatura media del aire en superficie y la precipitación para la región alpina; SHUKLA ET AL. (2006) evalúan la anomalía estacional de temperatura en superficie utilizando como métrica la entropía; GLECKLER ET AL. (2008) evalúan un total de 22 variables, a diferencia de los estudios anteriores en los que solamente se considera un número muy limitado de variables.

Entre los estudios de las evaluaciones realizadas con dato diario caben destacar: a) PERKINS ET AL. (2007) Y PERKINS Y PITMAN (2009) quienes realizan una evaluación de las temperaturas máxima, mínima y precipitación utilizando funciones de densidad de probabilidad (PDF) en el primero, y en el segundo analizan la influencia del sesgo de los modelos en las proyecciones de cambio climático; b) MÁXIMO ET AL. (2008) establecen un *ranking* de los modelos AR4 utilizando las PDF de PERKINS Y PITMAN (2007) para una región determinada de Australia; c) MIN Y HENSE

(2006) evalúan los modelos siguiendo el método bayesiano; d) SUN ET AL. (2006) evalúan la capacidad de los modelos para simular la precipitación, su intensidad y frecuencia; e) XAVIER ET AL. (2008) desarrollan una métrica para evaluar la variabilidad intraestacional en los modelos; f) KHARIN ET AL. (2007) evalúan extremos de precipitación y temperatura; g) CHEN Y KNUTSON (2008) comparan índices extremos de precipitación; h) DAI (2006) analiza las características de la precipitación diaria en 18 modelos del AR4.

La importancia y novedad de este estudio radica en que su objetivo es abordar una evaluación de los modelos AR4 utilizando datos tanto mensuales como diarios para poder estudiar adicionalmente las escalas sinópticas y su influencia en el clima. Además se ha abordado la evaluación de los modelos desde distintas perspectivas y escalas temporales y espaciales, utilizando en algunos casos técnicas novedosas y métricas hasta ahora apenas utilizadas en evaluación de modelos sobre nuestra región de interés. A este respecto los estudios de evaluación sobre nuestra área son por el momento escasos, destacando los realizados por NIETO Y RODRÍGUEZ-PUEBLA (2006) Y ERRASTI ET AL. (2011) en los que entre otras variables se compara la variabilidad de la precipitación observada con la obtenida por modelos. Finalmente, y de acuerdo con las recomendaciones de KNUTTI ET AL. (2010a) y ante la inexistencia de una métrica universal para medir la bondad de los modelos, se ha utilizado una variedad de métricas que permiten cuantificar diferentes aspectos y escalas de las simulaciones.

2.

Evaluación de precipitación y temperatura

2.1. Introducción

2.2. Datos

2.3. Metodología

2.4. Resultados

2.4.1. Ciclo anual de precipitación

2.4.2. Ciclo anual de temperatura

2.4.3. Análisis de la distribución espacial de precipitación

2.4.3.1. Anual

2.4.3.2. Invierno

2.4.3.3. Verano

2.4.4. Análisis de la distribución espacial de temperatura

2.4.4.1. Anual

2.4.4.2. Invierno

2.4.4.3. Verano

2.5. Conclusiones

2.1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este capítulo es la evaluación sobre la península Ibérica de las salidas directas de precipitación y temperatura de los 22 modelos del proyecto de intercomparación CMIP3 que contribuyeron extensamente al Cuarto Informe de Evaluación (AR4) del IPCC. La comparación se realiza frente a datos observacionales en rejilla generados por la Climate Research Unit (CRU) de la Universidad de East Anglia (Reino Unido). La escasa resolución espacial de los modelos globales considerados en este capítulo ha aconsejado no incluir ninguno de los archipiélagos españoles.

La primera y más inmediata evaluación de un modelo climático suele referirse con frecuencia a las variables precipitación y temperatura en superficie por diferentes razones. En primer lugar, la precipitación y la temperatura son las variables climáticas que normalmente se utilizan para definir el clima de una determinada región o localidad. En segundo lugar, se trata de las variables que históricamente se han medido en más observatorios y que poseen las series más largas. Y finalmente, por la percepción social de que ambas variables son las determinantes y condicionantes de nuestras actividades y de nuestra relación con el ambiente que nos rodea.

En particular, el estudio de la variabilidad de la precipitación es de importancia primordial, principalmente debido a su impacto en actividades económicas tales como la producción agrícola y los recursos hídricos (TRIGO Y PALUTIKOF, 2001). Las características orográficas y el origen atlántico de muchas perturbaciones sinópticas contribuyen a variaciones espaciales muy grandes en las cantidades de precipitación observadas. (SERRANO ET AL., 1999; RODRÍGUEZ-PUEBLA ET AL., 1998).

La comparación de las salidas directas de un modelo climático global con las observaciones no es fácil ni obvia, ya que se trata de magnitudes que no son directamente comparables. Las mediciones, tanto de temperatura como de precipitación, se realizan en los distintos observatorios siguiendo la normativa que establece la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y son representativas del punto en el que se realiza la medida. Las salidas directas de los modelos corresponden a valores de las mismas variables en puntos de rejilla.

En el caso de la temperatura, como los niveles verticales de los modelos raramente coinciden con la altura de referencia (2 m) para las mediciones de temperatura, los valores son interpolados teniendo en cuenta la estructura vertical de la capa límite. Además, la orografía del modelo es una representación necesariamente suavizada, por la baja resolución de los modelos de la orografía real por lo que, con frecuencia, suele haber discrepancias para cada punto de rejilla entre la altitud de la superficie real y la correspondiente del modelo, afectando lógicamente al valor de la temperatura a 2 m.

La precipitación que generan los modelos es una variable areal representativa y promediada en todo el cuadrado de rejilla. Este carácter de la precipitación está asociado al hecho de que la precipitación en los modelos procede de las parametrizaciones que representan los procesos subrejilla, no resueltos explícitamente por la rejilla de cálculo de los modelos, y, por lo tanto, los valores son representativos de la totalidad del cuadrado de rejilla. En consecuencia, la precipitación de los mode-

los suele tener un aspecto más suavizado y con menor variabilidad espacial que la precipitación observada.

Adicionalmente, hay que considerar que los procesos de interpolación para llevar a una rejilla común los modelos y las observaciones tienden a suavizar los datos. Todas estas limitaciones se palian en parte cuando se calculan promedios espaciales y temporales. Sin embargo, pueden exacerbarse cuando se calculan momentos de orden superior. Las comparaciones también entre salidas de modelos y observaciones de variables que muestran una gran variabilidad espacial precisan con frecuencia de algoritmos de aproximación de escalas. Este es el caso de la precipitación en la península Ibérica que, en principio, cuenta con una gran densidad de observaciones.

En este capítulo, al no haberse realizado cálculos y comparaciones de extremos, se puede suponer que algunos de los problemas antes indicados que surgen cuando se comparan las observaciones con las salidas directas de los modelos no serán especialmente graves. En cualquier caso la evaluación aquí realizada deberá complementarse en un futuro con la evaluación de regionalizaciones de los modelos globales frente a datos observacionales en una escala espacial comparable.

La comparación directa de la precipitación obtenida de modelos globales con datos observacionales para una selección de modelos de AR4 y sobre la península Ibérica ha sido previamente aplicada por algunos autores (NIETO Y RODRÍGUEZ-PUEBLA, 2006) y los resultados aquí recogidos son consistentes con ellos.

2.2. DATOS

En este capítulo se han utilizado las siguientes bases de datos:

- a) Todos los modelos climáticos utilizados por el AR4 y disponibles en el Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison (PCMDI) (véase <http://www.pcmdi.llnl.gov>). El análisis de este capítulo se basa en los datos de los valores medios mensuales de temperatura y de precipitación del siglo XX (20C3M). En el caso de encontrarse disponibles varias simulaciones por modelo, se ha optado por elegir la primera (run1). La no disponibilidad de datos de temperatura para los modelos INM-CM3.0 y MRI-CGCM2.3.2 no ha permitido su evaluación para esta variable, aunque sí para la precipitación. Las características de los modelos climáticos utilizados se resumen en la Tabla A.1 (Anexo A).
- b) Los datos de observación para temperatura y precipitación (MITCHELL Y JONES, 2005), se han extraído de la rejilla global de valores mensuales del CRU (Climate Research Unit) de la Universidad de East Anglia (http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_2.10) con resolución horizontal $0,5^\circ \times 0,5^\circ$.
- c) Datos de los reanálisis: i) del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ERA40) (UPPALA ET AL., 2005) y ii) del National Center for Environmental Prediction (NCEP) (KALNAY ET AL., 1996) promediados mensualmente.

Todos los datos de los modelos y de los reanálisis se han interpolado a la rejilla regular de las observaciones con una resolución de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ sobre un domi-

nio limitado por (10,5°O, 3,5°E y 45,5°N, 35,5°N) que incluye a la península Ibérica. Tanto de los datos observacionales CRU, como de los datos de los modelos y de los reanálisis se eliminan de la rejilla común de 0,5° los datos que no pertenecen a la península Ibérica, quedando finalmente 284 puntos sobre los cuales se han realizado los cálculos en esta sección. Se han considerado 20 años de datos (desde 1980 a 1999) consistente con el periodo utilizado en AR4.

2.3. METODOLOGÍA

Los cálculos relativos tanto al ciclo anual medio como las distribuciones espaciales de precipitación y temperatura se realizan para las observaciones y para los modelos promediando sobre los 284 puntos que cubren la península Ibérica y a su vez promediando para los 20 años de datos considerados. Las distribuciones espaciales de precipitación y temperatura se estudian tanto anualmente como para las estaciones invernal (diciembre, enero y febrero) y estival (junio, julio y agosto). Las diferencias entre observaciones y modelos se estiman con tres índices estadísticos seleccionados entre los más habituales: error absoluto medio (EAM), correlación absoluta (CORR) y desviación estándar espacial (σ). Finalmente, se resume la información procedente de los diferentes estadísticos en tablas utilizando un código terciario tipo semáforo con tres colores (verde, amarillo y rojo), correspondiendo el color verde (rojo) al tercio de modelos que mejor (peor) comparan con las observaciones. Esta información se presenta también en forma de diagramas de Taylor (TAYLOR, 2001).

Las tablas con los índices estadísticos calculados tanto para el ciclo anual como para la distribución espacial de precipitación y temperatura y el correspondiente código de color permiten en una rápida inspección establecer una ordenación (*ranking*) de los modelos que mejor se aproximan a las observaciones. También se ha incluido en las comparaciones la media de los modelos y, en los casos en los que sea procedente, los reanálisis ERA40 y NCEP.

2.4. RESULTADOS

2.4.1. Ciclo anual de precipitación

El panel de la Figura 2.1 muestra en 6 gráficos el ciclo anual de precipitación promediado en 20 años y a su vez promediado sobre los 284 puntos de rejilla de la península Ibérica de la observación, de los modelos, de los reanálisis ERA40 y NCEP y de la media de los modelos. Los dos reanálisis muestran los dos máximos de precipitación que aparecen en las observaciones en primavera y otoño. Muy pocos modelos, sin embargo, muestran esta estructura del ciclo anual, siendo destacables los modelos UKMO-HadGEM1, GFDL-CM2.0 y el MIROC3.2(hires) por representar razonablemente bien la estructura bimodal del ciclo anual de la precipitación aunque algo exagerada en el caso de los dos primeros y más reducida en el tercero. La con-

secuencia de esta ausencia de bimodalidad en la mayoría de los modelos es lógicamente su ausencia en la media de los modelos. Los modelos tienden a sobrestimar la precipitación media peninsular desde noviembre a abril y de junio a agosto y a subestimarla en los periodos de primavera y otoño tal y como se observa en Figura 2.1. Sin embargo, la precipitación media de la media de los modelos (55,12 mm) es muy similar y algo mayor que la observada (52,55 mm). En general se observa que la oscilación anual es de mayor amplitud que la observada en la mayoría de los modelos.

La Tabla B.1 (véase Anexo B) resume los diferentes índices estadísticos utilizados para estimar el error con respecto a las observaciones CRU del ciclo anual de precipitación, obtenidos a partir de los modelos y de los reanálisis, y calculados a partir de los datos de precipitación mensual. Es de destacar, como era esperable, la alta correlación del ciclo anual procedente del reanálisis ERA40 con los datos CRU que no se corresponde con la más baja correlación del reanálisis NCEP. De hecho, bastantes modelos superan a este último tanto en términos de correlación como de error absoluto medio. Conviene recordar en este punto que la precipitación proporcionada por los reanálisis no es una variable analizada basada en los datos, sino una variable pronosticada por el modelo utilizado en la asimilación. Por ello, las discrepancias habrá que atribuirles, posiblemente, a deficiencias del modelo.

La Figura D.1 (véase Anexo D) representa en forma de diagrama de Taylor el error del ciclo anual de precipitación de todos los modelos y reanálisis referidos a la observación (CRU). Los modelos y los reanálisis se representan por las letras y números asignados en la Tabla A.1 (véase Anexo A). Los ejes del diagrama representan las desviaciones estándar, la correlación se representa en el sector del arco externo y la distancia de un modelo (o reanálisis) con los datos, es proporcional al error cuadrático medio centrado (RMS-C) (TAYLOR, 2001). La Tabla 2.1 representa mediante un código de colores terciario tipo semáforo el tercio de modelos que más/menos se aproxima a la observación según los estadísticos considerados utilizando el color verde/rojo. Los 7 modelos con los valores de los estadísticos más altos/bajos están representados en verde/rojo. El resto están representados en amarillo. También se ha representado el número de orden de cada modelo para cada estadístico. Combinando todos los estadísticos, se observa que los modelos que mejor representan el ciclo anual de precipitación (color verde en la Tabla 2.1) son ECHO-G y MIROC3.2(medres). La media de los modelos muestra también todos sus estadísticos en el tercil superior (en color verde). Por el contrario, los modelos que peor representan el ciclo anual de precipitación (color rojo en la Tabla 2.1) son GISS-AOM y ECHAM5/MPI-OM. El diagrama de Taylor (véase Figura D.1) muestra también claramente estos dos últimos modelos más separados del resto y del punto correspondiente a la observación (CRU) en términos de distancia RMS-C.

2.4.2. Ciclo anual de temperatura

El panel de la Figura 2.2 muestra en 6 gráficos el ciclo anual de temperatura promediado en 20 años y a su vez promediado sobre los 284 puntos de rejilla de la península Ibérica de la observación, de los modelos, de los reanálisis ERA40 y NCEP

y de la media de los modelos. Para representar con una mayor claridad el ciclo anual, se ha optado por representar en la Figura 2.2 la diferencia de temperaturas respecto a la observación (CRU) en lugar de los valores absolutos. Se observa en este panel que el ciclo anual de temperatura tiende a ser sobrestimado por los modelos en el periodo invernal y subestimado el resto del año, comportamiento que queda reflejado en el ciclo de la media de los modelos. El máximo y el mínimo del ciclo anual muestran una gran correspondencia de todos los modelos con los datos. Los modelos que mejor se ajustan al ciclo anual son MIROC3.2(hires), UKMO-HadGEM1 y CCSM3. Por el contrario, hay modelos que sobrestiman todos los meses la temperatura (GISS-EH, MIROC3.2(medres)), mientras que otros la subestiman en todo el periodo (FGOALS-g1.0, CGCM3.1(T47), CGCM3.1(T63) y UKMO-HadCM3). Los modelos GISS-AOM y ECHO-G muestran una menor oscilación anual, con un máximo mucho menor y un mayor mínimo, y además desplazamiento del máximo hacia agosto y setiembre.

La Tabla C.1 (véase Anexo C) muestra el error del ciclo anual de temperatura para cada reanálisis y cada modelo estimado mediante los tres estadísticos seleccionados. La Tabla 2.2 representa mediante el código de colores terciario tipo semáforo, mencionado más arriba, el tercio de modelos que más/menos se aproxima a la observación según los estadísticos considerados utilizando el color verde/rojo. Con este código resulta para el ciclo anual de temperatura que los mejores modelos, basado en los

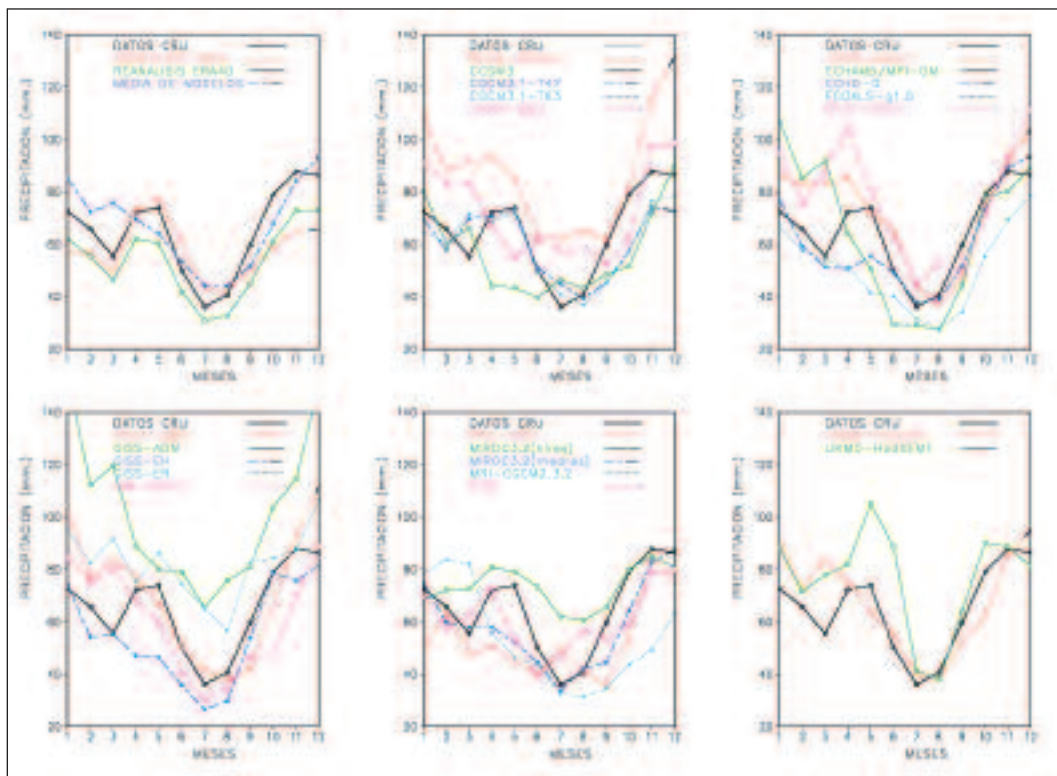


Figura 2.1a-f (de izquierda a derecha y de arriba abajo). Ciclo anual de precipitación promediado en 20 años (1980-1999) y para todos los puntos de rejilla sobre la península Ibérica. La Figura 2.1a (izquierda, fila superior) muestra los valores correspondientes a los datos de observación (CRU), al reanálisis ERA40, al reanálisis NCEP y a la media de los modelos. Las restantes figuras del panel muestran el ciclo anual de los 22 modelos listados en la Figura A.1 del Anexo A. Para facilitar la comparación, la observación (CRU) aparece repetida en todas las figuras a f.

tres estadísticos de error considerados, son UKMO-HadGEM1 y MIROC3.2(hires), mientras que los peores modelos son ECHO-G, GISS-ER y GISS-AOM.

El diagrama de Taylor (véase Figura D.2, Anexo D) muestra una gran tendencia a la agrupación de los modelos alrededor de la observación (designado CRU) con valores muy altos de la correlación. Solamente hay tres puntos que claramente se separan del resto y que corresponden a los modelos ECHO-G, GISS-ER y GISS-AOM, consistentemente con lo obtenidos con el código de colores de la Tabla 2.2.

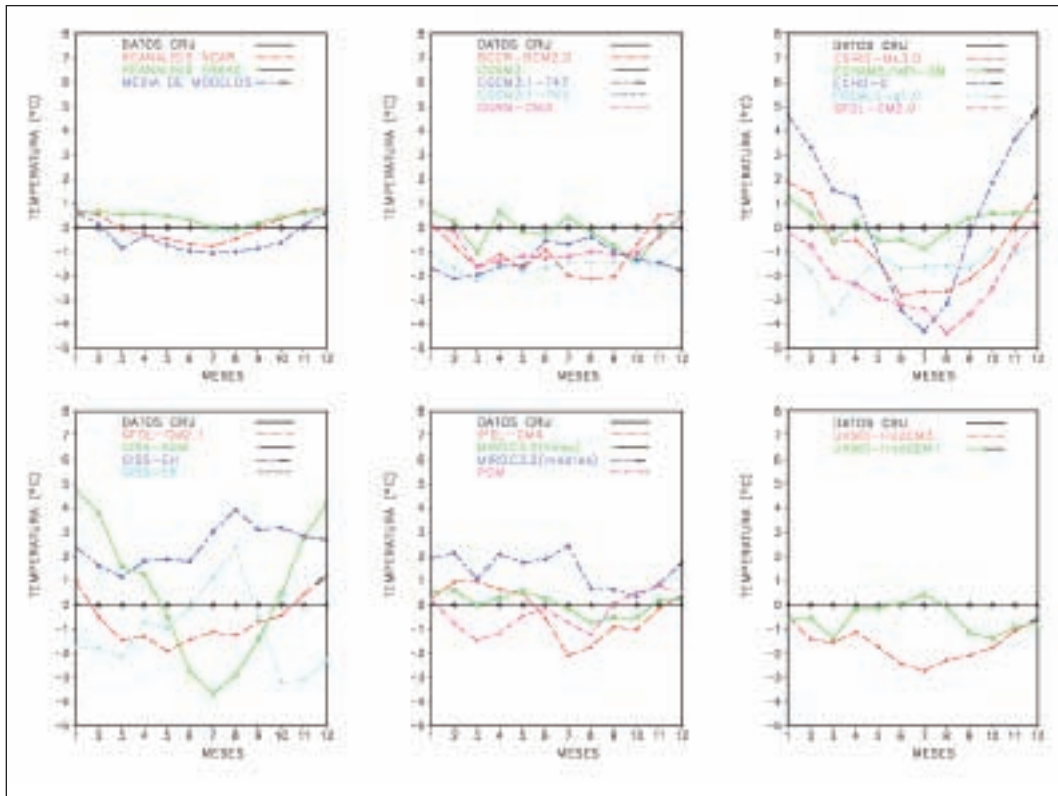


Figura 2.2a-f (de izquierda a derecha y de arriba abajo). Igual que la Figura 2.1a f, pero para el ciclo anual de temperatura media mensual, representada en forma de diferencia respecto a la observación (CRU).

2.4.3. Análisis de la distribución espacial de precipitación

2.4.3.1. Anual

La Figura 2.3 muestra la precipitación anual acumulada promediada en 20 años (1980-1999) obtenida a partir de la observación (CRU), de los reanálisis (ERA40 y NCEP), de los modelos climáticos considerados y de la media de los modelos. La observación muestra un máximo de precipitación anual en la fachada atlántica y cantábrica de la península Ibérica que aparece razonablemente bien representada en los reanálisis, especialmente en ERA40. Una gran mayoría de modelos muestran máximos de precipitación en el noroeste de la península, si bien más suavizados posiblemente debido a la menor resolución de los modelos climáticos respecto a las ob-

servaciones y los reanálisis. La media de los modelos recoge este comportamiento más generalizado con un máximo en el extremo noroeste de la península. Como la orografía de los modelos climáticos está muy suavizada, esto impide la correcta simulación de la precipitación en muchos de ellos ya que gran parte de la precipitación en la península Ibérica tiene un fuerte componente orográfico.

La Figura 2.4 muestra la desviación estándar temporal de la precipitación anual sobre el mismo periodo de 20 años y para los mismos datos de observación, de reanálisis y de modelos. En la observación se observa una estructura principalmente meridional con mayores desviaciones en la parte occidental de la península Ibérica. Esta estructura espacial de la desviación estándar no está suficientemente bien reproducida por un gran número de modelos lo que sugiere deficiencias en la simulación de la variabilidad interanual por parte de los modelos.

La Figura 2.5 muestra la diferencia relativa (en tanto por uno) de los reanálisis y los modelos respecto a la observación. En general, se observa una tendencia a subestimar la precipitación en las zonas costeras periféricas y a sobrestimar la precipitación en el interior de la península. Este es el caso de los reanálisis y de la media de los modelos. Gran parte de este comportamiento es atribuible a la orografía excesivamente suavizada de los modelos que apenas notan la estructura orográfica real de la península Ibérica. En muchos casos, la orografía queda simplemente reducida a un altiplano interior sin que aparezcan ni siquiera insinuadas las cordilleras periféricas y el Sistema Central.

La Tabla B.1 (Anexo B) resume diferentes estadísticos para el error de la distribución espacial de la precipitación anual acumulada. La Tabla 2.1 con el código de colores terciario permite concluir que el peor modelo en los tres estadísticos para la precipitación anual acumulada es el modelo GISS-AOM. No hay ningún modelo que presente color verde en los tres estadísticos considerados.

El diagrama de Taylor de la precipitación anual (véase Figura D.3, Anexo D) muestra claramente que la desviación estándar espacial obtenida a partir de los modelos es, en general, menor que la proporcionada por los datos CRU. Los modelos PCM, CCSM3, MIROC3.2(medres) MRI-CGCM-3.2 y UKMO-HadGEM1 son los que muestran una mayor proximidad con las observaciones en términos de RMS-C.

2.4.3.2. Invierno

La Figura 2.6 muestra la distribución espacial de la precipitación acumulada en los meses de invierno (DEF) promediada en 20 años (1980-1999) obtenida a partir de la observación (CRU), de los reanálisis (ERA40 y NCEP), de cada uno de los modelos y de la media de los modelos. La observación muestra un máximo de precipitación invernal en la fachada atlántica y cantábrica de la península Ibérica que aparece razonablemente bien representada en ambos reanálisis. Los modelos tienden a mostrar un gradiente SE-NO que simplifica y suaviza la precipitación observada.

La desviación estándar temporal de la precipitación invernal (véase Figura 2.7) es, en general, menor en los modelos que en la observación. Este hecho es consecuencia de la menor variabilidad interanual de la precipitación invernal tal y como se simula por una mayoría de modelos.

Los modelos que mejor representan la precipitación invernal basado en los tres estadísticos seleccionados para el error respecto a la observación (véase Tabla 2.1) y utilizando el código terciario de colores son MRI-CGCM2.3.2, PCM y UKMO-HadGEM1, mientras que los peores son BCCR-BCM2.0 y GISS-AOM, consistentemente con lo que se observa en la distancia RMS-C del diagrama de Taylor (véase Figura D.4, Anexo D).

2.4.3.3. Verano

La precipitación estival (véase Figura 2.8) muestra un claro gradiente S-N en las observaciones mientras que los modelos muestran una tendencia a mostrar un gradiente SO-NE aunque hay diferencias apreciables entre ellos. Mientras que un grupo de modelos (BCCR-BCM2.0, CNRM-CM3, GISS-AOM, GISS-ER, y MIROC3.2(hires)) tienen un máximo localizado de precipitación estival en los Pirineos, otros modelos (CSIRO-Mk3.0 y UKMO-HadGEM1) sitúan el máximo en el interior peninsular, y finalmente otros no presentan un máximo definido, aunque sí un gradiente. Las precipitaciones están sobrevaloradas en el interior, como sucedía en invierno, e infravaloradas en el norte y oeste peninsular, (salvo ECHAM5/MPI-OM, FGOALS-g1.0 e INM-CM3.0 que dan menor precipitación en toda la península). La precipitación media de los modelos (95,77 mm) supera claramente a los datos CRU (78,29 mm).

La desviación estándar temporal (véase Figura 2.9) muestra también en las observaciones un gradiente S-N que es recogido por algunos modelos, si bien la forma de la distribución y los valores numéricos muestran discrepancias con la observación.

El modelo que mejor representa la precipitación estival basado en los tres estadísticos seleccionados para el error respecto a la observación (véase Tabla 2.1) y utilizando el código terciario de colores es ECHO-G mientras que los peores son BCCR-BCM2.0, GISS-AOM y CNRM-CM3, consistentemente con lo que se observa en la distancia RMS-C del diagrama de Taylor (Figura D.5, Anexo D).

2.4.4. Análisis de la distribución espacial de temperatura

2.4.4.1. Anual

La Figura 2.10 muestra la distribución espacial de temperatura promediada anualmente para las observaciones, reanálisis, modelos y media de los modelos. En la citada figura se muestra muy claramente que una parte significativa de las diferencias geográficas de temperatura observacional (CRU) está relacionada con la orografía mostrándose valores más bajos coincidentes con las principales cadenas montañosas de la península Ibérica. Esta característica está ausente en la mayoría de los modelos que por su baja resolución no son capaces de resolver las principales características orográficas de la península. De hecho, aunque no se muestra, el campo de temperatura media para todos los modelos está muy correlacionado con el campo de orografía de cada modelo. Hay modelos que muestran mínimos de temperatura media en el interior de la península o ligeramente desplazados hacia el NE en consistencia con la orografía subyacente de cada modelo. La variabilidad interanual de la temperatura media es claramente infravalorada por algunos modelos, singular-

mente el GISS-AOM, tal y como se deduce de la Figura 2.11 que representa la desviación estándar temporal de la temperatura media.

El modelo que mejor simula la distribución espacial de temperatura media anual (véanse las Tablas C.1 (Anexo C) y 2.2) según el código terciático de colores aplicado anteriormente es el MIROC3.2(hires), mientras que los modelos que peor la simulan son CSIRO-Mk3.0 y GISS-EH. Estos resultados son consistentes con lo observado en el diagrama de Taylor (Figura D.6, Anexo D).

2.4.4.2. Invierno

Las características de la distribución espacial de temperatura media promediada para los meses de invierno (DEF) son muy similares a las correspondientes promediadas anualmente y en términos generales adolecen igualmente de los problemas asociados a la baja resolución de los modelos incapaces de representar fielmente la orografía real de la península Ibérica (véase Figura 2.12). La variabilidad interanual de la temperatura media promediada para los meses invernales (véase Figura 2.13) muestra en las observaciones una estructura meridional con valores más altos en la parte oriental de la península, singularmente en las regiones situadas más hacia el SE. Esta estructura es aproximadamente simulada por algunos modelos, siendo capaz la media de todos los modelos de simular vagamente estas diferencias entre la parte oriental y occidental de la península.

Las Tablas C.1 (Anexo C) y 2.2 nos muestran que para los meses invernales, y en coincidencia con el promedio anual, el mejor modelo según el código terciático es MIROC3.2(hires), mientras que el peor es ECHO-G. Estos resultados son consistentes con lo que se observa en el diagrama de Taylor (Figura D.7, Anexo D).

2.4.4.3. Verano

Las características de la distribución espacial de temperatura media promediada para los meses de verano (JJA) vienen sobre todo marcadas, tanto en las observaciones como en los modelos, por un claro gradiente meridional. En términos generales se observan también los problemas asociados a la baja resolución de los modelos incapaces de representar fielmente la orografía real de la península Ibérica (véase Figura 2.14). La variabilidad interanual de la temperatura media, representada por la desviación estándar temporal, promediada para los meses estivales (véase Figura 2.15) muestra en las observaciones una estructura caracterizada por valores más altos en el interior de la península, y valores más bajos en las zonas costeras, singularmente en la fachada atlántica. Estas características son recogidas de forma muy dispar por los modelos que, en términos generales, muestran una mayor variabilidad interanual, tal y como se resume en la media de los modelos que muestra valores claramente más altos que en la observación, si bien se mantiene una estructura similar con valores mayores hacia las regiones más interiores. Las Tablas C.1 (Anexo C) y 2.2 nos muestran que para los meses estivales los mejores modelos, según el código terciático de colores, son MIROC3.2(hires), ECHAM5/MPI-OM y CCSM3, mientras que los peores son ECHO-G y GISS-AOM. Estos resultados son consistentes con lo que se observa en el diagrama de Taylor (Figura D.8, Anexo D).

2.5. CONCLUSIONES

Las Tablas 2.1 y 2.2 resumen de forma muy sintética la evaluación de todos los modelos considerados utilizando tanto la distribución espacial como el ciclo anual de los campos de precipitación y temperatura. Las métricas utilizadas para estimar las diferencias entre las climatologías proporcionadas por los modelos y por la observación se basan en índices estadísticos habituales y en la utilización de un código terciario simple y visual. Este código permite una inmediata clasificación de los modelos para posteriores usos bien sean relacionados con la selección de modelos para su regionalización o para su combinación ponderada por su calidad.

En términos generales, las principales conclusiones de este capítulo son:

La clasificación de los modelos utilizando el código terciario simple propuesto es consistente con la información presentada en forma de diagramas de Taylor. Esto es esperable, ya que se trata de diferentes formas de representar visualmente la misma información contenida en los índices estadísticos calculados. La presentación gráfica basada en colores permite seleccionar inmediatamente los modelos que mejor y peor ajustan su climatología a las observaciones de cara fundamentalmente bien a descartar o seleccionar modelos para su posterior utilización. Los algoritmos más finos de pesado de modelos no parecen muy adecuados a la vista de la disparidad de resultados obtenidos por diferentes autores.

La precipitación y la temperatura procedentes de los modelos muestran las deficiencias asociadas con la escasa resolución de los mismos que les impide representar adecuadamente las características orográficas principales de la península Ibérica. En consecuencia, una parte relevante de las deficiencias en la simulación de ambas variables es atribuible a una insuficiente representación de la orografía por parte de los modelos. El régimen de precipitación de la península Ibérica se caracteriza por una gran variabilidad tanto en el dominio espacial como temporal. El ciclo anual bimodal observado en la península Ibérica para la precipitación apenas es representado por los modelos. Consecuentemente, los modelos tienden a sobrestimar la precipitación media peninsular desde noviembre a abril y de junio a agosto y a subestimarla en los periodos de primavera y otoño. Esta característica esencial de la precipitación sobre la península es una carencia fundamental de los modelos y la atribución de sus causas permitirá avanzar en una mejor simulación del clima. Tanto la insuficiente resolución espacial, como las parametrizaciones físicas empleadas deberán investigarse como causas posibles de este comportamiento.

El ciclo anual de temperatura tiende a ser sobrestimado por los modelos en el periodo invernal y subestimado el resto del año. Esta característica puede ser explicada razonablemente por la insuficiente resolución espacial que tiende a suavizar los extremos. Por esta misma razón, no se han hecho intentos de estimar la bondad de los extremos simulados por los modelos.

En términos generales, mientras que las características a grandes rasgos de la distribución espacial de precipitación acumulada y temperatura media están razonablemente simuladas por los modelos, su variabilidad interanual presenta serias deficiencias.

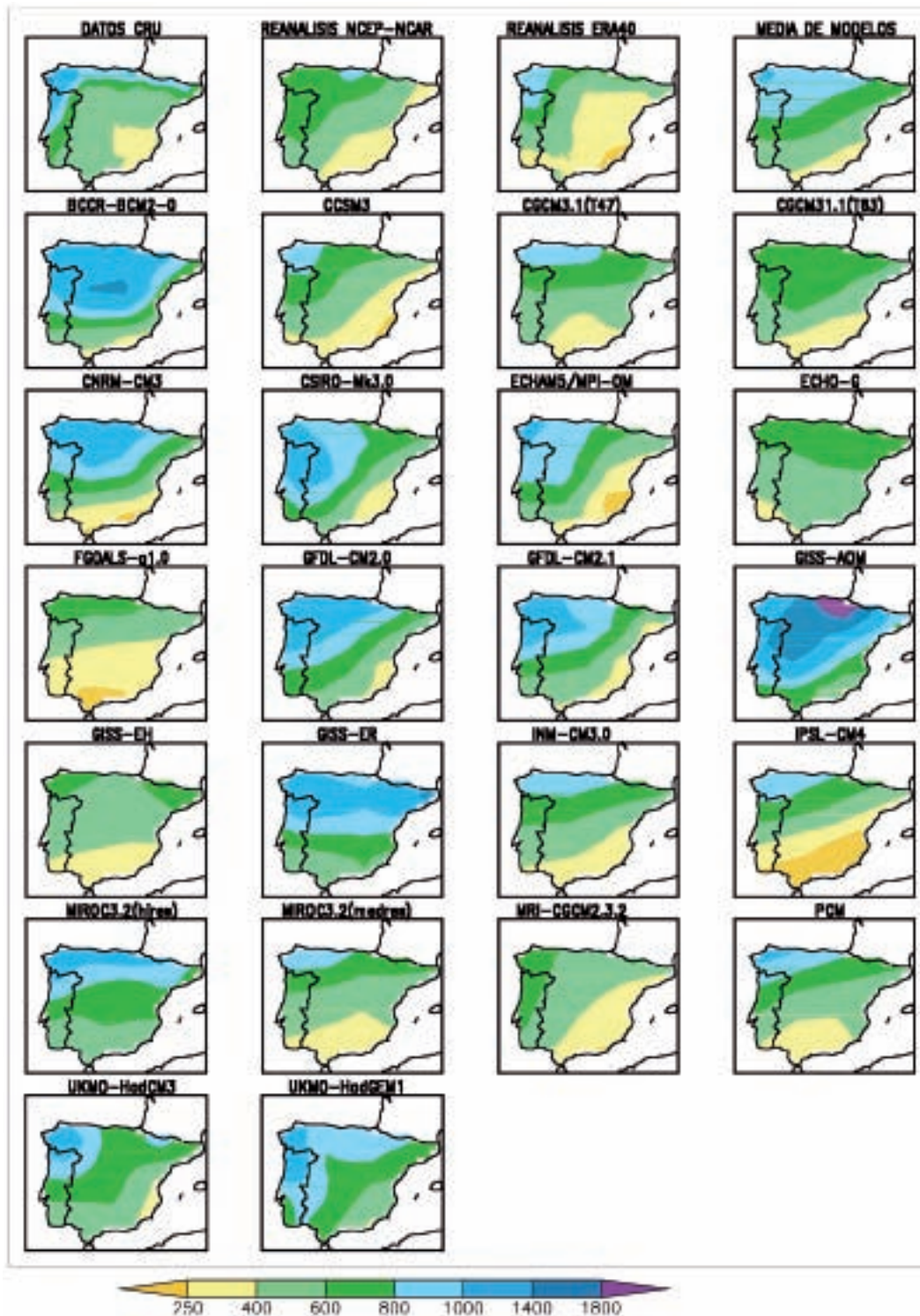


Figura 2.3. Precipitación (en mm) anual promediada en 20 años (1980-1999) sobre la península Ibérica. En la primera fila se muestran los campos correspondientes a los datos de observación (CRU), al reanálisis NCEP, al reanálisis ERA40 y a la media de los modelos. Las restantes figuras del panel muestran los campos de precipitación media generados por los 22 modelos listados en la Tabla A.1 del Anexo A.

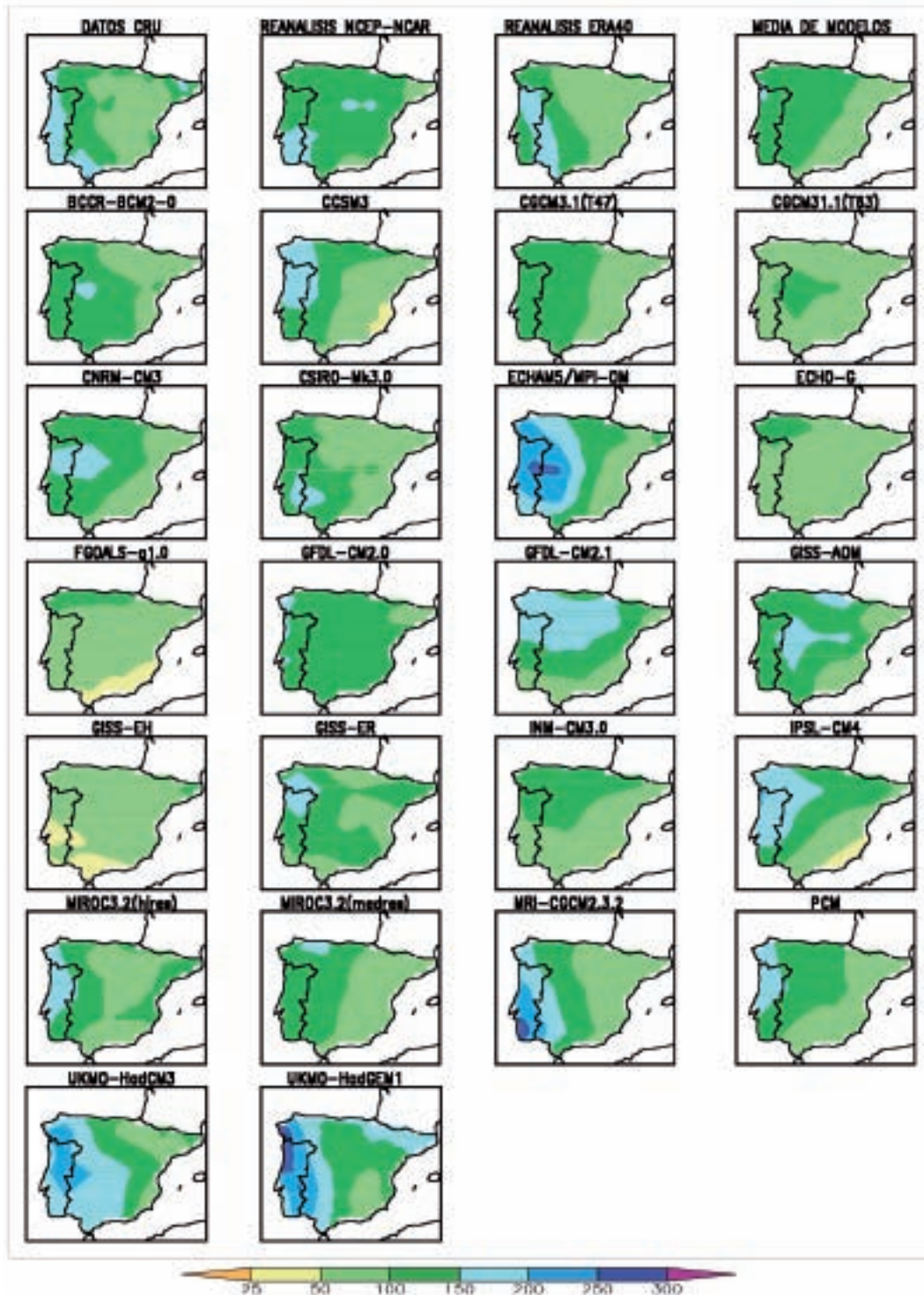


Figura 2.4. Desviación estándar de la precipitación anual (en mm) en el periodo de 20 años (1980-1999) sobre la península Ibérica. En la primera fila se muestran los campos correspondientes a los datos de observación (CRU), al reanálisis NCEP, al reanálisis ERA40 y a la media de las desviaciones de los modelos. Las restantes figuras del panel muestran la desviación estándar de los campos de precipitación media generados por los 22 modelos listados en la Tabla A.1 del Anexo A.

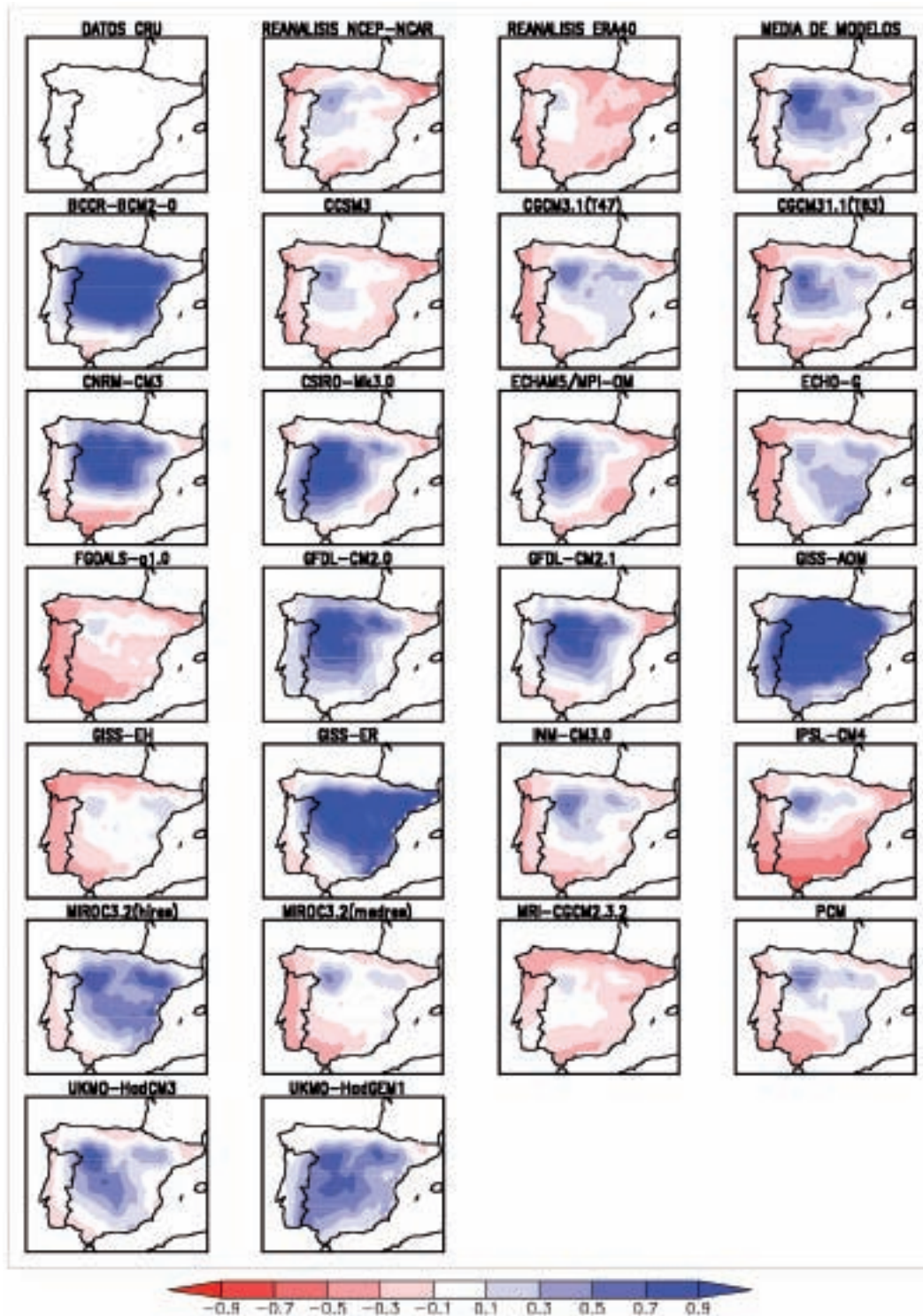


Figura 2.5. Diferencias relativas respecto a la observación de la precipitación media anual (en tanto por uno) en el periodo de 20 años (1980-1999) sobre la península Ibérica. En la primera fila se muestran los campos correspondientes al reanálisis NCEP, al reanálisis ERA40 y a la media de los modelos. Las restantes figuras del panel muestran la diferencia relativa respecto a la observación de la precipitación media anual de los 22 modelos listados en la Tabla A.1 del Anexo A.

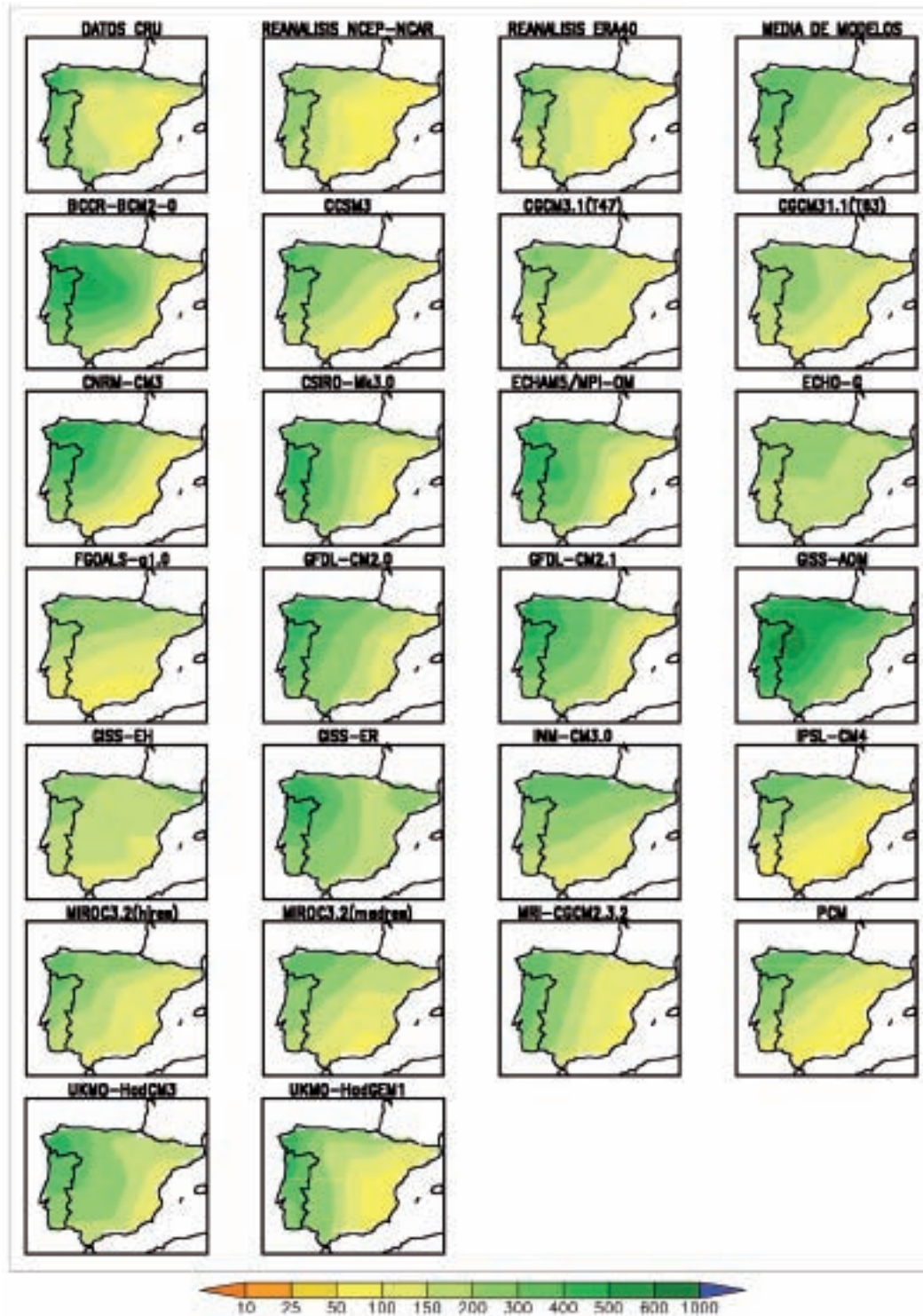


Figura 2.6. Igual que Figura 2.3 pero para la precipitación acumulada en invierno (DEF).

