Análisis de la fiabilidad de proyecciones con cobertura global para la región Galicia – Norte de Portugal

Código: E.3.1 Acción: A.3.1



España – Portugal

CAPTA

Cofinanciado por la Unión Europea a través del Programa Interreg VI-A España-Portugal (POCTEP) 2021-2027. Las opiniones son de exclusiva responsabilidad del autor que las emite.

ÍNDICE

NDICE	.3
.RESUMEN	.4
. INTRODUCCIÓN	.5
. DATOS APLICADOS Y USO	.6
. MÉTODOS	12
4.1 TIPOS DE CLIMA DE LAMB	12
4.2 COMPLEJIDAD DEL MODELO EN TÉRMINOS DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA CLIMÁTICO CONSIDERADOS	14
. RESULTADOS GENERALES DEL RENDIMIENTO DEL MODELO	15
5.1 RESUMEN DE RESULTADOS, PAPEL DE LA RESOLUCIÓN DEL MODELO, COMPLEJIDAD DEL MODELO Y VARIABILIDAD INTERNA	16
. RESUMEN Y CONCLUSIONES	20
EFERENCIAS	21

1.RESUMEN

Los modelos climáticos globales (GCM) son una pieza fundamental en el estudio del clima moderno, sin embargo, originalmente, no están hechos para reproducir el clima a una escala regional. Para solucionar este inconveniente se han propuesto dos soluciones. Por un lado, los propios modelos se han ido mejorando constantemente en términos de procesos físicos y químicos, esquemas de parametrización, resolución y componentes del sistema climático implementados, dando lugar al término "modelo del sistema terrestre". Por otro lado, los resultados de los modelos globales se han perfeccionado a escala regional utilizando modelos de área limitada o métodos estadísticos en lo que se conoce como *downscalling* dinámico o estadístico. Sin embargo, para ambas aproximaciones es difícil corregir errores que resultan de una representación errónea de la circulación a grande escala en el modelo global.

Teniendo en cuenta estas dificultades de los modelos climáticos globales y para tratar de caracterizar su comportamiento en el área de estudio (Galicia – Norte de Portugal), se ha realizado una evaluación del rendimiento de los experimentos históricos de modelos globales de Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados 5 y 6 (CMIP5 y 6) basados en patrones recurrentes de circulación atmosférica regional. Se obtuvo que la última generación de modelos (CMIP6) tiene en promedio un mejor rendimiento, lo que puede explicarse en parte por una relación estadística moderadamente fuerte entre el rendimiento y la resolución horizontal en la atmósfera. Algunos modelos se clasifican favorablemente en casi todo el hemisferio norte en latitudes medias y altas. La variabilidad interna del modelo solo tiene una pequeña influencia en las clasificaciones del mismo. Se identificaron los componentes del sistema climático prescritos y simulados interactivamente para cada configuración de modelo acoplado aplicada y se introduce un sistema de codificación simple para describir la complejidad del modelo en este sentido. Como conclusión se obtiene que los modelos de la familia EC-Earth son los que mejor reproducen la circulación a escala sinóptica en nuestra área de estudio, seguidos por los modelos de la familia HadGem y CMCC.

2. INTRODUCCIÓN

Los métodos de downscalling pueden darnos los efectos de los factores climáticos locales en los modelos climáticos globales (GCM) de resolución gruesa, la corrección de errores que vienen de una representación errónea de la circulación atmosférica a gran escala es un desafío. Una forma físicamente consistente de sortear este "error de circulación" es elegir un GCM o grupo de GCM capaz de simular de forma realista las estadísticas climatológicas de la circulación a escala regional. Sin embargo, debido a la disponibilidad de muchos GCM•de muchos grupos diferentes, esta idea fue parcialmente cambiada por el paradigma de la "democracia de modelos", donde se aplican tantos GCM como sea posible, independientemente de su rendimiento en las condiciones actuales. Debe recordarse que por definición, los GCM no se desarrollaron para representar de forma realista las características climáticas a escala regional a pesar de que se han visto obligados a asumir este papel durante los últimos 30 años debido al aumento de la demanda de información climática a esta escala. Por tanto, encontrar un GCM capaz de reproducir la circulación atmosférica regional de manera sistemática en muchas regiones del mundo es muy difícil.