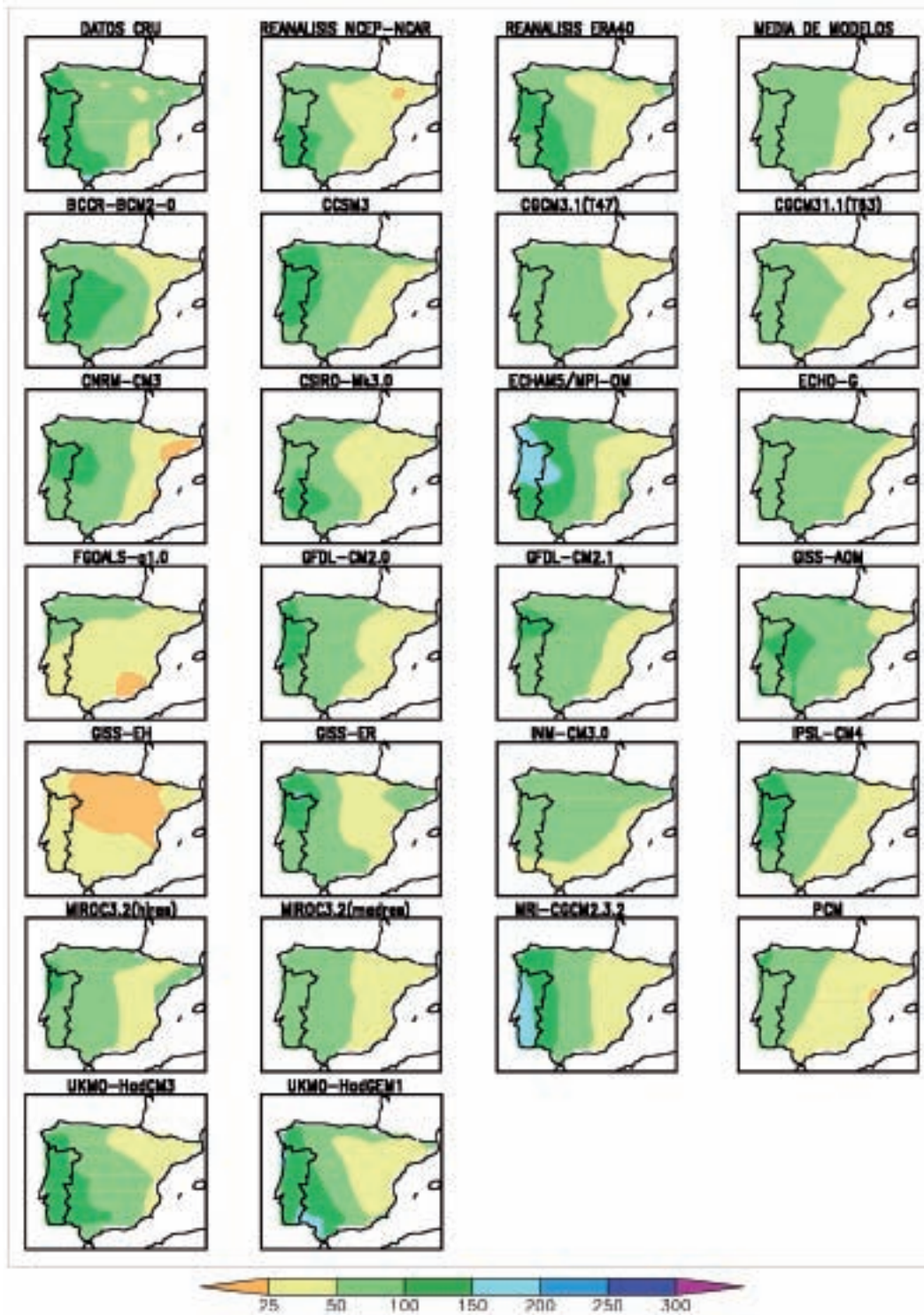


Figura 2.7. Igual que Figura 2.4 pero para la desviación estándar en invierno (DEF).

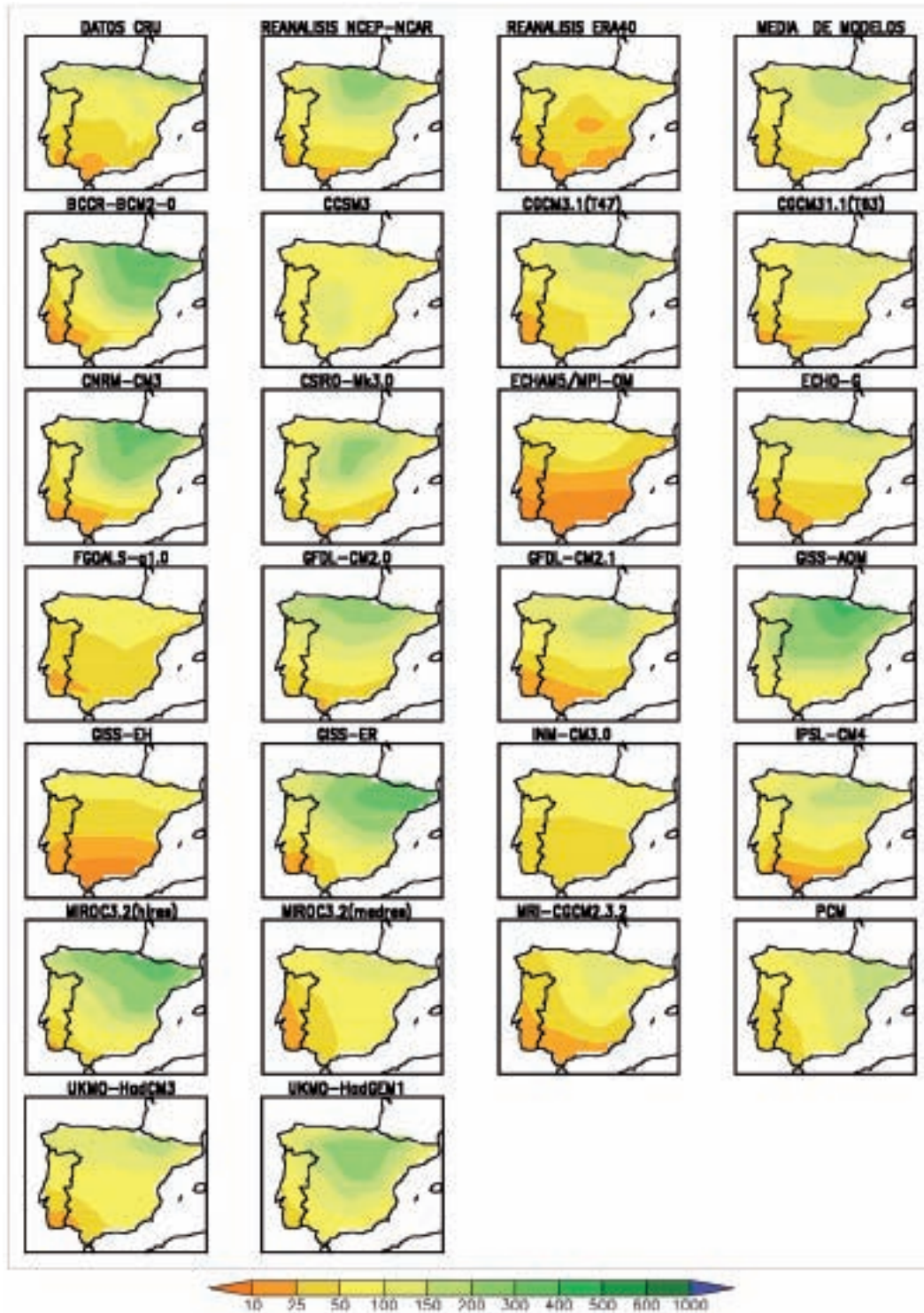


Figura 2.8. Igual que Figura 2.3 pero para la precipitación acumulada en verano (JJA).

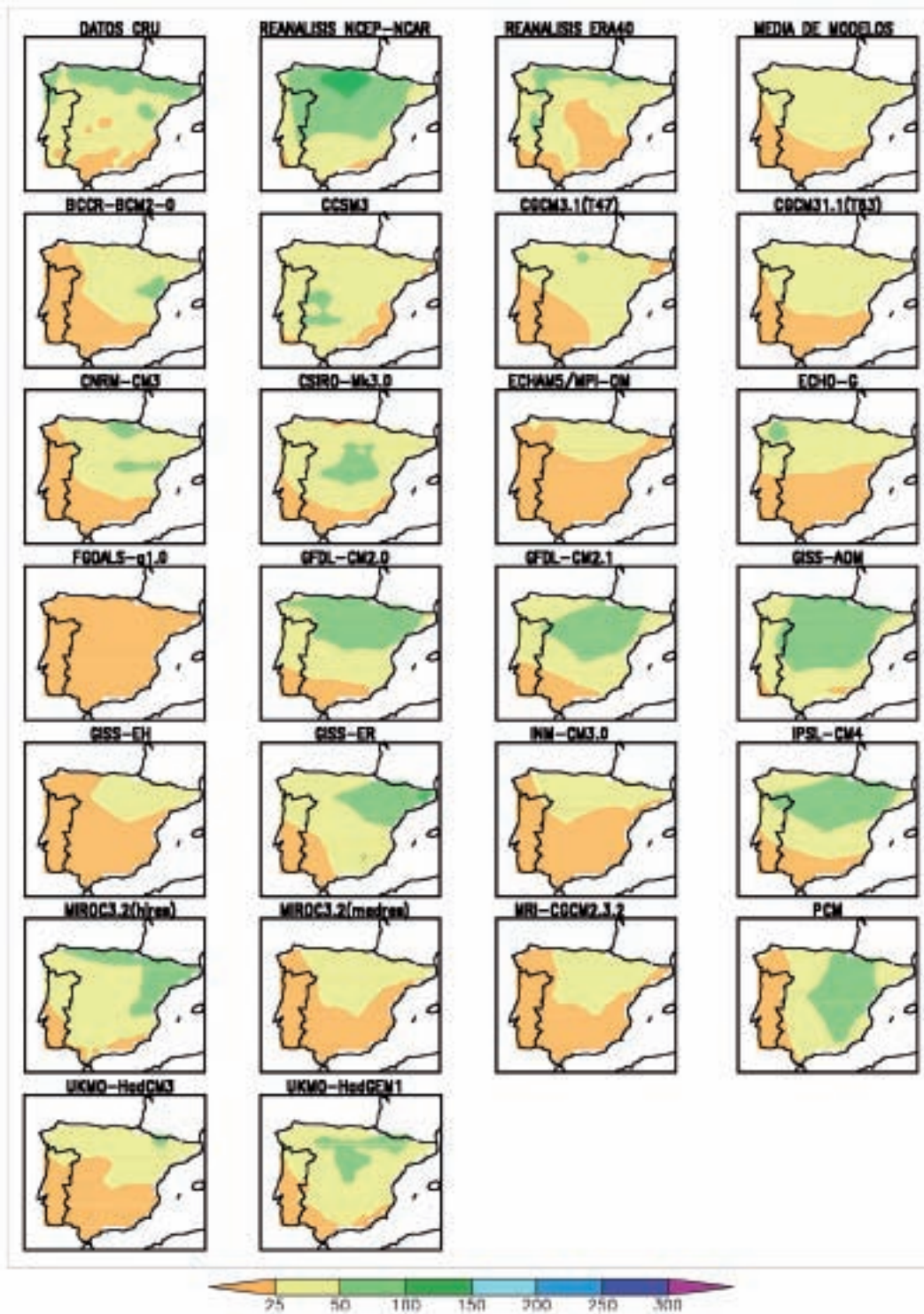


Figura 2.9. Igual que Figura 2.4 pero para la desviación estándar en verano (JJA).

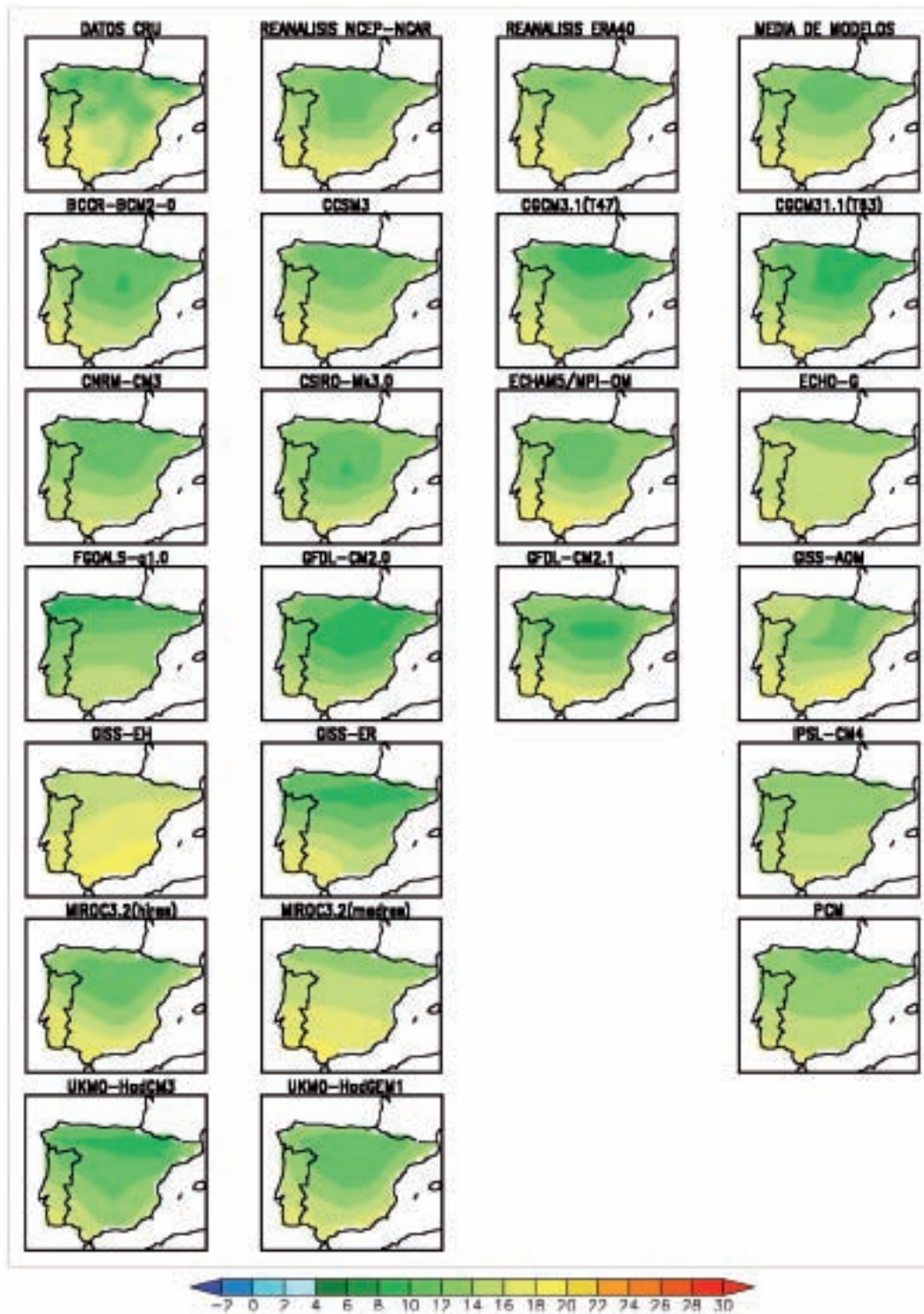


Figura 2.10. Igual que Figura 2.3, pero para la temperatura anual media.

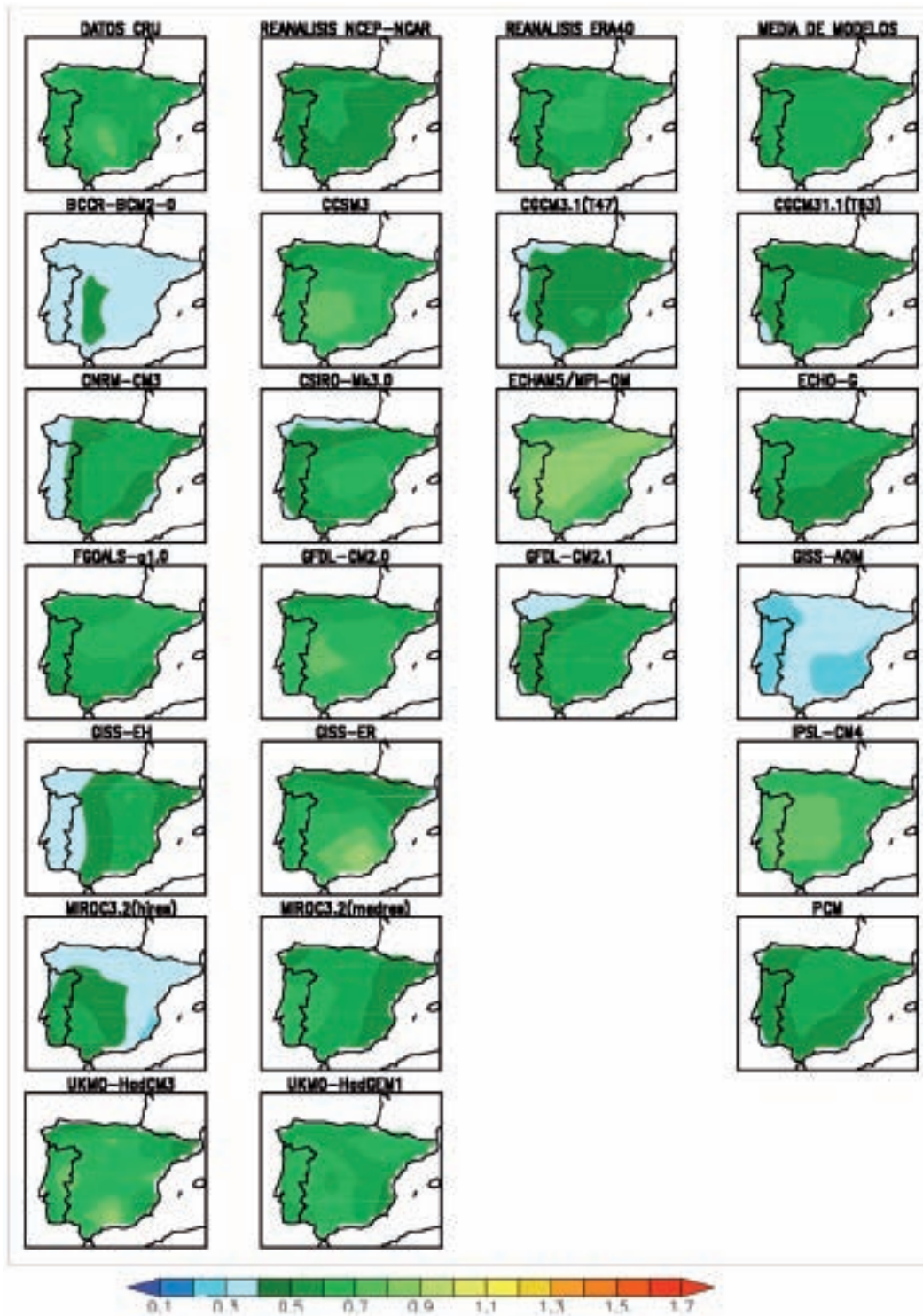


Figura 2.11. Igual que Figura 2.4, pero para la desviación estándar de la temperatura anual media.

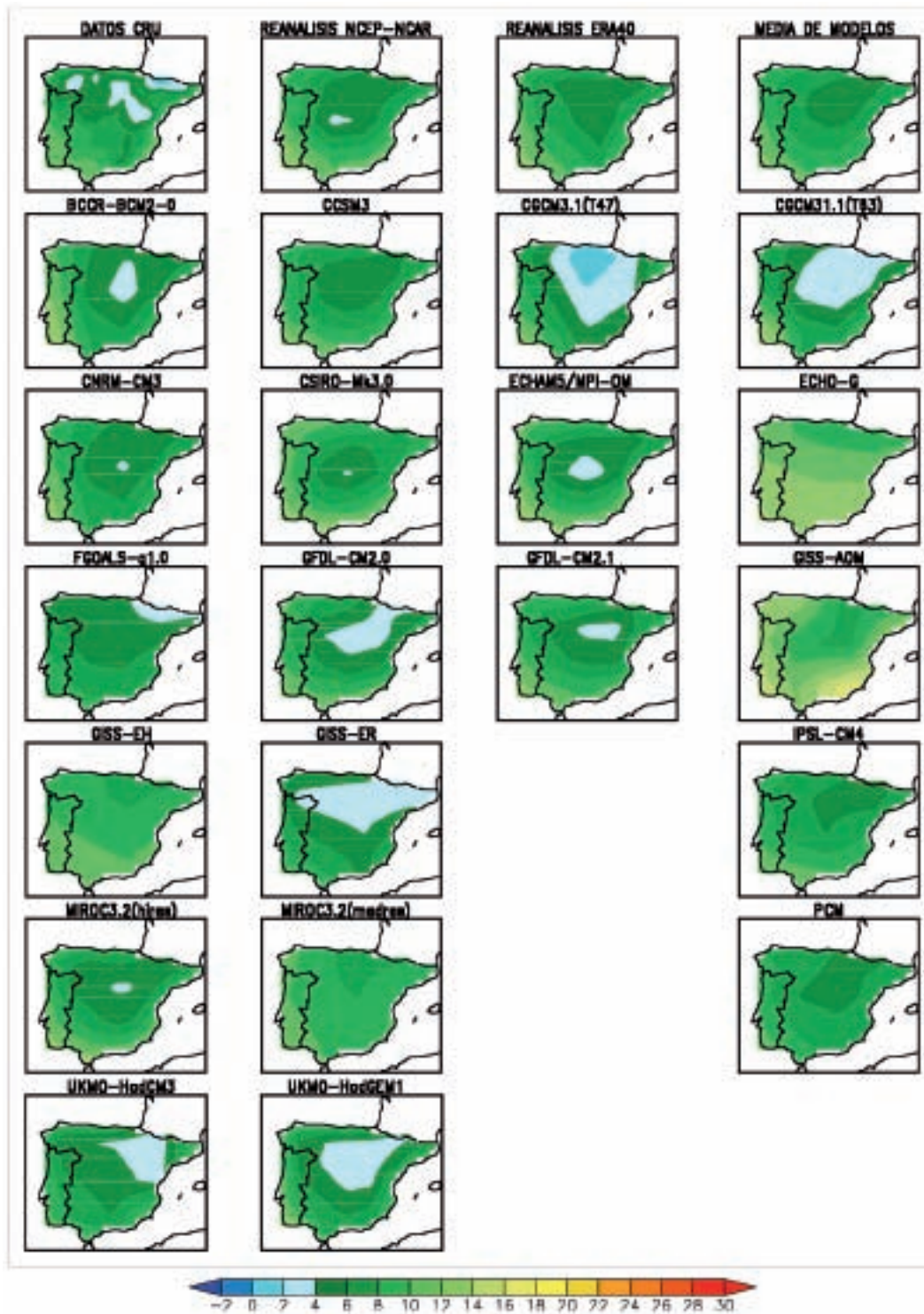


Figura 2.12. Igual que Figura 2.3 pero para la temperatura media en invierno (DEF).

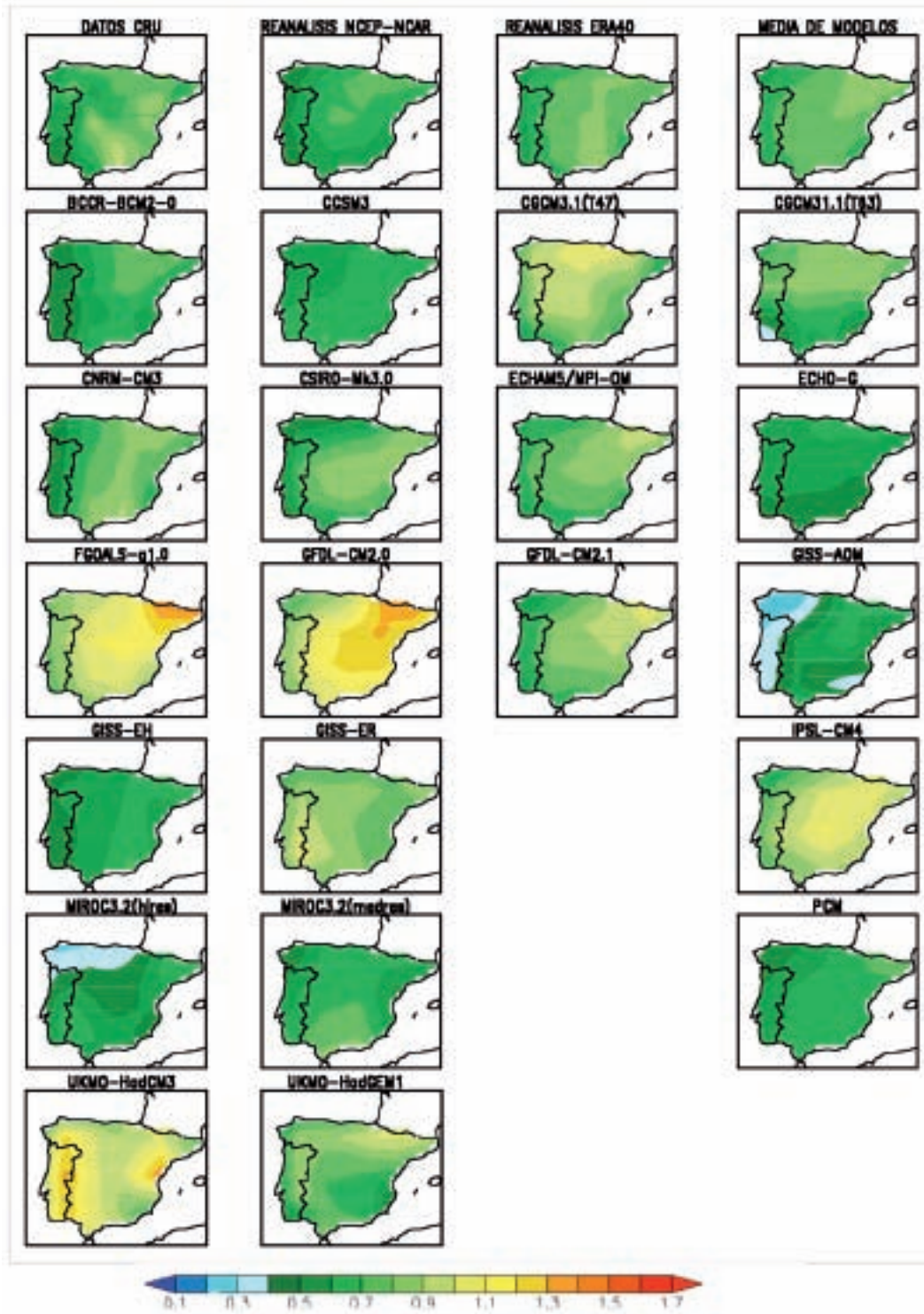


Figura 2.13. Igual que Figura 2.4 pero para la desviación estándar de la temperatura en invierno (DEF).

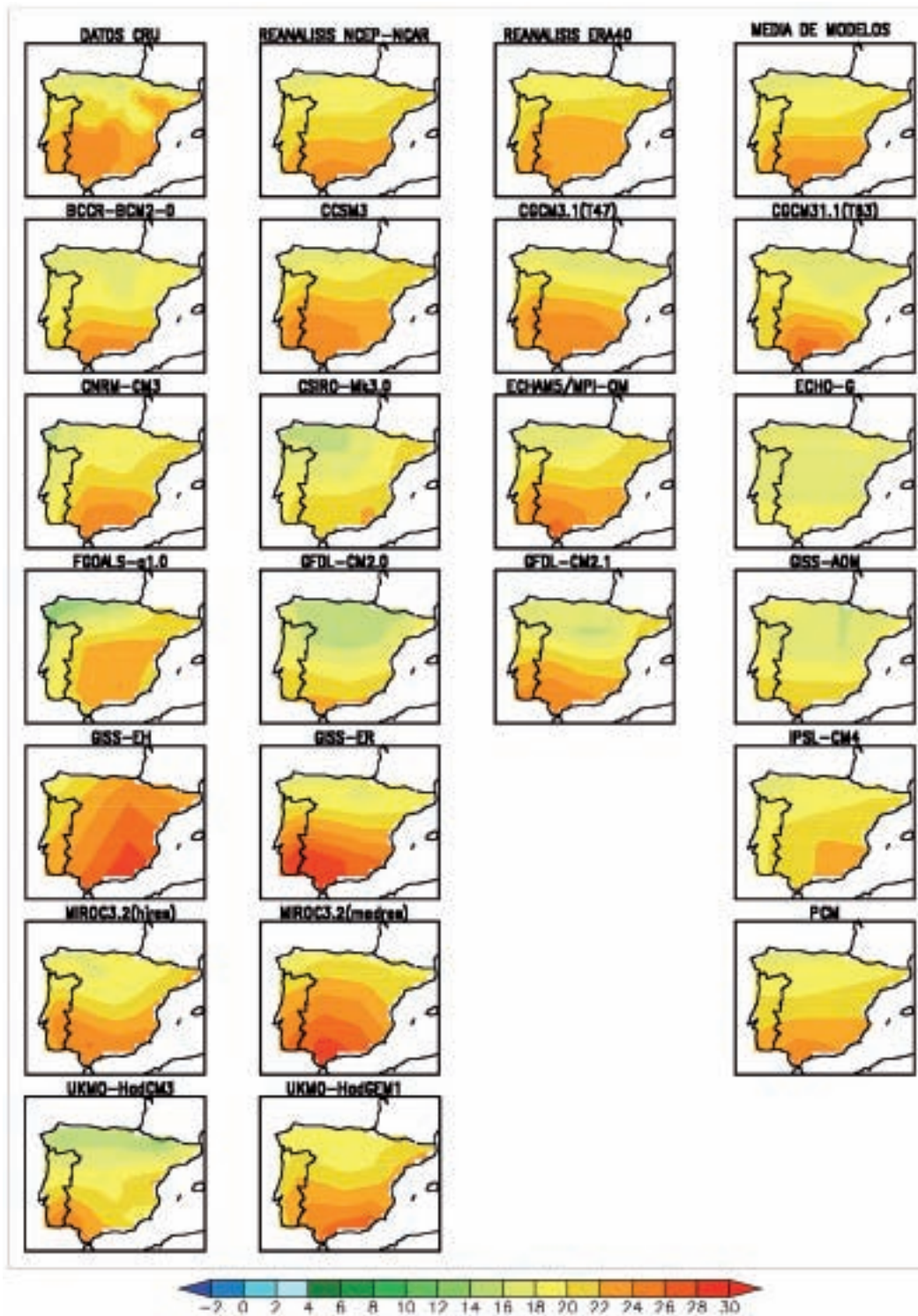


Figura 2.14. Igual que Figura 2.3 pero para la temperatura media en verano (JJA).

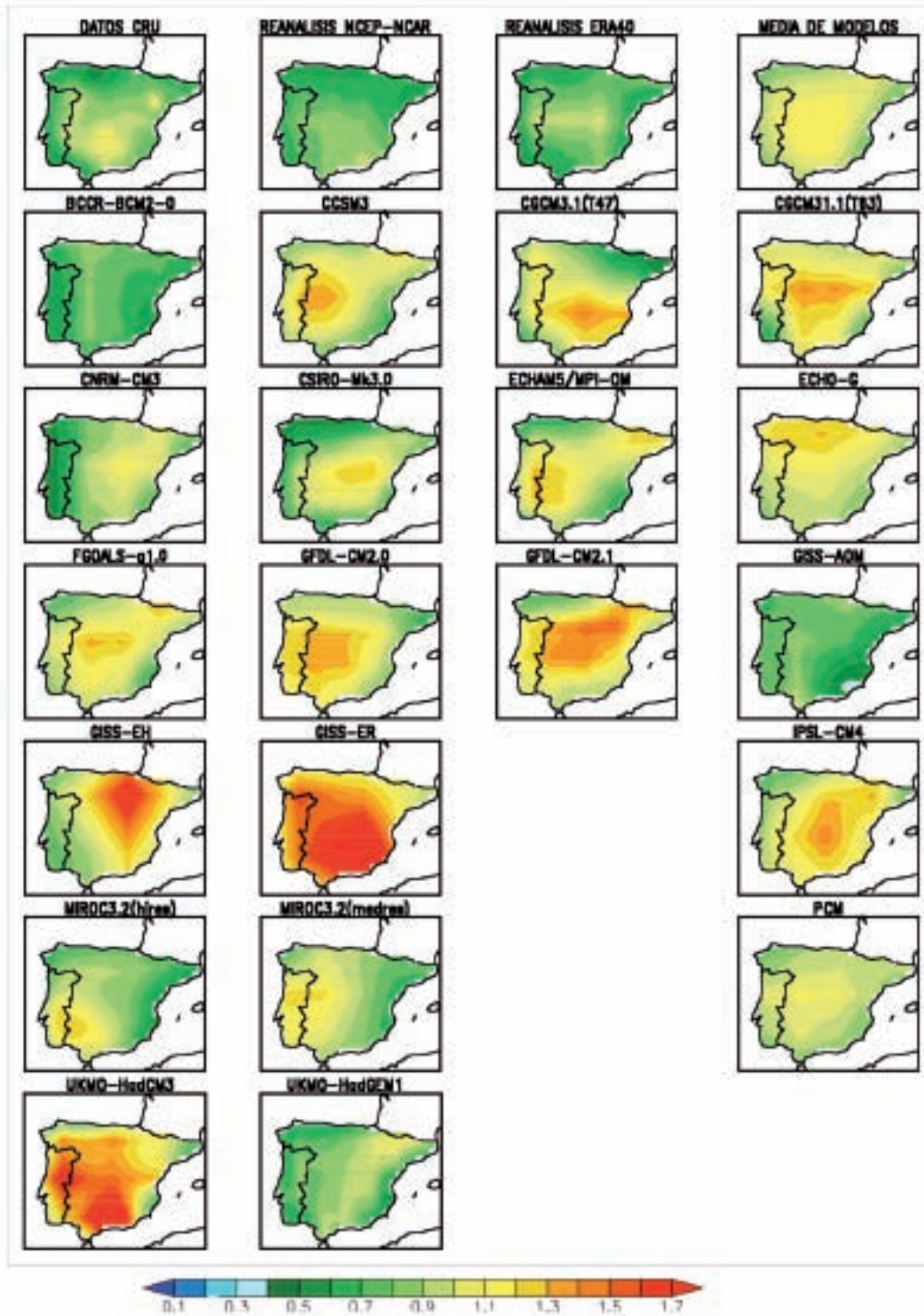


Figura 2.15. Igual que Figura 2.4 pero para la desviación estándar de la temperatura media en verano (JJA).

Precipitación		Ciclo anual			Invierno			Verano			Anual		
		EAM	CORR	M/ D	EAM	CORR	M/ D	EAM	CORR	M/ D	EAM	CORR	M/ D
Media de modelos		3	5	4	7	8	11	10	11	3	5	12	13
A	BCCR-BCM2.0	22	9	19	22	23	17	22	17	23	22	23	14
B	CCSM3	14	21	3	6	9	8	15	23	16	6	4	15
C	CGCM3.1(T47)	5	10	16	8	13	20	7	8	4	8	16	17
D	CGCM3.1(T63)	4	8	11	10	20	21	3	9	11	11	19	18
E	CNRM-CM3	18	22	2	21	16	18	19	18	21	20	17	11
F	CSIRO-Mk3.0	10	7	15	15	11	3	17	22	6	16	18	1
G	ECHAM5/MPI-OM	19	17	22	18	12	10	16	13	14	7	13	2
H	ECHO-G	1	1	6	14	18	23	1	3	5	14	20	23
I	FGOALS-g1.0	16	6	5	11	19	16	11	4	18	19	10	19
J	GFDL-CM2.0	17	11	18	16	4	1	14	6	10	18	6	6
K	GFDL-CM2.1	11	12	20	20	10	13	6	14	1	12	14	5
L	GISS-AOM	23	20	23	23	22	19	23	19	20	23	22	22
M	GISS-EH	8	3	8	12	17	22	13	1	15	9	15	21
N	GISS-ER	20	14	14	19	14	2	21	15	22	21	21	3
O	INM-CM3.0	12	18	13	17	21	12	9	2	17	4	11	12
P	IPSL-CM4	15	19	10	13	15	5	5	12	2	17	9	4
Q	MIROC3.2(hires)	9	4	21	3	2	15	20	7	19	13	8	7
R	MIROC3.2 (medres)	2	2	1	4	5	14	4	10	13	2	5	16
S	MRI-CGCM2.3.2	21	23	9	2	3	4	8	16	12	10	2	20
T	PCM	7	16	17	5	6	6	12	20	7	1	3	8
U	UKMO-HadCM3	6	13	7	9	7	9	2	5	9	3	7	10
V	UKMO-HadGEM1	13	15	12	1	1	7	18	21	8	15	1	9

Tabla 2.1. Clasificación de los 22 modelos listados en la Tabla A.1 del Anexo A según un código de colores terciario (verde/rojo representando los mejores/peores modelos) referidos a los estadísticos resumidos en la Tabla B.1 del Anexo B. Todos los estadísticos calculados para los modelos están referidos a la observación (CRU). [Los estadísticos representados son: error absoluto medio (EAM); coeficiente de correlación (CORR) y desviación estándar respecto a desviación estándar de las observaciones (σ_M/σ_D)].

Precipitación		Ciclo anual			Invierno			Verano			Anual		
		EAM	CORR	M/ D	EAM	CORR	M/ D	EAM	CORR	M/ D	EAM	CORR	M/ D
Media de modelos		6	3	12	2	3	14	7	2	13	3	2	14
A	BCCR-BCM2.0	10	15	15	12	18	2	13	13	12	12	12	8
B	CCSM3	2	11	3	3	5	13	1	1	1	1	1	12
C	CGCM3.1(T47)	11	1	13	18	19	5	2	4	14	14	13	5
D	CGCM3.1(T63)	13	5	2	14	7	4	12	16	6	17	10	1
E	CNRM-CM3	8	7	8	8	17	12	9	18	5	10	5	16
F	CSIRO-Mk3.0	14	12	19	15	21	10	17	14	17	15	21	17
G	ECHAM5/MPI-OM	3	8	9	11	15	1	4	5	2	4	15	6
H	ECHO-G	21	21	20	21	16	18	21	17	21	13	8	21
I	FGOALS-g1.0	15	17	1	13	4	17	15	19	11	19	18	13
J	GFDL-CM2.0	18	14	17	6	13	6	20	15	4	20	17	3
K	GFDL-CM2.1	9	19	11	4	14	9	8	11	10	8	16	4
L	GISS-AOM	20	20	21	20	20	8	19	20	18	11	19	9
M	GISS-EH	19	10	10	19	8	19	18	21	8	21	20	18
N	GISS-ER	17	18	18	16	2	15	11	7	20	9	4	7
P	IPSL-CM4	7	9	16	5	6	16	10	12	19	7	11	20
Q	MIROC3.2(hires)	1	4	7	1	1	3	3	6	3	2	6	2
R	MIROC3.2 (medres)	12	13	4	17	9	21	14	8	15	16	14	15
T	PCM	5	16	5	10	11	20	5	3	16	6	3	19
U	UKMO-HadCM3	16	2	14	7	12	11	16	10	7	18	7	11
V	UKMO-HadGEM1	4	6	6	9	10	7	6	9	9	5	9	10

Tabla 2.2. Clasificación de los 22 modelos listados en la Tabla A.1 del Anexo A según un código de colores terciario (verde/rojo representando los mejores/peores modelos) referidos a los estadísticos resumidos en la Tabla C.1 del Anexo C. Todos los estadísticos calculados para los modelos están referidos a la observación (CRU). [Los estadísticos representados son: error absoluto medio (EAM); coeficiente de correlación (CORR) y desviación estándar respecto a desviación estándar de las observaciones (σ_M/σ_D)].

3.

Evaluación de los modos de variabilidad

3.1. Introducción

3.2. Datos

3.3. Metodología

3.4. Resultados

3.4.1. Análisis espacial de los modos de variabilidad

3.4.2. Análisis temporal de los modos de variabilidad

3.5. Conclusiones

3.1. INTRODUCCIÓN

Gran parte de las evaluaciones de modelos globales que se encuentran en la literatura, como por ejemplo las realizadas, entre otros, por COLLINS ET AL. (2006), JOHNS ET AL. (2006), DELWORTH ET AL. (2006), WATTERSON (1996), TAYLOR (2001), KNUTTI ET AL. (2006), KNUTTI (2008), PIANI ET AL. (2005), SHUKLA ET AL. (2006), REICHLER Y KIM (2008), se basan en analizar la habilidad de los modelos climáticos para simular variables climáticas en escalas temporales mensuales, estacionales o anuales. En particular, la evaluación llevada a cabo en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (AR4), si bien se ha centrado principalmente en la capacidad de los modelos para simular su comportamiento global medio, ha dedicado el capítulo 8.4 a aspectos centrados con la variabilidad. El inconveniente de usar valores medios mensuales o estacionales es que estos pueden ocultar sesgos y errores sistemáticos que, sin embargo, se pueden detectar con mayor facilidad cuando se utilizan datos diarios (TAYLOR, 2001; KNUTTI ET AL., 2006; PIANI ET AL., 2005). En este sentido, es importante señalar que una "buena" simulación de los valores medios no garantiza que otras propiedades de los datos estén bien simuladas (ZWIERS Y ZHANG, 2003).

Por otra parte, el clima medio representa la integración en el tiempo de fluctuaciones de distintas escalas espaciales y temporales que representan su variabilidad. Se habla así de fluctuaciones diarias, interanuales, decenales, etc. Estas fluctuaciones como matizan CASSOU Y GUILYARDI (2007), a menudo, pueden cuantificarse e interpretarse gracias a un número restringido de modos de variabilidad o circulaciones atmosféricas y/o oceánicas típicas. Estos modos se caracterizan por presentar una estructura espacial cuasi-fija de gran escala y una serie temporal asociada que caracteriza la evolución de esta estructura, su amplitud y su fase (WALLACE Y GUTZLER, 1981; BARNSTON Y LIVEZEY, 1987; BELL Y HALPERT, 1995; STONER ET AL., 2009). La ocurrencia de los modos de variabilidad no es uniforme durante el año. La forma de las estructuras espaciales de los modos, la intensidad de sus centros de acción y su comportamiento en el tiempo variará en función de la estación astronómica considerada.

Los modos de variabilidad tienen importantes implicaciones en el estudio de futuros cambios del clima ya que, modificaciones en su frecuencia de ocurrencia, amplitud, posición o intensidad pueden alterar las condiciones climáticas en superficie de muchas localidades. El objetivo de este capítulo es evaluar la capacidad de un conjunto de modelos del AR4 de reproducir estos modos ya que, cuanto más realista sea su semejanza con los modos observados, tanto más adecuadamente representarán las características dinámicas atmosféricas asociadas (PIERCE, 2004). En este capítulo se evaluará, en consecuencia, la capacidad de las simulaciones de los modelos AR4 del IPCC de reproducir los cuatro modos de variabilidad con mayor influencia en la región euroatlántica como son: la Oscilación del Atlántico Norte (NAO, siglas en inglés), el modo Escandinavo (SCAND, abreviatura en inglés), el modo del Este del Atlántico (EA, siglas en inglés) y el modo del Este del Atlántico/Oeste de Rusia (EA/WR, siglas en inglés). Esta evaluación se ha centrado en el invierno del hemisferio norte, por ser esta estación en la que la atmósfera está más activa dinámicamente y las perturbaciones alcanzan su máxima amplitud; regis-

trándose, en consecuencia, las características más pronunciadas del patrón de Oscilación del Atlántico Norte, con gran influencia en el clima europeo.

La elección de los modos de variabilidad como herramienta para la evaluación de los modelos climáticos es un enfoque ya abordado por HUTH en 1997 y se puede justificar por el hecho de que los modos de variabilidad determinan las condiciones climáticas locales y sus cambios pueden tener repercusiones importantes en el estudio de los cambios climáticos futuros. Estos modos de variabilidad se examinarán evaluando, en primer lugar, su variabilidad espacial, es decir, analizando la intensidad y localización de los centros de anomalías y en segundo lugar las características de su variabilidad temporal, prestando especial atención al comportamiento de estadísticos de orden superior (asimetría y curtosis), a las funciones de distribución de probabilidad y al tiempo de decaimiento (*e-folding time*). La importancia de esta evaluación se justifica en que hasta la fecha, son pocos los estudios de evaluación que se han realizado considerando dato diario y estadísticos de orden superior, a pesar de su creciente importancia para una amplia gama de aplicaciones tales como el cambio climático, control de inundaciones, y la predicción de la demanda energética, entre otras.

Como ha sido apuntado por STONER ET AL. (2009), la capacidad de los modelos de circulación general para simular el clima de una determinada región depende en gran medida de la habilidad de dichos modelos para reproducir estos modos de variabilidad. La presencia de sesgos en la simulación de algunos de estos modos puede dar lugar a una descripción menos realista de los climas actuales y futuros. Los cambios en los modos de variabilidad en respuesta al forzamiento antropogénico pueden conducir a importantes impactos debido a que estos modos dominan la variabilidad anual a decenal, siendo aún la adaptación a la variabilidad un reto importante en muchas regiones (IPCC, <http://www.ipcc-wg2.gov/publications/AR4/index.html>). La respuesta al forzamiento antropogénico se puede presentar como un cambio en su frecuencia de ocurrencia, posición o intensidad (PALMER, 1999; CORTI ET AL., 1999), cambios que a su vez pueden alterar las condiciones meteorológicas de superficie en muchos lugares.

Los resultados de esta evaluación se compararán con los obtenidos por STONER ET AL. (2009); HANDORF Y DETHLOFF (2009) quienes han evaluado el comportamiento de los modelos AR4 del IPCC con respecto a los modos de variabilidad del Atlántico y Pacífico; y STEPHENSON ET AL. (2006) que han evaluado cómo es la NAO simulada por los modelos que participaron en el CMIP2 (Coupled Model Intercomparison Project).

Esta evaluación, desarrolla con más detalle resultados ya publicados (CASADO Y PASTOR, 2011), que permiten, en primer lugar, hacer una selección de aquellos modelos AR4 más fiables, en virtud de la mejor simulación de los modos de variabilidad y, por tanto, más óptimos para su regionalización y correlación con anomalías de variables de superficie como la temperatura y la precipitación. En segundo lugar, ayudan en la comprensión de las proyecciones climáticas y mecanismos subyacentes. Por último, esta evaluación permite considerar una serie de métricas que facilitan índices para el “pesado” de los modelos en un enfoque probabilístico en las proyecciones del cambio climático (KNUTTI ET AL., 2010a).

3.2. DATOS

En este capítulo se han utilizado las siguientes bases de datos:

- a) Como dato de referencia observacional, el campo diario de la presión media reducida al nivel del mar (MSLP, siglas inglesas) del reanálisis del Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio (ERA40, UPPALA ET AL., 2005) para el periodo invernal (diciembre, enero y febrero) comprendido entre diciembre de 1980 a febrero de 2000 (un total de 20 inviernos). La elección del periodo invernal se justifica porque, durante esta estación, los procesos advectivos asociados a la circulación atmosférica a gran escala tienen una influencia dominante en la distribución espacial y en la variación temporal del clima europeo (consultar KÜTTEL ET AL., 2010).
- b) Los campos diarios de MSLP simulados por los AOGCMs considerados en el 4.º Informe del IPCC en el mismo periodo invernal (1980, 2000). Los datos de los modelos AR4 del IPCC los distribuye el “Programa for Climate Model Diagnosis and Intercomparison” (PCMDI, <http://www-pcmdi.llnl.gov>); en el caso de modelos que han contribuido al AR4 con un *ensemble* de simulaciones, basadas en condiciones iniciales diferentes, se han utilizado las pertenecientes al “Run 1”. En este capítulo se han evaluado solo aquellos modelos que tenían disponible el dato diario de MSLP, resultando ser los siguientes 16 de los 22 modelos descritos en el Anexo A: BCCR-BCM2.0, CCSM3, CGCM3.1(T47), CGCM3.1(T63), CNRM-CM3, CSIRO-Mk3.0, ECHAM5/MPI-OM, GFDL-CM2.0, GISS-AOM, INM-CM3.0, MIROC3.2(hires), MIROC3.2(medres), MRI-CGCM2.3.2, PCM, UKMO-HadCM3, UKMO-HadGEM1.

Todos los campos, tanto los procedentes del ERA40 como los de los AOGCMs del AR4 han sido interpolados a una rejilla común con una resolución latitud longitud de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$. El área de estudio es la región euro-atlántica que se extiende desde 25°N a 70°N y desde 45°O a 50°E .

3.3. METODOLOGÍA

Los modos de variabilidad se han calculado aplicando el Análisis en Componentes Principales (PCA, siglas en inglés), siguiendo el mismo procedimiento y notación descrito en CASADO ET AL. (2008). Para ello, se parte de la ecuación $Z = FA^T$, siendo Z la matriz de los datos de entrada ($N \times n$), con N número de observaciones (días) y n número de variables (puntos de rejilla); F la matriz ($N \times n$) de las amplitudes de las componentes principales (cples); y A la matriz ($n \times n$) de las Funciones Ortogonales Empíricas (EOFs, siglas en inglés). Los EOFs son los vectores propios de la matriz de covarianza. Los vectores propios se ordenan según un criterio de varianza decreciente, así el primer vector propio será el que explique la mayor parte de la varianza, y los siguientes serán ortogonales a los anteriores. Los valores propios representan la varianza explicada por cada componente principal.

En este estudio la matriz Z corresponde a las anomalías diarias de la presión al nivel del mar (MSLP) y el PCA se ha aplicado a la matriz de covarianza en la que

cada elemento de dicha matriz, se ha multiplicado por el coseno normalizado de la latitud del punto de rejilla correspondiente para compensar el tamaño menor de la rejilla con las latitudes crecientes. Los datos de entrada pueden especificarse de diversas maneras según qué magnitudes se traten como observaciones y cuáles como variables (RICHMAN, 1986). En el caso de campos meteorológicos se tienen solo dos posibilidades, considerar los puntos de rejilla como variables y los pasos de tiempo como observaciones, esto corresponde al modo S, el contrario corresponde al modo T. En este capítulo se ha considerado el modo S, que agrupa puntos que varían de igual manera con el tiempo, por el contrario el modo T agrupa días con patrones espaciales similares.

Una debilidad de este análisis radica en el hecho de que por construcción, los patrones espaciales resultantes son ortogonales, para soslayar este problema se ha aplicado una rotación ortogonal, varimax (RICHMAN, 1986), para lo cual los EOFs han sido previamente renormalizados. Con la rotación las áreas de máxima variabilidad tienden a estar más concentradas, lo que facilita la interpretación de los patrones espaciales. Para determinar el número de modos a rotar, r , se ha hecho uso del diagrama LEV (log-eigenvalues, (log-valores propios)) (Figura 3.1) y se ha aplicado a la base de datos de referencia ERA40. En esta Figura se representa el logaritmo de los valores propios de ERA40 con respecto al número de componentes principales en orden decreciente. Este diagrama se basa en que los valores propios que representan “ruido” decaen en progresión geométrica formando una línea recta en dicho diagrama. El número r queda determinado por aquellos valores propios que quedan extrapolando hacia la izquierda esta línea recta (WILKS, 2006). De la Figura 3.1 se deduce que esta característica la cumplen los 4 primeros modos. Estos 4 modos explican el 69 % de la varianza total en ERA40.

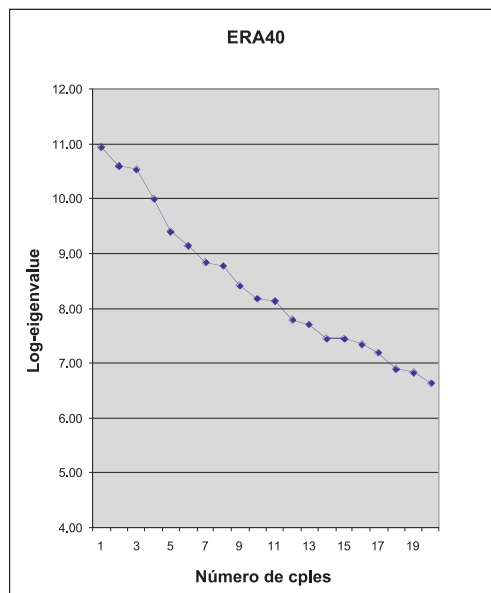


Figura 3.1. Diagrama Log-eigenvalue (LEV).

3.4. RESULTADOS

3.4.1. Análisis espacial de los modos de variabilidad

En esta sección se realiza un análisis de la estructura espacial de los modos de variabilidad del ERA40 y de los 16 modelos considerados. Previamente, se presentan los resultados de una evaluación en la que se analiza cómo reproducen los modelos AR4 la circulación invernal del clima presente en el área euroatlántica considerada.

Para evaluar la capacidad de los modelos de reproducir la circulación invernal, se han calculado el campo medio y desviación estándar (Anexo E, Figuras E.1 y E.2) de MSLP del ERA40 y se han analizado: a) la distribución espacial del sesgo estacional entre el campo medio de la MSLP de los modelos y del ERA40, (modelos AR4-ERA40), Figura E.3 del Anexo E) y b) la distribución espacial de la razón entre sus respectivas desviaciones estándar ($\sigma_{\text{modelo}}/\sigma_{\text{ERA40}}$), (Figura E.4 del Anexo E).

- a) En el invierno, los modelos reproducen con bastante fiabilidad los grandes rasgos de la circulación. Los modelos que presentan menos sesgo son: UKMO-HadGEM1, CGCM3.1(T47), CGCM3.1(T63) y MIROC3.2(hires). Todos los modelos, salvo UKMO-HadGEM1 y los dos CGCM3.1, presentan sesgo negativo en Europa central, con valores que oscilan entre -12 hPa (CCSM3 y GISS-AOM) y -2 hPa (MIROC3.2(hires)); en el caso del PCM este sesgo está desplazado hacia el norte. Los valores con sesgo positivo se localizan en las altas latitudes, salvo para el CCSM3 y INM-CM3.0, estos valores oscilan entre $+12$ hPa (CSIRO-Mk3.0) y $+2$ hPa (CGCM3.1(T63)) (véase Figura E.3 del Anexo E).
- b) Con respecto a la razón entre las respectivas desviaciones estándar, los modelos CCSM3, CGCM3.1(T47), CGCM3.1(T63), ECHAM5/MPI-OM, GFDL-CM2.0, PCM y UKMO-HadGEM1 presentan valores superiores a uno, prácticamente en todo el dominio, mientras que el resto de los modelos tienden a subestimar en altas latitudes y sobrestimar en el resto (véase Figura E.4 del Anexo E).

Los modos de variabilidad del ERA40 y de los 16 modelos AR4 del IPCC se han calculado aplicando la metodología anteriormente descrita. Se han obtenido e identificado los siguientes cuatro modos en todos los conjuntos de datos considerados: la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), el modo Escandinavo (SCAND), el modo Este del Atlántico (EA) y el modo Este del Atlántico/Oeste de Rusia (EA/WR).

A continuación se resumen las principales características de estos modos de variabilidad:

- **NAO**, modo localizado al norte del océano Atlántico. Se caracteriza por presentar bajas anomalías negativas de la presión al nivel del mar sobre Groenlandia e Islandia y altas anomalías positivas sobre los 40°N en el océano Atlántico y oeste de Europa.
- **SCAND**, modo Escandinavo. Se caracteriza por presentar un importante centro de anomalías sobre Escandinavia y un centro más débil sobre Europa occidental de signo contrario.
- **EA**, modo Este del Atlántico. Consiste en un dipolo norte-sur de anomalías sobre el Atlántico norte. Es un modo similar a la NAO pero desplazado hacia el SE.

- **EA/WR**, modo Este del Atlántico/Oeste de Rusia (EA/WR). Se caracteriza por presentar dos centros importantes de anomalías de signo contrario localizados sobre el mar Caspio y oeste de Europa.

En la Figura 3.2 se representan los modos de variabilidad del ERA40 en su fase positiva, mostrando una clara correspondencia con los obtenidos en la literatura con dato mensual para el invierno (WALLACE Y GUTZLER, 1981; BARNSTON Y LIVEZEY, 1987; BELL Y HALPERT, 1995). En este estudio la varianza explicada es menor por haber utilizado dato diario.

Los modos de variabilidad obtenidos para los 16 modelos del AR4 (ver Figura F.1 del Anexo F) presentan, en general, gran similitud con los correspondientes del ERA40. Resultado que coincide con el de STONER ET AL. (2009) en el que, en general, la NAO, único modo de variabilidad común en ambos estudios, es reproducida por los 22 modelos del AR4 que se consideran en su artículo y con el de STEPHENSON ET AL. (2006) en el que se evalúa cómo es simulada la NAO en los modelos que participaron en el CMIP2 (Coupled Model Intercomparison Project). Por el contrario en HANDORF Y DETHLOFF (2009), artículo en el que se evalúan los modos hemisféricos de variabilidad del Pacífico y Atlántico para 4 modelos del AR4: ECHAM5/MPI-OM, UKMO-HadCM3, NCAR-CCSM3 y CGCM3.1(T63), solo dos de estos modelos: UKMO-HadCM3 y CGCM3.1(T63) simulan sobre el Atlántico una estructura bipolar que parece corresponderse con el modo EA.

Para analizar, con más detalle, las posibles diferencias en la posición de los centros de acción y su intensidad se ha calculado el coeficiente de correlación lineal de Pearson (WILKS, 2006) entre los EOFs rotados de los 16 modelos del AR4 del IPCC y los correspondientes del ERA40. Como se observa en la Figura 3.3, todos los modelos presentan en general correlaciones bastante altas, comprendidas entre 68,7 % y 99,5 % para los 4 modos. Las correlaciones son significativas al nivel de confianza del 99 %. El SCAND es el modo que presenta un mayor número de modelos con las correlaciones más altas mientras que el EA/WR muestra, en general, las correlaciones más bajas. En la Tabla 3.1 se muestra el *ranking* de los modelos atendiendo al valor del coeficiente de correlación. Se utiliza el código tercílico tipo semáforo, en el que los cinco modelos con mejor correlación se presentan en color verde, los cinco con peor correlación en color rojo y los 6 modelos restantes en color amarillo. Los modelos CGCM3.1 (T63) y CGCM3.1 (T47) son aquellos que muestran las correlaciones más altas, mientras que, por el contrario, el GISS-AOM presenta las más bajas para los 4 modos de variabilidad.

Comparando nuestros resultados con los obtenidos por STONER ET AL. (2009) en su Figura 9, y centrándonos en la NAO, que es el único modo de variabilidad común en ambos estudios, se observa que los modelos BCCR-BCM2.0, GISS-AOM y MIROC3.2(hires) son los únicos que en ambos estudios presentan un mal comportamiento. Sin embargo, modelos como CSIRO-Mk3.0, MRI-CGCM2.3.2 y PCM, mal calificados en este estudio, no lo son en el de STONER ET AL. (2009). Es preciso señalar que en nuestro estudio se ha utilizado el dato diario de la MSLP mientras que en STONER ET AL. (2009) se ha considerado el dato mensual de altura de geopotencial de 500 hPa.

En la Figura 3.4 se muestra la razón de la desviación estándar de los modelos del AR4 con respecto al ERA40, ($\sigma_{\text{modelo}}/\sigma_{\text{ERA40}}$). Los modos NAO y SCAND son los que presentan para todos los modelos, en general, valores más próximos a uno. El modo

EA/WR subestima, en general, mientras que el modo EA presenta valores superiores a uno salvo para los modelos CNRM-CM3, ECHAM5/MPI-OM y GISS-AOM. La Tabla 3.2 muestra el *ranking* de los modelos atendiendo al valor de la razón de la desviación estándar. El modelo CGCM3.1(T63) es el único que presenta color verde para los cuatro modos, seguido del PCM y UKMO-HadGEM1 con tres modos en color verde, mientras que el MIROC3.2(hires) es el único que muestra color rojo para los cuatro modos.

Para analizar, con más detalle, las principales diferencias entre el ERA40 y los modelos del AR4, se ha hecho uso del diagrama de Taylor (TAYLOR, 2001) (Figura 3.5a-d). Este conjunto de diagramas, uno por modo de variabilidad, permite visualizar de forma conjunta los dos estadísticos analizados anteriormente y la raíz del error cuadrático medio centrado. Al comparar la Figura 3.5a con la correspondiente obtenida por HANDORF Y DETHLOFF (2009) para la NAO, utilizando datos mensuales y solo 4 modelos, se observa un claro acuerdo en las correlaciones, estando estas comprendidas entre 90 % y 95 %.

Con respecto a la varianza explicada, la Tabla 3.3 y Figura 3.6 muestran la varianza explicada (%) por cada modo y la varianza total, para el ERA40 y cada uno de los 16 modelos AR4 considerados. Con respecto a la varianza total explicada, 11 de los 16 modelos muestran valores comprendidos entre el 66 % y 70 %, siendo de 69 % la correspondiente del ERA40. Los cinco modelos restantes: CSIRO-Mk3.0, UKMO-HadCM3, MIROC3.2(medres), GISS-AOM y GFDL-CM2.0 muestran los mayores sesgos con valores de la varianza total comprendidos entre 61 % y 65 %.

Analizando la varianza explicada para cada modo, se observa que para la NAO todos los modelos subestiman la varianza explicada respecto al ERA40, contrariamente a los resultados de STONER ET AL. (2009) donde la mayoría de los modelos sobrestiman la varianza explicada. En el SCAND, todos los modelos, en general, subestiman, salvo el CCSM3 y CNRM-CM3. En el EA todos los modelos sobrestiman, salvo el GFDL-CM2.0 y UKMO-HadGEM1. En el EA/WR todos los modelos sobrestiman salvo el CGCM3.1(T63), CNRM-CM3, GISS-AOM y UKMO-HadCM3 que subestiman. La Tabla 3.4 muestra para cada uno de los modos de variabilidad, el *ranking* de los modelos atendiendo al valor absoluto del sesgo de la varianza explicada. Análogamente a la Tabla 3.3, anteriormente mencionada, los cinco modelos con menores diferencias respecto a la varianza explicada por el ERA40 se presentan en color verde, los cinco con mayores diferencias en color rojo y los 6 modelos restantes en color amarillo. Los modelos CGCM3.1(T63) y UKMO-HadGEM1 son los que presentan las varianzas más próximas al ERA40 para todos los modos mientras que el GISS-AOM es el modelo que presenta los sesgos mayores.

Al comparar estos resultados relativos a la varianza explicada correspondiente a la NAO con los obtenidos por STONER ET AL. (2009), ambos estudios coinciden en que las mayores diferencias con el ERA40 se observan en los modelos BCCR-BCM2.0 y GISS-AOM. Sin embargo, discrepan en el modelo MIROC3.2(medres), ya que en este estudio es uno de los modelos con mayores diferencias respecto a la varianza explicada del ERA40 mientras que es uno de los que presenta menores diferencias en STONER ET AL. (2009). Estas diferencias pueden ser debidas a la diferente resolución temporal y a las diferentes áreas geográficas consideradas en ambos estudios, reflejando en consecuencia el gran impacto del área seleccionada en los estudios de evaluación.

	NAO	SCAND	EA	EA/WR
BCCR-BCM2.0	Red	Green	Green	Red
CCSM3	Green	Yellow	Yellow	Yellow
CGCM3.1 (T47)	Green	Green	Green	Green
CGCM3.1 (T63)	Green	Green	Green	Green
CNRM-CM3	Yellow	Red	Red	Red
CSIRO-Mk3.0	Red	Red	Yellow	Yellow
ECHAM5/MPI-OM	Yellow	Green	Red	Yellow
GFDL-CM2.0	Green	Yellow	Yellow	Yellow
GISS-AOM	Red	Red	Red	Red
INM-CM3.0	Yellow	Yellow	Green	Green
MIROC3.2(hires)	Yellow	Yellow	Yellow	Red
MIROC3.2(medres)	Yellow	Yellow	Red	Green
MRI-CGCM2.3.2	Red	Yellow	Red	Green
PCM	Red	Red	Yellow	Red
UKMO-HadCM3	Yellow	Green	Yellow	Red
UKMO-HadGEM1	Green	Red	Green	Yellow

Tabla 3.1. Ranking de los modelos con respecto al coeficiente de correlación. Mejor correlación (color verde), peor correlación (color rojo).

$\sigma_{\text{modelo}}/\sigma_{\text{ERA40}}$	NAO	SCAND	EA	EA/WR
BCCR-BCM2.0	Yellow	Green	Yellow	Red
CCSM3	Green	Yellow	Green	Yellow
CGCM3.1 (T47)	Yellow	Red	Yellow	Yellow
CGCM3.1 (T63)	Green	Green	Green	Green
CNRM-CM3	Yellow	Red	Yellow	Yellow
CSIRO-Mk3.0	Green	Green	Red	Yellow
ECHAM5/MPI-OM	Red	Yellow	Yellow	Green
GFDL-CM2.0	Yellow	Green	Red	Yellow
GISS-AOM	Red	Yellow	Green	Yellow
INM-CM3.0	Yellow	Red	Yellow	Green
MIROC3.2(hires)	Red	Red	Red	Red
MIROC3.2(medres)	Red	Yellow	Red	Green
MRI-CGCM2.3.2	Yellow	Yellow	Red	Red
PCM	Green	Green	Green	Red
UKMO-HadCM3	Red	Red	Yellow	Red
UKMO-HadGEM1	Green	Yellow	Green	Green

Tabla 3.2. Ranking de los modelos con respecto a la razón de la desviación estándar ($\sigma_{\text{modelo}}/\sigma_{\text{ERA40}}$). Valores más próximos a uno (color verde), más alejados (color rojo).

	Varianza explicada (%)				TOTAL
	NAO	SCAND	EA	EA/WR	
ERA40	20,8	19,3	15,2	13,7	69,0
BCCR-BCM2.0	16,7	16,0	15,7	18,7	67,1
CCSM3	18,6	19,6	15,6	16,1	69,9
CGCM3.1(T47)	18,7	15,7	15,8	16,5	66,7
CGCM3.1(T63)	19,7	18,9	15,7	13,5	67,8
CNRM-CM3	12,6	22,6	21,4	12,0	68,6
CSIRO-Mk3.0	16,9	14,4	15,6	14,4	61,3
ECHAM5/MPI-OM	16,4	19,1	18,3	13,9	67,7
GFDL-CM2.0	19,5	15,6	14,4	14,9	64,4
GISS-AOM	15,0	14,1	25,1	9,6	63,8
INM-CM3.0	19,5	15,9	15,6	17,2	68,2
MIROC3.2(hires)	17,4	16,0	17,9	15,0	66,3
MIROC3.2(medres)	15,8	14,4	16,1	15,8	62,1
MRI-CGCM2.3.2	18,7	12,8	20,5	17,9	69,9
PCM	17,4	18,3	17,6	14,2	67,5
UKMO-HadCM3	17,8	14,0	17,0	13,0	61,8
UKMO-HadGEM1	20,1	19,2	15,0	14,1	68,4

Tabla 3.3. Porcentaje de varianza explicada (%) por ERA40 y los modelos AR4.

	NAO	SCAND	EA	EA/WR
BCCR-BCM2.0				
CCSM3				
CGCM3.1 (T47)				
CGCM3.1 (T63)				
CNRM-CM3				
CSIRO-Mk3.0				
ECHAM5/MPI-OM				
GFDL-CM2.0				
GISS-AOM				
INM-CM3.0				
MIROC3.2(hires)				
MIROC3.2(medres)				
MRI-CGCM2.3.2				
PCM				
UKMO-HadCM3				
UKMO-HadGEM1				

Tabla 3.4. *Ranking* de los modelos con respecto al sesgo de la varianza explicada. Valores más próximos al ERA40 (color verde), más alejados (color rojo).

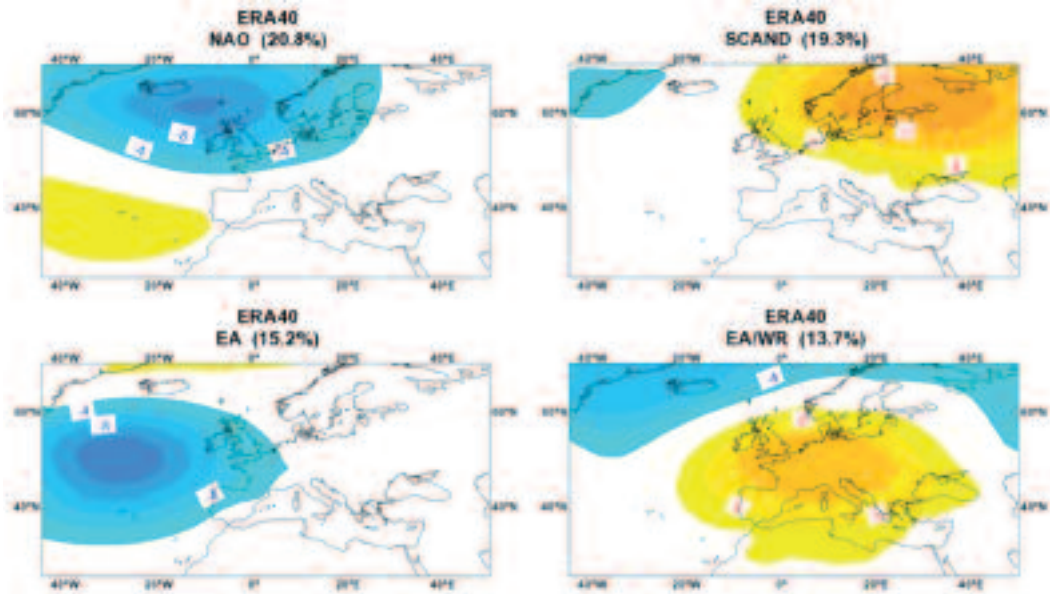


Figura 3.2. Los cuatro modos de variabilidad del ERA40. Entre paréntesis la varianza explicada por cada modo.

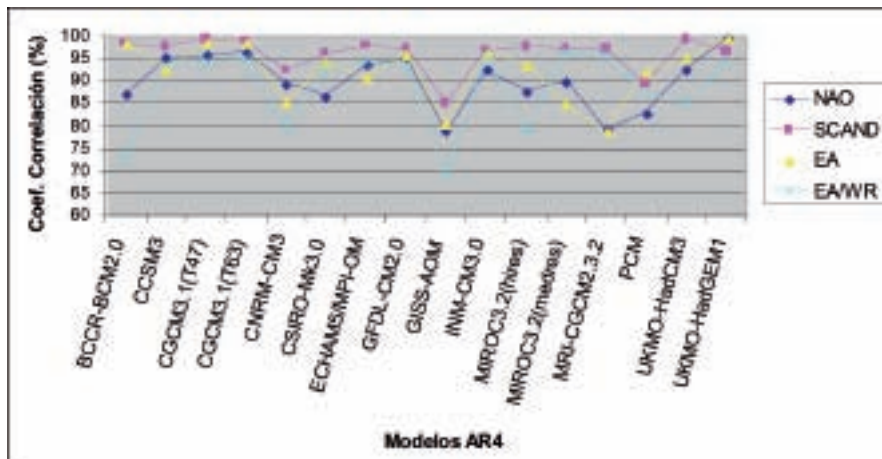


Figura 3.3. Coeficiente de correlación (%) entre los modelos AR4 y ERA40.

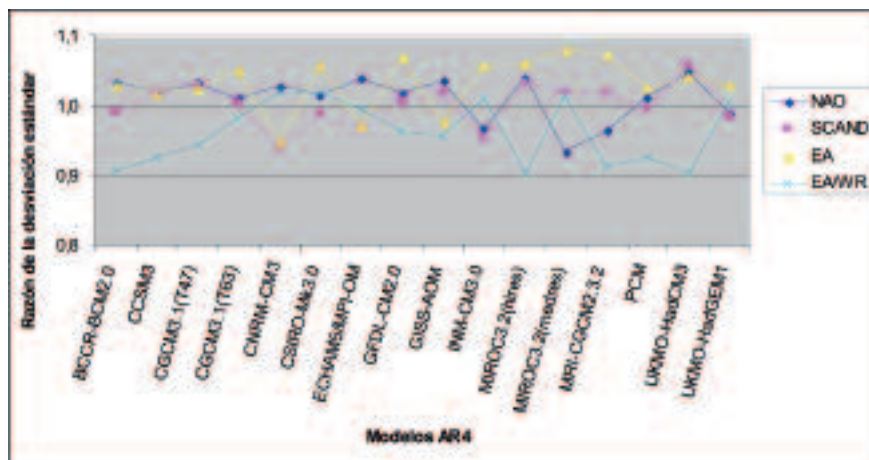


Figura 3.4. Razón de la desviación estándar ($\sigma_{\text{modelo}}/\sigma_{\text{ERA40}}$) entre los modelos AR4 y ERA40.

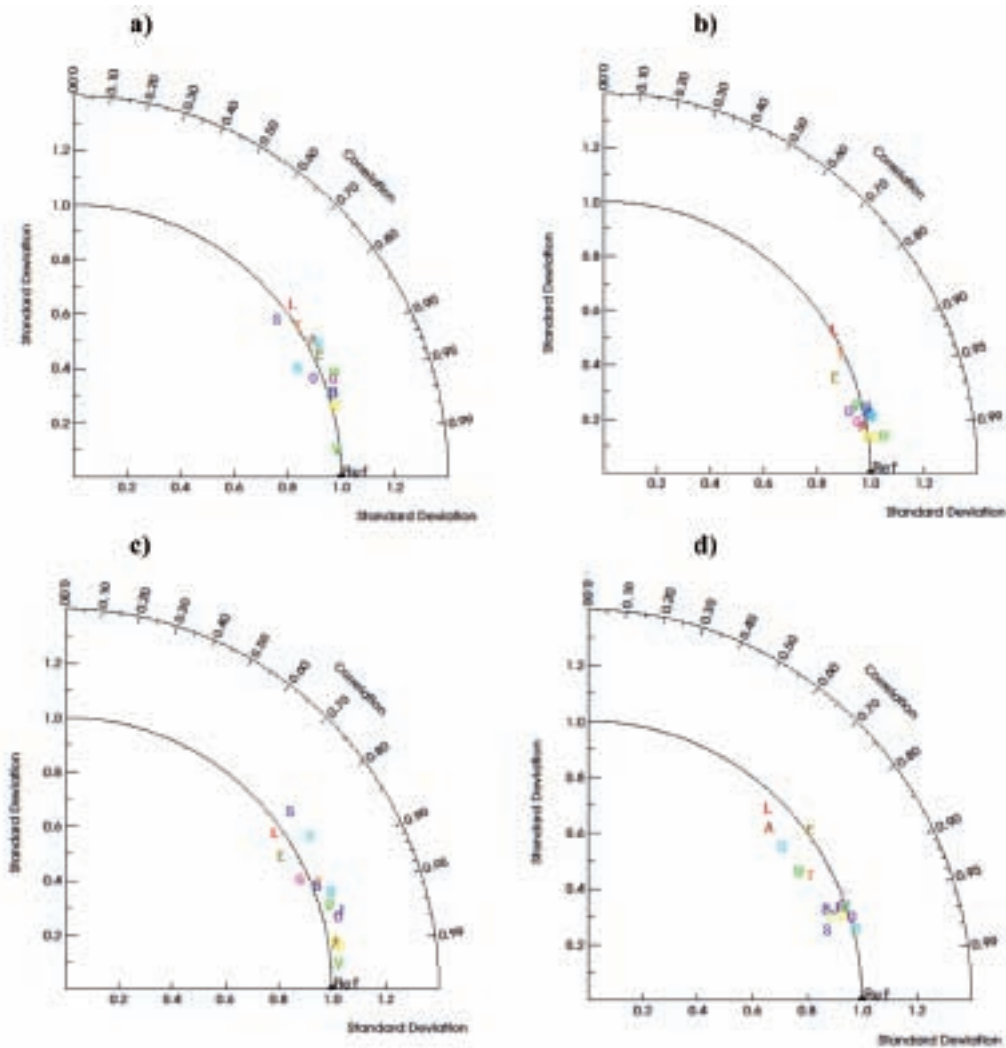


Figura 3.5. Diagramas de Taylor en los que se comparan los patrones espaciales del ERA40 (Ref) y los 16 modelos AR4 (letras coloreadas) para los cuatro modos de variabilidad: a) NAO, b) SCAND, c) EA y d) EA/WR. La distancia radial desde el origen es proporcional a la razón de la desviación estándar ($\sigma_{\text{modelo}}/\sigma_{\text{ERA40}}$). La correlación entre cada modelo y ERA40 es la posición azimutal. El error cuadrático medio de la diferencia entre el modelo y el campo de referencia es proporcional a su distancia.

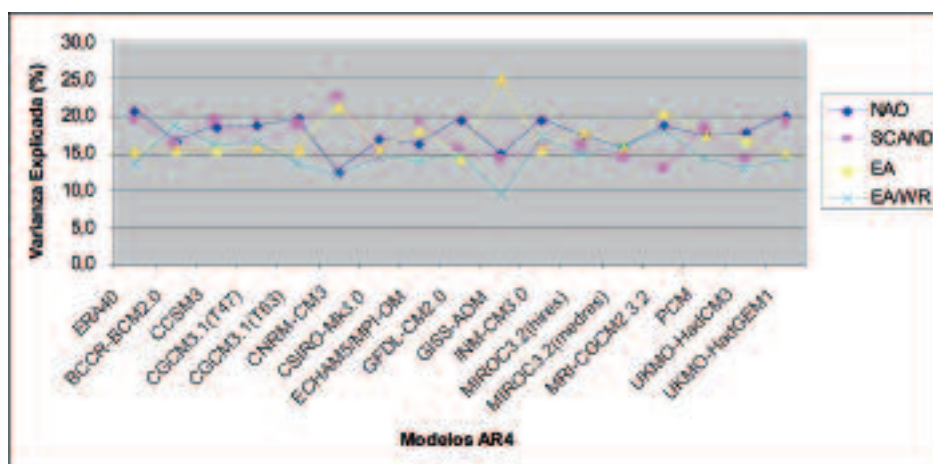


Figura 3.6. Porcentaje de varianza explicada (%) por ERA40 y los modelos AR4.

3.4.2. Análisis temporal de los modos de variabilidad

El objetivo específico de esta sección es la evaluación de los modelos seleccionados para cada modo de variabilidad, centrándonos en aspectos ligados al comportamiento temporal. Para ello, se han utilizado las componentes principales rotadas de los modos de variabilidad del ERA40 y las de los 16 modelos del AR4 del IPCC. Las componentes principales representan la intensidad de los modos de variabilidad y han sido estandarizadas. Para establecer un *ranking* de los modelos, se han comparado las dos series temporales, correspondientes al ERA40 y a cada uno de los modelos.

En el campo de la investigación climática, la comparación de dos series temporales es una tarea básica y en general se ha limitado a la comparación de sus medias y varianzas. A este respecto, PERKINS ET AL. (2007) recordaron que la necesidad de examinar estadísticos climáticos distintos de la media no era nueva pero que, sin embargo, el número de análisis que habían evaluado directamente la habilidad de los modelos climáticos para simular otros estadísticos distintos de la media y de la desviación estándar en escalas temporales de días era muy escaso.

En esencia, la evaluación aquí realizada sigue la misma metodología que en PERKINS ET AL. (2007) y PERKINS Y PITMAN (2009), quienes justificaron la gran ventaja que suponía en la evaluación de modelos climáticos, apoyarse en métricas obtenidas de las funciones de densidad de probabilidad (PDF) estimadas a partir de datos diarios. El proceso ha sido el siguiente: en primer lugar, se han calculado las PDFs y los parámetros de forma (coeficientes de asimetría y curtosis), en segundo lugar, se ha utilizado una medida cuantitativa sencilla que trata de recoger el mayor o menor acierto con el que cada modelo climático es capaz de captar la función de densidad de probabilidad del ERA40. En la exploración y comparación de las PDFs, se ha optado por los métodos no paramétricos, debido a que al estar basados en hipótesis de partida menos restrictivas que los paramétricos, gozan de mayor flexibilidad. Por último, se han estimado las escalas temporales asociadas a cada modo de variabilidad, basándose en el cálculo de los tiempos de decaimiento o decorrelación (*e-folding times*, de sus siglas en inglés).

No resulta superfluo insistir en que dos distribuciones se pueden comparar gráficamente mediante la representación de las funciones de densidad, tales como histogramas o *q-q plots*. Las inferencias relativas a las semejanzas entre distribuciones de variables meteorológicas se han llevado a cabo tradicionalmente con ayuda de tests estadísticos paramétricos tales como el test t para la igualdad de medias, o el test F para la igualdad de varianzas. Sin embargo, como apuntaron FERRO ET AL. (2005) estos tests se apoyan en hipótesis de distribución muy exigentes y restrictivas, de forma que su rendimiento '*performance*' es muy sensible al cumplimiento de esas hipótesis, ofreciendo una visión limitada y parcial de cómo difieren las distribuciones, precisamente cuando sería de gran utilidad, disponer de más detalle. Por ejemplo, mientras el test t no es capaz de detectar cambios en escala, el test F no detecta cambios de posición, teniendo ambos poca potencia si las distribuciones no son normales.

La Figura 3.7 representa las PDFs del ERA40 y de los modelos AR4 para los cuatro modos de variabilidad. Su empleo se justifica al permitir una evaluación más

completa de la simulación del rango completo de las observaciones en escalas de tiempo diarias. Las PDFs se han estimado mediante un procedimiento no paramétrico utilizando un kernel gaussiano (SILVERMAN, 1986) con un parámetro de suavizamiento de 0,25. Las características más notables de la forma de las PDFs se refieren a la bimodalidad de la NAO en ERA40, no captada por los modelos AR4, mientras que ocho de los modelos AR4 muestran bimodalidad para el EA, una característica no observada en ERA40. Con respecto a los modos EA/WR y SCAND, las PDFs del ERA40 tienden a presentar distribuciones más apuntadas que las observadas en la mayoría de los modelos, especialmente en el modo EA/WR.

Las características de las series temporales se han evaluado atendiendo a su desviación del comportamiento gaussiano. Estas desviaciones se han medido considerando los coeficientes de asimetría b_1 y de curtosis (b_2-3) definidos como:

$$b_1 = \frac{m_3}{m_2^{3/2}} \text{ y } b_2 = \frac{m_4}{m_2^2},$$

siendo m_k el momento k respecto a la media. El coeficiente b_1 mide la asimetría de la distribución de la probabilidad respecto a la media, mientras que la curtosis mide su aplanamiento (JOLLIFFE Y STEPHENSON, 2003). Un coeficiente de asimetría positivo indica que los valores extremos tienden a ser más positivos que negativos, lo que significa que la distribución tiene una cola más larga hacia la derecha y viceversa en el caso de coeficiente de asimetría negativo. Como indica GARCÍA PÉREZ (1992), el coeficiente de curtosis (b_2-3), mide si los datos, y en consecuencia la distribución de la que proceden, tiene colas menores que la normal ($b_2 > 0$, alargamiento de la distribución), mayores que la normal ($b_2 < 0$, aplanamiento de la distribución) o aproximadamente normales ($b_2 \sim 0$). JOLLIFFE Y STEPHENSON (2003) matizan a su vez que la curtosis mide la frecuencia relativa de los sucesos raros con respecto a la desviación estándar.

La Tabla 3.5 muestra los coeficientes de asimetría y curtosis de las series temporales asociadas a los modos de variabilidad del ERA40 y a la de los modelos considerados.

Centrándonos en primer lugar, en el coeficiente de asimetría, se observa que el ERA40 muestra una asimetría positiva para los modos NAO, SCAND y EA y negativa para el modo EA/WR. En la NAO, esta asimetría positiva ha sido también referenciada por STEPHENSON ET AL. (2006) ya que el período 1986-1998 se ha caracterizado por ser de un índice alto de la NAO, estando los centros de acción de la NAO localizados más al este de la posición correspondiente a un índice bajo de la NAO. Existen 12 modelos que reproducen esta asimetría positiva, siendo el MIROC3.2(medres) el modelo que muestra mayor similitud con el ERA40. Para el SCAND, la asimetría positiva del ERA40 es captada por 13 modelos. El modelo que muestra mayor similitud con el ERA40 es el CCSM3, existiendo una clara sobrestimación de la asimetría positiva en el modelo CNRM-CM3. El modelo BCCR-BCM2.0 presenta una asimetría negativa bastante notable. Para el EA, existen 7 modelos con asimetría positiva como el ERA40, siendo CCSM3 el modelo más semejante al ERA40. Los modelos GISS-AOM y MRI-CGCM2.3.2. muestran bastante asimetría negativa. Por último, para el EA/WR, hay 13 modelos que captan el

tipo de asimetría mostrado por el ERA40, siendo el CCSM3 y el UKMO-HadGEM1, los modelos más similares al ERA40. A modo de síntesis, los modelos más próximos al ERA40 son para la NAO, MIROC3.2(medres) y CCSM3 para los restantes modos de variabilidad.

Respecto al coeficiente de curtosis (Tabla 3.5), se observa que la NAO y el EA en ERA40 tienen una distribución platicúrtica, esto es, una distribución con un valor de exceso de curtosis negativa; situación que es reproducida en ambos casos por 14 de los 16 modelos. En el SCAND y el EA/WR, el ERA40 muestra unas distribuciones leptocúrticas, esto es, distribuciones con un valor de exceso de curtosis positiva, tan solo reproducida por dos modelos en el modo SCAND y uno en el EA/WR. A modo de síntesis, los modelos más similares al ERA40 son: para la NAO, ECHAM5/MPI-OM y CCSM3, para el SCAND, INM-CM3.0, para el EA, GISS-AOM y MRI-CGCM2.3.2 y finalmente, para el EA/WR, PCM.

Para sintetizar se ha recurrido a la representación de los diagramas de cajas de los coeficientes de asimetría y curtosis (Figuras 3.8 y 3.9 respectivamente). Según se desprende del análisis de la Figura 3.8, relativo al coeficiente de asimetría, se observa que en los modos NAO, SCAND y EA, el valor del ERA40, que es positivo, queda comprendido entre el tercer cuartil y el máximo del conjunto de los modelos destacándose la gran distancia existente entre el tercer cuartil y el máximo para el SCAND. En el caso del EA/WR, el valor del ERA40 es negativo, aproximándose al mínimo del conjunto de los modelos. En los modos NAO y EA/WR, las medianas ocupan una posición simétrica en las cajas respectivas contrariamente a lo observado en los modos SCAND y EA.

Analizando la Figura 3.9, relativa al coeficiente de curtosis, se observa que para los modos SCAND y EA/WR, el valor del ERA40 está comprendido entre el tercer cuartil y el máximo del conjunto de los modelos mientras que para los otros modos se observa que para la NAO, el valor del ERA40 se localiza entre el primer cuartil y la mediana del conjunto de los modelos y en el EA, el valor del ERA40 se sitúa entre el mínimo y el primer cuartil del conjunto de los modelos, estando muy próximo a la posición del primer cuartil. Análogamente al análisis del coeficiente de asimetría, en el modo SCAND es notable la distancia entre el tercer cuartil y el máximo. En todos los modos se observa que las medianas no ocupan una posición simétrica en las cajas respectivas, situándose, en general, hacia la parte inferior de las mismas.

Como se ha mencionado en párrafos anteriores, los tests estadísticos sencillos basados en la comparación de medias y desviaciones estándares no exploran la distribución completa de los datos, por tanto, la reproducción precisa de la media y varianza de una variable no implica necesariamente la plena confianza en los momentos de orden superior (HASSON ET AL., 2009). Debido a que estos momentos de orden superior serán cada vez más habituales y convenientes en ciertos estudios de impacto, como sucede, por ejemplo, en el estudio de extremos, donde el comportamiento de las colas de la distribución, aunque esencial, está frecuentemente ausente o insuficientemente tratado en muchos estudios estadísticos; se ha intentado recurrir, en consecuencia, a la utilización de tests estadísticos más complejos para consolidar o reforzar nuestra evaluación de modelos.

Para completar nuestra comparación de las PDFs de los modos de variabilidad se ha recurrido al contraste de Kolmogorov-Smirnov (KS) para dos muestras (WILKS, 2006) ya que permite evaluar de una manera objetiva la capacidad de los modelos de reproducir las PDFs de los modos de variabilidad correspondientes al ERA40. Al tratarse de un método no paramétrico, contrariamente a la mayoría de los tests de ajustes de distribución de datos, este test no hace ninguna suposición acerca de la distribución de los mismos, permitiendo explorar y comparar las diferencias entre pares de PDFs. El test KS se basa en el cálculo del estadístico D_s , conocido también como distancia de Smirnov. D_s se define como la distancia vertical máxima entre las funciones de distribución acumuladas empíricas de dos conjuntos de datos (modelo y ERA40). Este valor de D_s nos va a permitir, en primer lugar, establecer para cada modo de variabilidad un *ranking* entre los modelos, correspondiendo la mejor puntuación (“skill score”) al valor más pequeño del estadístico D_s y, por otra parte, evaluar el rechazo de la hipótesis nula de que las muestras de los dos conjuntos de datos pertenecen a la misma distribución si:

$$D_s > \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \ln \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right]^{1/2},$$

siendo $\alpha = 0,05$ el nivel de significación elegido en este estudio. Como se menciona en WILKS (2006), el test es unilateral porque aparece el valor absoluto en la expresión del estadístico D_s . Las PDFs de los modelos AR4 y del ERA40 difieren al nivel del 5 % para todos los modos de variabilidad.

Analizando para cada modo de variabilidad, los valores del estadístico D_s se comprueba (no se muestra), que aunque el rango de variación de D_s no sea demasiado amplio, sirve para discriminar el comportamiento de los distintos modelos. Este estadístico ha sido empleado por HASSON ET AL. (2009) utilizando como variables la precipitación y la temperatura máxima sobre el sureste de Australia. PERKINS ET AL. (2007) introdujeron una métrica muy similar basada en las PDFs para evaluar modelos climáticos. En ambos casos, lo más reseñable es que la métrica tiene la gran ventaja de medir la capacidad de un modelo para simular las colas de la distribución.

En la Tabla 3.6, se muestra el *ranking* de los modelos para cada modo de variabilidad. Centrándonos en el comportamiento específico de cada modo de variabilidad, observamos que para la NAO, los mejores modelos son: PCM, BCCR-BCM2.0, CSIRO-Mk3.0 y los peores: CNRM-CM3, MIROC3.2(medres) y GFDL-CM2.0. Para el SCAND, los mejores modelos son: CCSM3, PCM y BCCR-BCM2.0 y los peores: GFDL-CM2.0, CSIRO-Mk3.0 y UKMO-HadGEM1. Para el EA, los mejores modelos son: BCCR-BCM2.0, CCSM3 y GFDL-CM2.0 mientras que los peores son: MIROC3.2(hires), CGCM3.2(T47) y MIROC3.2(medres). Por último para el EA/WR, los mejores modelos son: CCSM3, BCCR-BCM2.0 e INM-CM3.0 y los peores: PCM, CNRM-CM3 y CGCM3.1(T63). Respecto a la métrica D_s , considerando todos los *rankings* relativos a todos los modos de variabilidad, los modelos mejores son BCCR-BCM2.0, CCSM3 y PCM, mientras que los peores son CNRM-CM3, MIROC3.2(medres) y GISS-AOM.

Por último, se ha introducido un análisis adicional aprovechando la disponibilidad de dato diario. Este análisis, basado en el cálculo de los tiempos de decaimiento (*e-folding times*), proporciona una estimación para ERA40 y los modelos del AR4 de las escalas temporales asociadas con cada modo de variabilidad (FELDSTEIN, 2000). Esta escala de tiempo característica, también denominada tiempo de decorrelación, se define como el tiempo necesario para que el coeficiente de autocorrelación correspondiente al retardo 1 decaiga en un factor de e .

Los tiempos de decaimiento se recogen en la Tabla 3.7. En líneas generales, los modelos no son capaces de captar de forma precisa estas escalas de tiempo intrínsecas, tendiendo a subestimarlas. Este hecho pone de manifiesto que los modelos muestran deficiencias cuando simulan los modos de variabilidad y puede que no puedan reproducir de forma adecuada algunas características dinámicas asociadas a los mismos. Centrándonos en cada modo de variabilidad, se observa que para la NAO, los mejores modelos que simulan el tiempo de decaimiento son: CCSM3, CSIRO-Mk3.0, PCM, CGCM3.1(T63) y UKMO-HadCM3 y los peores: GISS-AOM, INM-CM3.0, MRI-CGCM2.3.2, BCCR-BCM2.0 y CGCM3.1(T47). Para el SCAND, los mejores son: CCSM3, PCM, UKMO-HadCM3, CGCM3.1(T63) e INM-CM3.0 mientras que los peores: GISS-AOM, BCCR-BCM2.0, MRI-CGCM2.3.2, GFDL-CM2.0 y CSIRO-Mk3.0. Para el EA, los modelos mejores son: CCSM3, BCCR-BCM2.0, GFDL-CM2.0, UKMO-HadGEM1, CGCM3.1(T63) y UKMO-HadGEM1 mientras que los peores: MR-CGCM2.3.2, PCM, GISS-AOM, MIROC3.2(hires) y MIROC3.2(medres). Finalmente, para el EA/WR, los modelos mejores son: CGCM3.1(T63), CCSM3, MIROC3.2(medres), CNRM-CM3 y PCM mientras que los peores: BCCR-BCM2.0, MRI-CGCM2.3.2, ECHAM5/MPI-OM, CGCM3.1(T47) y CSIRO-Mk3.0. De los resultados antes mencionados se concluye que los modelos CCSM3 y CGCM3.1(T63) son los que poseen las mejores puntuaciones en los cuatro modos de variabilidad.

Los tiempos más largos se observan en el SCAND y la NAO, seguidos por el EA/WR y el EA. Estos resultados muestran un buen acuerdo con los siguientes estudios: a) FELDSTEIN (2000) especialmente por lo que respecta a la NAO, el EA y el EA/WR si bien, en nuestro trabajo se obtiene una escala de tiempo más larga para el SCAND; y b) STEPHENSON ET AL. (2000) centrado exclusivamente en el modo NAO. Ambos estudios muestran una escala temporal de decorrelación de 8-10 días para NAO; escala temporal que puede considerarse como la escala de tiempo fundamental para la componente a corto plazo de la NAO.

Estas escalas temporales de decorrelación son más largas que las escalas temporales asociadas con las ondas de escala sinóptica (~ 4 días), hecho que apunta a que los modos de variabilidad tienen una importante componente intramensual que no es tenida en cuenta cuando se utilizan datos medios mensuales.

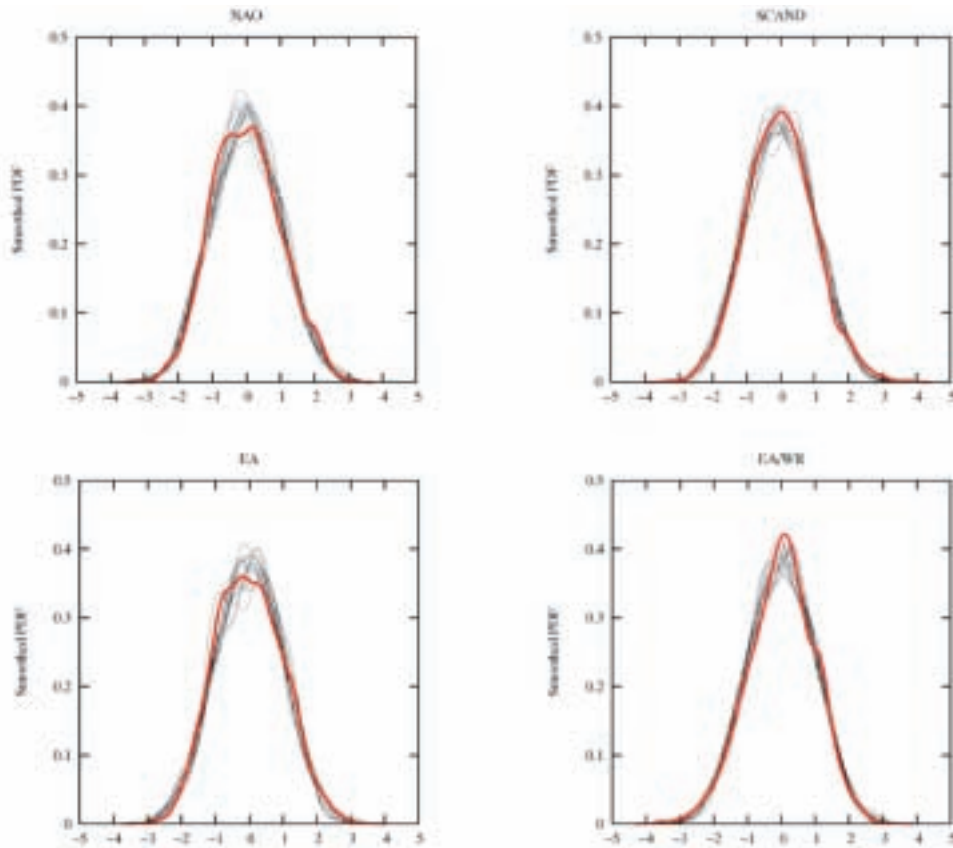


Figura 3.7. PDFs de los modos de variabilidad NAO, SCAND, EA y EA/WR correspondientes al ERA40 (en rojo) y a los modelos AR4 (en negro).

	NAO		SCAND		EA		EA/WR	
	Asimetría	Curtosis	Asimetría	Curtosis	Asimetría	Curtosis	Asimetría	Curtosis
ERA40	0,1736	-,3424	0,1428	0,0231	0,1371	-0,3641	-0,2171	0,0368
BCCR-BCM2.0	0,1010	-,0398	-0,1170	-,4249	0,0352	-,2690	-0,0275	-,4516
CCSM3	0,0886	-,3162	0,1488	-,1027	0,1530	-0,2216	-0,1858	-,2398
CGCM3.1(T47)	-0,0475	-,4466	0,0400	-,1079	-0,0104	0,0732	-0,0352	-,3346
CGCM3.1(T63)	0,0754	-,2655	0,0369	-,4193	0,0530	0,0297	-0,1723	-,0422
CNRM-CM3	0,1217	-,0905	0,3575	0,2088	0,0273	-0,0402	-0,1139	-,0189
CSIRO-Mk3.0	0,0164	-,2758	0,1189	-,3754	0,0794	-0,0085	0,0505	-,2254
ECHAM5/MPI-OM	0,0005	-,3542	0,0500	-,3430	-0,1043	-,2497	0,0947	-,1914
GFDL-CM2.0	0,2463	-,1869	0,0398	-,2729	-0,1413	-0,1756	-0,0826	-,2592
GISS-AOM	-0,0563	-,0879	0,0003	-,1183	-0,1757	-0,3702	0,0922	-,1480
INM-CM3.0	0,0327	-,4367	0,1682	0,0579	-0,0398	-0,2458	-0,0629	-,2204
MIROC3.2(hires)	0,0764	-,2693	0,1337	-,1541	-0,1050	-,2856	-0,0677	-,1584
MIROC3.2(medres)	0,1869	0,0435	0,0826	-,2456	-0,0680	-0,3777	-0,0936	-,0101
MRI-CGCM2.3.2	-0,0104	-,5408	-0,0354	-,3032	-0,1839	-0,3715	-0,0936	-,3545
PCM	0,1366	0,0659	0,0492	-,3412	0,0521	-0,5514	-0,1628	0,0944
UKMO-HadCM3	0,0742	-,2661	-0,0705	-,2432	-0,0464	-0,2335	-0,0333	-,1623
UKMO-HadGEM1	-0,0045	-,4200	0,1857	-,3771	0,0559	-0,2083	-0,2251	-,1322

Tabla 3.5. Coeficientes de asimetría y curtosis de los modos de variabilidad NAO, SCAND, EA y EA/WR correspondiente al ERA40 y los modelos del AR4 IPCC.

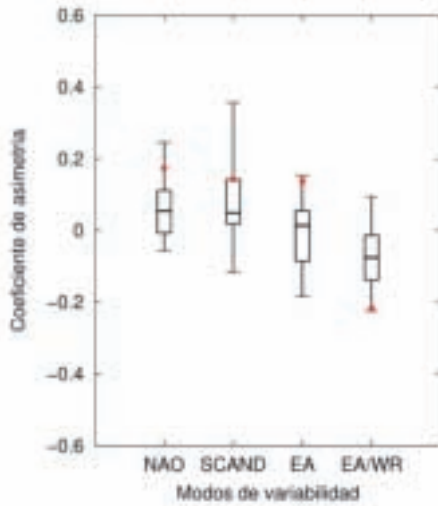


Figura 3.8. Diagrama de cajas del coeficiente de asimetría de los modos de variabilidad NAO, SCAND, EA y EA/WR correspondiente a los modelos del AR4. Los valores del ERA40 vienen representados por el círculo rojo.

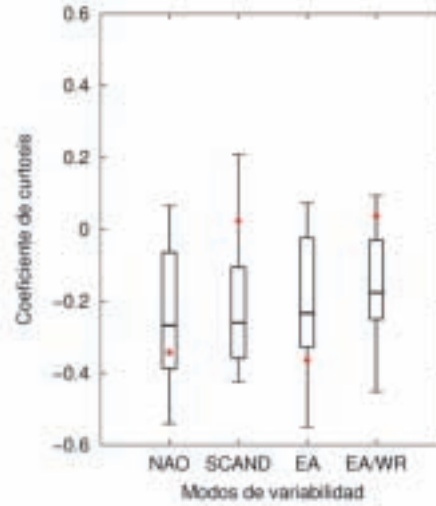


Figura 3.9. Como en la Figura 3.8, pero para el coeficiente de curtosis.

	NAO	SCAND	EA	EA/WR
BCCR-BCM2.0	Green	Green	Green	Green
CCSM3	Yellow	Green	Green	Green
CGCM3.1(T47)	Red	Yellow	Red	Green
CGCM3.1(T63)	Yellow	Green	Green	Red
CNRM-CM3	Red	Yellow	Yellow	Red
CSIRO-Mk3.0	Green	Red	Yellow	Red
ECHAM5/MPI-OM	Yellow	Green	Yellow	Yellow
GFDL-CM2.0	Red	Red	Green	Yellow
GISS-AOM	Yellow	Red	Red	Yellow
INM-CM3.0	Green	Red	Yellow	Green
MIROC3.2(hires)	Yellow	Yellow	Red	Yellow
MIROC3.2(medres)	Red	Yellow	Red	Yellow
MRI-CGCM2.3.2	Yellow	Yellow	Red	Red
PCM	Green	Green	Yellow	Red
UKMO-HadCM3	Green	Yellow	Yellow	Yellow
UKMO-HadGEM1	Red	Red	Green	Green

Tabla 3.6. Ranking de los modelos AR4 considerando el estadístico de Kolmogorov-Smirnov, D_s , para los modos de variabilidad NAO, SCAND, EA y EA/WR.

	Tiempos de decaimiento			
	NAO	SCAND	EA	EA/WR
ERA40	10,4	11,8	8,6	8,8
BCCR-BCM2.0	7,9	8,2	7,4	6,2
CCSM3	9,4	10,8	7,3	7,7
CGCM3.1(T47)	7,9	10,0	6,7	6,5
CGCM3.1(T63)	9,1	10,3	6,9	7,9
CNRM-CM3	8,2	9,1	6,7	7,3
CSIRO-Mk3.0	9,3	8,9	6,7	6,7
ECHAM5/MPI-OM	8,3	9,9	6,8	6,5
GFDL-CM2.0	8,9	8,7	7,0	7,1
GISS-AOM	7,3	7,9	6,3	6,8
INM-CM3.0	7,6	10,1	6,8	6,9
MIROC3.2(hires)	8,1	9,9	6,3	7,0
MIROC3.2(medres)	8,5	9,8	6,4	7,4
MRI-CGCM2.3.2	7,7	8,6	6,0	6,4
PCM	9,2	10,9	6,5	7,3
UKMO-HadCM3	9,0	10,7	6,8	6,8
UKMO-HadGEM1	8,8	9,1	7,0	7,2

Tabla 3.7. Tiempos de decaimiento (en días) de los modos de variabilidad NAO, SCAND, EA y EA/WR para ERA40 y los modelos AR4.

3.5. CONCLUSIONES

La evaluación de modelos climáticos respecto a datos de observación proporciona un análisis de la fiabilidad de los mismos que justificará su posterior empleo en las evaluaciones de impacto. Aunque los modelos climáticos admiten un amplio abanico de procedimientos de evaluación, los métodos más usuales se limitan a explorar el comportamiento del modelo en medias anuales, estacionales y mensuales; escalas que probablemente no sean las que más afectan a los sistemas humanos, físicos o biológicos (PERKINS ET AL., 2007). Este estudio está basado en dato diario para evitar la presencia de sesgos que puedan quedar ocultos en el proceso de promediado. Sus resultados, consistentes con los obtenidos por otros autores utilizando datos mensuales o estacionales, permiten determinar características temporales de los modos de variabilidad ligadas a escalas sinópticas.

Un conjunto de 16 modelos del AR4 del IPCC, seleccionados por disponer de dato diario, se han evaluado atendiendo a la simulación de las características espaciales y temporales de los cuatro modos de variabilidad (NAO, SCAND, EA y EA/WR), más importantes para el área euroatlántica. La evaluación se ha centrado en la captación de las varianzas, estructuras espaciales, correlaciones, y en aspectos relacionados con las funciones de densidad de probabilidad de los modos (PDFs,

asimetría, curtosis y métrica obtenida a partir del estadístico del test no paramétrico de KS), y escalas de tiempo características como los tiempos de decaimiento, comparados con los correspondientes al ERA40. Las principales conclusiones que se han extraído de este capítulo son:

- a) En general los 16 modelos AR4 considerados son capaces de reproducir las principales características espaciales de los modos de variabilidad del ERA40. La mayoría de los modelos subestiman las varianzas explicadas por la NAO y el SCAND mientras que sobrestiman para los modos EA y EA/WR; siendo los modelos CGCM3.1 (T63) y UKMO-HadGEM1 los que presentan valores más próximos a la varianza explicada del ERA40, mientras que el modelo GISS-AOM muestra el mayor sesgo para los cuatro modos. Por otro lado, el SCAND es el modo con mayor número de modelos con las correlaciones espaciales más altas, estando estas comprendidas entre 95 % y el 99 %. Para los modos NAO y EA, los modelos muestran correlaciones de entre el 80 % y el 90 %, mientras que para el EA/WR, un elevado número de modelos muestra correlaciones en torno al 95 %. Considerando los cuatro modos conjuntamente, UKMO-HadGEM1, CGCM3.1 (T63) y CGCM3.1 (T47) son los modelos que muestran las correlaciones más altas, mientras que el GISS-AOM es el que muestra las más bajas.
- b) Con respecto a las características temporales, las diferencias entre la PDF de cada modo de variabilidad para el ERA40 y los modelos, se han evaluado mediante el test no paramétrico de Kolmogorov-Smirnov de 2 muestras, en función de la denominada distancia de Smirnov, D_s , que resulta ser significativa al nivel del 5 %. La forma de las PDFs depende del modelo de variabilidad considerado. La naturaleza cuantitativa del estadístico D_s ha permitido cuantificar la habilidad de los modelos para simular la función de densidad de probabilidad de cada modo de variabilidad relativa a ERA40. Los modelos BCCR-BCM2.0, CCSM3 y PCM son los modelos mejores mientras que los peores son CNRM-CM3, MIROC3.2(medres) y GISS-AOM.

Respecto a los tiempos de decaimiento, utilizados como medidas de escalas de tiempo características, ninguno de los modelos considerados en este capítulo es capaz de reproducirlos apropiadamente para los cuatro modos de variabilidad. Los modelos que muestran los mejores tiempos de decaimiento son CCSM3 y CGCM3.1(T63).

A modo de resumen, todos los modelos son capaces de simular razonablemente bien los cuatro modos de variabilidad, siendo el SCAND el modo mejor simulado espacialmente mientras que los modos mejor simulados atendiendo a sus características temporales son el SCAND y la NAO. UKMO-HadGEM1 y CGCM3.1(T63) son los modelos que mejor simulan las características espaciales mientras que CCSM3 y CGCM3.1(T63) son los modelos mejores con respecto a las características temporales. GISS-AOM es el modelo con el peor comportamiento tanto en características espaciales como temporales. En consonancia con los resultados de STONER ET AL. (2009) y STEPHENSON ET AL. (2006), no se ha encontrado ningún modelo que sobresaliera en su habilidad para reproducir todos los modos de variabilidad. Se puede aceptar que los modelos AR4 considerados han mostrado ha-

bilidad en reproducir correctamente las propiedades espaciales de variabilidad, como ya habían apuntado CASSOU Y GUILYARDI, (2007) con respecto al modo NAO.

De acuerdo con ERRASTI ET AL. (2011) y KNUTTI ET AL. (2010b), podemos concluir que los *rankings* de los modelos muestran una gran dependencia de la región, variables y métricas seleccionadas en la evaluación de los modelos; sin olvidar, por otra parte, que la elección de los modelos “mejores” dependerá en gran medida de las aplicaciones específicas diseñadas por los usuarios.

4.

Evaluación de los Tipos de Circulación

4.1. Introducción

4.2. Datos

4.3. Metodología

4.4. Resultados

4.4.1. Análisis espacial de los Tipos de Circulación

4.4.2. Análisis temporal de los Tipos de Circulación

4.4.2.1. Frecuencias de los Tipos de Circulación

4.4.2.2. Tiempo medio de residencia de los Tipos de Circulación

4.4.2.3. Características de los eventos

4.4.2.4. Transiciones y su predecibilidad

4.5. Conclusiones

4.1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos decenios junto a la conciencia creciente del cambio climático se ha asistido casi paralelamente a un renacer en la investigación de la climatología sinóptica. Actualmente existe un número creciente de estudios que tratan de relacionar las tendencias climáticas y la variabilidad de la circulación atmosférica en escalas de tiempo sinópticas, que pueden describirse de diferentes maneras, como queda ampliamente reflejado en el gran número de diferentes clasificaciones basadas en la circulación atmosférica (HUTH ET AL., 2008). En términos generales, clasificación significa agrupar en clases o “conglomerados” entidades que comparten características comunes en cada grupo y presentan grandes diferencias entre los distintos grupos resultantes de la clasificación.

Las clasificaciones de los regímenes de circulación a escala de tiempo sinóptica se introdujeron originalmente como un intento para relacionar los patrones persistentes y recurrentes con la dinámica atmosférica a escala planetaria o sinóptica (RHEINHOLD Y PIERREHUMBERT, 1982). Poco tiempo después, se sugirió, por vez primera, que los regímenes de flujo podrían estar asociados con algunas propiedades del atractor atmosférico a gran escala, en concreto, con los puntos fijos inestables de la dinámica atmosférica (LEGRAS Y GHIL, 1985). Más recientemente, las clasificaciones sinópticas de los regímenes de circulación se han utilizado para inferir las probabilidades de sucesos extremos. A este respecto, las conexiones entre regímenes de tiempo y episodios de extremos a escala local se han examinado en distintas zonas de las regiones de latitudes medias (ROBERTSON Y GHIL, 1999; YIOU Y NOGAJ, 2004; CASSOU ET AL., 2005).

Centrándonos en Europa, más concretamente en el área mediterránea, HERTIG ET AL. (2010) subrayan que debido a la gran variabilidad climática de las latitudes subtropicales y a la compleja topografía de la región mediterránea, esta área se ve afectada tanto por los eventos fríos —especialmente durante los meses invernales— como por las condiciones extremas muy cálidas, principalmente durante los meses estivales. Por otra parte, como apunta GIORGI (2006), el cambio climático futuro afectará más al área mediterránea que a otras regiones del globo.

En este contexto, la posibilidad de emplear métodos sinópticos con los datos de reanálisis y/o salidas de los AOGCMs para estudiar las características del clima puede ser una vía muy prometedora. Especialmente en la última década, se ha reconocido que los procedimientos de clasificación de la circulación constituyen una herramienta innovadora en la evaluación de los modelos climáticos desde un punto de vista sinóptico. Por otra parte, dada la necesidad creciente de las evaluaciones de impacto del cambio climático tanto a escala regional como local, este enfoque sinóptico se revela de gran utilidad al tratar de escoger los modelos más apropiados para posteriores estudios de reducción de escala (*downscaling*) y/o de combinación ponderada de miembros en un *ensemble* multimodelo. Sin embargo, hasta el presente el número de estudios dedicados a examinar la forma y el grado en que los modelos reproducen los Tipos de Circulación (TC) es relativamente escaso destacando los realizados por SHERIDAN Y LEE (2010) y los estudios de: HUTH (1997 Y 2000), LAPP ET AL. (2002), MCKENDRY ET AL. (1995 Y 2006), SCHOOF Y PRYOR (2006), STAHL ET AL. (2006), CASSANO ET AL. (2006), BRUNET ET AL. (2008), HAN-

DORF Y DETHLOFF (2009), HUTH ET AL. (2008), DEMUZERE ET AL. (2009) Y FINNIS ET AL. (2009). La adopción de este enfoque en este capítulo está motivado, en gran medida, por nuestra convicción del beneficio que puede aportar al análisis climático la descripción más detallada de la escala sinóptica mediante la identificación de la posición e intensidad de los centros de presión, la frecuencia relativa de los tipos de flujo medio zonales y meridionales y de las transiciones entre diferentes tipos de circulación (DEMUZERE ET AL., 2009; CASADO ET AL., 2010). De esta forma, se puede evaluar si los tipos simulados por los AOGCMs son realistas tanto en su representación geográfica como en las frecuencias de los tipos de circulación comparándolos con los datos de observación. Además, los errores sistemáticos presentes en la estimación de la frecuencia y la variabilidad en algunos TC pueden considerarse como una fuente de incertidumbre adicional e introducirse en aquellos métodos de reducción de escala que utilicen como predictores las frecuencias de los Tipos de Circulación según la constatación reciente de ANAGNOSTOPOULOU ET AL. (2007).

Más adelante, el mismo procedimiento permitirá abordar el estudio de los cambios en los tipos o los cambios en las frecuencias de los TC en las condiciones de clima futuro, proporcionadas por las simulaciones de los AOGCMs bajo diferentes escenarios de emisión, respecto a las condiciones del clima actual.

Dentro de este marco, el objetivo principal de este capítulo consiste en evaluar la habilidad de un conjunto de modelos del AR4 del IPCC para reproducir las características principales tanto espaciales como temporales de los Tipos de Circulación del reanálisis ERA40. Se han aplicado dos esquemas o técnicas de clasificación para explorar de esta forma, no solo la incertidumbre de utilizar distintos modelos, sino también la sensibilidad de los resultados respecto al esquema de clasificación empleado. Estos resultados serán de gran utilidad ya que permitirán establecer un *ranking* de los modelos AR4 que mejor simulen el clima desde un punto de vista sinóptico en la región euroatlántica; reduciendo así el número de posibles modelos climáticos que podrán emplearse posteriormente en aplicaciones específicas; sin olvidar que estas listas de *rankings* proporcionan una información muy valiosa tanto en la cuantificación de la relación entre extremos y tipos de circulación como en los estudios de impacto.

4.2. DATOS

En este capítulo se han utilizado las mismas bases de datos, variable (MSLP), periodo invernal (diciembre, enero y febrero, comprendidos entre diciembre de 1980 a diciembre de 1999) y área (25°N a 70°N y desde 45°O a 50°E) a las que se hacen referencia en el capítulo 3 de este libro. Como en el capítulo anterior, todas las bases de datos, tanto los procedentes del ERA40 como los de los modelos del AR4, han sido interpolados a una rejilla común con una resolución latitud longitudinal de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$.

4.3. METODOLOGÍA

En este capítulo se han seleccionado dos esquemas objetivos de clasificación utilizados en la Acción 733 del COST (European Cooperation in Science and Technology) denominada: "Harmonisation and Applications of Weather Types Classifications for European regions", (<http://www.cost733.org>), para lo cual se ha hecho uso del software de dichos esquemas, disponible en dicha Acción 733. El objetivo de esta Acción ha consistido en desarrollar un método numérico de evaluación, comparación y clasificación de Tipos de Circulación, escalable a cualquier región europea y de uso en distintas aplicaciones.

Entre los diferentes esquemas disponibles en esta Acción se ha optado por dos métodos pertenecientes a los algoritmos de optimización: k-medias y SANDRA. Su elección se debe a que estos esquemas tienden a producir tipos de circulación que varían estacionalmente en su frecuencia de ocurrencia, contrariamente a la mayoría de los métodos que reflejan una distribución uniforme de los tipos a lo largo del año (DEMUZERE ET AL., 2010), y por ser los que mejor representan la precipitación en la península Ibérica y Baleares, según los resultados de CASADO ET AL. (2010). El uso de dos esquemas permitirá, además, analizar el impacto del método de clasificación utilizado en los resultados.

El esquema de clasificación k-medias utiliza el algoritmo del conglomerado no jerárquico de k-medias (HARTIGAN Y WONG, 1979) considerando semillas iniciales mientras que SANDRA, acrónimo de 'Simulated ANnealing and Diversified RANdomization', es una versión optimizada del esquema k-medias (PHILIPP ET AL., 2010), cuya principal ventaja estriba en generar particiones más próximas al óptimo global y más estables, esquema descrito inicialmente por PHILIPP ET AL. (2007). Esta técnica, compacta y robusta, que proporciona excelentes soluciones a problemas de optimización con una reducción sustancial en el tiempo de computación, permite a cada miembro de un conglomerado cambiar a otro conglomerado en cualquier instante de tiempo, incluso si la similitud en el interior del conglomerado decreciera al principio (KÜTTEL ET AL., 2010). Además en SANDRA se combina con el concepto de aleatorización diversificada ('diversified randomization'), el de 'simulated annealing', repitiéndose 1 000 veces con conglomerados de partida aleatorios, donde en cada iteración se examina si cada objeto está en el conglomerado apropiado, en caso de no serlo, se vuelve a reasignarlo a otro conglomerado (PHILIPP ET AL., 2007). En su aplicación a campos de presión diarios sobre el Atlántico Norte y Europa para inviernos, desde 1850 hasta 2003, PHILIPP ET AL. (2007) mostraron que SANDRA proporcionaba mejores resultados que otras técnicas de conglomerados, utilizadas más habitualmente como es el caso de k-medias, en lo que respecta a la similitud en el interior de cada clase (conglomerado) y a la separación entre clases.

La determinación del número óptimo de conglomerados constituye un paso crucial en cualquier técnica de conglomerados. En PHILIPP ET AL. (2007) se demuestra que, a pesar de considerar varios métodos de estimación del número apropiado de clases, no ha sido posible determinar un número de clases idóneo, ya que este va a depender considerablemente de la aplicación que se considere. En nuestro caso, para su determinación, se ha realizado previamente un análisis en componentes princi-

pales y como criterio de selección del número óptimo de clases se ha considerado el diagrama LEV (log-eigenvalues) (WILKS, 2006). De dicho diagrama se deduce que 8 o 9 conglomerados serían los números óptimos a considerar. Dado este resultado, en un principio se han aplicado ambos esquemas de clasificación para 8 y 9 clases al conjunto de datos del ERA40. Los 8 o 9 centroides obtenidos para el ERA40 corresponden al valor medio de los campos MSLP de los días que pertenecen a cada clase (TC, más adelante). Del análisis de estos resultados se puede concluir que los 8 TC obtenidos al considerar 8 clases, son prácticamente análogos a 8 de los 9 obtenidos al considerar 9 clases. Por lo que, finalmente, para este estudio se ha optado por considerar 8 clases teniendo en cuenta además que, para la finalidad del mismo, la evaluación de los modelos AR4, el considerar 8 TC simplifica los resultados y que estos se pueden comparar con los obtenidos en CASADO ET AL. (2008) y PASTOR ET AL. (2008).

El cálculo de los TC correspondientes a los modelos AR4 no se ha realizado aplicando el esquema de clasificación a cada uno de estos modelos, técnica usada en el estudio previo (PASTOR ET AL., 2008; BRUNET ET AL., 2008), debido a que siguiendo esta metodología los TC obtenidos para cada modelo presentan bastantes diferencias con respecto a los correspondientes del ERA40, lo que dificulta considerablemente su evaluación. Para soslayar este problema y para que los TC obtenidos de los modelos sean comparables entre sí y con los del ERA40, se ha procedido de la siguiente manera: para cada día problema del modelo, una vez corregido de su sesgo, se calcula su distancia euclídea con los 8 centroides del ERA40, asignándose el día problema del modelo a la clase con cuyo centroide presente la distancia mínima. Los TC de cada modelo se calcularán como el valor medio de los campos MSLP de los días del modelo que pertenecen a cada clase. De esta manera, los 8 TC obtenidos para cada modelo AR4 y para ambos esquemas de clasificación serán, por construcción, muy similares a los obtenidos para el ERA40. Resultando así fácilmente comparables los TC del ERA40 con los correspondientes de cada modelo.

4.4. RESULTADOS

4.4.1. Análisis espacial de los Tipos de Circulación

En esta sección se realiza una descripción espacial de la circulación invernal y de las configuraciones de los distintos TC relativos a cada esquema de clasificación para el ERA40 y los 16 modelos considerados.

La Figura 4.1 muestra los TC obtenidos para el ERA40 y para ambos esquemas de clasificación, k-medias (Figura 4.1a) y SANDRA (Figura 4.1b). Sus principales características están brevemente descritas en la Tabla 4.1. Los Tipos de Circulación TC1 y TC3, se caracterizan por un predominio de flujo zonal en latitudes medias y altas; TC2 y TC4 están ligados a un flujo del SO, siendo más acusado en el caso del TC4, que da lugar al paso de sistemas frontales por la península Ibérica; TC6 y TC7 se corresponden con situaciones de flujo meridional (tipo bloqueo), en las que el anticiclón presenta distintas posiciones y finalmente, TC5 y TC8, re-

presentan patrones de circulación mixta entre zonales y meridionales. De las Figuras 4.1a y 4.1b se observa que existe una gran semejanza entre los TC obtenidos por ambos esquemas. Para analizar detalladamente sus posibles diferencias se han calculado los mapas de diferencias entre los TC para ambos esquemas (no se muestran). En estos mapas de diferencias se observan sesgos significativos solo para los tipos de circulación TC3 y TC8, mostrando valores superiores en TC3 e inferiores en TC8 para el esquema de k-medias con respecto al de SANDRA entre las latitudes de 40°N y 70°N.

Con respecto a los TC obtenidos para los modelos AR4, estos se caracterizan por presentar bastantes similitudes con los correspondientes del ERA40, consecuencia de la metodología seguida para su obtención. Para analizar con más detalle sus posibles diferencias se han calculado los coeficientes de correlación espacial entre los TC de los modelos AR4, a los que previamente se les ha quitado el sesgo, y los correspondientes del ERA40, para ambos esquemas de clasificación (Tabla 4.2). Todos los modelos muestran, para todos los TC, coeficientes de correlación superiores al 95 %, siendo en un gran número de casos próximos al 99 %, excepto para el TC6, que presenta valores inferiores al 90 % para 11 de los 16 modelos considerados. El modelo con las correlaciones más altas para todos los TC es el UKMO-HadGEM1 mientras que las correlaciones más bajas corresponden al GISS-AOM para ambos esquemas de clasificación.

Los campos medios de MSLP de los TC obtenidos para el ERA40 presentan, en general, una gran similitud con los correspondientes obtenidos en la Acción COST733, (<http://www.cost733.org>), que han sido calculados con las siguientes características: a) para un dominio ligeramente distinto del considerado en este estudio y que se extiende desde 30°N a 76°N y desde 37°O a 56°E, b) para el periodo de 1957 a 2002 y c) aplicando el esquema de clasificación a 9 TC. Un resultado interesante de esta Acción es que, en ella, se han calculado la precipitación y las anomalías de temperatura, con datos del ERA40, para cada uno de sus 9 TC. Considerando las analogías existentes entre sus 9 TC con los 8 TC de este estudio, se pueden asociar algunas de las características anteriores de temperatura y precipitación sobre la península Ibérica, como son por ejemplo: una anomalía positiva de temperatura en toda la península y en mayor grado en la región mediterránea, así como precipitación en el oeste peninsular en el TC4; el TC5 tiene asociados ligeros incrementos de temperatura en el SE y precipitación en el N peninsular. El TC6 muestra descensos de temperatura en toda la península más acusados en el N y E peninsular y en menor grado en el TC7. Finalmente el TC3 muestra incrementos de temperatura en toda la península siendo más importantes en el NE y precipitaciones en el NO peninsular.

TC	Descripción de los Tipos de Circulación de ERA40
TC1	Flujo zonal en altas latitudes con altas presiones sobre la Península Ibérica, Baleares y África que se extienden sobre gran parte de Europa Central. Bajas presiones en altas latitudes.
TC2	Flujo del suroeste. Altas presiones que se extienden desde Azores hasta el sur de Europa oriental y Rusia y un centro intenso de bajas presiones en torno a Islandia.
TC3	Flujo zonal sobre Europa occidental y central entre un centro intenso de altas presiones sobre Azores y Canarias y una zona intensa de bajas presiones al norte del paralelo 50°N.
TC4	Flujo del suroeste sobre el continente con altas presiones centradas sobre Canarias extendiéndose al sur de Europa y un centro de bajas presiones al oeste de Irlanda.
TC5	Centro de altas presiones sobre Azores. Centro de bajas presiones sobre la Península Escandinava.
TC6	Centro intenso de altas presiones entre Islandia y norte de Gran Bretaña e Irlanda, afectando bajo su radio de acción a toda Europa y región atlántica.
TC7	Dos áreas de altas presiones: a) una muy intensa centrada en Rusia y b) otra más débil centrada sobre Azores y Canarias. Centro de bajas presiones al SO de Islandia.
TC8	Altas presiones centradas en el Canal de la Mancha afectando bajo su radio de acción a gran parte de Europa. Bajas presiones al oeste de Islandia.

Tabla 4.1. Descripción de los 8 Tipos de Circulación (TC) para el invierno de ERA40.

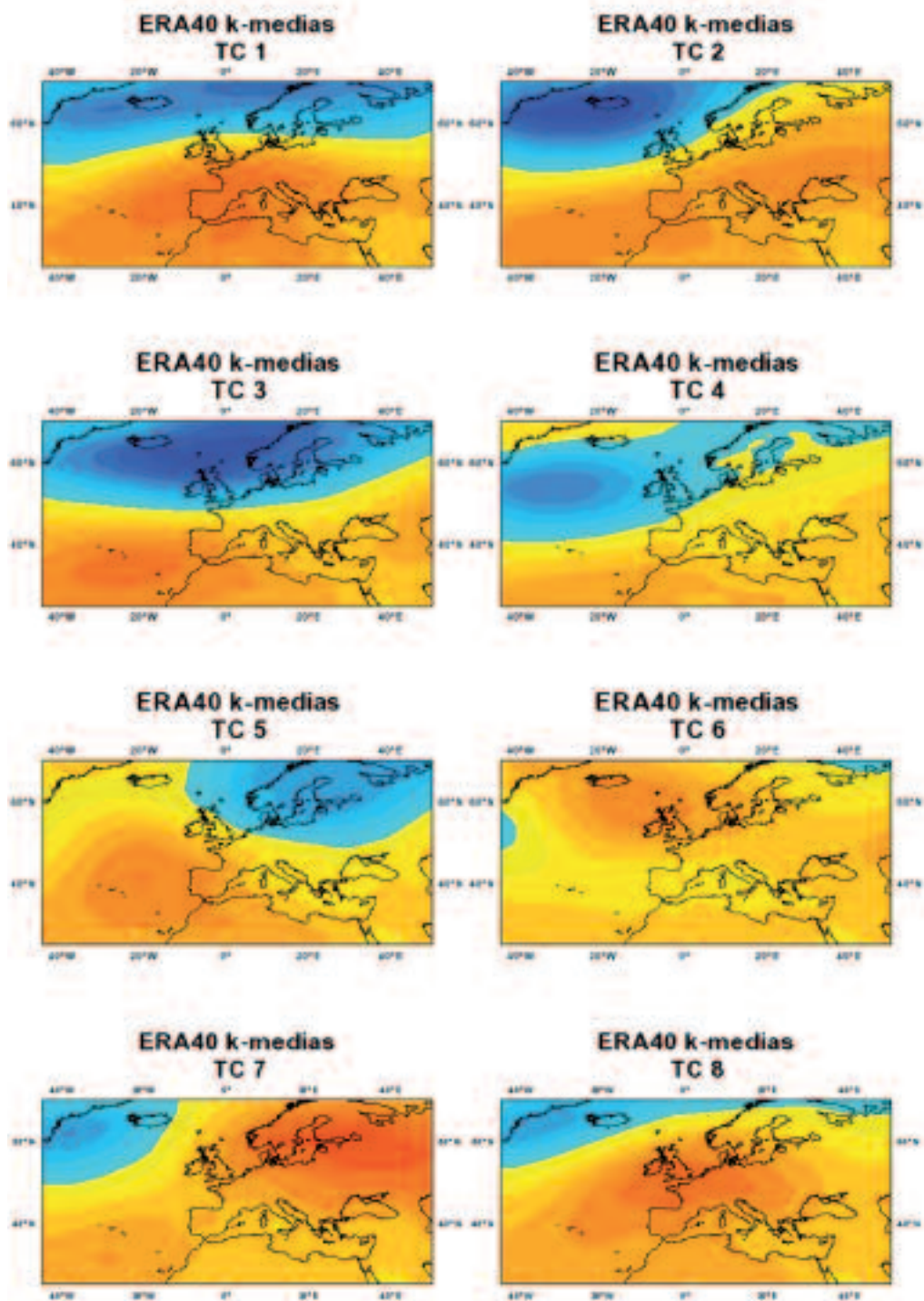


Figura 4.1.a. Campos medios MSLP de los 8 Tipos de Circulación para el invierno de ERA40 utilizando el esquema de clasificación k-medias. Intervalo de 4 hPa.

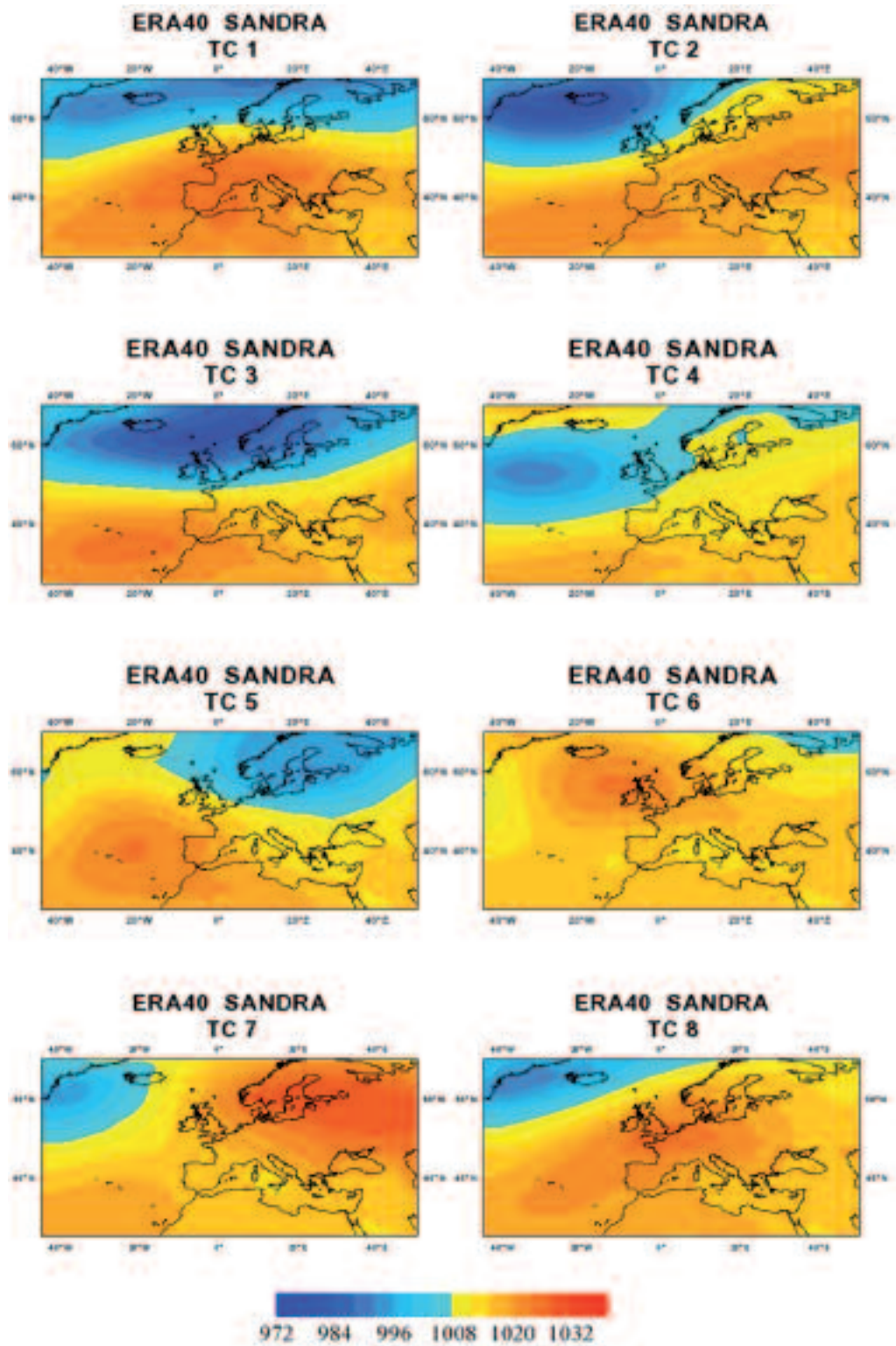


Figura 4.1.b. Campos medios MSLP de los 8 Tipos de Circulación para el invierno de ERA40 utilizando el esquema de clasificación SANDRA. Intervalo de 4 hPa.

	CORRELACIONES															
	TC1		TC2		TC3		TC4		TC5		TC6		TC7		TC8	
	k	S	k	S	k	S	k	S	k	S	k	S	k	S	k	S
BCCR-BCM2.0	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,96	0,98	0,98	0,76	0,83	0,97	0,96	0,98	0,98
CCSM3	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,99	0,99	0,87	0,88	0,97	0,97	0,98	0,98
CGCM3.1(T47)	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,97	0,99	0,99	0,87	0,90	0,97	0,97	0,98	0,98
CGCM3.1(T63)	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99	0,97	0,94	0,99	0,94	0,95	0,99	0,99	0,99	0,98
CNRM-CM3	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,95	0,93	0,96	0,96	0,68	0,82	0,99	0,98	0,99	0,99
CSIRO-Mk3.0	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,95	0,94	0,96	0,97	0,86	0,89	0,97	0,97	0,98	0,98
ECHAM5/MPI-OM	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,97	0,96	0,99	0,99	0,94	0,96	0,99	0,98	0,99	0,99
GFDL-CM2.0	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98	0,86	0,92	0,98	0,97	0,99	0,99
GISS-AOM	0,99	0,98	0,99	0,98	0,98	0,97	0,95	0,93	0,97	0,96	0,51	0,72	0,94	0,94	0,98	0,97
INM-CM3.0	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,96	0,95	0,98	0,98	0,75	0,83	0,96	0,96	0,99	0,98
MIROC3.2(hires)	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,97	0,98	0,99	0,95	0,95	0,98	0,97	0,98	0,98
MIROC3.2(medres)	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,97	0,95	0,98	0,98	0,76	0,85	0,90	0,95	0,98	0,98
MRI-CGCM2.3.2	0,98	0,98	0,99	0,98	0,99	0,98	0,97	0,97	0,98	0,98	0,83	0,87	0,95	0,95	0,99	0,99
PCM	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,97	0,99	0,99	0,84	0,89	0,98	0,97	0,98	0,98
UKMO-HadCM3	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,96	0,95	0,98	0,98	0,91	0,90	0,97	0,97	0,98	0,98
UKMO-HadGEM1	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,95	0,96	0,99	0,99	0,99	0,99

Tabla 4.2. Correlaciones de los TC de los modelos AR4 con los correspondientes del ERA40 para ambos esquemas de clasificación: k-medias (k) y SANDRA (S).

4.4.2. Análisis temporal de los Tipos de Circulación

En esta sección se analizan las características temporales de los TC en la estación invernal, tales como las frecuencias, su sesgo o error medio, tiempo de vida medio, longitud de los eventos, así como las transiciones entre TC y la predecibilidad de las mismas en términos de la entropía de Shannon.

4.4.2.1. Frecuencias de los Tipos de Circulación

La frecuencia invernal de ocurrencia de un TC dado se calcula como el porcentaje del número total de muestras diarias de dicho TC respecto al número total de días de invierno considerados (1 800 días). En las Figuras 4.2 y 4.3 se presentan los diagramas de cajas de la frecuencia invernal de los Tipos de Circulación de los modelos del AR4 junto con la frecuencia correspondiente a los Tipos de Circulación del ERA40 para cada esquema de clasificación (k-medias y SANDRA). Por su parte, las Tablas 4.3 y 4.4 recogen la frecuencia invernal (expresada en %) de los Tipos de Circulación del ERA40 y de los modelos del AR4 para cada esquema de clasificación considerado (k-medias y SANDRA).

Del análisis de las frecuencias invernales se deduce que en el esquema k-medias, todos los modelos (Figura 4.2) sobrestiman las frecuencias del tipo TC4, ligado a flujo del suroeste sobre el continente con altas presiones sobre Canarias y bajas presiones sobre Irlanda, siendo el valor del ERA40 ligeramente inferior al mínimo del conjunto de los valores de los modelos. Respecto a los tipos que corresponden a circulaciones más zonales en altas y medias latitudes, TC1 y TC3, en el TC1, el valor del ERA40 se encuentra comprendido entre la mediana y el tercer cuartil mientras que en el TC3, el valor del ERA40, se encuentra muy próximo al tercer cuartil. En el tipo TC2 (ligado a flujo del SO), el valor del ERA40 coincide aproximadamente con el

valor del tercer cuartil del conjunto de los modelos. En los tipos de circulación más meridionales asociados con configuraciones de tipo bloqueo, tales como TC6 y TC7, se observa que el valor del ERA40 se encuentra comprendido entre el tercer cuartil y el máximo (TC6) y coincide con el máximo (TC7). Esta tendencia a la subestimación de la frecuencia de los modelos, más notoria en el caso de flujos meridionales o regímenes tipo bloqueo mostrada en el TC7, concuerda con los resultados ya obtenidos en la bibliografía (HUTH, 2000; PELLY Y HOSKINS, 2003b). Finalmente, considerando los tipos TC5 y TC8, patrones de circulación mixtos, entre zonales y meridionales, en el TC5, el valor del ERA40 es ligeramente inferior a la mediana del conjunto de los modelos y en el caso del TC8, el valor del ERA40 se encuentra localizado entre el mínimo y el primer cuartil, más próximo al primer cuartil. La menor variabilidad en el conjunto de los modelos se presenta en el tipo TC3. La mayor variabilidad, a tenor de la longitud de los bigotes y del tamaño de las cajas se presenta en los tipos TC4 y TC8. Hay una tendencia hacia asimetría negativa en el TC2 y TC6, ya que los modelos tienden a concentrarse en los valores superiores mientras que los tipos TC1 y TC7 muestran tendencia hacia asimetría positiva.

El esquema SANDRA (Figura 4.3) muestra en líneas generales resultados similares a los obtenidos en k-medias, el tamaño de los diagramas de cajas y bigotes no suele variar, donde sí se aprecian diferencias es en la posición del ERA40. Las pequeñas diferencias afectan al tipo TC2, en el que el valor del ERA40 es ligeramente superior al valor de la mediana del conjunto de los modelos; en el TC5, el valor del ERA40 está muy próximo al valor del primer cuartil, existiendo una tendencia hacia asimetría negativa. En el TC7, el valor del ERA40 se localiza entre el tercer cuartil y el máximo, más próximo al máximo del conjunto de los modelos y finalmente, el tipo TC8, en el que el ERA40 viene a coincidir con el primer cuartil. Las frecuencias relativas del conjunto de los modelos para los tipos TC4 y TC8 son más variables que para los otros tipos.

Analizando cómo se distribuye la frecuencia invernal entre los 8 Tipos de Circulación en cada modelo y para cada esquema de clasificación (Tablas 4.3 y 4.4) se observa que el rango de variación de las frecuencias de los modelos excede al mostrado en el ERA40. Así, en el esquema k-medias, los tres modelos con el menor rango son el CCSM3 que oscila entre 10,06 % (para los tipos TC6 y TC8) y 15,32 % (TC1); el CGCM3.1(T63) que oscila entre 9,67 % (TC6) y 15,17 % (TC2) y el UKMO-HadGEM1 que oscila entre 9,67 % (TC6) y 15,56 % (TC8) siendo los modelos con mayor rango: el GISS-AOM que oscila entre 6,00 % (TC7) y 23,89 % (TC4), el CNRM-CM3 entre 6,89 % (para los tipos TC3 y TC6) y 23,28 % (TC4) y el MRI-CGCM2.3.2 que oscila entre 5,22 % (TC7) y 24,72 % (TC4). Con respecto al esquema SANDRA, los tres modelos con el menor rango son el UKMO-HadGEM1 que varía entre 10,17 % (TC7) y 14,94 % (TC4), el CGCM3.1(T63) cuya oscilación está entre 9,22 % (TC7) y 15,33 % (TC2) y el CCSM3 que oscila entre 9,71 % (TC6) y 16,43 % (TC1), Por su parte, los modelos con mayor rango son: el GISS-AOM entre 5,39 % (TC7) y 22,00 % (TC4); el CNRM-CM3 que oscila entre 7,11 % (TC7) y 21,44 % (TC4) y el MRI-CGCM2.3.2 entre 4,00 % (TC7) y 23,94 % (TC4).

FRECUENCIAS (%) TC (k-medias)								
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8
ERA40	13,61	14,83	9,83	13,39	11,83	10,56	12,33	13,61
BCCR-BCM2.0	11,58	14,27	6,14	20,76	12,11	8,19	9,42	17,54
CCSM3	15,32	14,44	10,18	15,09	12,57	10,06	12,28	10,06
CGCM3.1(T47)	15,67	13,67	7,83	16,22	12,28	10,78	9,06	14,50
CGCM3.1(T63)	13,06	15,17	9,94	14,39	12,78	9,67	10,56	14,44
CNRM-CM3	14,61	10,00	6,89	23,28	12,22	6,89	8,28	17,83
CSIRO-Mk3.0	13,67	14,22	8,17	16,28	10,78	9,50	8,28	19,11
ECHAM5/MPI-OM	12,56	12,39	8,94	20,11	10,67	11,50	10,83	13,00
GFDL-CM2.0	12,56	15,89	11,00	14,94	11,06	12,00	8,72	13,83
GISS-AOM	13,94	13,11	6,11	23,89	8,50	7,56	6,00	20,89
INM-CM3.0	10,39	14,06	8,28	18,72	12,44	10,11	7,28	18,72
MIROC3.2(hires)	12,83	14,61	8,06	15,83	14,33	8,06	11,17	15,11
MIROC3.2(medres)	16,67	12,83	6,89	18,72	12,00	7,78	8,11	17,00
MRI-CGCM2.3.2	13,50	12,61	6,89	24,72	9,17	10,33	5,22	17,56
PCM	11,93	17,08	8,13	16,90	12,69	8,36	9,65	15,26
UKMO-HadCM3	12,56	15,83	6,11	19,00	12,67	9,44	7,72	16,67
UKMO-HadGEM1	11,56	13,78	11,33	15,28	11,94	9,67	10,89	15,56

Tabla 4.3. Frecuencias expresadas en porcentaje de los 8 Tipos de Circulación (TC) del invierno de ERA40 y de los modelos para el esquema de clasificación k-medias.

FRECUENCIAS (%) TC (SANDRA)								
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8
ERA40	14,33	14,33	10,39	12,89	11,61	11,50	10,83	14,11
BCCR-BCM2.0	13,22	13,22	6,61	19,18	12,51	9,06	7,19	19,01
CCSM3	16,43	13,92	10,41	15,03	12,63	9,71	11,87	10,00
CGCM3.1(T47)	16,17	14,44	8,22	15,22	12,50	11,83	7,39	14,22
CGCM3.1(T63)	13,33	15,33	10,22	13,94	12,78	10,67	9,22	14,50
CNRM-CM3	15,83	9,50	7,17	21,44	12,94	7,67	7,11	18,33
CSIRO-Mk3.0	14,78	14,44	8,78	15,67	11,50	9,50	6,28	19,06
ECHAM5/MPI-OM	13,11	13,00	9,44	18,56	10,94	11,78	9,39	13,78
GFDL-CM2.0	13,33	15,11	11,28	15,44	10,89	13,17	8,22	12,56
GISS-AOM	15,50	12,78	6,56	22,00	9,28	8,39	5,39	20,11
INM-CM3.0	11,22	14,06	8,50	18,28	12,89	10,11	6,00	18,94
MIROC3.2(hires)	13,89	14,67	8,17	15,44	14,56	8,61	9,56	15,11
MIROC3.2(medres)	18,06	12,67	6,72	17,39	12,56	8,56	7,06	17,00
MRI-CGCM2.3.2	14,56	13,33	6,89	23,94	9,56	10,72	4,00	17,00
PCM	12,92	16,67	8,65	15,61	12,57	10,64	7,84	15,09
UKMO-HadCM3	14,00	15,44	6,39	17,94	13,00	10,11	6,17	16,94
UKMO-HadGEM1	12,61	13,78	11,28	14,94	11,94	11,17	10,17	14,11

Tabla 4.4. Frecuencias expresadas en porcentaje de los 8 Tipos de Circulación (TC) del invierno de ERA40 y de los modelos para el esquema de clasificación SANDRA.

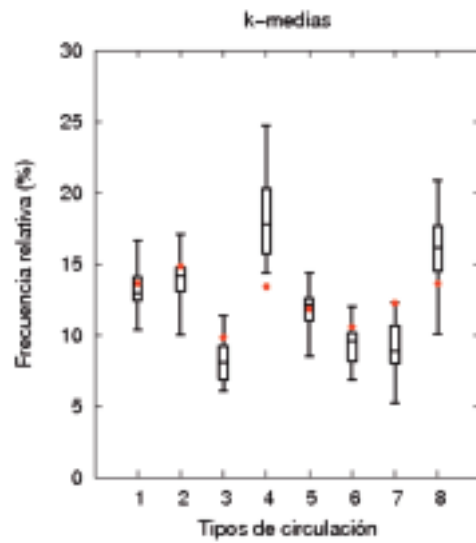


Figura 4.2. Diagrama de cajas de las frecuencias expresadas en porcentaje de los 8 Tipos de Circulación (TC) del invierno de los modelos del AR4 para el esquema de clasificación k-medias. Las barras horizontales inferiores (superiores) indican los valores mínimos (máximos). Los extremos inferiores (superiores) de las cajas señalan el primer (tercer) cuartil y, el segmento central, la mediana. Las frecuencias para el ERA40 vienen representadas por el círculo rojo.

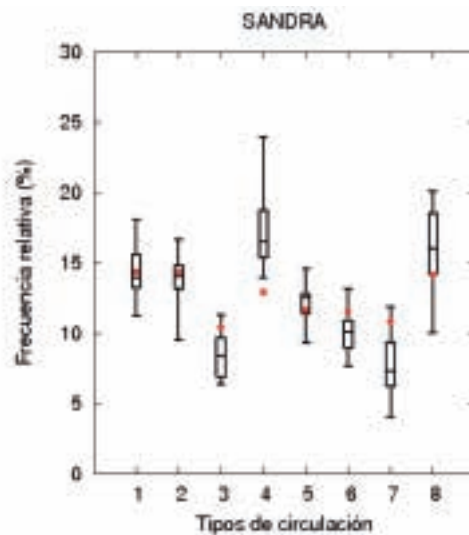


Figura 4.3. Como en la Figura 4.2, pero para el esquema de clasificación SANDRA.

A continuación se han calculado los sesgos de las frecuencias de los TC (AR4 ERA40), expresados en días (Figura 4.4). Se ha evaluado la significación estadística del sesgo aplicando el test paramétrico t de Student al nivel de confianza del 99 % y el p-valor del sesgo.

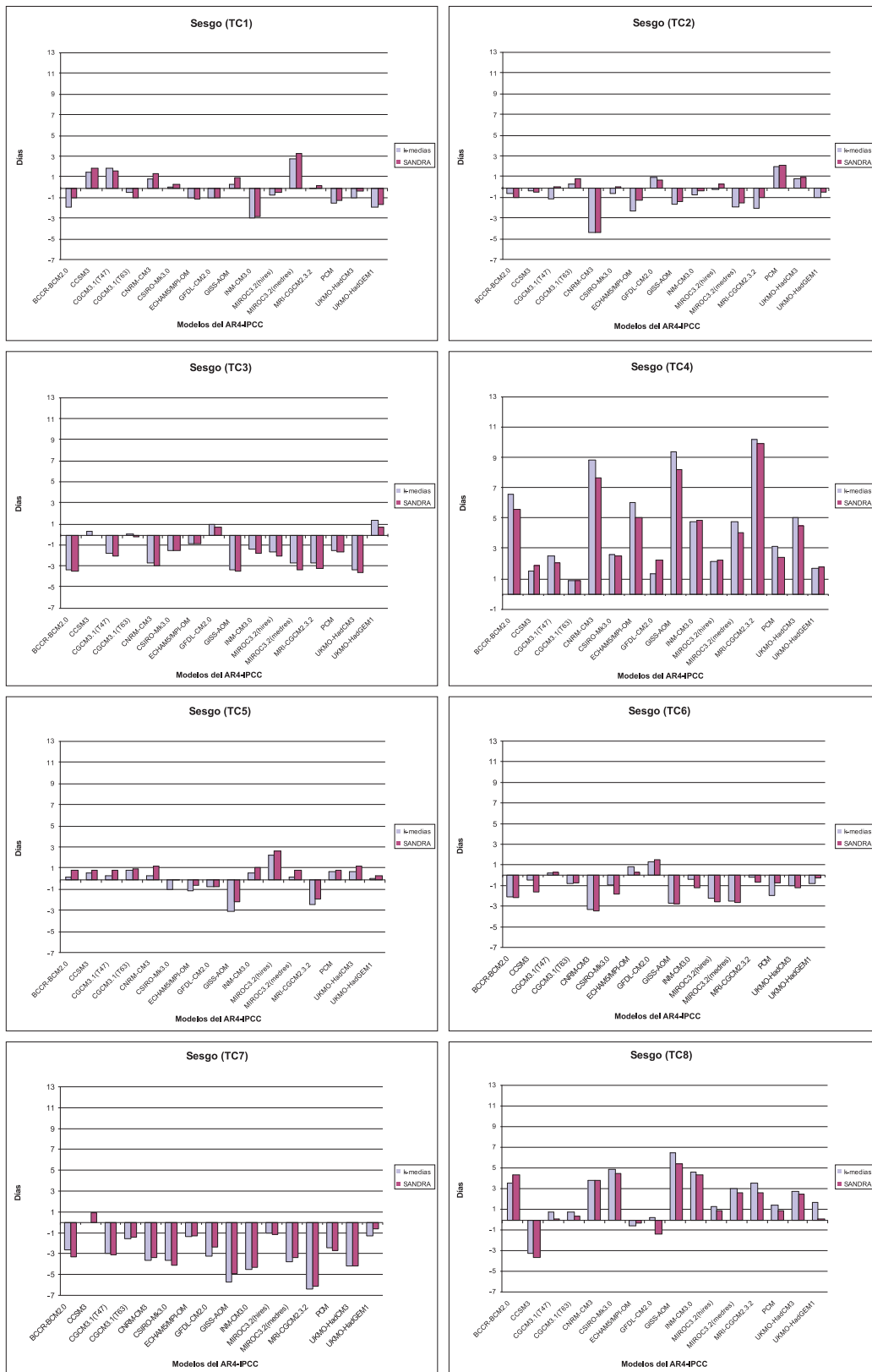


Figura 4.4. Sesgo invernal (en días) de los 8 Tipos de Circulación para los modelos del AR4-IPCC bajo los esquemas de clasificación k-medias y SANDRA.

Sintetizando las características comunes, más significativas, de los sesgos de las frecuencias se puede concluir que en el tipo TC4, ligado a flujo del SO, todos los modelos, independientemente del esquema de clasificación, muestran un sesgo positivo, tendiendo a ser más acusado en el caso de k-medias. En los tipos ligados a configuraciones más meridionales (TC6 y TC7), existe un predominio de modelos con sesgos negativos, especialmente, en el TC7; en los tipos de circulación mixta (TC5 y TC8), coexisten modelos con sesgo positivo con modelos con sesgo negativo, aunque tienden a dominar los de sesgo positivo. Por último, en los tipos zonales (TC1 y TC3), coexisten modelos con sesgos positivos y negativos, aunque hay mayor número de modelos con sesgo negativo; especialmente en el tipo TC3.

Considerando el comportamiento en todos los tipos de circulación, los modelos con sesgo menor son UKMO-HadGEM1, CGCM3.1(T63) y GFDL-CM2.0 mientras que los de mayor sesgo son: GISS-AOM, CNRM-CM3 y MRI-CGCM2.3.2 (en ambos esquemas). Influencia del esquema elegido en algunos modelos, así por ejemplo, se observa un mejor comportamiento del modelo CCSM3 cuando se utiliza k-medias. Es digno de subrayar que los sesgos mayores se localizan fundamentalmente en dos tipos de circulación (TC4 y TC7) y que dependiendo del TC considerado, existen diferencias claras en el comportamiento de un mismo modelo.

Analizando individualmente cada tipo de circulación se observa: en el tipo TC1, para ambos esquemas de clasificación, existen seis modelos que muestran un sesgo positivo, siendo el MIROC3.2(medres) el modelo con mayor sesgo; y nueve modelos con sesgo negativo, siendo el INM-CM3.0, el de mayor sesgo. Los modelos con menor sesgo son el CSIRO-Mk3.0 y el MRI-CGCM2.3.2; este último modelo cuenta con la particularidad de que el signo del sesgo depende del esquema, así es negativo para k-medias y positivo para SANDRA.

El TC2 presenta, en ambos esquemas de clasificación, cuatro modelos con sesgo positivo, siendo el PCM, el modelo con mayor sesgo; y nueve modelos con sesgo negativo, siendo el CNRM-CM3.0, el de mayor sesgo. Existen tres modelos: CGCM3.1(T47), CSIRO-Mk3.0 y MIROC3.2(hires) cuyo sesgo depende del esquema de clasificación. Los modelos con menos sesgo en ambos esquemas son: CCSM3 y MIROC3.2(hires).

El TC3 presenta, en ambos esquemas de clasificación, tres modelos con sesgo positivo, siendo el UKMO-HadGEM1, el modelo con mayor sesgo positivo; sesgo que es de menor magnitud que para los doce modelos que presentan sesgo negativo; siendo en este último caso, los modelos con mayor sesgo: GISS-AOM, UKMO-HadCM3 y BCCR-BCM2.0. Los modelos con menor sesgo son CCSM3 y CGCM3.1(T63), este último, muestra distinto signo en función del esquema, positivo (k-medias) y negativo (SANDRA). En aquellos modelos que presentan sesgos negativos, los valores son ligeramente superiores para SANDRA; la situación inversa se produce para k-medias.

El TC4 es el único tipo de circulación en el que todos los modelos presentan sesgo positivo, en ambos esquemas de clasificación. Los modelos con menor sesgo son: CGCM3.1(T63), UKMO-HadGEM1 y CCSM3 mientras que aquellos de mayor sesgo son: MRI-CGCM2.3.2, GISS-AOM y CNRM-CM3. En nueve de los modelos, los valores del esquema k-medias son superiores a los encontrados en el esquema SANDRA.

El TC5 presenta, en ambos esquemas de clasificación, once modelos con sesgo positivo y cinco modelos con sesgo negativo. En los modelos con sesgo positivo, los valores son mayores para el esquema SANDRA; la situación contraria se produce para k-medias, en decir, que en caso de sesgo negativo, los valores son más negativos para k-medias. El modelo con menor sesgo es UKMO-HadGEM1, el modelo con mayor sesgo positivo es MIROC3.2(hires) y, por último, los modelos con mayor sesgo negativo son GISS-AOM y MRI-CGCM2.3.2.

El TC6 presenta, en ambos esquemas de clasificación, tres modelos con sesgo positivo y trece modelos con sesgo negativo. El modelo que presenta menor sesgo es CGCM3.1(T47). GFDL-CM2.0 es el modelo con mayor sesgo positivo y CNRM-CM3.0, GISS-AOM, MIROC3.2(hires) y MIROC3.2(medres), los modelos con el mayor sesgo negativo en ambos esquemas. En ambos esquemas, tienden a ser mayores los valores del esquema SANDRA (2 casos de 3 en los sesgos positivos y 10 casos de 13 en los sesgos negativos).

El TC7 presenta un único modelo (CCSM3) con sesgo positivo, en ambos esquemas. Los modelos con mayor sesgo negativo son: MRI-CGCM2.3.2, GISS-AOM, e INM-CM3.0. Los modelos con menor sesgo son: UKMO-HadGEM1 y CCSM3, en ambos esquemas. En los quince modelos que muestran sesgo negativo, hay nueve modelos que muestran valores más negativos para el esquema de k-medias.

El TC8 presenta dos modelos con sesgo negativo (CCSM3 y ECHAM5/MPI-OM), trece modelos con sesgo positivo y un modelo (GFDL-CM2.0) cuyo sesgo depende del esquema de clasificación. En ambos esquemas de clasificación, los esquemas con menor sesgo son: CGCM3.1(T47), CGCM3.1(T63) y ECHAM5/MPI-OM y los de mayor sesgo: GISS-AOM e INM-CM3.0.

En la Figura 4.5 se muestra de forma sintetizada la información del análisis anterior. En cada esquema y en cada modelo queda representada la contribución de cada uno de los sesgos de sus TC. Todos los modelos tienden a presentar sesgos medios muy semejantes en ambos esquemas de clasificación: únicamente, el tipo TC4 presenta sesgo positivo en todos los modelos; en los tipos TC5 y TC8, dominan los modelos que presentan sesgo positivo, especialmente, el TC8. Por el contrario, los tipos TC2, TC3, TC6 y TC7 presentan sesgo negativo, especialmente, el TC7. En ambos esquemas, GISS-AOM, CNRM-CM3 y MRI-CGCM2.3.2 son los modelos que presentan el mayor sesgo mientras que CGCM3.1(T63) es el del menor sesgo.

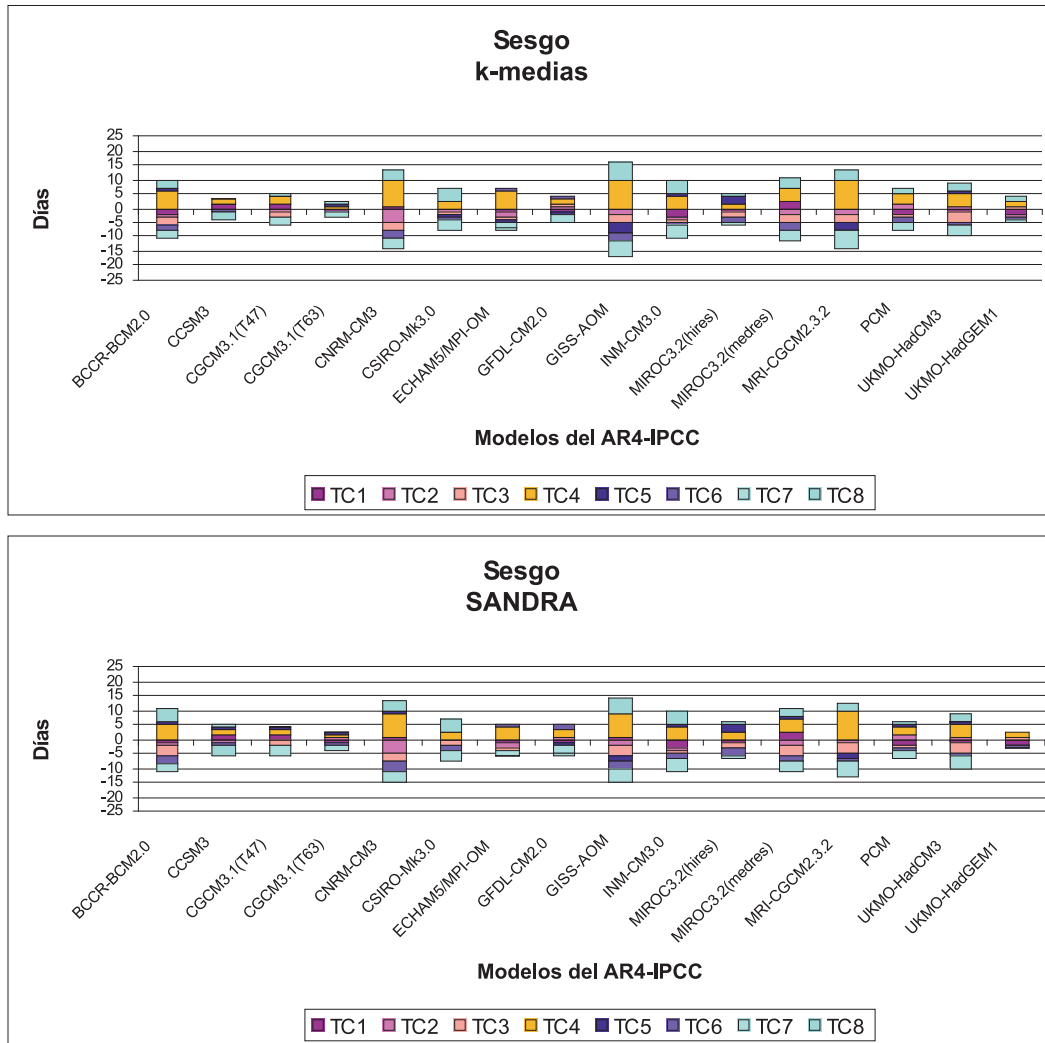


Figura 4.5. Sesgo inercial (días) de los modelos del AR4-IPCC. a) Esquema de clasificación k-medias, b) esquema de clasificación SANDRA.

Finalmente se ha calculado para cada esquema de clasificación y para cada modelo el promedio de los sesgos (en valor absoluto) de los tipos considerados (Figura 4.6) según DEMUZERE ET AL. (2009). Tres de los 16 modelos, presentan un sesgo de 3 días, superándose los 4 días en el modelo GISS-AOM (k-medias). En la Tabla 4.5 se presenta un *ranking* de los modelos ordenados de menor a mayor sesgo para cada esquema de clasificación siguiendo el código terciario tipo semáforo.

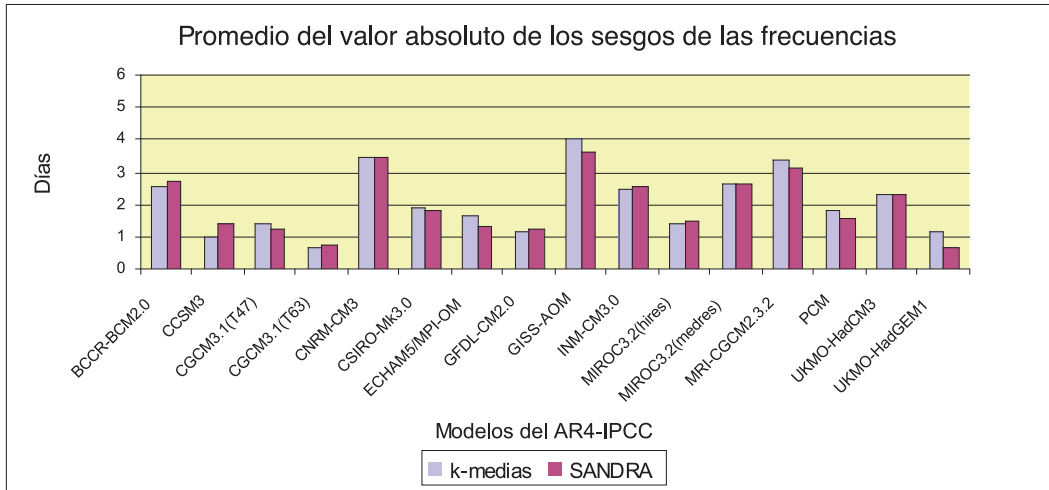


Figura 4.6. Promedio del valor absoluto de los sesgos de las frecuencias de los TC de los modelos del AR4-IPCC expresado en días para los esquemas de clasificación k-medias y SANDRA.

	SESGO FRECUENCIAS	
	k-medias	SANDRA
BCCR-BCM2.0	Red	Red
CCSM3	Green	Yellow
CGCM3.1(T47)	Yellow	Green
CGCM3.1(T63)	Green	Green
CNRM-CM3	Red	Red
CSIRO-Mk3.0	Yellow	Yellow
ECHAM5/MPI-OM	Yellow	Green
GFDL-CM2.0	Green	Green
GISS-AOM	Red	Red
INM-CM3.0	Yellow	Yellow
MIROC3.2(hires)	Green	Yellow
MIROC3.2(medres)	Red	Red
MRI-CGCM2.3.2	Red	Red
PCM	Yellow	Yellow
UKMO-HadCM3	Yellow	Yellow
UKMO-HadGEM1	Green	Green

Tabla 4.5. Ranking de los modelos con respecto al promedio de los sesgos invernales para los esquemas de clasificación k-medias y SANDRA. Valores más próximos al ERA40 (color verde), más alejados (color rojo).

Los modelos con menos sesgo para el esquema k-medias son: el CGCM3.1 (T63), CCSM3, GFDL-CM2.0, UKMO-HadGEM1 y MIROC3.2(hires). Por lo que respecta a SANDRA son: el UKMO-HadGEM1, CGCM3.1(T63), CGCM3.1(T47), GFDL-CM2.0 y ECHAM5/MPI-OM. El rasgo más reseñable se refiere a la coincidencia total en los modelos de mayor sesgo en ambos esquemas: GISS-AOM, CNRM-CM3, MRI-CGCM2.3.2, MIROC3.2(medres) y BCCR-BCM2.0.

4.4.2.2. Tiempo medio de residencia de los Tipos de Circulación

La persistencia o tiempo de vida de un determinado TC viene expresada como la duración media de los eventos. Se define como el cociente entre el número total de días de cada TC y el número de eventos del dicho TC; donde un evento es una secuencia ininterrumpida de días clasificados en un determinado TC, siendo precedidos y seguidos por días pertenecientes a otro TC (CAHYNOVÁ Y HUTH, 2009). En la literatura aparecen como sinónimos: tiempo medio de residencia, persistencia, tiempo de vida o vida media.

En las Figuras 4.7 y 4.8 se presentan los diagramas de cajas de la vida media (días) de los Tipos de Circulación del invierno de los modelos del AR4 junto con la vida media correspondiente a los Tipos de Circulación del ERA40 para cada esquema de clasificación (k-medias y SANDRA). Por su parte, las Tablas 4.6 y 4.7 se refieren a la vida media de los Tipos de Circulación del ERA40 y de los modelos del AR4 para cada esquema de clasificación (k-medias y SANDRA).

Analizando las Figuras 4.7 y 4.8, en el esquema de clasificación k-medias se observa que la vida media del ERA40 para los tipos TC1, TC2 y TC4, está comprendida entre el primer cuartil y la mediana. Para los tipos TC5 y TC8, la vida media del ERA40 se localiza entre el mínimo y el primer cuartil y finalmente, para los tipos TC6 y TC7, ligados a una configuración de flujo meridional (tipo bloqueo), la vida media del ERA40 queda comprendida entre la mediana y el tercer cuartil, coincidiendo prácticamente con este último (TC6). Los tipos TC1, TC2 y TC5 son aquellos que presentan distribuciones más simétricas. La dispersión mayor entre los modelos se encuentra en los tipos TC4, TC6 y TC7. Respecto al esquema de clasificación SANDRA, se observa que la vida media del ERA40 coincide con el mínimo del conjunto de modelos para el TC8; para el tipo TC2, la vida media del ERA40 queda comprendida entre el mínimo y el primer cuartil para el TC2 y coincide prácticamente con el primer cuartil para los tipos TC1 y TC5. Para los tipos TC3 y TC7, la vida media del ERA40 apenas si supera el tercer cuartil del conjunto de las vidas medias de los modelos y, en el caso del TC4, coincide prácticamente con la mediana. En los tipos TC6 y TC7 se aprecia una mayor variabilidad en el conjunto de los modelos mientras que en el tipo TC5 es donde se constata una menor variabilidad.

Para el esquema k-medias (Tabla 4.6), se observa el siguiente comportamiento, en el TC1 los modelos con mayor similitud al ERA40 son el INM-CM3.0, BCCR-BCM2.0 y MIROC3.2(hires) y los de menor similitud el MIROC3.2(medres) y el CGCM3.1(T47). En el TC2, los valores de los modelos muestran mayor semejanza con el ERA40, siendo los más próximos MIROC3.2(hires), UKMO-HadGEM1 y MIROC3.2(medres) siendo los menos próximos GFDL-CM2.0 e INM-CM3.0. En el TC3, los modelos más similares son: INM-CM3.0, UKMO-HadGEM1 y

BCCR-BCM2.0 y los menos similares GFDL-CM2.0, MIROC3.2(medres) y UKMO-HadCM3. En el TC4, los modelos que mejor reproducen la vida media son: INM-CM3.0, UKMO-HadCM3 y PCM y, los modelos más distantes del ERA40 son: GISS-AOM, CNRM-CM3 y MRI-CGCM2.3.2. Respecto a los tipos siguientes, se observa: en el TC5, los modelos con tiempos de vida más similares al ERA40 son: MRI-CGCM2.3.2, ECHAM5/MPI-OM y GFDL-CM2.0; siendo MIROC3.2(medres), UKMO-HadCM3 y MIROC3.2(hires) los modelos que más se apartan del ERA40. En el TC6, la vida media del ERA40 alcanza su máximo valor: 3,73 días, los modelos más semejantes son: INM-CM3.0, CGCM3.1(T47) y CGCM3.1(T63) y los menos semejantes: UKMO-HadGEM1, BCCR-BCM2.0 y PCM. En el TC7, los modelos más semejantes al ERA40 son: MIROC3.2(hires), UKMO-HadGEM1 y GFDL-CM2.0 y los menos semejantes: INM-CM3.0, MRI-CGCM2.3.2 y CNRM-CM3. En el TC8, los modelos que muestran mayor similitud con el ERA40 son: CGCM3.1(T63), ECHAM5/MPI-OM y PCM; siendo los menos similares MRI-CGCM2.3.2, CNRM-CM3 y GISS-AOM, respectivamente.

Para el esquema SANDRA (Tabla 4.7), se observa el siguiente comportamiento, en el TC1, la gran mayoría de los modelos tiende a sobrestimar la vida media del ERA40, siendo los modelos más similares, INM-CM3.0, CSIRO-Mk3.0 y PCM y los de menor similitud, CCSM3, CGCM3.1(T47) y MIROC3.2(medres). En el TC2, se repite la misma tónica que en el TC1, existiendo una tendencia a sobrestimar la vida media del ERA40; los modelos CGCM3.1(T63), CCSM3 y UKMO-HadGEM1 son los más próximos y CSIRO-Mk3.0, GFDL-CM2.0 e INM-CM3.0 los más alejados. En el TC3, el conjunto de los modelos tiende a subestimar la vida del ERA40, los modelos que mejor captan la vida media del ERA40 son: UKMO-HadGEM1, MIROC3.2(hires) y CCSM3 mientras que aquellos que peor la reproducen son: PCM, UKMO-HadCM3 y GFDL-CM2.0. En el TC4, tipo que presenta uno de los tiempos de vida media más largos del ERA40, hay ocho modelos que presentan sobrestimación; los más próximos son GFDL-CM2.0, CGCM3.1(T47) y UKMO-HadCM3 y los menos próximos BCCR-BCM2.0, GISS-AOM y MRI-CGCM2.3.2. Respecto al resto de los tipos se observa que el TC5 es uno de los mejor captados por los modelos, los más próximos al ERA40 son: GISS-AOM, MRI-CGCM2.3.2 y UKMO-HadGEM1 mientras que los más alejados son: MIROC3.2(medres), UKMO-HadCM3 y MIROC3.2(hires). En el TC6, se observa que aproximadamente el 50 % de los modelos subestima la vida media del ERA40, siendo los modelos más similares: UKMO-HadGEM1, UKMO-HadCM3 y ECHAM5/MPI-OM, mientras que los menos similares son: CSIRO-Mk3.0, CNRM-CM3 y PCM. En el TC7, existen ocho modelos que sobrestiman la vida media del ERA40, siendo los más similares: CGCM3.1(T63), CCSM3 y MIROC3.2(medres) y los más alejados INM-CM3.0, MRI-CGCM2.3.2 y CNRM-CM3. En el TC8, hay una tendencia generalizada a sobrestimar la vida media del ERA40; los modelos más próximos son: CCSM3, UKMO-HadGEM1 y GFDL-CM2.0 mientras que los de peor comportamiento: CNRM-CM3, INM-CM3.0 y GISS-AOM, respectivamente.

Sintetizando, en el esquema de clasificación k-medias, considerando el comportamiento para todos los tipos de circulación, los mejores modelos son CGCM3.1(T63), UKMO-HadGEM1, ECHAM5/MPI-OM, MIROC3.2(hires) y

GFDL-CM2.0 mientras que los peores son CNRM-CM3, GISS-AOM, MRI-CGCM2.3.2, MIROC3.2(medres) y BCCR-BCM2.0. Procediendo de la misma manera para el esquema SANDRA, los mejores modelos son UKMO-HadGEM1, CGCM3.1(T63), CCSM3, MIROC3.2(hires) y PCM mientras que los peores son: CNRM-CM3, MRI-CGCM2.3.2, BCCR-BCM2.0, GISS-AOM e INM-CM3.0.

Conviene tener presente que un modelo puede captar de manera apropiada la vida media de un determinado tipo de circulación y alejarse notablemente de la vida media mostrada por el ERA40, para otro tipo de circulación; por ejemplo, en el esquema k-medias, el modelo INM-CM3.0 es el que mejor reproduce la vida media de los tipos TC1, TC3, TC4 y TC6, a la vez que resulta ser el peor para el tipo TC2.

Como conclusión, los modelos que mejor captan la vida media del ERA40, comunes a ambos esquemas de clasificación, son UKMO-HadGEM1, CGCM3.1(T63) y MIROC3.2(hires) mientras que los peores son CNRM-CM3, GISS-AOM y MRI-CGCM2.3.2. Por último, el modelo que presenta una vida media más larga es el MRI-CGCM2.3.2 para el TC5 con valores de 5,06 y 5,32 días para los esquemas de clasificación k-medias y SANDRA respectivamente (Tablas 4.6 y 4.7).

	VIDA MEDIA TC (k-medias)							
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8
ERA40	2,47	2,81	2,85	3,65	2,32	3,73	3,47	2,36
BCCR-BCM2.0	2,57	3,25	2,76	4,08	2,62	2,75	3,04	2,88
CCSM3	3,08	2,63	2,72	3,27	2,69	2,97	3,68	2,07
CGCM3.1(T47)	3,17	2,65	2,66	3,95	2,63	3,66	3,08	2,56
CGCM3.1(T63)	2,22	2,65	2,63	3,32	2,61	3,62	3,28	2,43
CNRM-CM3	2,80	2,43	2,48	4,55	2,22	3,26	4,97	3,57
CSIRO-Mk3.0	2,26	3,16	2,53	3,12	2,42	4,17	3,17	3,16
ECHAM5/MPI-OM	2,83	2,30	2,44	3,55	2,40	3,45	3,31	2,49
GFDL-CM2.0	2,63	3,33	3,47	3,54	2,40	4,08	3,57	2,54
GISS-AOM	2,89	3,11	2,62	4,26	2,47	3,02	3,27	3,92
INM-CM3.0	2,40	3,33	2,87	3,70	2,55	3,71	2,98	3,40
MIROC3.2(hires)	2,57	2,92	3,09	3,52	3,11	3,22	3,41	2,72
MIROC3.2(medres)	3,12	2,69	2,21	3,79	2,70	3,04	3,32	2,97
MRI-CGCM2.3.2	2,96	3,07	2,64	5,06	2,26	4,04	2,85	3,51
PCM	2,32	3,01	2,40	3,57	2,49	2,27	3,84	2,53
UKMO-HadCM3	2,86	3,06	2,08	3,72	2,78	3,86	3,23	2,94
UKMO-HadGEM1	2,10	2,70	2,91	4,04	2,42	2,95	3,56	2,57

Tabla 4.6. Vida media (días) de los 8 TC del invierno para el esquema de clasificación k-medias.

VIDA MEDIA TC (SANDRA)								
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8
ERA40	2,41	2,69	2,83	3,68	2,35	3,18	3,68	2,08
BCCR-BCM2.0	2,83	3,14	2,69	4,21	2,61	2,87	3,08	3,10
CCSM3	2,96	2,80	2,70	3,43	2,54	2,72	3,76	2,04
CGCM3.1(T47)	3,23	3,02	2,69	3,65	2,68	2,96	3,02	2,56
CGCM3.1(T63)	2,35	2,68	2,42	3,49	2,53	3,43	3,61	2,56
CNRM-CM3	2,79	2,28	2,35	4,15	2,24	2,56	5,33	3,47
CSIRO-Mk3.0	2,38	3,17	2,68	3,32	2,56	3,64	3,23	2,93
ECHAM5/MPI-OM	2,81	2,29	2,54	3,27	2,21	3,26	3,38	2,73
GFDL-CM2.0	2,58	3,20	3,76	3,71	2,25	3,59	3,22	2,43
GISS-AOM	2,82	3,03	2,62	4,30	2,35	2,80	2,94	3,62
INM-CM3.0	2,40	3,37	3,06	3,50	2,67	3,31	2,92	3,52
MIROC3.2(hires)	2,60	2,93	2,94	3,56	3,01	2,77	3,44	2,64
MIROC3.2(medres)	3,28	2,96	2,28	3,91	2,76	2,96	3,53	3,03
MRI-CGCM2.3.2	2,85	3,04	2,43	5,32	2,36	3,45	2,57	3,12
PCM	2,38	2,97	2,24	3,76	2,34	2,36	3,94	2,61
UKMO-HadCM3	2,68	2,96	2,17	3,63	2,82	3,25	3,17	2,72
UKMO-HadGEM1	2,23	2,56	2,86	3,96	2,36	3,24	4,36	2,40

Tabla 4.7. Como en la Tabla 4.6, pero para el esquema de clasificación SANDRA.

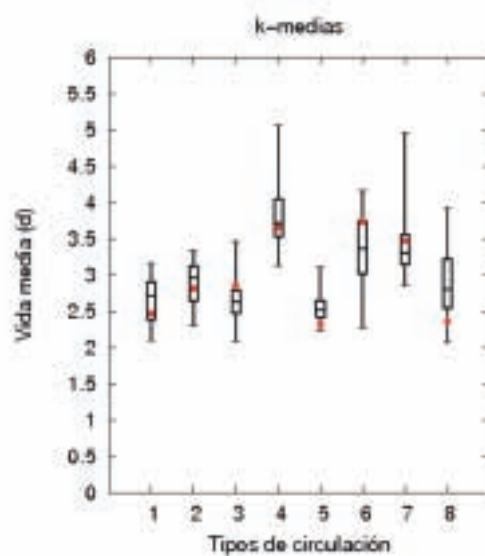


Figura 4.7. Diagrama de cajas de las vidas medias (expresadas en días) de los 8 Tipos de Circulación (TC) para el invierno de los modelos del AR4 y para el esquema de clasificación k-medias. Los extremos inferiores (superiores) de las cajas señalan el primer (tercer) cuartil y, el segmento central, la mediana. El ERA40 viene representado por el círculo rojo.

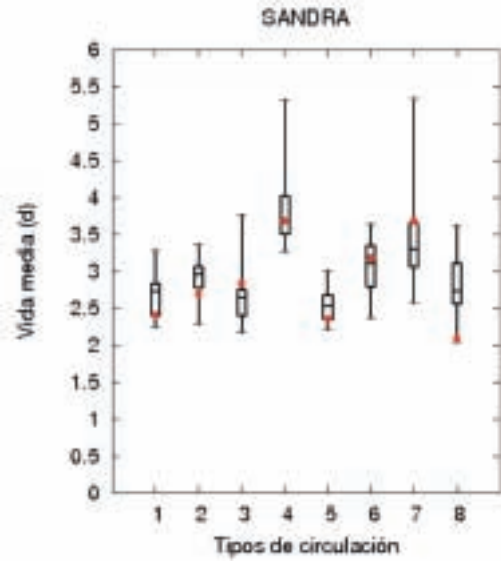


Figura 4.8. Como en la Figura 4.7, pero para el esquema de clasificación SANDRA.

4.4.2.3. Características de los eventos

Se calcula para cada modelo y para cada esquema de clasificación: a) la duración media (M), expresada como el cociente entre el número total de días respecto al número total de eventos de la clasificación, b) el porcentaje de tiempo experimentado en eventos de duración igual o superior a 4 días, y c) el número de eventos de 1 día de duración (HUTH, 1997).

	EVENTOS (k-medias)		
	M	≥ 4	1
ERA40	2,84	55,44	234
BCCR-BCM2.0	3,03	59,36	175
CCSM3	2,85	53,57	204
CGCM3.1(T47)	3,00	58,39	212
CGCM3.1(T63)	2,74	52,83	229
CNRM-CM3	3,17	60,89	182
CSIRO-Mk3.0	2,91	56,06	211
ECHAM5/MPI-OM	2,82	52,00	186
GFDL-CM2.0	3,08	58,94	185
GISS-AOM	3,32	61,72	138
INM-CM3.0	3,12	58,89	164
MIROC3.2(hires)	3,02	58,78	180
MIROC3.2(medres)	3,00	59,11	197
MRI-CGCM2.3.2	3,38	62,11	151
PCM	2,76	51,81	223
UKMO-HadCM3	3,06	56,33	164
UKMO-HadGEM1	2,81	53,61	233

Tabla 4.8. Características de la duración de eventos: duración media en días (M), porcentaje de tiempo experimentado en sucesos de duración igual o superior a 4 días (≥ 4) y número de eventos de 1 día de duración para el invierno en el esquema de k-medias.

	EVENTOS (SANDRA)		
	M	≥ 4	1
ERA40	2,72	54,67	263
BCCR-BCM2.0	3,09	58,13	159
CCSM3	2,83	53,39	205
CGCM3.1(T47)	2,97	55,56	201
CGCM3.1(T63)	2,78	52,22	209
CNRM-CM3	2,99	57,11	196
CSIRO-Mk3.0	2,91	57,39	209
ECHAM5/MPI-OM	2,77	52,56	212
GFDL-CM2.0	3,01	58,89	187
GISS-AOM	3,16	60,33	166
INM-CM3.0	3,11	59,78	164
MIROC3.2(hires)	2,95	57,22	195
MIROC3.2(medres)	3,10	61,33	180
MRI-CGCM2.3.2	3,22	59,83	170
PCM	2,72	51,81	240
UKMO-HadCM3	2,92	54,00	192
UKMO-HadGEM1	2,82	55,28	243

Tabla 4.9. Como en la Tabla 4.8, pero para el esquema de clasificación SANDRA.

En las Tablas 4.8 y 4.9 y en las Figuras 4.9, 4.10 y 4.11 se presentan los resultados para ambos esquemas. Del análisis de las Figuras 4.9, 4.10 y 4.11, se desprende que respecto a la duración media, en el esquema k-medias, el valor del ERA40 coincide con el primer cuartil mientras que en el esquema SANDRA coincide con el mínimo del conjunto de los modelos; existiendo más simetría en este último caso. Respecto al porcentaje de tiempo experimentado en eventos de duración igual o superior a 4 días, el valor correspondiente al ERA40 se sitúa más próximo al primer cuartil que a la mediana para el esquema k-medias y es ligeramente superior al primer cuartil para el esquema SANDRA; las distribuciones de los modelos en ambos esquemas presentan poca variabilidad, con tendencia hacia una asimetría negativa que es más acusada en k-medias. En el caso del número de eventos de duración 1 día, el valor correspondiente al ERA40 coincide con el máximo del conjunto de los modelos para el esquema k-medias y supera el máximo correspondiente de los modelos para el esquema SANDRA. Distribuciones razonablemente simétricas, tendencia hacia asimetría positiva en el esquema k-medias.

En el esquema k-medias (Tabla 4.10) los modelos cuya duración media es más próxima al ERA40 son CCSM3, ECHAM5/MPI-OM y UKMO-HadGEM1 y en SANDRA (Tabla 4.11) PCM, ECHAM5/MPI-OM y CGCM3.1(T63). Con respecto al porcentaje de tiempo experimentado en eventos de duración igual o superior a 4 días, en el esquema k-medias, CSIRO-Mk3.0, UKMO-HadCM3 y UKMO-HadGEM1 son los modelos más próximos a los valores del ERA40; en el esquema SANDRA, UKMO-HadGEM1, UKMO-HadCM3 y CGCM3.1(T47). Por último, en el número de eventos de duración 1 día, hay una tendencia generalizada a la subestimación especialmente en el esquema SANDRA. Los modelos más similares al

ERA40 en el esquema k-medias son UKMO-HadGEM1, CGCM3.1(T63) y PCM mientras que en SANDRA son UKMO-HadGEM1, PCM y ECHAM5/MPI-OM. Considerando ambos esquemas y las tres magnitudes, el mejor modelo es UKMO-HadGEM1, y los peores GISS-AOM y MRI-CGCM2.3.2.

A modo de conclusión, la mayoría de los modelos tienden a sobrestimar la duración media, mientras que subestiman el número de eventos de 1 día de duración, siendo estas características, especialmente la última, más notables en el esquema SANDRA. Como se verá al analizar las figuras del Anexo G, en el siguiente párrafo, ambas características están conectadas con el hecho de que el número de eventos largos (cortos) de los modelos son mayores (menores) que los correspondientes al ERA40, como ya fue apuntado por HUTH (1997).

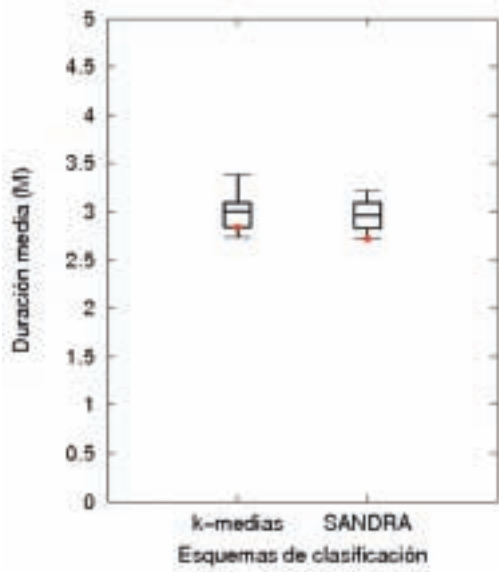


Figura 4.9. Diagrama de cajas de la duración media expresada en días de los modelos del AR4 para los esquemas de clasificación k-medias y SANDRA. Los extremos inferiores (superiores) de las cajas señalan el primer (tercer) cuartil y, el segmento central, la mediana. El ERA40 viene representado por el círculo rojo.

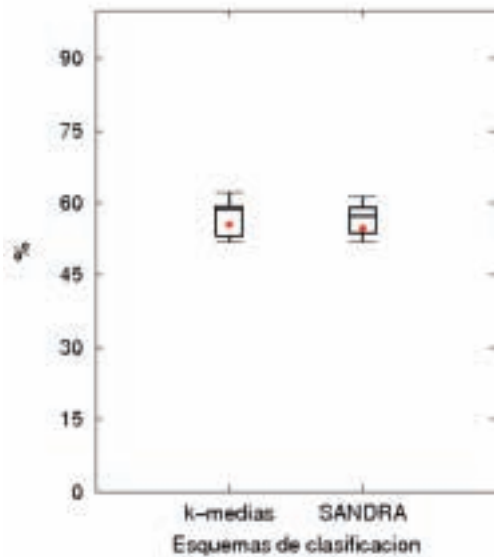


Figura 4.10. Diagrama de cajas del porcentaje de tiempo experimentado en eventos de duración igual o superior a 4 días de los modelos del AR4 para los esquemas de clasificación k-medias y SANDRA. Los extremos inferiores (superiores) de las cajas señalan el primer (tercer) cuartil y, el segmento central, la mediana. El ERA40 viene representado por el círculo rojo.

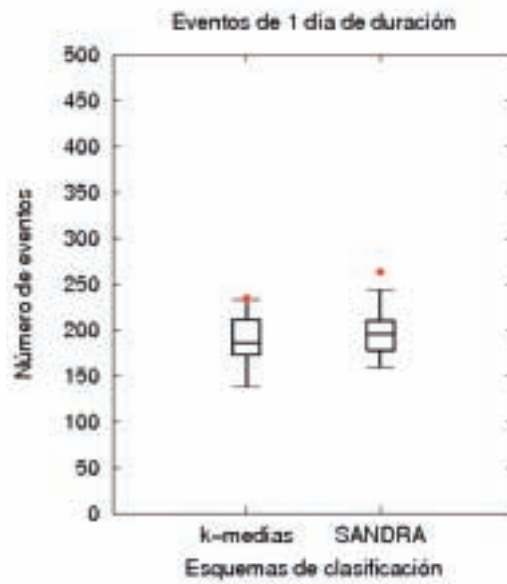


Figura 4.11. Diagrama de cajas del número de eventos de 1 día de duración de los modelos del AR4 para los esquemas de clasificación k-medias y SANDRA. Los extremos inferiores (superiores) de las cajas señalan el primer (tercer) cuartil y, el segmento central, la mediana. El ERA40 viene representado por el círculo rojo.

	DURACIÓN DE EVENTOS (k-medias)		
	M	≥ 4	1
BCCR-CM2.0	Yellow	Red	Red
CCSM3	Green	Green	Yellow
CGCM3.1 (T47)	Yellow	Yellow	Green
CGCM3.1 (T63)	Yellow	Green	Green
CNRM-CM3	Red	Red	Yellow
CSIRO-Mk3.0	Green	Green	Green
ECHAM5/MPI-OM	Green	Yellow	Yellow
GFDL-CM2.0	Red	Yellow	Yellow
GISS-AOM	Red	Red	Red
INM-CM3.0	Red	Yellow	Red
MIROC3.2(hires)	Yellow	Yellow	Yellow
MIROC3.2(medres)	Yellow	Red	Yellow
MRI-CGCM2.3.2	Red	Red	Red
PCM	Green	Yellow	Green
UKMO- HadCM3	Yellow	Green	Red
UKMO-HadGEM1	Green	Green	Green

Tabla 4.10. Ranking de los modelos con respecto a la simulación de características relacionadas con la duración de los eventos en el invierno para el esquema de clasificación k-medias. Valores más próximos al ERA40 (color verde), más alejados (color rojo).

	DURACIÓN DE EVENTOS (SANDRA)		
	M	≥ 4	1
BCCR-CM2.0			
CCSM3			
CGCM3.1 (T47)			
CGCM3.1 (T63)			
CNRM-CM3			
CSIRO-Mk3.0			
ECHAM5/MPI-OM			
GFDL-CM2.0			
GISS-AOM			
INM-CM3.0			
MIROC3.2(hires)			
MIROC3.2(medres)			
MRI-CGCM2.3.2			
PCM			
UKMO- HadCM3			
UKMO-HadGEM1			

Tabla 4.11. Como en la Tabla 4.10, pero para el esquema de clasificación SANDRA.

Como complemento al análisis anterior en el Anexo G se presenta la Figura G.1 que relaciona la contribución de cada Tipo de Circulación y los eventos de distinta duración, para el ERA40 y los modelos del AR4 (para ambos esquemas de clasificación). Estas figuras constituyen una síntesis visual muy instructiva porque permiten captar de manera rápida aquellos tipos de circulación que contribuyen a los eventos de mayor duración.

En general, mientras la longitud de los eventos no supera los 10 días, se aprecia una contribución de todos los TC, aunque siempre dominando los primeros TC para ambos esquemas de clasificación. Los eventos de mayor duración suelen estar asociados generalmente a un único TC.

En ambos esquemas, el ERA40 muestra que los eventos de mayor duración, 19 o 20 días, aparecen en el tipo TC4, ligado al flujo del SO; seguidos por eventos de duración entre 15 y 17 días, en los tipos relacionados con situaciones de bloqueos (TC6 y TC7). Sin embargo, se observa que los modelos tienden a presentar eventos de mayor duración; así, el UKMO-HadGEM1 presenta el evento de mayor duración (25 días) en el tipo TC4, como sucede en el ERA40, seguido por el BCCR-BCM2.0 (24 días). Por otra parte, los modelos que sitúan los eventos de mayor duración en los tipos relacionados con el bloqueo (TC6 y TC7) son CCSM3, CSIRO-Mk3.0, CGCM3.1(T63) y GFDL-CM2.0 en el esquema k-medias mientras que los modelos que sitúan los eventos de mayor duración en los tipos zonales son: el ECHAM5/MPI-OM con un evento de 21 días en el TC1.

Por último, atendiendo a las diferencias entre ambos esquemas de clasificación, los modelos que presentan mayores diferencias son: el CGCM3.1(T47) con

un evento de duración 24 días en el esquema k-medias frente a los 15 días observados en SANDRA; el ECHAM5/MPI-OM con un evento de duración de 21 días en el TC1 en el esquema SANDRA mientras que en k-medias el evento de mayor duración es de 13 días que se presentan en los tipos TC4 y TC7.

4.4.2.4. Transiciones y su predecibilidad

El estudio de la circulación atmosférica en función de los TC permite abordar el análisis de las transiciones entre los TC. La probabilidad de transición desde un TC dado a otro TC permite explorar la predecibilidad asociada con cada TC. El carácter de las transiciones podría ser, como apuntaron SÁNCHEZ GÓMEZ Y TERRAY (2005), un proceso puramente interno de la dinámica atmosférica conectado con los cambios de fase de las ondas atmosféricas intraestacionales. JAMES (2007) subrayó que si un determinado TC particular fuera siempre seguido por un número reducido de diferentes TC, entonces podríamos disponer de una medida significativa de la predecibilidad a medio plazo. De ahí se deduce la importancia de tratar y caracterizar apropiadamente las transiciones de TC, al facilitar la comprensión de algunos aspectos de la dinámica atmosférica en baja frecuencia sobre la región euroatlántica.

Para cada esquema de clasificación se calculan en primer lugar, las frecuencias absolutas para las 56 transiciones posibles de TC (excluidas las autotransiciones, esto es cuando un TC es seguido por el mismo TC) para ERA40 y los modelos AR4, dando por resultado, 17 matrices de transición (véase Figura H.1 en el Anexo H, donde se muestran las correspondientes matrices de probabilidad de transiciones para el esquema k-medias). Para dilucidar cuáles son los TC que tienen la predecibilidad más alta se recurre al cálculo de la denominada entropía de Shannon, S, (JAMES, 2007):

$$S(l) = -k \sum_{i=1}^n p_{li} \cdot \ln(p_{li}),$$

siendo: l el TC de partida del que vamos a calcular la entropía de Shannon, n el número total de tipos de circulación considerados (8), p_{li} el número de días del TC(l) seguidos por el TC(i), siendo $i \neq l$, dividido por el número total de días del TC(l). Se considera $p_{li} \cdot \ln p_{li} = 0$ si $p_{li} = 0$. Se normaliza S de forma que el máximo desorden posible esté representado por $S = 1$, mientras que $S = 0$ represente que no existe desorden, k es un factor arbitrario que se elige de forma que sea igual a $[\ln 8]^{-1}$.

Siguiendo la metodología propuesta por JAMES (2007), la entropía (desorden) de cada fila de la matriz de transición de los TC es inversamente proporcional a la predecibilidad de la transición del TC que se esté considerando. Por tanto, interesan los valores más bajos de entropía. Ahora bien, hay que verificar también si los valores más bajos de entropía se han encontrado con tipos frecuentes; ya que cualquier predecibilidad potencial asociada se reduce sencillamente porque ocurren raramente.

En las Tablas 4.12 y 4.13, basadas en los valores de S del ERA40 y de cada modelo, para ambos esquemas de clasificación, se muestra un *ranking* de los TC. Como complemento se han elaborado las Figuras 4.12 y 4.13 que son los diagramas de cajas de la entropía de Shannon de los 8 tipos de circulación (TC) de los modelos del AR4 junto con los valores del ERA40 para ambos esquemas de clasificación.

	ENTROPÍA DE SHANNON (k-medias)							
ERA40	TC8	TC7	TC6	TC3	TC1	TC5	TC4	TC2
BCCR-BCM2.0	TC3	TC7	TC6	TC5	TC1	TC2	TC8	TC4
CCSM3	TC3	TC6	TC7	TC2	TC1	TC5	TC8	TC4
CGCM3.1 (T47)	TC7	TC3	TC6	TC1	TC5	TC2	TC8	TC4
CGCM3.1 (T63)	TC3	TC6	TC7	TC2	TC1	TC5	TC4	TC8
CNRM-CM3	TC3	TC7	TC5	TC1	TC6	TC8	TC2	TC4
CSIRO-Mk3.0	TC3	TC7	TC6	TC5	TC1	TC2	TC8	TC4
ECHAM5/MPI-OM	TC3	TC7	TC6	TC5	TC1	TC2	TC8	TC4
GFDL-CM2.0	TC3	TC6	TC7	TC2	TC1	TC5	TC8	TC4
GISS-AOM	TC6	TC5	TC7	TC2	TC3	TC1	TC8	TC4
INM-CM3.0	TC7	TC6	TC3	TC5	TC1	TC2	TC8	TC4
MIROC3.2(hires)	TC7	TC6	TC3	TC1	TC2	TC5	TC8	TC4
MIROC.2(medres)	TC6	TC7	TC3	TC5	TC1	TC2	TC8	TC4
MRI-CGCM2.3.2	TC7	TC3	TC6	TC2	TC5	TC1	TC8	TC4
PCM	TC7	TC3	TC6	TC1	TC2	TC5	TC8	TC4
UKMO- HadCM3	TC6	TC3	TC5	TC7	TC1	TC2	TC8	TC4
UKMO-HadGEM1	TC6	TC3	TC1	TC2	TC7	TC5	TC8	TC4

Tabla 4.12. Ranking de la predecibilidad de los Tipos de Circulación para el ERA40 y los modelos del AR4 en el esquema de k-medias. La primera columna contiene el TC más predecible y la última columna el TC menos predecible.

	ENTROPÍA DE SHANNON (SANDRA)							
ERA40	TC7	TC3	TC6	TC1	TC8	TC2	TC5	TC4
BCCR-BCM2.0	TC3	TC6	TC7	TC5	TC1	TC2	TC8	TC4
CCSM3	TC3	TC6	TC7	TC8	TC5	TC2	TC1	TC4
CGCM3.1 (T47)	TC7	TC3	TC6	TC5	TC1	TC2	TC8	TC4
CGCM3.1 (T63)	TC3	TC6	TC7	TC2	TC4	TC1	TC5	TC8
CNRM-CM3	TC6	TC3	TC7	TC2	TC1	TC5	TC8	TC4
CSIRO-Mk3.0	TC3	TC6	TC7	TC5	TC2	TC1	TC8	TC4
ECHAM5/MPI-OM	TC6	TC3	TC7	TC5	TC1	TC8	TC2	TC4
GFDL-CM2.0	TC3	TC7	TC6	TC5	TC1	TC8	TC2	TC4
GISS-AOM	TC7	TC6	TC3	TC2	TC5	TC1	TC8	TC4
INM-CM3.0	TC6	TC7	TC3	TC5	TC2	TC1	TC8	TC4
MIROC3.2(hires)	TC7	TC6	TC3	TC1	TC2	TC4	TC5	TC8
MIROC.2(medres)	TC6	TC3	TC7	TC5	TC2	TC1	TC8	TC4
MRI-CGCM2.3.2	TC7	TC3	TC6	TC1	TC2	TC5	TC8	TC4
PCM	TC7	TC3	TC6	TC8	TC5	TC2	TC1	TC4
UKMO- HadCM3	TC7	TC3	TC6	TC1	TC5	TC8	TC2	TC4
UKMO-HadGEM1	TC6	TC3	TC7	TC1	TC2	TC4	TC8	TC5

Tabla 4.13. Como en la Tabla 4.12, pero para el esquema de clasificación SANDRA.

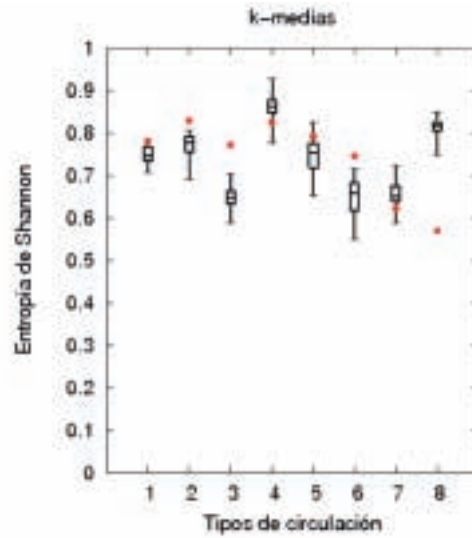


Figura 4.12. Diagrama de cajas de la entropía de Shannon de los 8 TC para los modelos del AR4 para el esquema de clasificación k-medias. Los extremos inferiores (superiores) de las cajas señalan el primer (tercer) cuartil y, el segmento central, la mediana. El ERA40 viene representado por el círculo rojo.

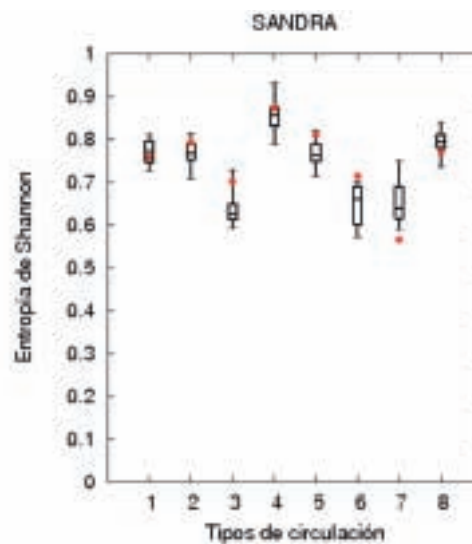


Figura 4.13. Como en la Figura 4.12, pero para el esquema de clasificación SANDRA.

Del análisis de las Figuras 4.12 y 4.13 se observa que, para el esquema k-medias, la entropía de Shannon del ERA40 se aleja de la mostrada para el conjunto de los modelos en los tipos TC3, TC8; especialmente en el TC8. Menor variabilidad se observa en el tipo TC1 y mayor variabilidad en el TC5 y TC6 para el conjunto de los modelos. Asimetría positiva en los tipos TC1 y TC7.

El esquema de SANDRA muestra diferencias con el esquema de k-medias, el valor más alejado del ERA40 se aprecia en el tipo TC7, siendo ligeramente inferior al mínimo del conjunto de los modelos. El conjunto de los modelos presenta mayor variabilidad para los tipos TC3, TC6 y TC7, y menor variabilidad para los tipos TC1, TC5 y TC8. Asimetría positiva en los tipos TC3 y TC7 y negativa en el tipo TC6.

En el esquema k-medias (Tabla 4.12), los valores de mayor predecibilidad (menor entropía) se localizan en las transiciones cuyos tipos de partida son el TC8 (ERA40), TC7 (5 modelos, CGCM3.1(T47), INM-CM3.0, MIROC3.2(hires), MRI-CGCM2.3.2 y PCM), TC6 (4 modelos, GISS-AOM, MIROC3.2(medres), UKMO-HadCM3 y UKMO-HadGEM1) y TC3 (7 modelos, BCCR-BCM2.0, CCSM3, CGCM3.1(T63), CNRM-CM3, CSIRO-Mk3.0, ECHAM5/MPI-OM y GFDL-CM2.0).

Respecto a los valores de menor predecibilidad (mayor entropía) se encuentran en las transiciones cuyos tipos de partida son el TC2 (ERA40), TC4 (15 modelos) y TC8 (1 modelo, CGCM3.1(T63)).

En el esquema SANDRA (Tabla 4.13), los valores de mayor predecibilidad (menor entropía) se localizan en las transiciones cuyos tipos de partida son el TC7 (ERA40 y 6 modelos, CGCM3.1(T47), GISS-AOM, MIROC3.2(hires), MRI-CGCM2.3.2, PCM y UKMO-HadCM3), TC6 (5 modelos, CNRM-CM3, INM-CM3.0, ECHAM5/MPI-OM, MIROC3.2(medres) y UKMO-HadGEM1) y TC3 (5 modelos, BCCR-BCM2.0, CCSM3, CGCM3.1(T63), CSIRO-Mk3.0 y GFDL-CM2.0). Respecto a los valores de menor predecibilidad (mayor entropía) se encuentran en las transiciones cuyos tipos de partida son el TC4 (ERA40 y 15 modelos) y TC8 (1 modelo, MIROC3.2(hires)).

Como regla general, las transiciones menos predecibles son aquellas cuyo tipo de partida es el TC4, situación de flujo del SO, y en el que se había observado una gran diferencia entre la vida media del ERA40 y los modelos del AR4 y las más predecibles suelen corresponderse con el tipo de partida TC7, que es una situación de bloqueo. Como se ha mencionado anteriormente existen diferencias entre los esquemas de clasificación.

Por último, se presentan las Tablas 4.14 y 4.15 donde se sintetiza para cada esquema y cada Tipo de Circulación, el comportamiento de los modelos con respecto a la predecibilidad de las transiciones de los tipos de circulación de partida, apreciándose diferencias entre ambos esquemas. En el esquema k-medias, en términos medios, los modelos mejores son: INM-CM3.0, MIROC3.2(hires), CNRM-CM3, CGCM3.1(T47) y PCM y los modelos peores son: GISS-AOM, UKMO-HadGEM1, CSIRO-Mk3.0, UKMO-HadCM3 y MRI-CGCM2.3.2. En el esquema SANDRA, los modelos mejores son: CGCM3.1(T47), UKMO-HadCM3, ECHAM5/MPI-OM, GISS-AOM y MIROC3.2(hires) y los peores son: MIROC3.2(medres), CSIRO-Mk3.0, INM-CM3.0, CNRM-CM3 y UKMO-HadGEM1.

	ENTROPIA DE SHANNON (k-medias)							
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8
BCCR-BCM2.0	Green	Green	Yellow	Red	Red	Yellow	Green	Red
CCSM3	Yellow	Green	Red	Yellow	Green	Yellow	Red	Green
CGCM3.1 (T47)	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Yellow	Green	Green	Green
CGCM3.1 (T63)	Green	Red	Green	Yellow	Green	Yellow	Red	Red
CNRM-CM3	Red	Yellow	Red	Green	Red	Green	Green	Green
CSIRO-Mk3.0	Red	Yellow	Red	Red	Yellow	Green	Yellow	Yellow
ECHAM5/MPI-OM	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Red	Yellow
GFDL-CM2.0	Green	Yellow	Red	Yellow	Green	Yellow	Red	Red
GISS-AOM	Yellow	Red	Green	Red	Red	Red	Yellow	Yellow
INM-CM3.0	Green	Yellow	Green	Green	Yellow	Yellow	Green	Yellow
MIROC3.2(hires)	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Red
MIROC3.2(medres)	Green	Green	Yellow	Red	Green	Red	Yellow	Yellow
MRI-CGCM2.3.2	Red	Red	Red	Green	Red	Red	Yellow	Green
PCM	Red	Red	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Green	Green
UKMO- HadCM3	Yellow	Green	Green	Yellow	Red	Red	Yellow	Yellow
UKMO-HadGEM1	Red	Red	Green	Yellow	Yellow	Red	Red	Red

Tabla 4.14. Ranking de los modelos con respecto a la predecibilidad de las transiciones entre los Tipos de Circulación para el esquema de k-medias. Valores más próximos al ERA40 (color verde), más alejados (color rojo).

	ENTROPIA DE SHANNON (SANDRA)							
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8
BCCR-BCM2.0	Green	Green	Red	Yellow	Red	Yellow	Yellow	Yellow
CCSM3	Red	Green	Red	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Green
CGCM3.1 (T47)	Yellow	Green	Red	Green	Green	Green	Green	Yellow
CGCM3.1 (T63)	Red	Red	Green	Red	Green	Green	Red	Red
CNRM-CM3	Yellow	Red	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Green
CSIRO-Mk3.0	Yellow	Green	Red	Red	Red	Red	Red	Yellow
ECHAM5/MPI-OM	Green	Yellow	Green	Red	Red	Yellow	Red	Green
GFDL-CM2.0	Red	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Yellow	Red
GISS-AOM	Green	Red	Green	Yellow	Red	Yellow	Green	Green
INM-CM3.0	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Red	Green	Yellow
MIROC3.2(hires)	Green	Yellow	Green	Red	Green	Green	Yellow	Red
MIROC3.2(medres)	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Red	Red	Red	Red
MRI-CGCM2.3.2	Yellow	Red	Red	Green	Yellow	Red	Green	Green
PCM	Red	Yellow	Yellow	Red	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
UKMO- HadCM3	Yellow	Green	Green	Yellow	Yellow	Green	Green	Yellow
UKMO-HadGEM1	Green	Red	Yellow	Red	Green	Red	Red	Red

Tabla 4.15. Como en la Tabla 4.14, pero para el esquema de clasificación SANDRA.

4.5. CONCLUSIONES

En este capítulo se ha evaluado la habilidad de un conjunto de 16 modelos del AR4 del IPCC, atendiendo a la simulación de las características espaciales y temporales de los Tipos de Circulación invernales de ERA40 obtenidos mediante la aplicación de dos esquemas de clasificación, k-medias y SANDRA. La mayoría de los resultados obtenidos han mostrado su robustez respecto a cambios en el método de clasificación seleccionado.

Los Tipos de Circulación obtenidos para el ERA40 guardan una gran similitud en ambos esquemas, no mostrando diferencias significativas en 7 de los 8 TCs considerados. La única excepción corresponde al TC6, con un coeficiente de correlación espacial de 0,89 entre ambos esquemas, en lugar de 0,99 obtenido para el resto de los TC. Con respecto a los modelos del AR4, en general, simulan los Tipos de Circulación obtenidos por el ERA40, con coeficientes de correlación espacial muy altos, para todos los TC, a excepción del TC6 que muestra los valores de correlación más bajos, para ambos esquemas. Los modelos UKMO-HadGEM1 y GISS-AOM muestran las correlaciones más altas y más bajas respectivamente.

En cuanto a las características temporales de los Tipos de Circulación: todos los modelos sobrestiman las frecuencias de ocurrencia del Tipo de Circulación TC4, ligado a flujo del oeste sobre el continente con altas presiones sobre Canarias y bajas presiones sobre Irlanda, independiente del esquema de clasificación elegido; predominando la subestimación de las frecuencias de los Tipos de Circulación, siendo más acusada en el tipo TC7, ligado a circulación meridional.

Atendiendo al sesgo de las frecuencias de los Tipos de Circulación, se observa que todos los modelos, por regla general, presentan sesgos medios muy semejantes en ambos esquemas de clasificación. Considerando el promedio del valor absoluto de los sesgos de las frecuencias de los Tipos de Circulación se constata que los modelos peores (mayor sesgo) coinciden en ambos esquemas: GISS-AOM, CNRM-CM3, MRI-CGCM2.3.2, MIROC3.2(medres) y BCCR-BCM2.0. En el caso de los modelos mejores (menor sesgo), hay tres modelos comunes en ambos esquemas: GCM3.1(T63), UKMO-HadGEM1 y GFDL-CM2.0.

Como regla general, los modelos sobrestiman la duración media y subestiman el número de eventos de 1 día de duración; siendo esta última característica más acusada en el esquema SANDRA. Este resultado coincide con los obtenidos por HUTH (1997), relativos a la validación del modelo de circulación general de alta resolución de la Oficina Meteorológica del Reino Unido (UKHI-GCM, de sus siglas en inglés) utilizando como esquema de clasificación, el Análisis de Componentes Principales en modo T aplicado a los datos de 500 hPa correspondientes a los 10 inviernos (DEF) que se extienden desde 1983-1984 a 1992-1993. La circulación del modelo UKHI es ligeramente más persistente que la observación y el número de eventos largos (cortos) del modelo es mayor (menor) que la realidad; hecho que se ha visto corroborado en este estudio al representar el número de eventos de distinta longitud.

Teniendo en cuenta estas tres últimas características, el mejor modelo es UKMO-HadGEM1 y los peores GISS-AOM y MRI-CGCM2.3.2, para ambos esquemas de clasificación.

Combinando los cuatro *rankings* (promedio del valor absoluto de los sesgos de las frecuencias de los Tipos de Circulación, duración media, porcentaje de tiempo experimentado en eventos de duración igual o superior a 4 días y número de eventos de 1 día de duración), de forma análoga a la del medallero olímpico, se tendría que para el esquema k-medias, los mejores modelos son: UKMO-HadGEM1, CGCM3.1(T63), CCSM3, CSIRO-Mk3.0 y ECHAM5/MPI-OM y los peores: GISS-AOM, MRI-CGCM2.3.2, CNRM-CM3, BCCR-BCM2.0 e INM-CM3.0 mientras que para el esquema SANDRA, los mejores modelos son UKMO-HadGEM1, CGCM3.1(T63), ECHAM5/MPI-OM, PCM y CCSM3, y los peores GISS-AOM, MRI-CGCM2.3.2, MIROC3.2(medres), INM-CM3.0 y BCCR-BCM2.0.

Respecto a la predecibilidad de las transiciones entre Tipos de Circulación, se ha puesto de manifiesto que las transiciones menos predecibles son aquellas cuyo TC de partida es el TC4, situación de flujo del SO y las más predecibles aquellas cuyo tipos de partida están ligadas a situaciones de flujo meridional (tipo bloqueo). Desafortunadamente, el *ranking* de los modelos basado en la predecibilidad no es muy robusto, mostrando una gran dependencia del TC considerado y del esquema de clasificación.

Al combinar el *ranking* de la predecibilidad de las transiciones con el procedente de los cuatro *rankings* (sesgos+eventos), se observan con más claridad diferencias en ambos esquemas, debido fundamentalmente a las diferencias existentes en las predecibilidades de las transiciones. Así, en el esquema k-medias, los mejores modelos son: CCSM3, ECHAM5/MPI-OM y CGCM3.1(T63) y en el esquema SANDRA, ECHAM5/MPI-OM, CCSM3 y UKMO-HadGEM1. Respecto a los peores, en el esquema k-medias: GISS-AOM, MRI-CGCM2.3.2, CNRM-CM3 y BCCR-BCM2.0 y en el de SANDRA, MIROC3.2(medres), INM-CM3.0, MRI-CGCM2.3.2, BCCR-BCM2.0 y GISS-AOM.

A modo de resumen, se podría concluir que los mejores modelos, atendiendo a su comportamiento temporal a partir de las diferentes perspectivas consideradas en este estudio para ambos esquemas son: CCSM3 y ECHAM5/MPI-OM y los peores GISS-AOM, MRI-CGCM2.3.2 y BCCR-BCM2.0. Resulta digno de mención, el mejor comportamiento de los modelos UKMO-HadCM3 y UKMO-HadGEM1 en el esquema SANDRA, contrariamente al CGCM3.1(T63) que alcanza mejores puntuaciones en el esquema k-medias.

Al considerar conjuntamente las características espaciales y temporales, hay que puntualizar que el modelo GISS-AOM presenta las puntuaciones peores, en prácticamente todos los *rankings* espaciales y temporales considerados en este capítulo.

A la vista de los resultados obtenidos, podemos concluir con ERRASTI ET AL. (2011) y KJELLSTRÖM ET AL. (2010) que los *rankings* de los modelos sobre una región particular dada son muy dependientes de las variables y de las métricas utilizadas en la evaluación de los modelos.

Para concluir en este capítulo se ha puesto de manifiesto la conveniencia y utilidad de este enfoque, basado en los Tipos de Circulación y, en consecuencia, centrado en las escalas sinópticas, para evaluar las diferencias existentes entre los reanálisis y los modelos climáticos (SCHUENEMANN Y CASSANO, 2009), diferencias que deberán ser tenidas en cuenta al emplear los AOGCMs en estudios de impacto. Con-

viene recalcar la importancia de la simulación apropiada de las escalas sinópticas en el estudio de extremos y en las colas de las distribuciones de probabilidad. Y aún más, este método nos permitirá evaluar no solo el progreso en modelización climática sino que estrechará la elección de los modelos más apropiados en los estudios de *downscaling* (reducción de escala).

5.

Conclusiones generales

Mientras que una gran mayoría de estudios de evaluación de modelos climáticos se centran en la capacidad de los modelos para simular las características globales medias, tal y como se resume en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC, examinando medias anuales, estacionales y mensuales, estas escalas temporales no son probablemente las que más afecten a los sistemas humanos, físicos o biológicos (PERKINS ET AL., 2007). Por ello, en este texto se ha optado por considerar tanto el dato mensual como el dato diario para poder analizar las escalas sinópticas que determinan el clima y para evitar sesgos y filtrados que pudieran tener su origen en el proceso de promediado de los datos.

El capítulo 2 se centra en la evaluación de los 22 modelos del CMIP3 considerando tanto el ciclo anual como la distribución espacial de los campos de precipitación y temperatura. La distribución espacial se ha referido a valores medios anuales y a las estaciones invernal y estival para el dominio espacial de la España peninsular. Las tres métricas utilizadas para estimar las diferencias entre las climatologías de los modelos y la observación (CRU) han sido: el error absoluto medio (EAM), el coeficiente de correlación (CORR) y la razón entre la desviación estándar del modelo respecto a la desviación estándar de las observaciones (σ_M/σ_D).

En el caso de la precipitación, combinando los *rankings* de las tres métricas ya mencionadas, se observa que los modelos que mejor representan el ciclo anual de precipitación son MIROC3.2 (medres) y ECHO-G. La media de los modelos muestra un comportamiento muy bueno, ya que los valores de sus métricas están en el tercil superior del *ranking* de los mejores modelos. Por el contrario, los modelos que peor representan el ciclo anual son GISS-AOM y ECHAM5/MPI-OM. El diagrama de Taylor corrobora este resultado, mostrando claramente como estos dos últimos modelos se encuentran más separados del resto y del punto correspondiente a la observación (CRU) en términos de distancia RMS-C. Respecto a la distribución espacial de la precipitación anual acumulada, se observa que no hay ningún modelo que obtenga las máximas puntuaciones en las tres métricas consideradas, siendo el GISS-AOM el peor modelo. Considerando las métricas EAM y CORR, los mejores modelos serían PCM, MIROC3.2(medres), CCSM3 y UKMO-HadCM3, y los peores GISS-AOM y GISS-ER; respecto a (σ_M/σ_D), los mejores modelos son CSIRO-Mk3.0, ECHAM5/MPI-OM y GISS-ER.

Respecto a la distribución espacial de la precipitación invernal, los mejores modelos son: UKMO-HadGEM1, MRI-CGCM2.3.2 y PCM, mientras que los peores son GISS-AOM y BCCR-BCM2.0, consistentemente con lo que se observa en la distancia RMS-C del diagrama de Taylor. Considerando las métricas EAM y CORR, los mejores modelos son: UKMO-HadGEM1, MRI-CGCM2.3.2 y MIROC3.2(hires); mientras que los peores son: GISS-AOM y BCCR-BCM2.0; respecto a (σ_M/σ_D), los mejores modelos son GFDL-CM2.0, GISS-ER y CSIRO-Mk3.0 y los peores ECHO-G, GISS-EH, y CGCM3.1(T63).

Respecto a la distribución espacial de la precipitación estival, el mejor modelo es ECHO-G mientras que los peores son: BCCR-BCM2.0, GISS-AOM y CNRM-CM3, consistentemente con lo que se observa en la distancia RMS-C del diagrama de Taylor correspondiente. Considerando las métricas EAM y CORR, los mejores modelos son: ECHO-G y UKMO-HadCM3; mientras que los peores son: GISS-AOM y BCCR-

BCM2.0; respecto a (σ_M/σ_D) , los mejores modelos son GFDL-CM2.1, IPSL-CM4 y la media de los modelos y los peores BCCR-BCM2.0, GISS-ER y CNRM-CM3.

En el caso de la temperatura, se observa que los modelos que mejor representan el ciclo anual de la temperatura son MIROC3.2(hires) y UKMO-HadGEM1 mientras que los peores modelos son ECHO-G, GISS-AOM y GISS-ER. Respecto a la distribución espacial de la temperatura media anual, se observa que los mejores modelos son MIROC3.2(hires) y CCSM3, mientras que los modelos que peor la simulan son GISS-EH y CSIRO-Mk3.0. Estos resultados son consistentes con los obtenidos en el diagrama de Taylor. Considerando las métricas EAM y CORR, los mejores modelos son: CCSM3, la media de los modelos y PCM; mientras que los peores son: GISS-EH, GFDL-CM2.0 y FGOALS-g1.0; respecto a (σ_M/σ_D) , los mejores modelos son CGCM3.1(T63), MIROC3.2(hires) y GFDL-CM2.0 y los peores ECHO-G, IPSL-CM4 y PCM.

Respecto a la distribución espacial de la temperatura media invernal, y en coincidencia con el promedio anual, el mejor modelo es MIROC3.2(hires) mientras que el peor es el ECHO-G. Estos resultados son consistentes con lo observado en el diagrama de Taylor. Considerando las métricas EAM y CORR, los mejores modelos son: MIROC3.2(hires), la media de los modelos y CCSM3; mientras que los peores son: GISS-AOM, ECHO-G y CGCM3.1(T47); respecto a (σ_M/σ_D) , los mejores modelos son ECHAM5/MPI-OM, BCCR-BCM2.0 y MIROC3.2(hires) y los peores MIROC3.2(medres), PCM y GISS-EH.

Respecto a la distribución espacial de la temperatura media estival, los mejores modelos son: CCSM3, ECHAM5/MPI-OM y MIROC3.2(hires) mientras que los peores son: ECHO-G y GISS-AOM. Considerando las métricas EAM y CORR, los mejores modelos son: CCSM3, CGCM3.1(T47), PCM, la media de los modelos y MIROC3.2(hires); mientras que los peores son: GISS-AOM, GISS-EH y ECHO-G; respecto a (σ_M/σ_D) , los mejores modelos son CCSM3, ECHAM5/MPI-OM y MIROC3.2(hires) y los peores ECHO-G, GISS-ER e IPSL-CM4.

Se puede resumir afirmando que la precipitación y la temperatura procedentes de los modelos muestran las deficiencias asociadas con la escasa resolución de los mismos que les impide representar adecuadamente las características orográficas principales de la península Ibérica. En consecuencia, una parte relevante de las deficiencias en la simulación de ambas variables es atribuible a insuficiente representación de la orografía por parte de los modelos. En términos generales, mientras que las características a grandes rasgos de la distribución espacial de precipitación acumulada y temperatura media están razonablemente simuladas por los modelos, su variabilidad interanual presenta serias deficiencias.

El capítulo 3 se centra en la evaluación de los modelos atendiendo a la simulación de las características espaciales y temporales de los cuatro modos de variabilidad (NAO, SCAND, EA y EA/WR), más importantes para el área euroatlántica mientras que el capítulo 4 analiza la simulación de las características espaciales y temporales de los Tipos de Circulación obtenidos mediante la aplicación de dos esquemas de clasificación, k-medias y SANDRA.

Una característica que comparten ambos enfoques de tratamiento de la circulación atmosférica (modos de variabilidad y tipos de circulación) es que los modelos

que mejor simulan las características espaciales no son necesariamente los mejores en la reproducción de los aspectos temporales. De modo sucinto, todos los modelos son capaces de simular razonablemente bien los cuatro modos de variabilidad, siendo SCAND, el modo mejor simulado espacialmente; pudiéndose aceptar que los modelos AR4 han mostrado habilidad en reproducir correctamente las propiedades espaciales de variabilidad, como ya habían apuntado CASSOU Y GUILYARDI (2007) con respecto al modo NAO. Atendiendo a las características temporales, los modos mejor simulados son SCAND y NAO. Cuando se combinan los *rankings* espaciales y temporales de los cuatro modos de variabilidad, los mejores modelos siguen el siguiente orden: CGCM3.1(T63), CCSM3, UKMO-HadGEM1, INM-CM3.0 y BCCR-BCM2.0 y los peores: GISS-AOM, CNRM-CM3, MIROC3.2(hires), MRI-CGCM2.3.2 y MIROC3.2(medres). En consonancia con los resultados de STONER ET AL. (2009) y STEPHENSON ET AL. (2006), no se ha encontrado ningún modelo que sobresaliera claramente en su habilidad para reproducir todos los modos de variabilidad.

En el caso de la simulación de los Tipos de Circulación, atendiendo al promedio del valor absoluto de los sesgos de las frecuencias de los TC, para ambos esquemas de clasificación, se observa que los modelos mejores (menor sesgo) son: CGCM3.1(T63), UKMO-HadGEM1 y GFDL-CM2.0 y los peores GISS-AOM, CNRM-CM3, MRI-CGCM2.3.2 y MIROC3.2 (medres). Sin embargo, al considerar las características de los eventos, como duración media, porcentaje de tiempo experimentado en eventos de duración igual o superior a 4 días y eventos de 1 día de duración, se observan algunas discrepancias con los resultados anteriores; así, los modelos mejores en ambos esquemas son UKMO-HadGEM1, y los peores GISS-AOM y MRI-CGCM2.3.2.

De la combinación de todos los *rankings* que afectan al comportamiento temporal del capítulo 4, considerando todas las características consideradas en este estudio, se concluye que, para ambos esquemas, los mejores modelos son: CCSM3 y ECHAM5/MPI-OM y los peores GISS-AOM, MRI-CGCM2.3.2 y BCCR-BCM2.0. Resulta digno de destacar, el impacto positivo del esquema SANDRA por lo que respecta a los modelos UKMO-HadCM3 y UKMO-HadGEM1 contrariamente al modelo CGCM3.1(T63) que alcanza mejores puntuaciones en el esquema k-medias.

Finalmente, al comparar los *rankings* de los modelos obtenidos en los capítulos 3 y 4 (modos de variabilidad y Tipos de Circulación), se observa que en ambos casos, hay tres modelos que ocupan los primeros puestos: CCSM3, CGCM3.1(T63), UKMO-HadGEM1 y dos modelos que ocupan los peores puestos: GISS-AOM y MRI-GCM2.3.2. Conviene tener presente que la elección de los modelos “mejores”, en última instancia, va a venir condicionada por las aplicaciones específicas requeridas por los usuarios. La formulación de las razones de la existencia de los sesgos de los modelos encontrados en esta evaluación queda fuera del objetivo de este libro. Solo podría abordarse a partir de experimentos de sensibilidad centrados en las respuestas de los modelos a cambios en las parametrizaciones físicas, resolución de los modelos, acoplamientos con el océano, etc. Sin embargo, no hay que olvidar que el primer paso para abordar estas cuestiones es el conocimiento de los sesgos.

De los resultados presentados en los capítulos anteriores, y resumidos en esta sección, se puede concluir que los diferentes métodos y métricas utilizados para

comparar cuantitativamente el grado de proximidad o acuerdo entre las simulaciones proporcionadas por los modelos entre sí y entre los modelos y las observaciones dependen grandemente de las escalas y aspectos de los modelos y observaciones que se consideren. En este sentido, se puede decir que las métricas a seleccionar dependen mucho del objetivo de la comparación. En consecuencia, se cuantificará diferentemente la “bondad” del modelo en términos de su mayor proximidad con las observaciones dependiendo de la métrica seleccionada que normalmente está referida a ciertos aspectos y/o escalas de los modelos. Se puede, por lo tanto, concluir que la comparación de modelos es muy dependiente del objeto de la comparación y de las aplicaciones posteriores de las simulaciones.

Las simulaciones de los modelos constituyen la base para generar las proyecciones de cambio climático. Todos los resultados mostrados en los Informes de Evaluación del IPCC relativos a proyecciones e incertidumbres se han basado en un enfoque muy gráficamente ilustrado por la expresión “un modelo, un voto”, que evitaba establecer ponderaciones de los modelos y *rankings* de los mismos. La colección de modelos en la que se ha venido basando los *ensembles* multimodelos utilizados en los últimos Informes de Evaluación del IPCC no dejan de ser un *ensemble* de oportunidad que solamente proporciona una idea aproximada de las incertidumbres provenientes de los modelos, ya que se ha obviado un enfoque sistemático y formalizado para estimar los errores. El establecimiento de evaluaciones cuantitativas de los modelos, basadas en métricas, constituyen un primer paso para avanzar en estimaciones más realistas de las proyecciones y de sus incertidumbres. El campo de las evaluaciones de modelos climáticos con la finalidad de combinar posteriormente las proyecciones multimodelo y a su vez estimar las incertidumbres de las mismas constituye actualmente un campo muy activo de investigación tal y como se refleja en (KNUTTI ET AL., 2010a y b). Consistentemente con los resultados presentados en este libro, se considera que no existe una “receta” única para evaluar modelos. La evaluación, como se ha descrito extensivamente en este trabajo, depende en gran medida de las aplicaciones para las que se utilicen las simulaciones climáticas (KNUTTI ET AL., 2010a y b).

No obstante se han realizado una serie de recomendaciones generales (KNUTTI ET AL., 2010a) que afectan a la evaluación de modelos y que hemos procurado seguir e incorporar en este texto:

- Utilización de variedad de métricas que exploren diferentes aspectos de los modelos.
- Una métrica es más poderosa si es relativamente simple y estadísticamente robusta.
- La incertidumbre en la observación debe ser tomada en cuenta al evaluar los modelos utilizando, cuando sea posible, diferentes fuentes de datos.
- Los modelos deberán ser evaluados en diferentes estados de referencia, diferentes escalas espaciales y temporales y diferentes tipos de simulaciones.
- Cuando las evaluaciones ponen especial énfasis en una única métrica, y si además se basan en un único conjunto de datos, pueden sobrestimar la confianza en algunos modelos impidiendo su diversidad y afectando al rango de la incertidumbre.

Confiamos en que este estudio haya sido de utilidad para identificar sesgos específicos de los modelos y haya servido para fomentar análisis con nuevas métricas para evaluación de modelos, que seguramente permitirán el establecimiento de nuevos *rankings* en la próxima generación de modelos climáticos (CMIP5) que constituirán la base del quinto informe de evaluación (AR5) del IPCC.

Anexos y referencias

- Anexo A. Tabla resumen de las principales características de los modelos AR4 utilizados
 - Anexo B. Índices estadísticos para la precipitación
 - Anexo C. Índices estadísticos para la temperatura
 - Anexo D. Diagramas de Taylor de precipitación y temperatura
 - Anexo E. Estadísticas de la MSLP en la región euroatlántica
 - Anexo F. Modos de variabilidad de los modelos AR4
 - Anexo G. Distribución de las longitudes de eventos en los Tipos de Circulación
 - Anexo H. Matrices de probabilidades de transición entre Tipos de Circulación
- Referencias

ANEXO A.

Tabla resumen de las principales características de los modelos AR4 utilizados

Acrónimo de los modelos	Inicial	Institución	Resolución		Año comienzo (SST)	Referencia
			Atmos.	Oceánica		
BCCR-BCM2.0	A	Bjerknes Centre for Climate Research (Noruega)	1,9° × 1,9°	0,5°-1,5° × 1,5°	1850	FUREVIK ET AL., 2003
CCSM3	B	National Centre for Atmospheric Research (Estados Unidos)	1,4° × 1,4°	0,3°-1,0° × 1,0°	1870	COLLINS ET AL., 2006B
CGCM3.1(T47)	C	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (Canadá)	2,8° × 2,8°	1,9° × 1,9°	1850	FLATO, 2005
CGCM3.1(T63)	D	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (Canadá)	1,9° × 1,9°	0,9° × 1,4°	1850	FLATO, 2005
CNRM-CM3	E	Météo France Centre National de Recherches Météorologiques (Francia)	1,9° × 1,9°	0,5°-2,01° × 2,0°	N/A	SALAS-MELIÁ ET AL., 2005
CSIRO-Mk3.0	F	Commonwealth Scientific and Industrial research Organisation (CSIRO) Atmospheric Research (Australia)	1,9° × 1,9°	0,8° × 1,9°	1871	GORDON ET AL., 2002
ECHAM5/MPI-OM	G	Max Planck Institute for Meteorology (Alemania)	1,9° × 1,9°	1,5° × 1,5°	N/A	ROECKNER ET AL., 2003
ECHO-G	H	Meteorological Institute of the University of Bonn, Meteorological Research Institute of the Korea Meteorological Administration (KMA), and Model and Data Group, (Alemania/Corea)	3,9° × 3,9°	0,5°-2,8° × 2,8°		ROECKNER. ET AL., 1996
FGOALS-g1.0	I	National Key Laboratory of Numerical Modelling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG)/ Institute of Atmospheric Physics (China)	2,8° × 2,8°	1,0° × 1,0°		WANG ET AL., 2004

Tabla A.1. Resumen de las principales características de los modelos AR4 utilizados.

Acrónimo de los modelos	Inicial	Institución	Resolución		Año comienzo (SST)	Referencia
			Atmos.	Oceánica		
GFDL-CM2.0	J	U.S. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) (Estados Unidos)	2,0° × 2,5°	0,3°-1,0° × 1,0°	1861	DELWORTH ET AL., 2006
GFDL-CM2.1	K	NOAA/GFDL (Estados Unidos)	2,0° × 2,5°	0,3°-1,0° × 1,0°	1861	DELWORTH ET AL., 2006
GISS-AOM	L	National Aeronautics and Space Administration (NASA) Goddard Institute for Space Studies (GISS) (Estados Unidos)	3° × 4°	3° × 4°	1850	RUSSELL ET AL., 1995; RUSSELL 2005
GISS-EH	M	NASA/GISS (Estados Unidos)	4° × 5°	2° × 2°	1880	SCHMIDT ET AL., 2006
GISS-ER	N	NASA/GISS (Estados Unidos)	4° × 5°	4° × 5°	1880	SCHMIDT ET AL., 2006
INM-CM3.0	O	Institute for Numerical Mathematics (Rusia)	4° × 5°	2° × 2,5°	1871	DIANSKY AND VOLODIN, 2002, DIANSKY ET AL., 2002
IPSL-CM4	P	Institute Pierre Simon Laplace (Francia)	2,5° × 3,75°	2° × 2°	1860	HOUDIN ET AL., 2006
MIROC3.2 (hires)	Q	Centre for Climate System Research (Univ. of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC) (Japón)	1,1° × 1,1°	0,2° × 0,3°	1900	HASUMI & EMORI, 2004
MIROC3.2 (medres)	R	Center for Climate System Research (Univ. of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC) (Japón)	2,8° × 2,8°	0,5°-1,4° × 1,4°	1850	HASUMI & EMORI, 2004
MRI-CGCM2.3.2	S	Meteorological Research Institute (Japón)	2,8° × 2,8°	0,5°-2,0° × 2,5°	1901	YUKIMOTO ET AL., 2001; YUKIMOTO AND NODA, 2003
PCM	T	National Center for Atmospheric Research (Estados Unidos)	2,81° × 2,81°	0,5°-0,7° × 1,1°	1890	WASHINGTON ET AL., 2000
UKMO-HadCM3	U	Hadley Centre for Climate Prediction and Research Met Office (Reino Unido)	2,5° × 3,75°	1,25° × 1,25°	1860	GORDON ET AL. 2000; POPE ET AL. 2000

Tabla A.1 (continuación). Resumen de las principales características de los modelos AR4 utilizados.

Acónimo de los modelos	Inicial	Institución	Resolución		Año comienzo (SST)	Referencia
			Atmos.	Oceánica		
UKMO-HadGEM1	V	Hadley Centre for Climate Prediction and Research Met Office (Reino Unido)	1,3° × 1,9°	0,3°-1,0° × 1,0°	1860	JOHNS ET AL., 2006; MARTIN ET AL., 2006

Tabla A.1 (continuación). Resumen de las principales características de los modelos AR4 utilizados.

ANEXO B.**Índices estadísticos para la precipitación**

PRECIPITACIÓN		CICLO ANUAL			INVERNO			VERANO			ANUAL		
MODELOS		EAM	CORR	σ_M/σ_D	EAM	CORR	σ_M/σ_D	EAM	CORR	σ_M/σ_D	EAM	CORR	σ_M/σ_D
DATOS CRU		0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
1	REANÁLISIS NCEP	12,34	0,7408	0,64	55,05	0,8585	0,64	39,52	0,6848	1,27	137,63	0,6728	0,60
2	REANÁLISIS ERA40	13,13	0,9880	0,84	44,69	0,9004	0,67	26,38	0,8758	0,67	163,34	0,8759	0,73
3	MEDIA DE MODELOS	9,38	0,8348	0,96	53,91	0,7596	0,81	29,64	0,7808	0,94	139,76	0,6843	0,74
A	BCCR-BCM2.0	26,09	0,8112	1,35	131,54	0,4616	1,42	85,05	0,6845	2,21	348,55	0,3415	1,30
B	CCSM3	15,93	0,5840	0,98	50,43	0,7561	0,86	44,29	-0,0389	0,41	147,38	0,7588	0,70
C	CGCM3.1(T47)	9,90	0,7946	0,76	55,59	0,7068	0,53	26,12	0,7956	0,94	153,85	0,6048	0,60
D	CGCM3.1(T63)	9,83	0,8214	0,85	62,13	0,5573	0,45	23,32	0,7920	0,69	168,98	0,4767	0,55
E	CNRM-CM3	18,03	0,5793	1,02	88,20	0,6580	1,43	70,53	0,6806	1,98	228,72	0,5386	1,23
F	CSIRO-Mk3.0	13,47	0,8242	1,22	69,19	0,7385	1,10	48,28	0,3651	1,13	199,76	0,5166	0,99
G	ECHAM5/MPI-OM	18,39	0,6934	1,65	77,42	0,7209	1,18	47,40	0,7539	0,52	153,23	0,6649	0,98
H	ECHO-G	7,97	0,8830	1,10	69,14	0,5945	0,22	15,30	0,8936	0,89	176,56	0,3720	0,38
I	FGOALS-g1.0	16,57	0,8274	0,95	63,26	0,5639	0,63	34,03	0,8547	0,29	203,62	0,7106	0,54
J	GFDL-CM2.0	17,85	0,7857	1,29	73,17	0,8077	1,01	41,25	0,8343	1,30	203,09	0,7296	1,15
K	GFDL-CM2.1	14,73	0,7816	1,46	86,85	0,7433	1,24	26,10	0,7245	1,01	170,32	0,6632	1,09
L	GISS-AOM	43,06	0,6389	1,71	224,64	0,4717	1,44	109,66	0,6713	1,92	533,88	0,3518	1,60
M	GISS-EH	12,03	0,8753	1,13	63,34	0,6239	0,28	40,49	0,9334	0,43	163,40	0,6092	0,42
N	GISS-ER	20,19	0,7674	0,79	83,77	0,6638	0,91	83,44	0,7217	2,10	304,19	0,3578	1,02
O	INM-CM3.0	14,78	0,6780	1,20	75,63	0,5114	0,78	29,43	0,9147	0,33	138,27	0,6892	0,74
P	IPSL-CM4	16,43	0,6733	0,87	66,42	0,6597	0,87	25,36	0,7662	0,96	202,83	0,7118	0,94
Q	MIROC3.2(hires)	12,20	0,8586	0,47	37,42	0,8737	0,71	81,02	0,8152	1,81	175,57	0,7239	0,82
R	MIROC3.2(medres)	8,99	0,8788	0,99	47,65	0,7775	0,75	23,91	0,7914	0,68	130,28	0,7510	0,65
S	MRI-CGCM2.3.2	22,94	0,3570	1,13	37,28	0,8474	0,89	27,97	0,7032	0,68	163,69	0,8088	0,51
T	PCM	11,74	0,7366	0,74	50,06	0,7677	0,87	38,08	0,5722	0,86	124,72	0,7783	0,80
U	UKMO-HadCM3	11,10	0,7691	1,12	58,66	0,7619	0,85	22,98	0,8439	0,79	137,59	0,7288	0,77
V	UKMO-HadGEM1	14,86	0,7484	1,18	32,66	0,9338	1,13	60,71	0,4469	1,15	177,42	0,8269	0,78

Tabla B.1. Resumen de índices estadísticos calculados [media de los errores absolutos (EAM), correlación (CORR), desviación estándar (σ)] para el ciclo anual y distribución espacial de la precipitación (invierno, verano, anual) y referidos a las observaciones (CRU). Los índices se han calculado para los reanálisis NCEP y ERA40, para la media de los modelos y para los 22 modelos de la Tabla A.1 del Anexo A.

ANEXO C.

Índices estadísticos para la temperatura

PRECIPITACIÓN		CICLO ANUAL			INVERNO			VERANO			ANUAL		
MODELOS		EAM	CORR	σ_M/σ_D	EAM	CORR	σ_M/σ_D	EAM	CORR	σ_M/σ_D	EAM	CORR	σ_M/σ_D
DATOS CRU		0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
1	REANÁLISIS NCEP	0,49	0,9981	0,92	1,26	0,8554	0,95	1,26	0,9077	0,81	1,03	0,8811	0,85
2	REANÁLISIS ERA40	0,42	0,9999	0,96	1,09	0,9004	0,83	1,03	0,9258	0,78	0,97	0,9252	0,73
3	MEDIA DE MODELOS	0,66	0,9982	0,91	1,14	0,8767	0,74	1,40	0,9123	0,88	1,11	0,8946	0,78
A	BCCR-BCM2.0	1,19	0,9921	0,88	1,58	0,7687	0,98	2,04	0,8474	0,91	1,44	0,8633	0,85
B	CCSM3	0,56	0,9933	0,98	1,15	0,8629	0,77	0,99	0,9205	0,98	0,98	0,8976	0,84
C	CGCM3.1(T47)	1,34	0,9994	1,09	2,24	0,7417	1,04	1,16	0,9018	1,12	1,58	0,8624	0,94
D	CGCM3.1(T63)	1,51	0,9980	0,99	1,62	0,8514	1,03	2,03	0,8340	1,05	1,74	0,8660	0,97
E	CNRM-CM3	0,90	0,9959	0,94	1,44	0,7796	0,79	1,87	0,8090	0,97	1,38	0,8876	0,73
F	CSIRO-Mk3.0	1,58	0,9932	0,73	1,98	0,7234	0,87	2,92	0,8452	0,79	1,68	0,7472	0,72
G	ECHAM5/MPI-OM	0,58	0,9958	0,93	1,54	0,8031	1,00	1,24	0,8997	1,02	1,16	0,8561	0,93
H	ECHO-G	2,79	0,9313	0,53	4,27	0,7798	0,62	3,77	0,8231	0,25	1,57	0,8711	0,47
I	FGOALS-g1.0	1,59	0,9917	1,00	1,62	0,8641	0,64	2,31	0,7855	1,08	1,96	0,8004	0,78
J	GFDL-CM2.0	2,21	0,9925	0,78	1,38	0,8143	0,96	3,65	0,8421	0,97	2,35	0,8210	0,95
K	GFDL-CM2.1	1,06	0,9888	0,91	1,28	0,8097	0,87	1,75	0,8570	1,07	1,38	0,8324	0,94
L	GISS-AOM	2,50	0,9830	0,53	4,24	0,7295	0,92	3,26	0,7651	0,70	1,43	0,7784	0,85
M	GISS-EH	2,45	0,9940	1,08	2,36	0,8456	0,51	3,02	0,7307	0,95	2,49	0,7711	0,68
N	GISS-ER	1,67	0,9897	1,23	2,10	0,8829	0,73	2,00	0,8884	1,47	1,38	0,8908	1,08
P	IPSL-CM4	0,84	0,9943	0,86	1,32	0,8571	0,66	1,96	0,8559	0,63	1,33	0,8656	0,63
Q	MIROC3.2(hires)	0,39	0,9981	0,95	1,10	0,8901	0,98	1,18	0,8915	0,98	1,02	0,8857	0,96
R	MIROC3.2(medres)	1,46	0,9930	0,98	2,20	0,8407	0,44	2,12	0,8733	1,14	1,70	0,8571	0,75
T	PCM	0,66	0,9920	0,98	1,51	0,8264	0,50	1,26	0,9064	0,83	1,26	0,8928	0,64
U	UKMO-HadCM3	1,61	0,9986	0,89	1,42	0,8188	0,80	2,66	0,8608	1,05	1,75	0,8782	0,84
V	UKMO-HadGEM1	0,64	0,9965	1,05	1,45	0,8362	0,94	1,29	0,8619	0,94	1,24	0,8661	0,85

Tabla C.1. Igual que Tabla B.1 del Anexo B, pero para temperatura.

ANEXO D.

Diagramas de Taylor de precipitación y temperatura

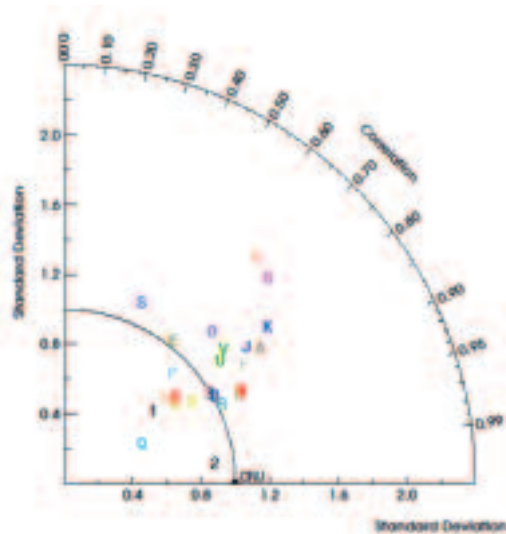


Figura D.1. Diagrama de Taylor representando el error del ciclo anual de precipitación simulado por todos los modelos y reanálisis con respecto a la observación (punto CRU). Los modelos y reanálisis se representan por los números y las letras asignadas en la Tabla A.1 del Anexo A.

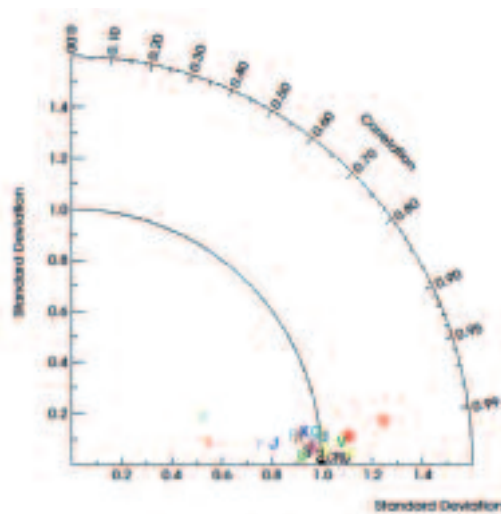


Figura D.2. Igual que la Figura D.1, pero para el ciclo anual de temperatura media mensual.

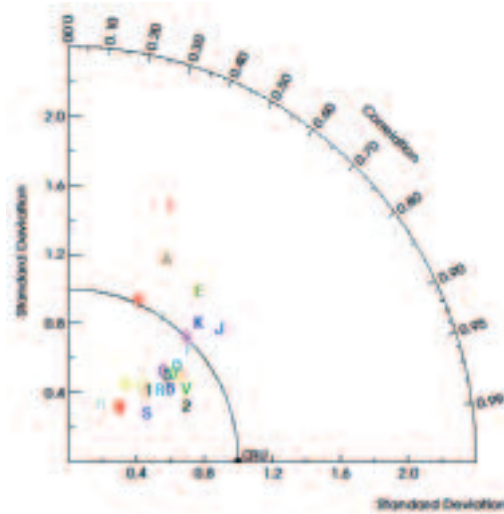


Figura D.3. Diagrama de Taylor de la distribución espacial de la precipitación anual para 20 años de datos (1980-1999) sobre la península Ibérica. Se representan todos los modelos y reanálisis por las letras asignadas en la Tabla A.1 y referidos a la observación (punto CRU).

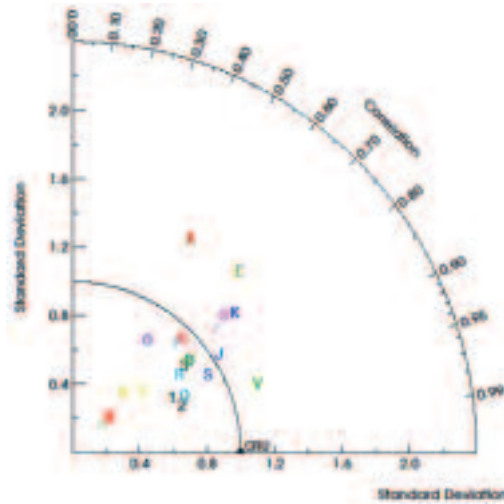


Figura D.4. Igual que la Figura D.3, pero para invierno (DEF).

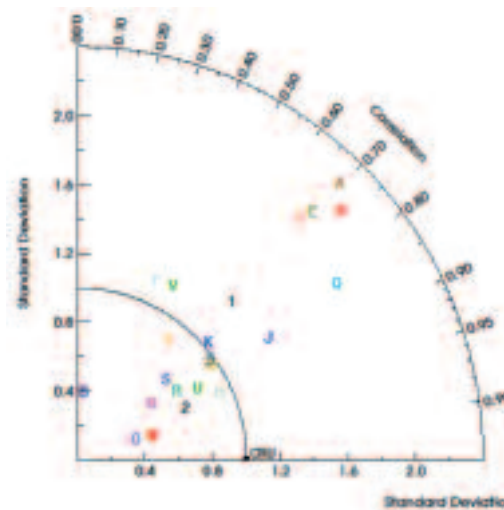


Figura D.5. Igual que la Figura D.3, pero para verano (JJA).

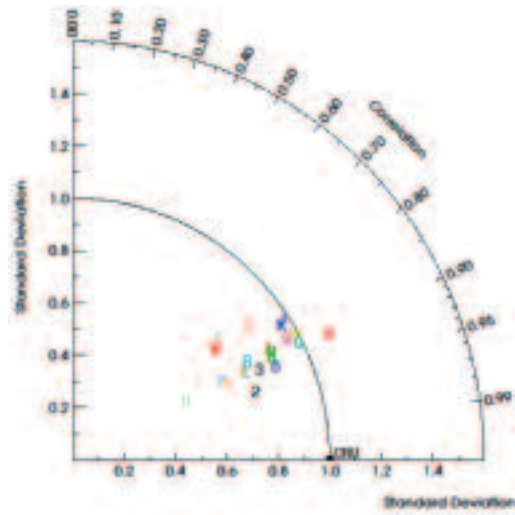


Figura D.6. Igual que la Figura D.3, pero para la temperatura anual media.

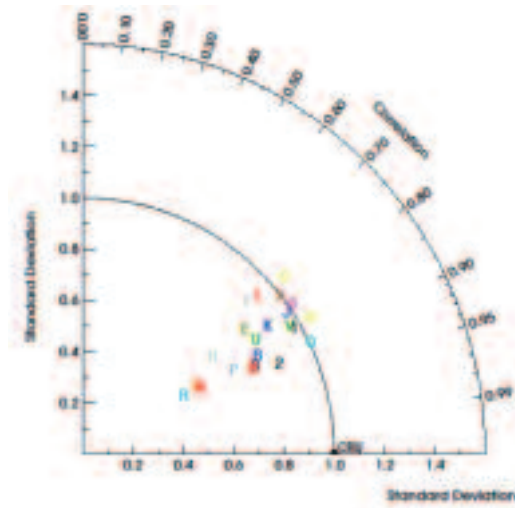


Figura D.7. Igual que la Figura D.6, pero para invierno (DEF).

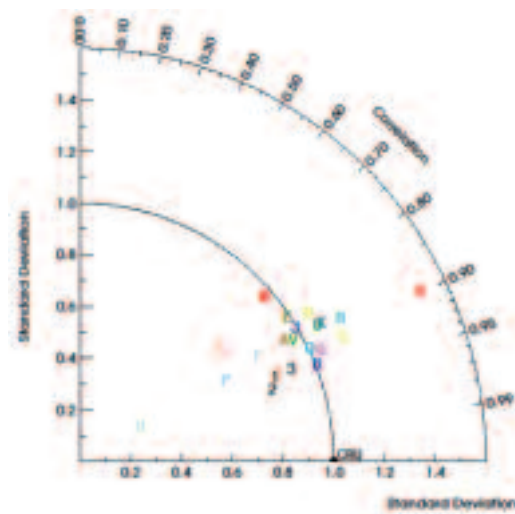


Figura D.8. Igual que la Figura D.6 pero para verano (JJA).

ANEXO E.

Estadísticas de la MSLP en la región euroatlántica

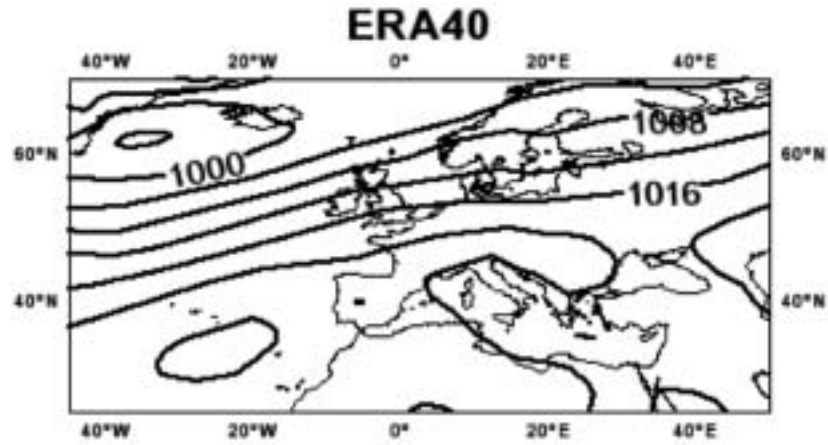


Figura E.1. Campo medio de MSLP para invierno de ERA40, intervalo de 4 hPa.

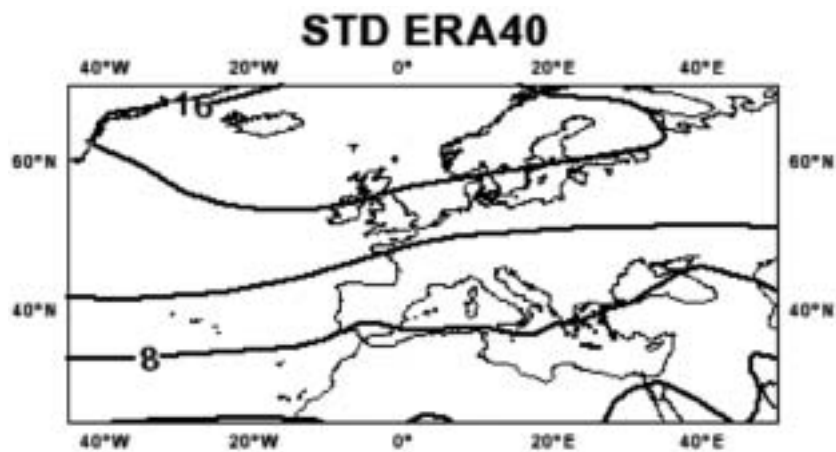


Figura E.2. Desviación estándar (STD) de MSLP para invierno de ERA40, intervalo de 4 hPa.

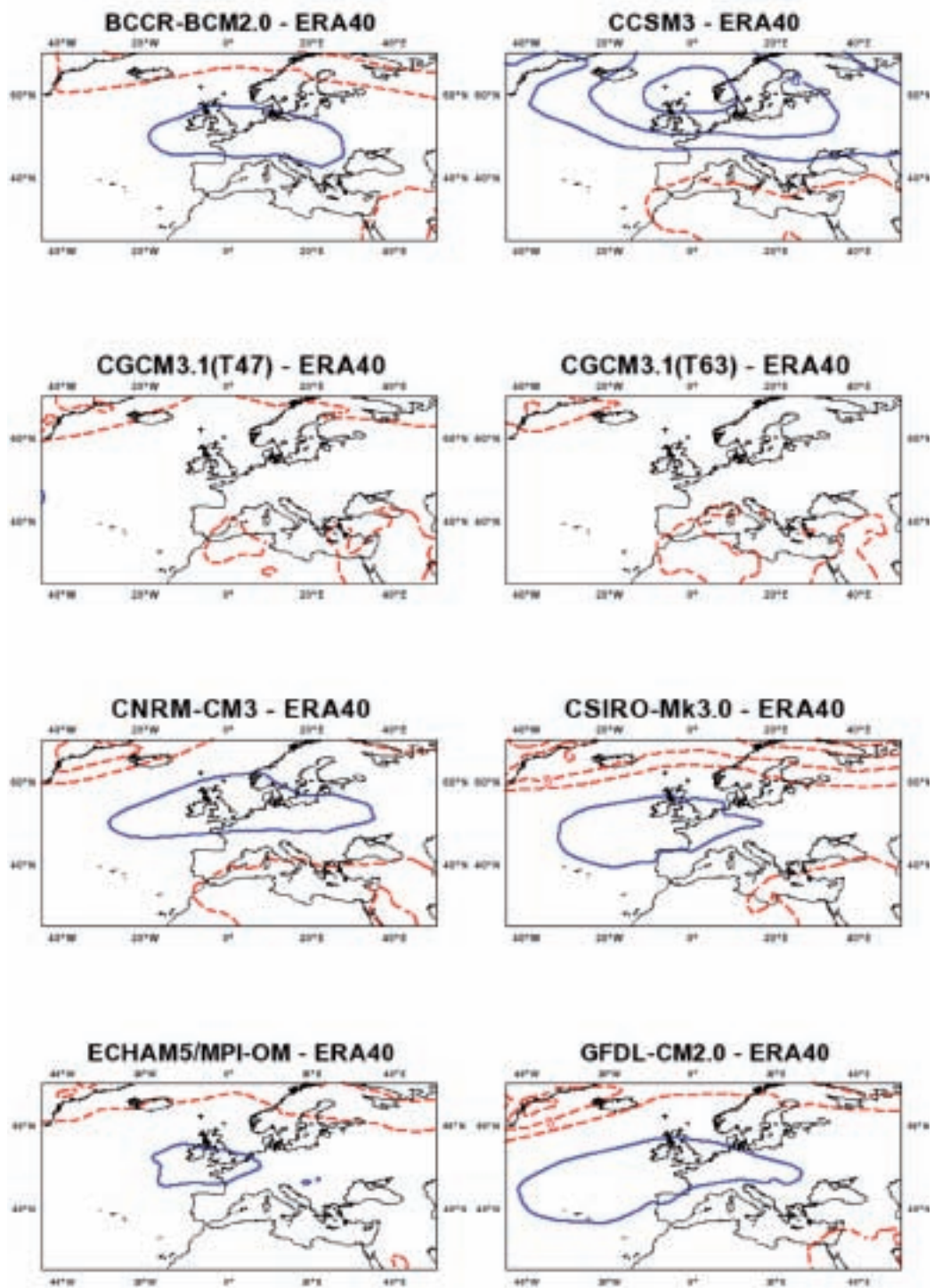


Figura E.3. Sesgo de los modelos con respecto al ERA40, intervalo de 4 hPa. Color azul valores negativos, color rojo valores positivos.

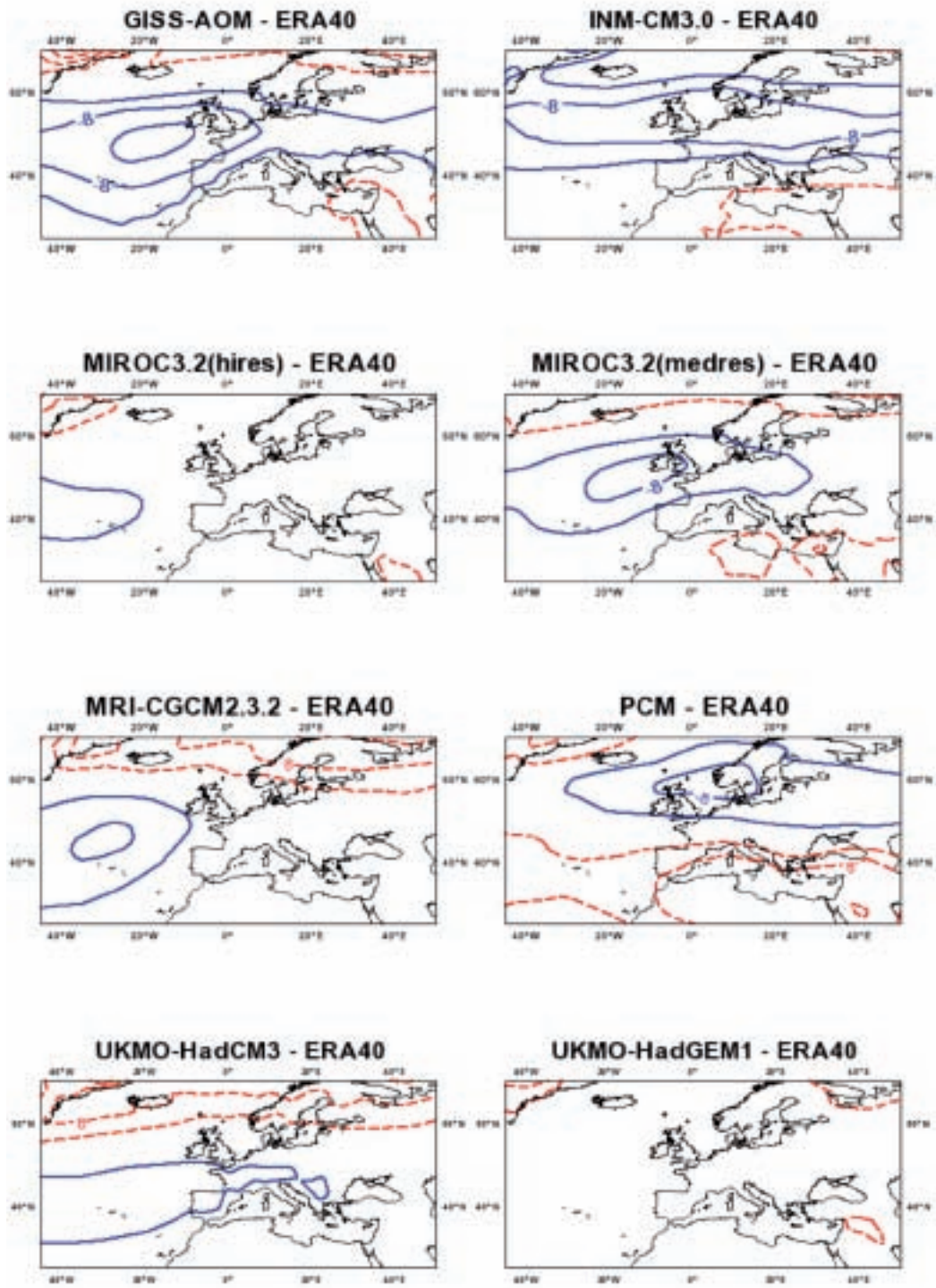


Figura E.3 (continuación). Sesgo de los modelos con respecto al ERA40, intervalo de 4 hPa. Color azul valores negativos, color rojo valores positivos.

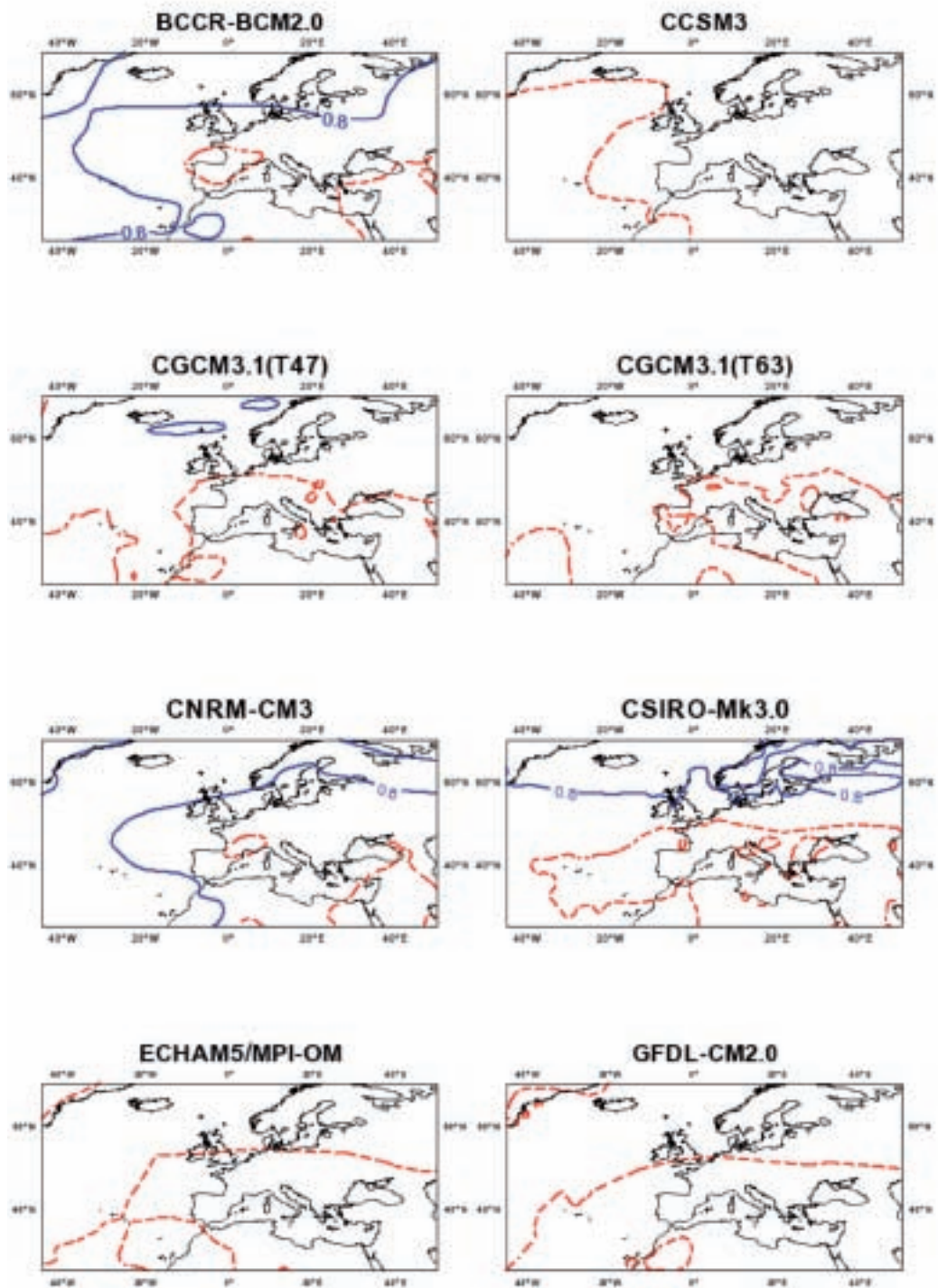


Figura E.4. Razón de la desviación estándar con respecto al ERA40 ($\sigma_{\text{modelo}}/\sigma_{\text{ERA40}}$) de los modelos, intervalo de 0,2. Color azul valores inferiores o iguales a 0,9, color rojo superiores o iguales a 1,1.

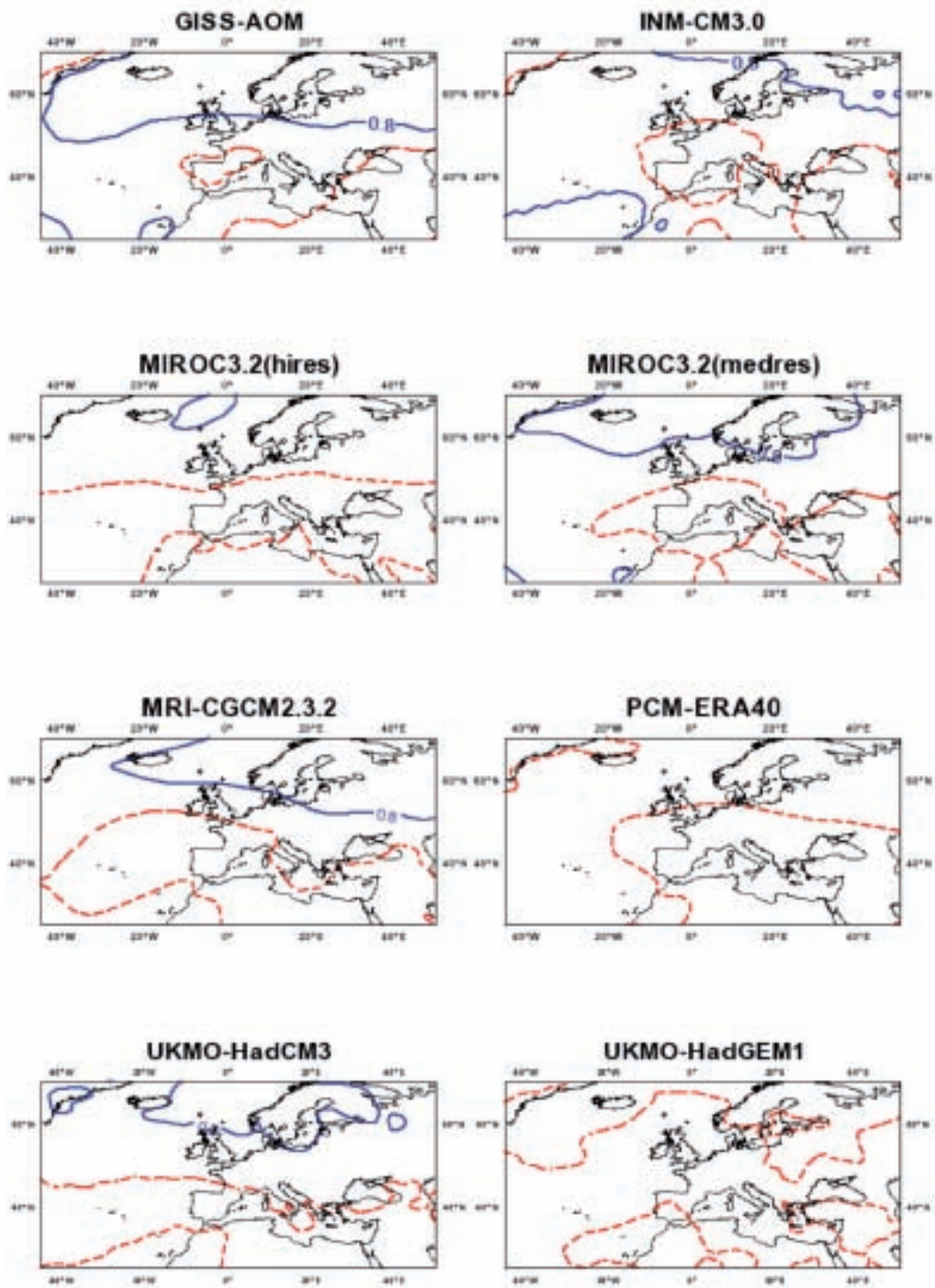


Figura E.4 (continuación). Razón de la desviación estándar con respecto al ERA40 ($\sigma_{\text{modelo}}/\sigma_{\text{ERA40}}$) de los modelos, intervalo de 0,2. Color azul valores inferiores o iguales a 0,9, color rojo superiores o iguales a 1,1.

ANEXO F.

Modos de variabilidad de los modelos AR4

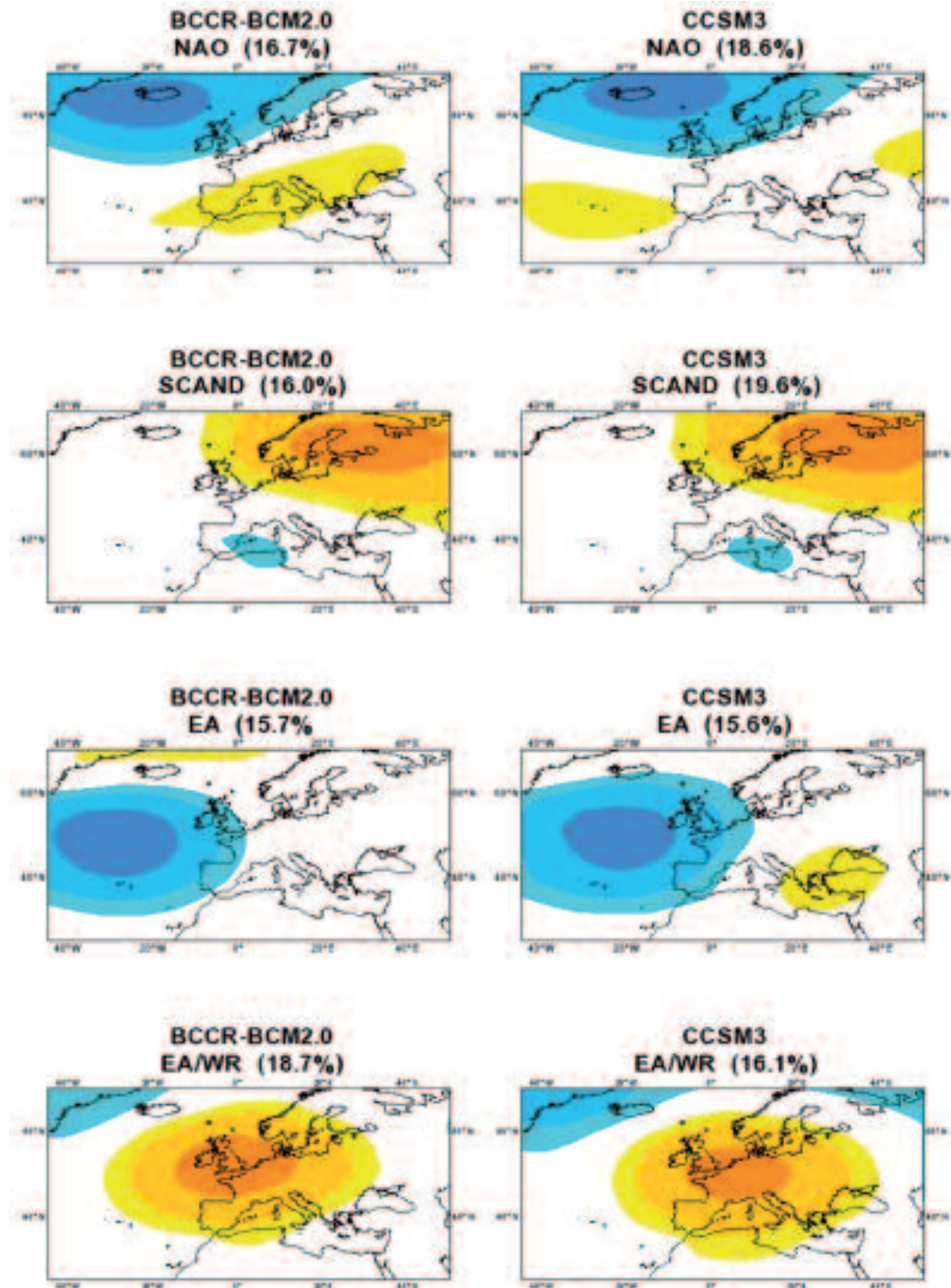


Figura F.1. Modos de variabilidad de los 16 modelos AR4. De arriba abajo NAO, SCAND, EA y EA/WR. Entre paréntesis la varianza explicada por cada modo.

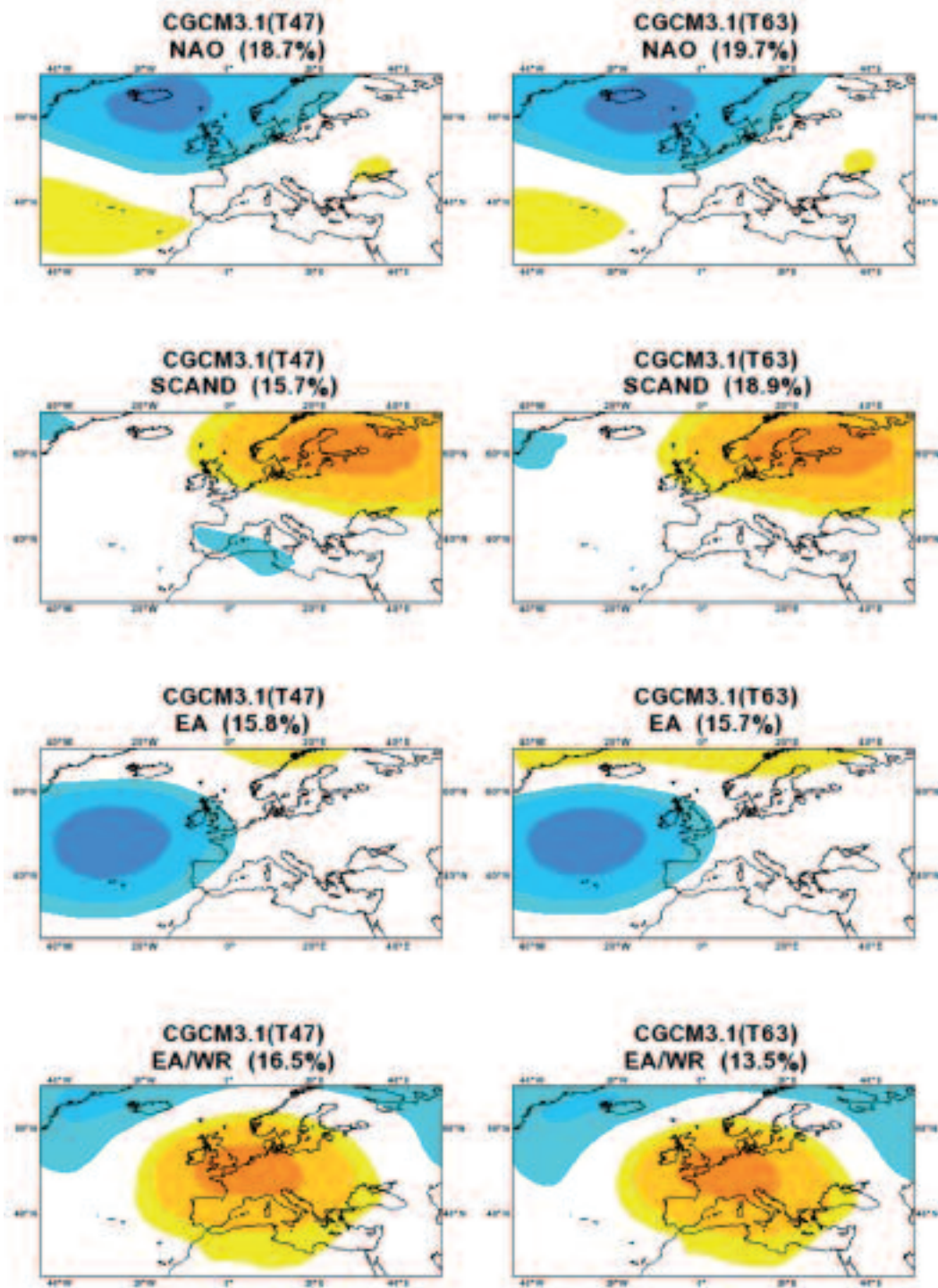


Figura F.1 (continuación). Modos de variabilidad de los 16 modelos AR4. De arriba abajo NAO, SCAND, EA y EA/WR. Entre paréntesis la varianza explicada por cada modo.

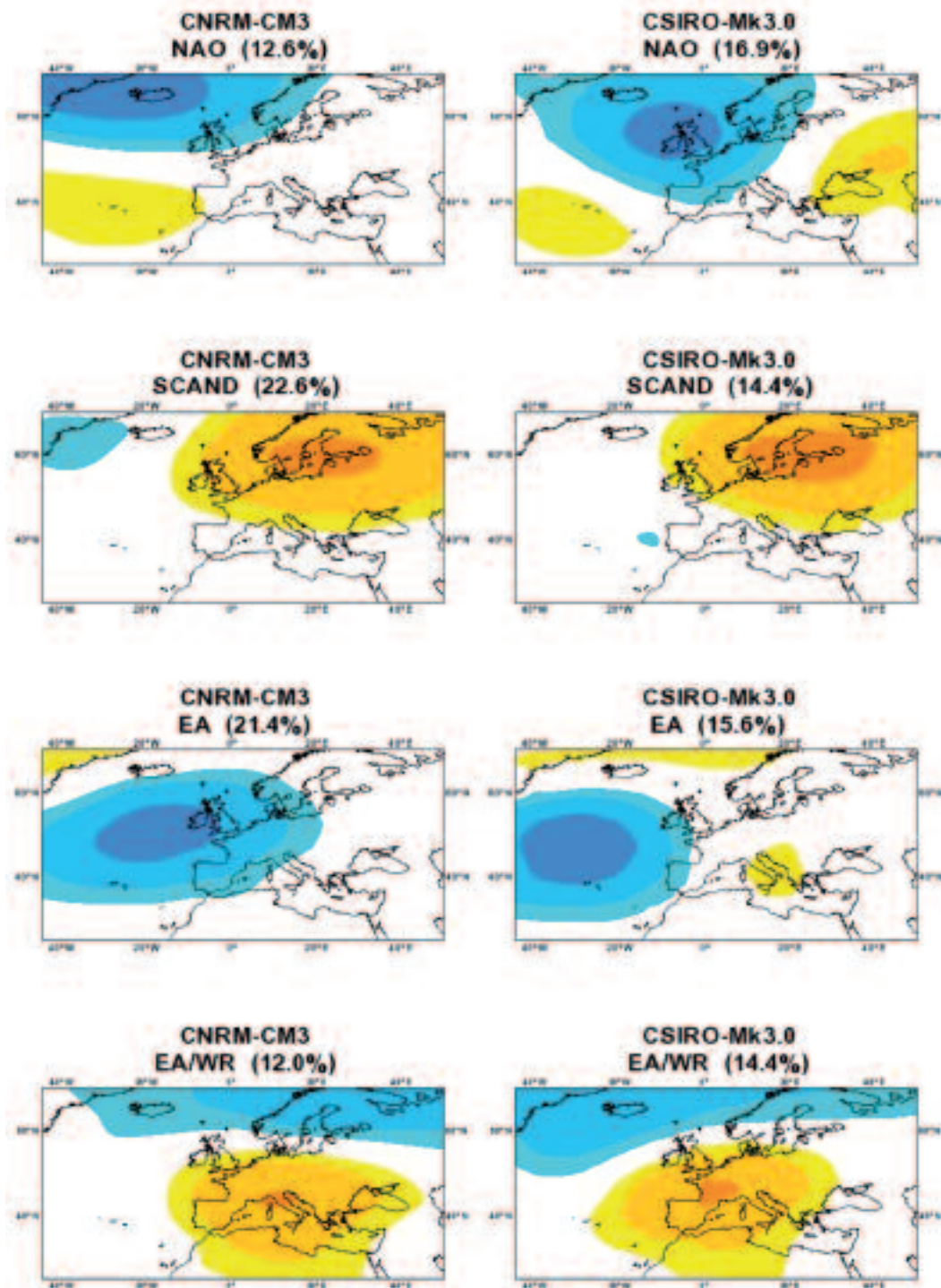


Figura F.1 (continuación). Modos de variabilidad de los 16 modelos AR4. De arriba abajo NAO, SCAND, EA y EA/WR. Entre paréntesis la varianza explicada por cada modo.

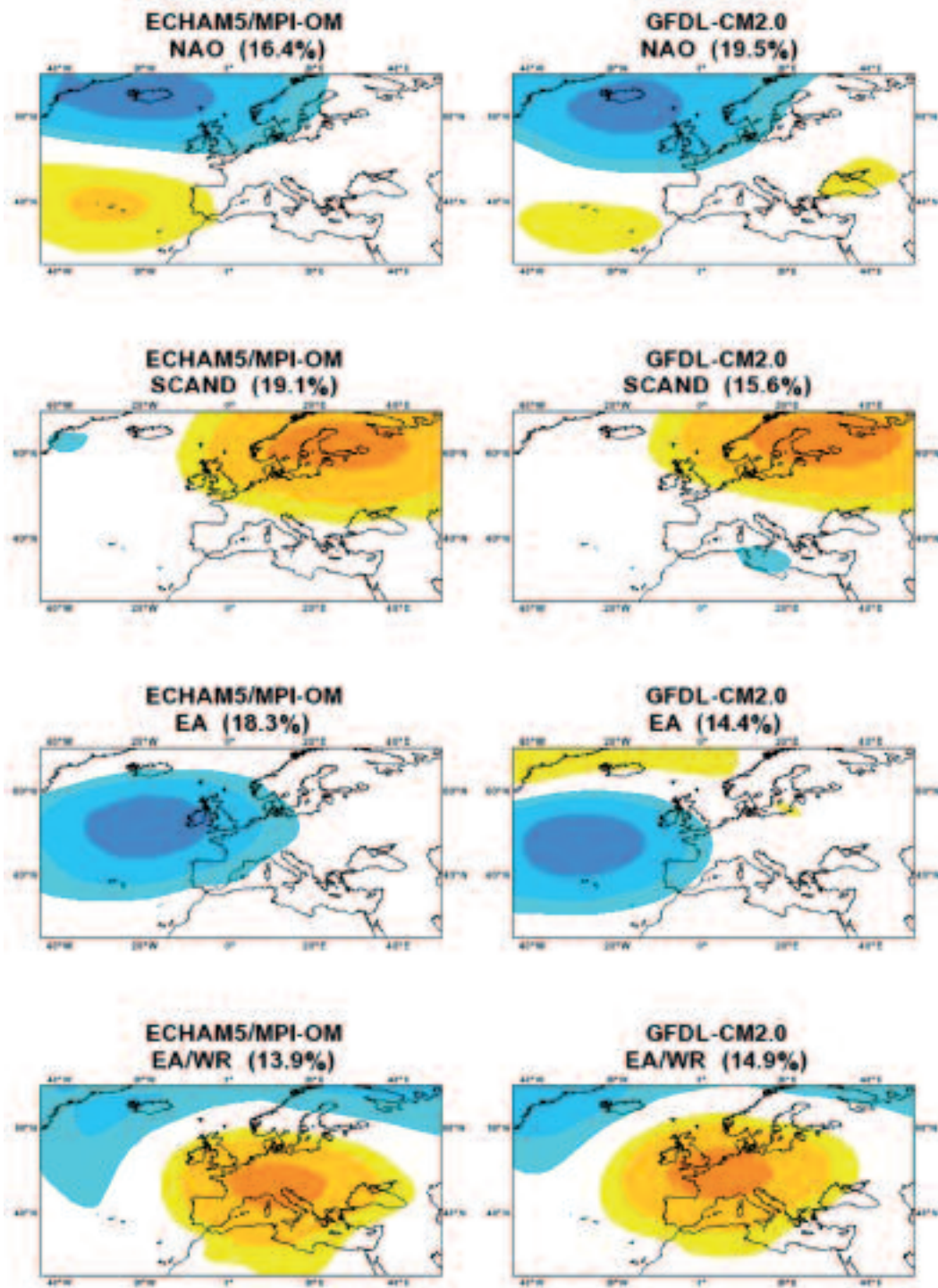


Figura F.1 (continuación). Modos de variabilidad de los 16 modelos AR4. De arriba abajo NAO, SCAND, EA y EA/WR. Entre paréntesis la varianza explicada por cada modo.

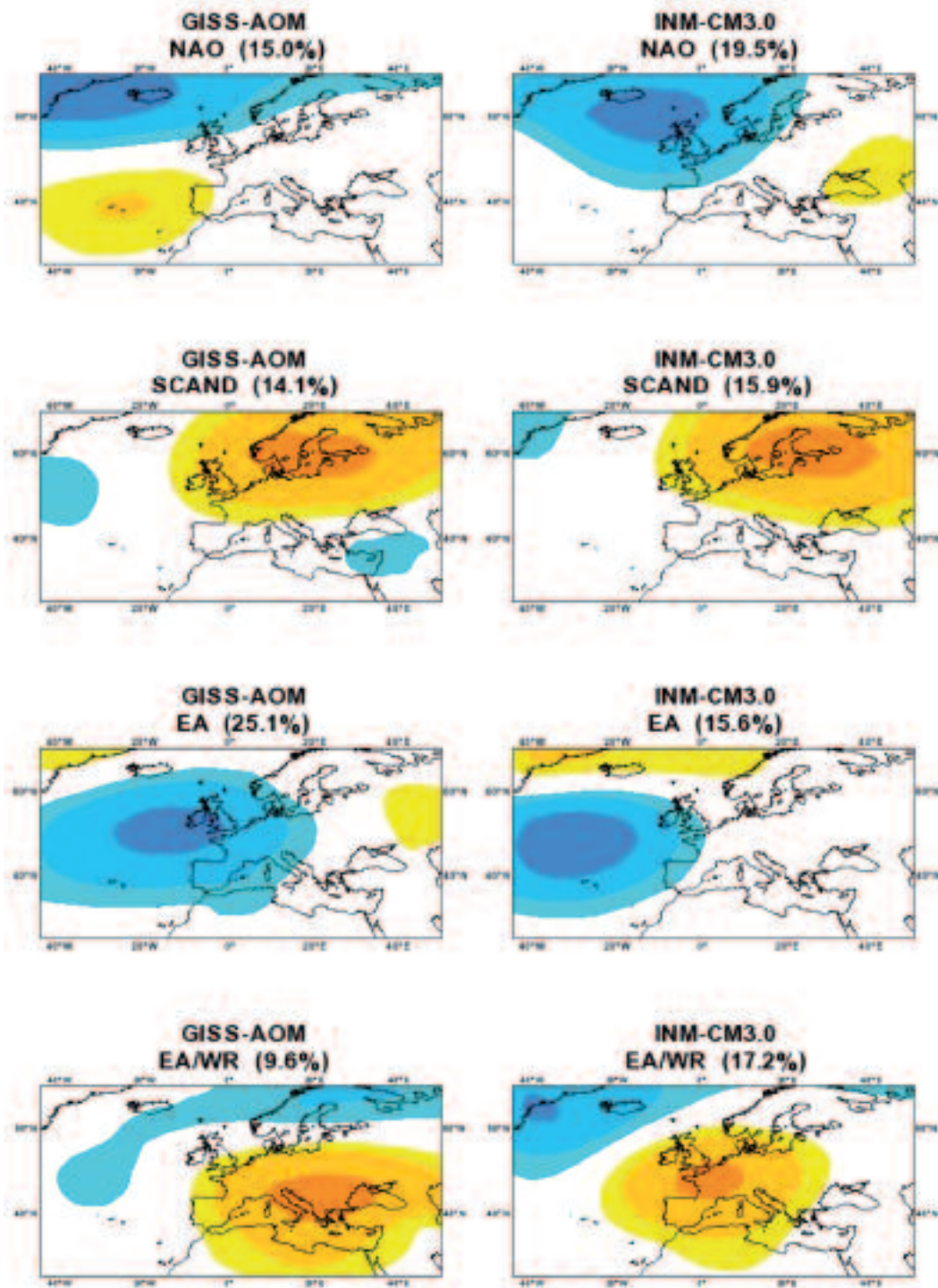


Figura F.1 (continuación). Modos de variabilidad de los 16 modelos AR4. De arriba abajo NAO, SCAND, EA y EA/WR. Entre paréntesis la varianza explicada por cada modo.

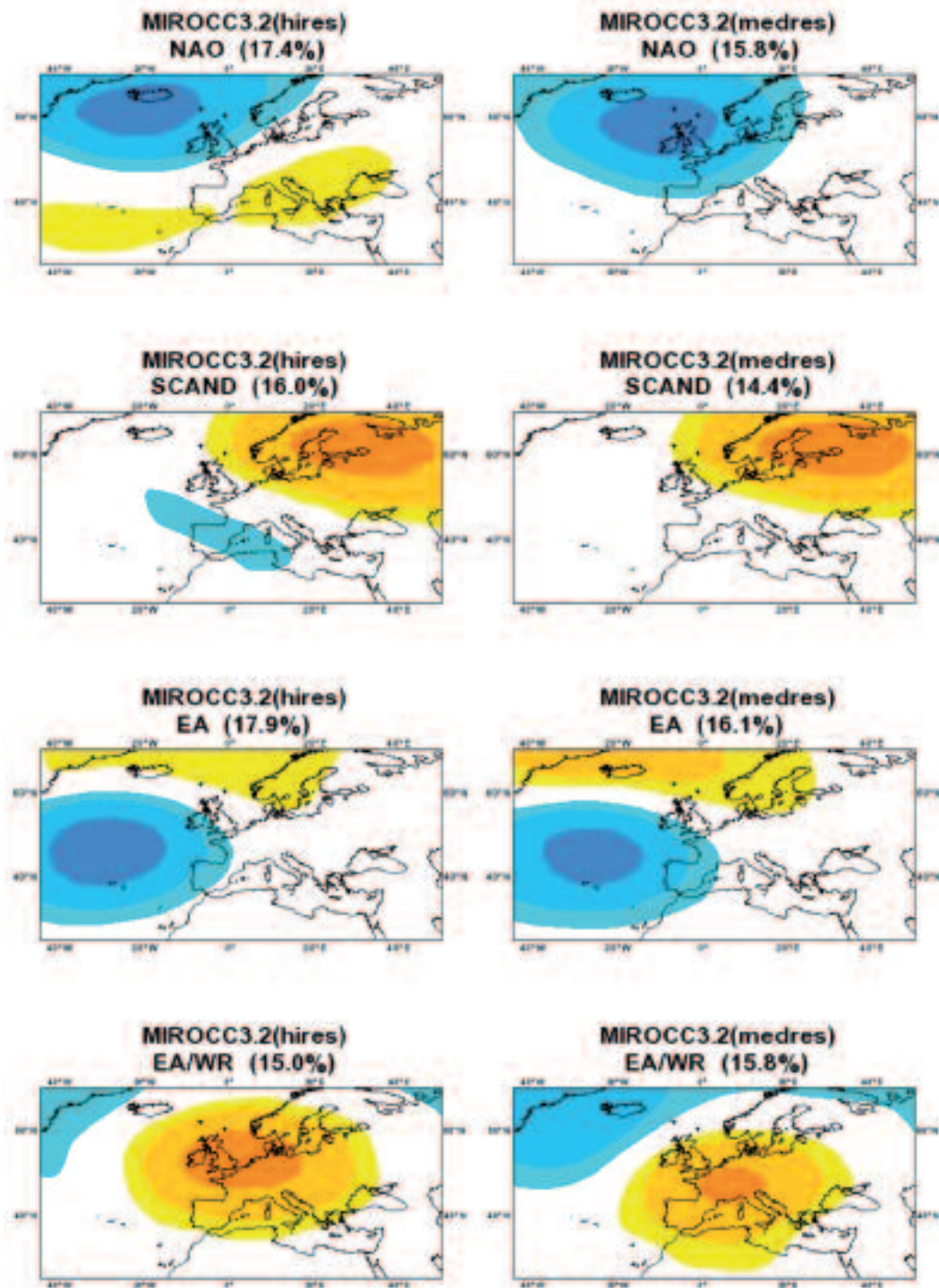


Figura F.1 (continuación). Modos de variabilidad de los 16 modelos AR4. De arriba abajo NAO, SCAND, EA y EA/WR. Entre paréntesis la varianza explicada por cada modo.

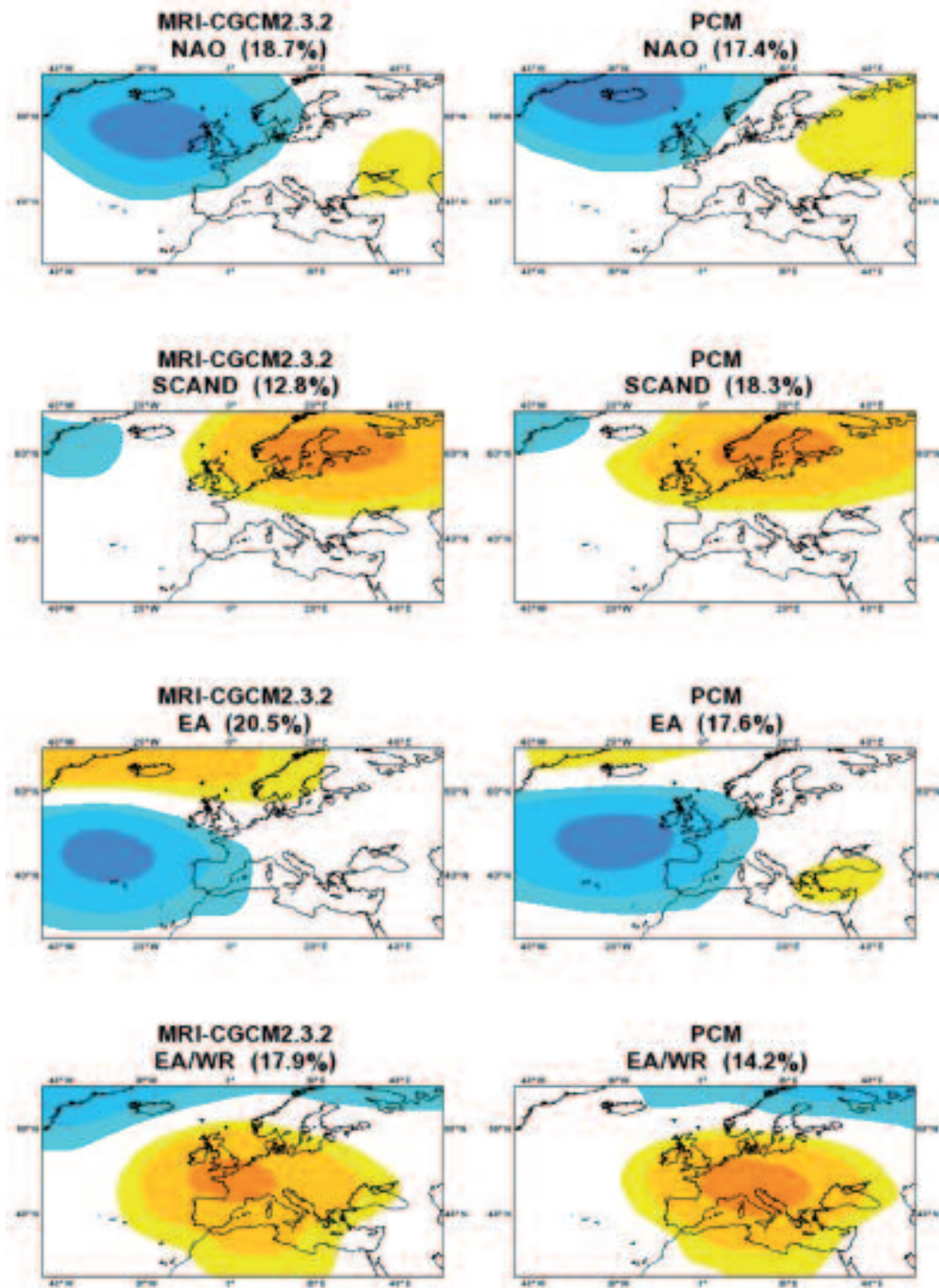


Figura F.1 (continuación). Modos de variabilidad de los 16 modelos AR4. De arriba abajo NAO, SCAND, EA y EA/WR. Entre paréntesis la varianza explicada por cada modo.

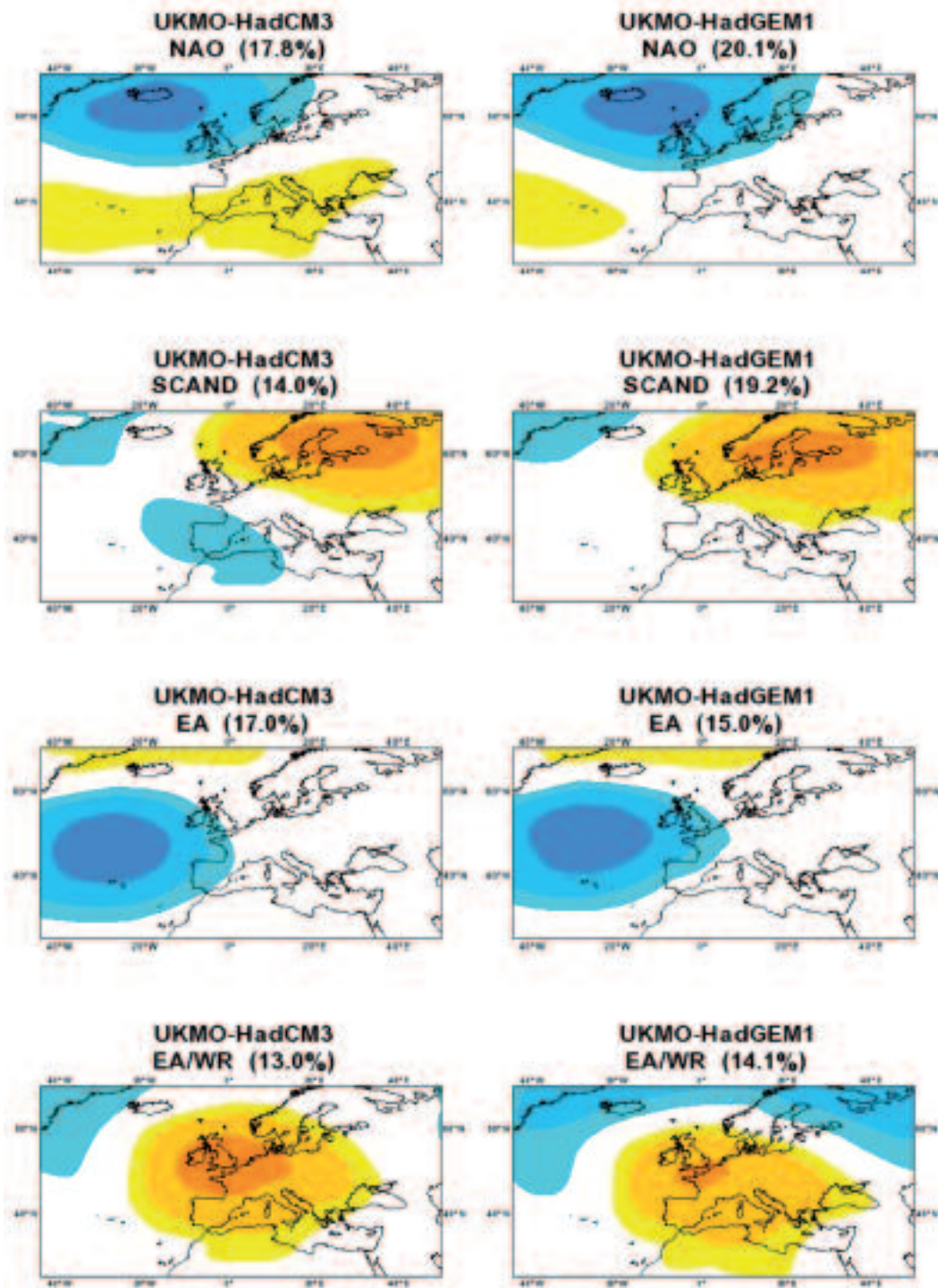


Figura F.1 (continuación). Modos de variabilidad de los 16 modelos AR4. De arriba abajo NAO, SCAND, EA y EA/WR. Entre paréntesis la varianza explicada por cada modo.

ANEXO G.

Distribución de las longitudes de eventos en los Tipos de Circulación

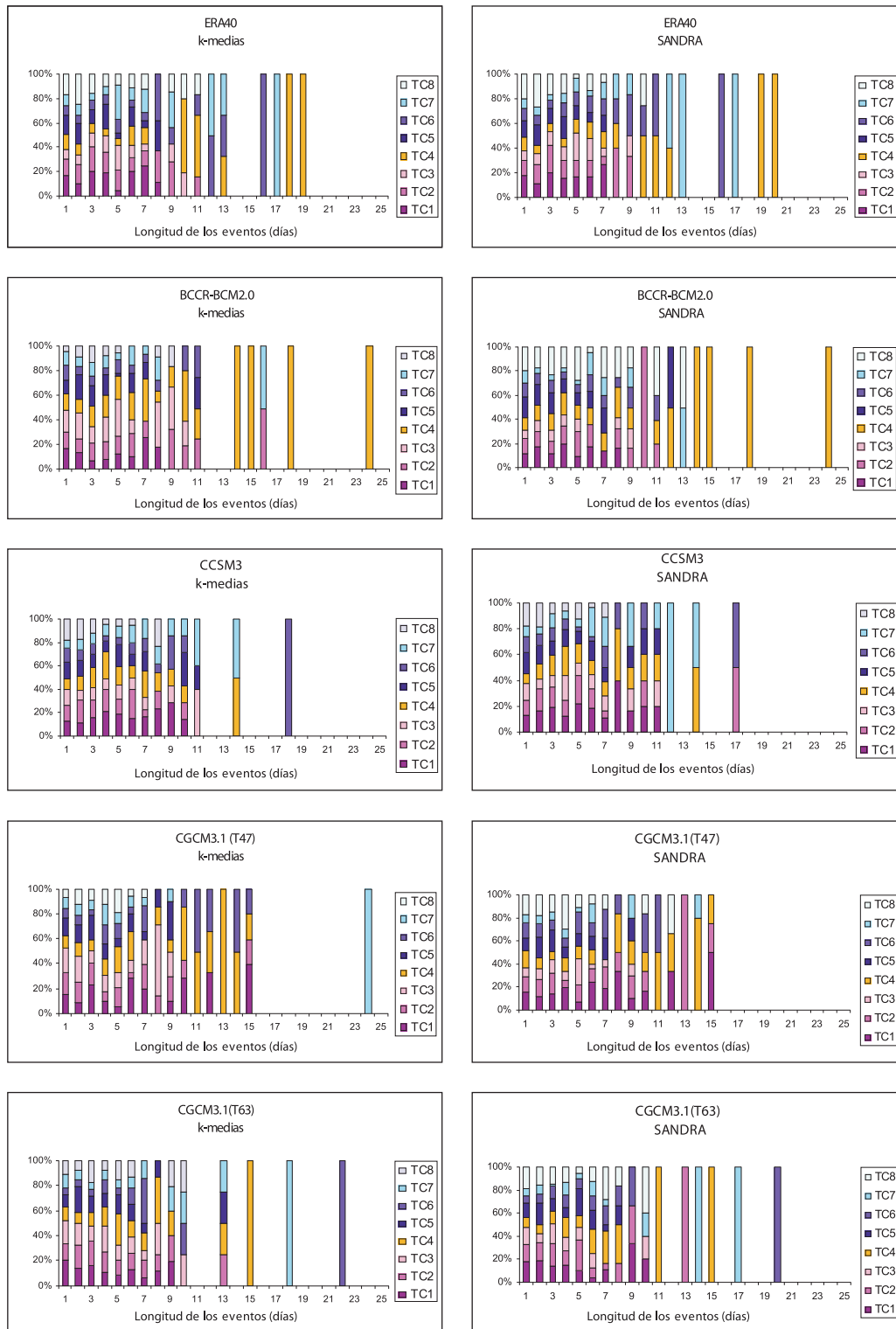


Figura G.1. Distribución de longitudes de eventos de distinta duración (en días) en los Tipos de Circulación para el ERA40 y los modelos AR4. Esquema de k-medias a la izquierda y de SANDRA a la derecha.



Figura G.1 (continuación). Distribución de longitudes de eventos de distinta duración (en días) en los Tipos de Circulación para el ERA40 y los modelos AR4. Esquema de k-medias a la izquierda y de SANDRA a la derecha.



Figura G.1 (continuación). Distribución de longitudes de eventos de distinta duración (en días) en los Tipos de Circulación para el ERA40 y los modelos AR4. Esquema de k-medias a la izquierda y de SANDRA a la derecha.

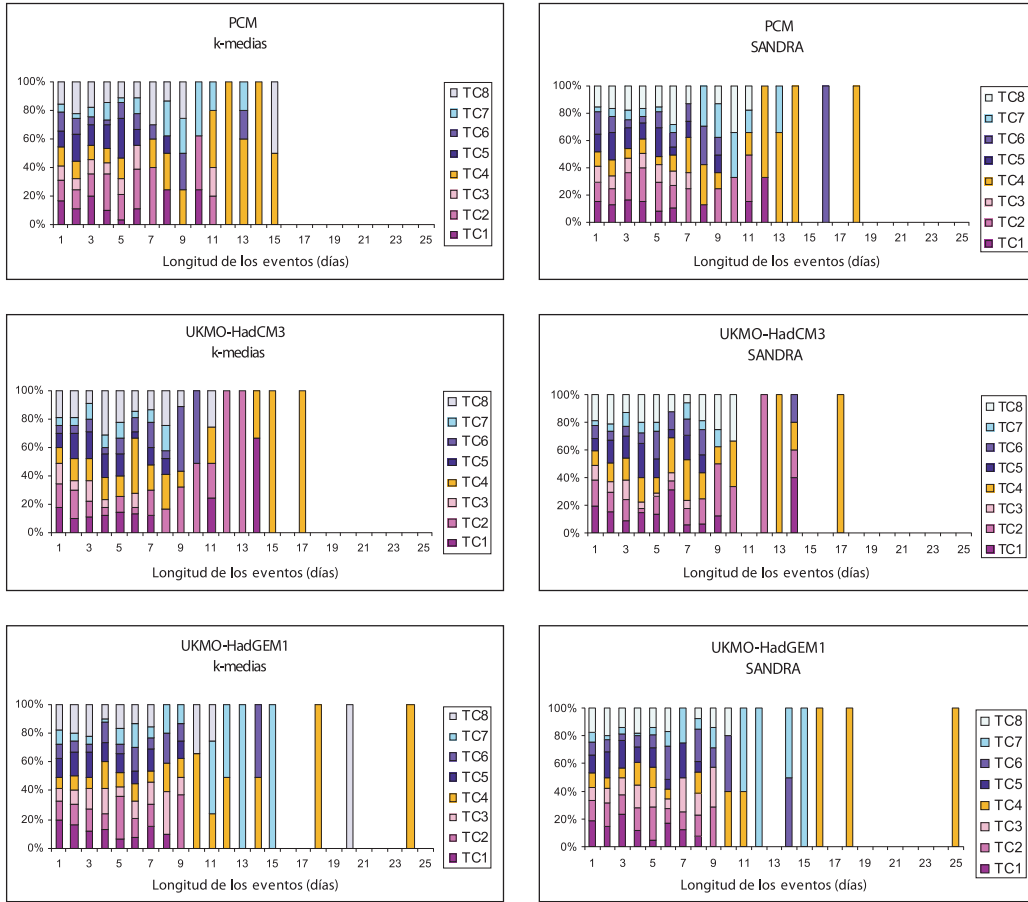


Figura G.1 (continuación). Distribución de longitudes de eventos de distinta duración (en días) en los Tipos de Circulación para el ERA40 y los modelos AR4. Esquema de k-medias a la izquierda y de SANDRA a la derecha.

ANEXO H.

Matrices de probabilidades de transición entre Tipos de Circulación

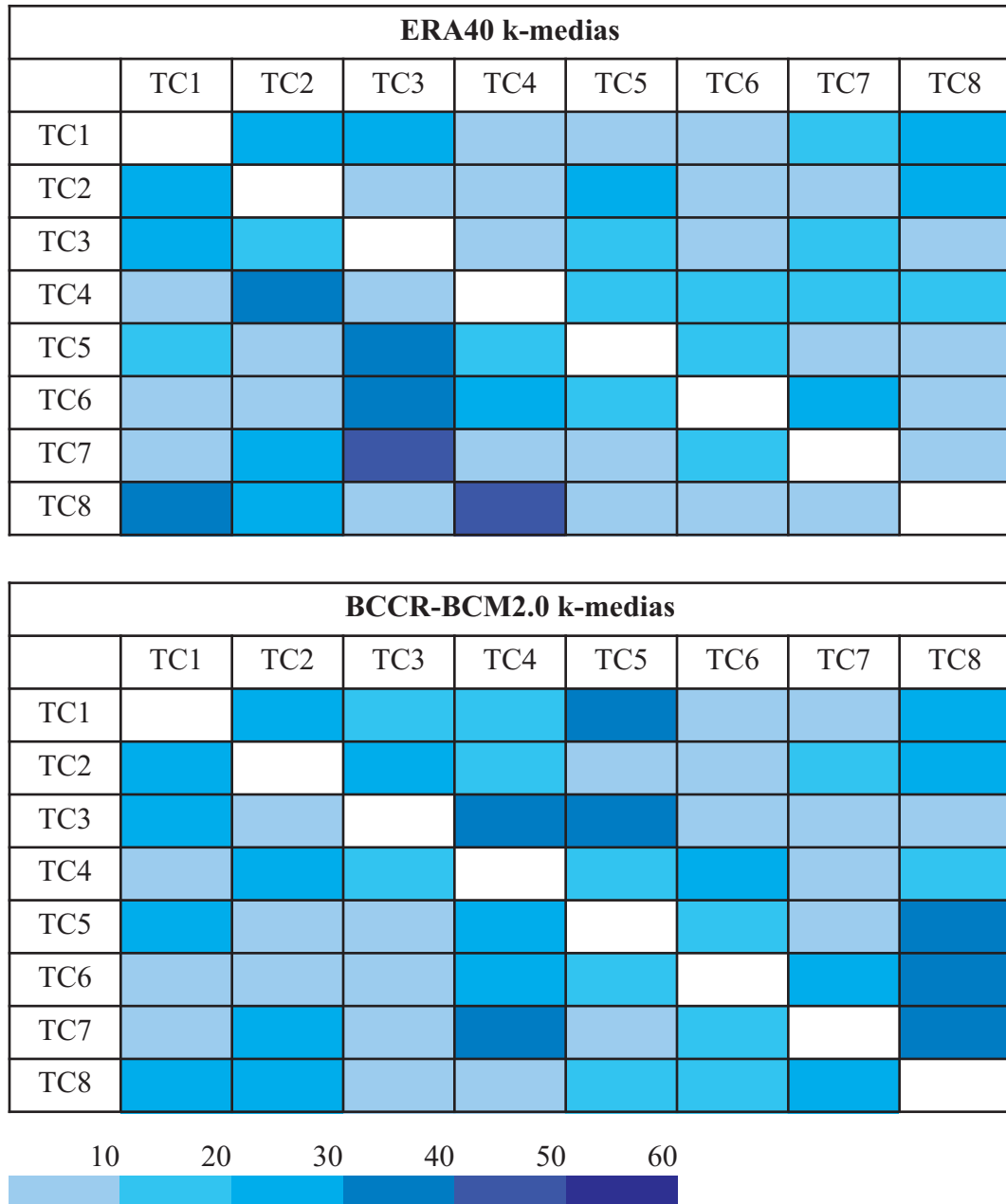


Figura H.1. Matrices de las probabilidades de transición (%) entre los Tipos de Circulación para el ERA40 y los modelos AR4 (esquema k-medias).

CCSM3 k-medias								
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8
TC1								
TC2								
TC3								
TC4								
TC5								
TC6								
TC7								
TC8								

CGCM3.1(T47) k-medias								
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8
TC1								
TC2								
TC3								
TC4								
TC5								
TC6								
TC7								
TC8								

CGCM3.1(T63) k-medias								
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8
TC1								
TC2								
TC3								
TC4								
TC5								
TC6								
TC7								
TC8								



Figura H.1 (continuación). Matrices de las probabilidades de transición (%) entre los Tipos de Circulación para el ERA40 y los modelos AR4 (esquema k-medias).

CNRM-CM3 k-medias								
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8
TC1								
TC2								
TC3								
TC4								
TC5								
TC6								
TC7								
TC8								

CSIRO-Mk3.0 k-medias								
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8
TC1								
TC2								
TC3								
TC4								
TC5								
TC6								
TC7								
TC8								

ECHAM5/MPI-OM k-medias								
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8
TC1								
TC2								
TC3								
TC4								
TC5								
TC6								
TC7								
TC8								



Figura H.1 (continuación). Matrices de las probabilidades de transición (%) entre los Tipos de Circulación para el ERA40 y los modelos AR4 (esquema k-medias).

GFDL-CM2.0 k-medias								
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8
TC1								
TC2								
TC3								
TC4								
TC5								
TC6								
TC7								
TC8								

GISS-AOM k-medias								
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8
TC1								
TC2								
TC3								
TC4								
TC5								
TC6								
TC7								
TC8								

INM-CM3.0 k-medias								
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8
TC1								
TC2								
TC3								
TC4								
TC5								
TC6								
TC7								
TC8								



Figura H.1 (continuación). Matrices de las probabilidades de transición (%) entre los Tipos de Circulación para el ERA40 y los modelos AR4 (esquema k-medias).

MIROC3.2(hires) k-medias								
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8
TC1								
TC2								
TC3								
TC4								
TC5								
TC6								
TC7								
TC8								

MIROC3.2 (medres) k-medias								
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8
TC1								
TC2								
TC3								
TC4								
TC5								
TC6								
TC7								
TC8								

MRI-CGCM2.3.2 k-medias								
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8
TC1								
TC2								
TC3								
TC4								
TC5								
TC6								
TC7								
TC8								



Figura H.1 (continuación). Matrices de las probabilidades de transición (%) entre los Tipos de Circulación para el ERA40 y los modelos AR4 (esquema k-medias).

PCM k-medias								
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8
TC1								
TC2								
TC3								
TC4								
TC5								
TC6								
TC7								
TC8								

UKMO-HadCM3 k-medias								
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8
TC1								
TC2								
TC3								
TC4								
TC5								
TC6								
TC7								
TC8								

UKMO-HadGEM1 k-medias								
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8
TC1								
TC2								
TC3								
TC4								
TC5								
TC6								
TC7								
TC8								



Figura H.1 (continuación). Matrices de las probabilidades de transición (%) entre los Tipos de Circulación para el ERA40 y los modelos AR4 (esquema k-medias).

REFERENCIAS

- ALEXANDER, L. V. ET AL. (2006): Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.*, **111**, D05109, doi: 10.1029/2005JD006290.
- ANAGNOSTOPOULOU, C. H. R., K. TOLIKA, P. MAHERAS, H. KUTIEL y H. A. FLOCAS (2007): Performance of the general circulation HadAM3P model in simulating circulation types over the Mediterranean region. *Int. J. Climatol.*, doi: 10.1002/joc.1521.
- BARNSTON, A. G. y R. E. LIVEZEY (1987): Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Weather Rev.*, **115**, 983-1126.
- BELL, G. D. y M. S. HALPERT (1995): Atlas of intraseasonal and interannual variability, 1986-1993. NOAA Atlas No. 12. Climate Prediction Center, NOAA/NWS/NMC, Washington D. C.
- BRUNET, M., M. J. CASADO, M. DE CASTRO, P. GALÁN, J. A. LÓPEZ, J. M. MARTÍN, A. PASTOR, E. PETISCO, P. RAMOS, J. RIBALAYGUA, E. RODRÍGUEZ y L. TORRES (2008): Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España, Agencia Estatal de Meteorología, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (ISBN: 978-84-8320-470-2, 157 páginas).
- CAHYNOVÁ, M. y R. HUTH (2009): Enhanced lifetime of atmospheric circulation types over Europe: fact or fiction? *Tellus*, **61A**, 407-416, doi: 10.1111/j.1600-0870.2009.00393.x.
- CASADO, M. J., M. A. PASTOR y F. J. DOBLAS-REYES (2008): Euro-Atlantic circulation types and modes of variability in winter. *Theor. Appl. Climatol.*, **96**, Issue 1-2, 17-29, doi: 10.1007/s00704-008-0036-2.
- CASADO, M. J., M. A. PASTOR y F. J. DOBLAS-REYES (2010): Links between circulation types and precipitation over Spain. *Phys. Chem. Earth*, **35**, 437-447.
- CASADO, M. J. y M. A. PASTOR (2011): Use of variability modes to evaluate AR4 climate models over the Euro-Atlantic region. *Clim. Dyn.*, doi: 10.1007/s00382-011-1077-2.
- CASSANO, J. P., P. UOTILA y A. LYINCH (2006): Changes in synoptic weather patterns in the Polar Regions in the twentieth and twenty-first centuries. Part I: Arctic. *Int. J. Climatol.*, **26**, 1027-1049.
- CASSOU, C., L. TERRAY y A. S. PHILLIPS (2005): Tropical Atlantic influences on European heatwaves, *J. Climate*, **18**, 2085-2111.
- CASSOU, C. y E. GUILYARDI (2007): Modes de variabilité et changement climatique. Synthèse du quatrième rapport d'évaluation du Giec. *La Météorologie*, **59**, 22-30.
- CHEN, C.-T. y T. KNUTSON (2008): On the verification and comparison of extreme rainfall indices from climate models. *J. Climate*, **21**, 1605-1621.

- CHRISTENSEN, J. H. y O. B. CHRISTENSEN (2007): A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Clim. Change*, **81** (Supplement 1), 7-30, doi: 1007/s10584-006-9210-7.
- CHRISTENSEN ET AL. (2009): Project no. GOCE-CT-2003-505539. Project acronym: ENSEMBLES. Project title: ENSEMBLE-based Predictions of Climate Changes and their Impacts.
- COLLINS, M., B. B. B. BOOTH, G. HARRIS, J. M. MURPHY, D. M. H. SEXTON y M. J. WEBB (2006): Towards quantifying uncertainty in transient climate change. *Clim. Dyn.*, **27**, 127-147.
- COLLINS, W. D. ET AL. (2006b): The Community Climate System Model Version 3 (CCSM3). *J. Climate*, **19**, 2122-2143.
- CORTI, S., F. MOLteni y T. PALMER (1999): Signature of recent climate change in frequencies of natural atmospheric circulation regimes. *Nature*, **398**, 799-802.
- DAI, A. (2006): Precipitation characteristics in eighteen coupled climate models. *J. Climate*, **19**, 4605-4630.
- DELWORTH, T. L. ET AL. (2006): GFDL's CM2 Global Coupled Climate Models. Part I: Formulation and simulation characteristics. *J. Clim.*, **19**, 643-674.
- DEMUZERE, M., M. WERNER, N. P. M. VAN LIPZIG y E. ROECKNER (2009): An analysis of present and future ECHAM5 pressure fields using a classification of circulation patterns. *Int. J. Climatol.*, **29**, 1796-1811.
- DEMUZERE, M., P. KASSOMENOS y A. PHILLIP (2010): The COST733 circulation type classification software: an example for surface ozone concentrations in Central Europe. *Theor. Appl. Climatol.*, doi: 10.1007/s00704-010-0378-4.
- DIANSKY, N. A. y E. M. VOLODIN (2002): Simulation of the present day climate with a coupled atmosphere-ocean general circulation model. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, **38**, 732-747.
- DIANSKY, N. A., A. V. BAGNO y V. B. ZALESNY (2002): Sigma model of global ocean circulation and its sensitivity to variations in wind stress. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, **38**, 477-494.
- ERRASTI, I., A. EZCURRA, J. SÁENZ y G. IBARRA-BERASTEGUI (2011): Validation of IPCC AR4 models over the Iberian Peninsula. *Theor. Appl. Climatol.*, **103**, 61-79, doi: 10.1007/s00704-010-0282-y.
- FAGGIAN, P. y F. GIORGI (2009): An analysis of global model projections over Italy, with particular attention to the Italian Greater Alpine Region (GAR). *Clim. Change*, Volume **96**, 239-258, doi: 10.1007/s10584-009-9584-4.
- FELDSTEIN, S. B. (2000): The timescale, power spectra and climate noise properties of teleconnection patterns. *J. Climate*, **13**, 4340-4440.
- FERRO, C. A. T., A. HANNACHI y D. B. STEPHENSON (2005): Simple non-parametric techniques for exploring changing probability distributions of weather. *J. Climate*, **18**, 4344-4354.

- FLATO, G. M., cited (2005): The Third Generation Coupled Global Climate Model (CGCM3). [Disponible en línea en <http://www.cccma.bc.ec.gc.ca/models/cgcm3.shtml>].
- FUREVIK, T., M. BENTSEN, H. DRANGE, I. K. T. KINDEM, N. G. KVAMSTØ y A. SORTEBERG (2003): Description and evaluation of the Bergen climate model: ARPEGE coupled with MICOM. *Clim. Dynam.*, **21**, 27-51.
- FINNIS, J., J. CASSANO, M. HOLLAND, M. SERREZE y P. UOTILLA (2009): Synoptically Forced Hydroclimatology of Major Arctic Watersheds in General Circulation Models, Part 1: the Mackenzie River Basin. *Int. J. Climatol.*, **29**, 1226-1243.
- FRICH, P., L. V. ALEXANDER, P. DELLA-MARTA, B. GLEASON, M. HAYLOCK, A. M. G. KLEIN y T. PETERSON (2002): Observed Coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Clim. Res.*, **19**, 193-212.
- GARCÍA PÉREZ, A. (1992): Estadística aplicada: Conceptos Básicos. Universidad Nacional de Educación a Distancia, 405 páginas.
- GATES, W. L. (1992): AMIP: The Atmospheric Model Intercomparison Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **73**, 1962-1970.
- GATES, W. L., J. S. BOYLE, C. COVEY, C. G. DEASE, C. M. DOUTRIAUX, R. S. DRACH, M. FIORINO, P. J. GLECKLER, S. MARLAIS, T. J. PHILLIPS, G. L. POTTER, B. D. SANTER, K. R. SPERBER, K. E. TAYLOR y D. N. WILLIAMS (1999): An overview of the results of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP I). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 29-55.
- GIORGI, F. y L. O. MEARNES (2002): Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via the *Reliability Ensemble Averaging* (REA) method. *J. Climate*, **15**, 1141-1158.
- GIORGI, F. (2006): Climate Change hot-spots. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L08707, doi: 10.1029/2006GL025734.
- GLECKLER, P. J., K. E. TAYLOR y C. DOUTRIAUX (2008): Performance metrics for climate models, *J. Geophys. Res.*, **113**, D06104, doi: 10.1029/2007JD008972.
- GORDON, C., C. COOPER, C. A. SENIOR, H. T. BANKS, J. M. GREGORY, T. C. JOHNS, J. F. B. MITCHELL y R. A. WOOD (2000): The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Clim. Dyn.*, **16**, 147-168.
- GORDON, H. B. ET AL. (2002): The CSIRO Mk3 Climate System Model. CSIRO Atmospheric Research Tech. Paper 60, 134 pp. [Disponible en línea en http://www.cmar.csiro.au/e-print/open/gordon_2002a.pdf].
- HAGEDORN, R., F. J. DOBLAS-REYES y T. N. PALMER (2005): The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting. Part I: Basic concept. Part II: Calibration and combination. *Tellus*, **57A**, 219-252.
- HANDORF, D. y K. DETHLOFF (2009): Atmospheric teleconnections and flow regimes under future climate projections. *Eur. Phys. J. Special Topics*, **174**, 237-255.

- HARTIGAN, J. A. y M. A. WONG (1979): A K-means Clustering Algorithm. *Applied Statistic*, **28**, 100-108.
- HASSON, A. E. A., G. A. MILLS, B. TIMBAL y K. WALSH (2009): Assessing the impact of climate change on extreme fire weather events over southeastern Australia. *Clim. Res.*, **39**, 159-172.
- HASUMI, H. y S. EMORI (2004): K-1 coupled GCM (MIROC) description. K-1 Tech. Rep. 1, Center for Climate System Research, University of Tokyo, 39 pp. [Disponible en línea en <http://www.ccsr.u-tokyo.ac.jp/kyosei/hasumi/MIROC/tech-repo.pdf>].
- HAYLOCK, M. R., N. HOSFSTRA, A. M. G. KLEIN TANK, E. J. KLOK, P. JONES y M. NEW (2008): European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation for 1950-2006. *J. Geophys. Res.*, **113**, D20119, doi: 10.1029/2008.
- HERTIG, E., S. SEUBERT y J. JACOBET (2010): Temperature extremes in the Mediterranean area: trends in the past and assessments for the future. *Nat. Hazards Earth Sys.*, **10**, 2039-2050.
- HOURLIN, F., I. MUSAT, S. BONY, P. BRACONNOT, F. CODRON, J. L. DUFRESNE, L. FAIRHEAD, M. A. FILIBERTI, P. FRIEDLINGSTEIN, J. Y. GRANDPEIX, G. KRINNER, P. LEVAN, Z. X. LI y F. LOTT (2006): The LMDZ4 general circulation model: climate performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection. *Clim. Dyn.*, **27**(7 8), 787-813.
- HUTH, R. (1997): Continental-Scale circulation in the UKHI GCM. *J. Climate*, **10**, 1545-1561.
- HUTH, R. (2000): A circulation classification scheme applicable in GCM studies. *Theor. Appl. Climatol.*, **67**, 1-18.
- HUTH, R., C. BECK, A. PHILIPP, M. DEMUZERE, Z. USTRNUL, M. CAHYNOVÁ, K. KYSELÝ y O. E. TVEITO (2008): Classifications of atmospheric circulation patterns: recent advances and applications. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, **1146**, 105-152.
- 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. S. SALOMON, D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K. B. AVERYT, M. TIGNOR y K. L. MILLER (eds.). Cambridge University Press, UK & New York, NY, USA, 996 pp.
- JACOB, D. ET AL. (2007): An intercomparison of regional climate models for Europe: design of the experiments and model performance climatic change. Prudence, Special issue, **81**, suplement: 1, 31-52.
- JAMES, P. M. (2007): An objective classification method for Hess and Brezowsky Grosswetterlagen over Europe. *Theor. Appl. Climatol.*, **88**, 17-42.
- JOHNS, T. C. ET AL. (2006): The New Hadley Centre Climate Model (HadGEM1): Evaluation of coupled simulations. *J. Climate*, **19**, 1327-1353.
- JOLLIFFE, I. T. y D. B. STEPHENSON (2003): Forecast Verification. Wiley, New York, 240 pp.

- KALNAY, E. M. ET AL. (1996): The NCEP/NCAR 40 year reanalysis project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **77**, 437-471.
- KHARIN, V. V. y F. ZWIERS (2000): Changes in the extremes in an ensemble of transient climate simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM. *J. Climate*, **13**, 3760-3788.
- KHARIN, V. V. y F. W. ZWIERS (2005): Estimating extremes in transient climate change simulations. *J. Climate*, **18**, 1156-1173.
- KHARIN, V. V. y X. ZHANG (2005): Intercomparison of near surface temperature and precipitation extremes in AMIP-2 simulations. *J. Climate*, **18**, 5201-5223.
- KHARIN, V. V., F. W. ZWIERS, X. ZHANG y G. C. HEGERL (2007): Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of global coupled model simulations. *J. Climate*, **20**, 1419-1444.
- KIKTEV, D. ET AL. (2003): Comparison of modeled and observed trends in indices of daily climate extremes. *J. Climate*, **16**, 3560-3571.
- KJELLSTRÖM, E. ET AL. (2010): Daily and monthly temperature and precipitation statistics as performance indicators for regional climate models. *Clim. Res.*, **44**, 135-150.
- KNUTTI, R., G. A. MEEHL, M. R. ALLEN y D. A. STAINFORTH (2006): Constraining climate sensitivity from the seasonal cycle in surface temperature. *J. Climate*, **19**, 4224-4233.
- KNUTTI, R. (2008): Should we believe model predictions of future climate change? *Triennial Issue Earth Science of Philosophical Transactions of the Royal Society A*, **366**, 4647-4664.
- KNUTTI, R. (2010): The end of model democracy? *Clim. Change*, **102**, 395-404.
- KNUTTI, R., G. ABRAMOWITZ, M. COLLINS, V. EYRING, P. J. GLECKLER, B. HEWITSON y L. MEARN (2010a): Good Practice Guidance Paper on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections. En: *Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections* [STOCKER, T. F., D. QIN, G.-K. PLATTNER, M. TIGNOR and P. M. MIDGLEY (eds.)]. IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern, Bern, Switzerland.
- KNUTTI, R., R. FURRER, C. TEBALDI y G. A. MEEHL (2010b): Challenges in combining projections from multiple climate models. *J. Climate*, **23**, 2739-2758.
- KÜTTEL, M. ET AL. (2010): Multidecadal changes in winter circulation-climate relationships in Europe: frequency variations, within-type modifications, and long-term trends. *Clim. Dyn.*, doi: 10.1007/s00382-009-0737.
- LAMBERT, S. J. y G. J. BOER (2001): CMIP1 evaluation and intercomparison of coupled climate models. *Clim. Dyn.*, **17**, 83-106.

- LAPP, S., J. BYRNE, S. KIENZLE y I. TOWNSHEND (2002): Linking global circulation model synoptics and precipitation for western North America. *Int. J. Climatol.*, **22**, 1807-1817.
- LEGRAS, B. y M. GHIL (1985): Persistent anomalies, blocking and variations in atmospheric predictability. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 433-471.
- LUO, Q., W. BELLOTTI, M. WILLIAMS y B. BRYAN (2005): Potential impact of climate change on wheat yield in South Australia, *Agr. Forest Meteorol.*, **132**, no. 3-4, 273-285.
- MARTIN, G. M., M. A. RINGER, V. D. POPE, A. JONES, C. DEARDEN y T. J. HINTON (2006): The physical properties of the atmosphere in the new Hadley Centre Global Environmental Model (HadGEM1). Part I: Model description and global climatology. *J. Climate*, **19**, 1274-1301.
- MÁXINO, C. C., B. J. MCAVANEY, A. J. PITMAN y S. E. PERKINS (2008): Ranking the AR4 climate models over the Murray-Darling Basin using simulated maximum temperature, minimum temperature and precipitation. *Int. J. Climatol.*, **28**, 1097-1112.
- McKENDRY, I. G., D. G. STEYN y G. MCBEAN (1995): Validation of synoptic circulation patterns simulated by the Canadian climate centre general circulation model for western North America. *Atmos. Ocean*, **33**, 809-825.
- McKENDRY, I. G., K. STAHL y R. D. MOORE (2006): Synoptic sea-level pressure patterns generated by a general circulation model: comparison with types derived from NCEP/NCAR re-analysis and implications for downscaling. *Int. J. Climatol.*, **26**, 1727-1736.
- MEEHL, G. A., G. J. BOER, C. COVEY, M. LATIF y R. J. STOUFFER (2000): The Coupled Model Intercomparison Project (CMIP). *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **81**, 313-318.
- MEEHL, G. A., C. COVEY, B. MCAVANEY, M. LATIF y R. J. STOUFFER (2005b): Overview of the Coupled Model Intercomparison Project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **86**, 89-93.
- MEEHL, G. A., C. COVEY, T. DELWORTH, M. LATIF, B. MCAVANEY, J. F. B. MITCHELL, R. J. STOUFFER y K. E. TAYLOR (2007): THE WCRP CMIP3 Multimodel Dataset: A New Era in Climate Change Research, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **88**, 1383-1394, doi: 10.1175/BAMS-88-9-1383.
- MIN, S.-K. y A. HENSE (2006): A Bayesian approach to climate model evaluation and multi-model averaging with an application to global mean surface temperatures from IPCC AR4 coupled climate models. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L08708, doi: 10.1029/2006GL025779.
- MITCHELL, T. D. y P. D. JONES (2005): An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high resolution grids. *Int. J. Climatol.*, **25**, 693-712.
- MITCHELL, T. D. y M. HULME (1999): Predicting regional climate change: living with uncertainty. *Prog. Phys. Geog.*, **23** (1), 57-78.

MOSS, R. H., J. A. EDMONDS, K. HIBBARD, M. MANNING, S. K. ROSE, D. VAN VUUREN, T. CARTER, S. EMORI, M. KAINUMA, T. KRAM, G. MEEHL, J. MITCHELL, N. NAKICENOVIC, K. RIAHI, S. J. SMITH, R. STOUFFER, A. M. THOMSON, J. WEYANT y T. WILBANKS (2010): The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment. *Nature*, **463** (7282): 747-756, doi: 10.1038/nature08823.

NAKICENOVIC, N. y R. SWART (Eds.) (2000): IPCC Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press, 570 pp.

NIETO, S. y C. RODRÍGUEZ-PUEBLA (2006): Comparison of Precipitation from Observed Data and General Circulation Models over the Iberian Peninsula, *J. Climate*, **19**, 4254-4275.

PALMER, T. N. (1999): A nonlinear dynamical perspective on climate prediction. *J. Climate*, **12**, 575-591.

PALMER, T. N. ET AL. (2004): Development of a European multimodel ensemble system for seasonal-to-interannual prediction (DEMETER). *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **85**, 853-872.

PASTOR, M. A., M. J. CASADO y F. J. DOBLAS-REYES (2008): Climate model validation in the Euro-Atlantic domain using Circulation Types. Nota Técnica n.º 4 del Área de Evaluación y Modelización del Cambio Climático. Instituto Nacional de Meteorología. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.

PELLY, J. L. y B. J. HOSKINS (2003b): How well does the ECMWF Ensemble Prediction System predict blocking? *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **129**, 1683-1702.

PERKINS, S. E., A. J. PITMAN, N. J. HOLBROOK y J. MCANENEY (2007): Evaluation of the AR4 Climate Models simulated daily maximum temperature, minimum temperature, and precipitation over Australia using probability density functions. *J. Climate*, **20**, 4356-4376.

PERKINS, S. E. y A. J. PITMAN (2009): Do weak AR4 models bias projections of future climate changes over Australia? *Clim. Change*, **93**, 527-558.

PHILIPP, A., P. M. DELLA-MARTA, P. M. JACOBET, D. R. FEREDAY, P. D. JONES, A. MOBERG y H. WANNER (2007): Long term variability of daily north atlantic-european pressure patterns since 1850 classified by simulated annealing clustering. *J. Climate*, **20**, (16): 4065-4095.

PHILIPP, A., J. BARTHOLY, C. BECK, M. ERPICUM, P. ESTEBAN, R. HUTH, P. JAMES, S. JOURDAIN, T. KRENNERT, S. LYKOUDES, S. MICHAELIDIS, K. PIANKO, P. POST, D. RASILLA ÁLVAREZ, A. SPEKAT y F. S. TYMVIOS (2010): COST733CAT — a database of weather and circulation type classifications. *Phys. Chem. Earth*, **35**, 360-373.

PIANI, C., D. J. FRAME, D. A. STAINFORTH y M. R. ALLEN (2005): Constraints on climate change from a multi-thousand member ensemble of simulations. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L23825, doi: 10.1029/2005GL024452.

PIERCE, D. W. (2004): Beyond the means: validating climate models with higher order statistics. *Computing in Science and Engineering* 6(5): 22-29. [Disponible en línea en <http://doi.ieeeecomputersociety.org/10.1109/MCSE.2004.32>].

- POPE, V. D., M. L. GALLANI, P. R. ROWNTREE y R. A. STRATTON (2000): The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model: HadAM3. *Clim. Dynam.*, **16**, 123-146.
- REICHLER, T. y J. KIM (2008): How Well Do Coupled Models Simulate Today's Climate? *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **89**, 303-311.
- REINHOLD, B. B. y R. T. PIERREHUMBERT (1982): Dynamics of weather regimes: Quasi-stationary waves and blocking. *Mon. Weather Rev.*, **110**, 1105-1145.
- RICHMAN, M. B. (1986): Rotation of principal components. *J. Climatol.*, **6**, 293-335.
- ROBERTSON, A. W. y M. GHIL (1999): Large-scale weather regimes and local climate over the western United States. *J. Climate*, **12**, 1796-1813.
- RODRÍGUEZ-PUEBLA, C., A. H. ENCINAS, S. NIETO y J. GARMENDÍA (1998): Spatial and Temporal patterns of annual precipitation variability over the Iberian Peninsula. *Int. J. Climatol.*, **18**, 299-316.
- ROECKNER, E. ET AL. (1996): The atmospheric general circulation model ECHAM4: Model description and simulation of present day climate. Report 218, Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany, P90.
- ROECKNER, E. ET AL. (2003): The atmospheric general circulation model ECHAM 5. Part I: Model description. Max Planck Institute for Meteorology Rep., 127 pp. [Disponible en línea en <http://edoc.mpg.de/175329>].
- RUSSELL, G. L. (2005): 4x3 atmosphere-ocean model documentation. [Disponible en línea en <http://aom.giss.nasa.gov/doc4x3.html>].
- RUSSELL, G. L., J. R. MILLER y D. RIND (1995): A coupled atmosphere-ocean model for transient climate change studies. *Atmos. Ocean*, **33**, 683-730.
- SÁNCHEZ, E., M. A. GAERTNER y C. GALLARDO (2009): Regionalización dinámica de la precipitación diaria sobre la Península Ibérica: análisis de la resolución espacial en la descripción del clima actual y clima futuro. *Física de la Tierra*, **21**, 207-218. ISSN: 0214-4557.
- SALAS-MELIA, D. ET AL. (2005): Description and validation of the CNRM-CM3 global coupled model. CNRM Working Note 103, 36 pp.
- SÁNCHEZ GÓMEZ, E. y L. TERRAY (2005): Large-scale atmospheric dynamics and local intense precipitation episodes. *Geophys. Res. Lett.*, **32**: L24711, doi: 10.1029/2005GL023990.
- SCHAEFFER, M., F. M. SELTEN y J. D. OPSTEEGH (2005): Shifts of Means are not a Proxy for Changes in Extreme Winter Temperatures in Climate Projections. *Clim. Dyn.*, **25**, 51-63.
- SCHMIDT, G. A. ET AL. (2006): Present day atmospheric simulations using GISS ModelE: Comparison to in-situ, satellite and reanalysis data. *J. Climate*, **19**, 153-192.

- SCHOOF, J. T. y S. C. PRYOR (2006): An evaluation of two GCMs: simulation of North American teleconnection indices and synoptic phenomena. *Int. J. Climatol.*, **26**(2): 267-282.
- SCHUENEMANN, K. C. y J. J. CASSANO (2009): Changes in synoptic weather patterns and Greenland precipitation in the 20th and 21st centuries: 1. Evaluation of late 20th century simulations from IPCC models. *J. Geophys. Res.*, **114**, D20113, doi: 10.1029/2009/D011705.
- SCHWIERZ, C., C. APPENZELLER, H. C. DAVIES, M. LINIGER, W. MÜLLER, T. F. STOCKER y M. YOSHIMORI (2006): Challenges posed by and Approaches to the study of Seasonal-to-Decadal Climate Variability, *Clim. Change*, **79**, 31-63, doi: 10.1007/s10584-006-9076-8.
- SERRANO, A., A. J. GARCÍA, V. L. MATEOS, M. L. CANCELLO y J. GARRIDO (1999): Monthly modes of variation of precipitation over the Iberian Peninsula. *J. Climate*, **12**, 2894-2919.
- SHERIDAN, S. y C. LEE (2010): Synoptic climatology and the general circulation model. *Prog. Phys. Geog.*, **34**, No. 1, 101-109, doi: 10.1177/0309133309357012.
- SHUKLA, J., T. DELSOLE, M. FENNESSY, J. KINTER y D. PAOLINO (2006): Climate model fidelity and projections of climate change. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L07702, doi: 10.1029/2005GL025579.
- SILVERMAN, B. W. (1986): Density estimation for statistics and data analysis. Chapman and Hall, London, 175 pp.
- STAHL, K., R. D. MOORE y I. G. MCKENDRY (2006): The role of synoptic-scale circulation in the linkage between large-scale ocean-atmosphere indices and winter surface climate in British Columbia, Canada. *Int. J. Climatol.*, **26**, 541-560, doi: 10.1002/joc.1268.
- STEPHENSON, D. B., V. PAVAN y R. BOXARIU (2000): Is the North Atlantic Oscillation a random walk? *Int. J. Climatol.*, **20**(1), 1-18.
- STEPHENSON, D. B., V. PAVAN, M. COLLINS, M. M. JUNGE y R. QUADRELLI (2006): North Atlantic Oscillation response to transient greenhouse gas forcing and the impact on European winter climate: a CMIP2 multi-model assessment. *Clim. Dyn.*, **27**, 401-420.
- STONER, K., K. HAYHOE y D. J. WUEBLES (2009): Assessing General Circulation Model Simulations of Atmospheric Teleconnection Patterns. *J. Climate*, **22**, 4348-4372.
- SUN, Y., S. SOLOMON, A. DAI y R. PORTMANN (2006): How often does it rain? *J. Climate*, **19**, 916-934.
- TAYLOR, K. E. (2001): Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.*, **106** (D7), 7183-7192.
- TRIGO, R. M. y J. P. PALUTIKOF (2001): Precipitation scenarios over Iberia: a comparison between direct GCM output and different downscaling techniques. *J. Climate*, **14**, 4422-4446.

- TRIGO, R., R. GARCÍA-HERRERA, J. DÍAZ, I. TRIGO y M. VALENTE (2005): How exceptional was the early August 2003 heatwave in France? *Geophys. Res. Lett.*, **32**, 1071-1074.
- UPPALA, S. M., P. W. KÄLLBERG, A. J. SIMMONS, U. ANDRAE, V. DA COSTA BECHTOLD, M. FIORINO, J. K. GIBSON, J. HASELER, A. HERNÁNDEZ, G. A. KELLY, X. LI, K. ONOGI, S. SAARINEN, N. SOKKA, R. P. ALLAN, E. ANDERSSON, K. ARPE, M. A. BALMASEDA, A. C. M. BELJAARS, L. VAN DE BERG, J. BIDLOT, N. BORMANN, S. CAIRES, F. CHEVALLIER, A. DETHOF, M. DRAGOSAVAC, M. FISHER, M. FUENTES, S. HAGEMANN, E. HÓLM, B. J. HOSKINS, L. ISAKSEN, P. A. E. M. JANSSEN, R. JENNE, A. P. MCNALLY, J. F. MAHFOUF, J. J. MORCRETTE, N. A. RAYNER, R. W. SAUNDERS, P. SIMON, A. STERL, K. E. TRENBERTH, A. UNTCH, D. VASILJEVIC, P. VITERBO y J. WOOLLEN (2005): The ERA-40 re-analysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **131**, 2961-3012, doi: 10.1256/qj.04.176.
- VAN ULDEN, A. P. y G. J. VAN OLDENBORGH (2006): Large scale atmospheric circulation biases and changes in global climate model simulation and their importance for climate change in Central Europe. *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 863-881.
- VON STORCH, H. y F. W. ZWIERS (1999): Statistical analysis in climate research. Cambridge University Press, Cambridge, 510 pp.
- WALLACE, J. M. y D. S. GUTZLER (1981): Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere Winter. *Mon. Weather Rev.*, **109**, 784-812.
- WANG, B. ET AL. (2004): Design of a new dynamical core for global atmospheric models based on some efficient numerical methods. *Science in China, Series A*, **47**, Suppl. 4-21.
- WASHINGTON, W. M. ET AL. (2000): Parallel Climate Model (PCM) control and transient simulations. *Clim. Dyn.*, **16**, 755-774.
- WATTERSON, I. G., (1996): Non-dimensional measures of climate model performance. *Int. J. Climatol.*, **16**, 379-391.
- WILKS, D. S. (2006): Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Second Edition. International Geophysics Series Volume 91. Elsevier, 627 pp.
- XAVIER, P. K., J.-P. DUVEL y F. J. DOBLAS-REYES (2008): Boreal summer intraseasonal variability in coupled seasonal hindcasts. *J. Climate*, **21**, 4477-4497.
- YIOU, P. y M. NOGAJ (2004): Extreme climatic events and weather regimes over the North Atlantic: When and where? *Geophys. Res. Lett.*, **1**, L07202, doi: 10.10129/2003GL019119.
- YUKIMOTO, S. y A. NODA (2003): Improvements of the Meteorological Research Institute Global Ocean-Atmosphere Coupled GCM (MRI-GCM2) and its climate sensitivity. CGER's Supercomputing Activity Rep., Vol. 10 2001, National Institute for Environmental Studies, Ibaraki, Japan, 37-44.
- YUKIMOTO, S. ET AL. (2001): The new Meteorological Research Institute global ocean-atmosphere coupled GCM (MRICGCM2) — Model climate and variability. *Pap. Meteor. Geophys.*, **51**, 47-88.

ZWIERS, F. Y X. ZHANG (2003): Towards regional-scale climate change detection. *J. Climate*, **16**, 793-797.



ISBN: 978-84-7837-085-6



PVP: 15,00 € (IVA incluido)



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE
Y MEDIO RURAL Y MARINO