Para comprobar el rendimientos de diferentes modelos en nuestro área de estudio se evaluaron 128 ejecuciones históricas de 56 GCM distintos de la quinta y sexta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5 y 6) en términos de su capacidad para representar la climatología actual de la circulación atmosférica regional, representada por la frecuencia de los 27 tipos de circulación propuestos por Lamb (Lamb, 1972). Con base en la propuesta de (Jones et al. (2013)) de que este esquema puede, en principio, aplicarse dentro de una banda latitudinal de 30° a 70° N, se utiliza un sistema de coordenadas deslizantes (Otero et al., 2017) que se extiende a lo largo de las casillas de una cuadrícula de latitud - longitud de 2.5° que cubre todas las latitudes medias y altas del hemisferio norte.

En este caso nos centraremos en la evaluación con respecto a ERA - Interim, añadiendo la indicación de las desviaciones de la evaluación con respecto al Reanálisis Japonés de 55 años (JRA-55) en las regiones que nos interesan, que son Galicia y el Norte de Portugal.

3. DATOS APLICADOS Y USO

Se usaron los datos del modelo de presión instantánea a nivel del mar (SLP) de 6 horas obtenidos de los portales de datos de la Earth System Grid Federation (ESGF). Estas ejecuciones del modelo se evalúan con datos de reanálisis de ECMWF ERA - Interim y la Agencia Meteorológica de Japón (JMA) JRA - 55. En primer lugar, para comparar el mayor número de modelos posible, se descargó una única ejecución histórica por modelo con los datos mencionados anteriormente para el período 1979 - 2005. Si se disponía de varias integraciones históricas para una versión concreta del modelo, se seleccionaba el primer miembro. De los modelos utilizados en el CMIP6, 26 se ejecutaron con los conjuntos de datos de forzamiento <f1>, 4 con <f2> y 1 con <f3>•. Además de considerar los pares de versiones de CMIP5 a CMIP6, también se consideran las versiones de los modelos que no tienen un predecesor en CMIP5 ni un sucesor en CMIP6. En el mejor de los casos, hay dos versiones de un mismo modelo para CMIP5 y CMIP6: una configuración de mayor resolución que considera menos reinos (configuración AOGCM), complementada con una configuración más compleja que incluye más componentes del modelo, generalmente ejecutada con una resolución menor que la versión AOGCM.

En la Tabla•1 se muestra una descripción general de las 56 versiones del modelo aplicado. La tabla indica información sobre los componentes AGCM y OGCM, su resolución horizontal y vertical, las especificaciones de ejecución y los códigos de complejidad.

Para 13 modelos seleccionados (ACESS-ESM1, CNRM-CM6-1, HadGEM2-ES, EC-Earth3, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM6A-LR, MIROC-ES2L, MPI-ESM1-2-LR, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2, NorESM2-LM, NorESM2-MM, NESM3), se recuperaron un total de 72 integraciones históricas adicionales (entre 1 y 17 ejecuciones adicionales por modelo) de los conjuntos respectivos para evaluar los efectos de la variabilidad interna del modelo. Por definición del protocolo experimental seguido en CMIP, la dispersión del conjunto se basa en la inicialización a partir de distintas fechas de inicio de las ejecuciones de control preindustriales correspondientes, o ejecuciones similares más cortas.

Modelo acoplado	СМІР	Modelo atmosf.	Modelo oceánico	ID ejecución	Refs.	Complejidad	Afinidad	MAE
ACCESS1- 0	5	HadGAM2, 192×144, 38 lv	NOAA/GFDL MOM4p1, 360×300, 50 lv	r1i1p1	Bi et al. (2013)	2222002000	Mixed	0,53
ACCESS1- 3	5	UM7.3- approx. GA1, 192×144, 38 lv	NOAA/GFDL MOM4p1, 360×300, 50 lv	r1i1p1	Bi et al. (2013)	2222002000	Mixed	0,63
ACCESS- CM2	6	UM10.6- GA7.1, 192×144, 85 lv	ACCESS-OM2 (GFDL- MOM5), 360×300, 50 lv	r1i1p1f1	Bi et al. (2020)	2222002000	Mixed	0,6
ACCESS-	6	UM7.3-	ACCESS-OM2	r1i1p1f1 +	Ziehn et al.	2222122020	Mixed	0,61

ESM1-5		approx. GA1, 192×145, 38 lv	(GFDL- MOM5), 360×300, 50 lv	1	(2020)			
AWI-ESM- 1-1-LR	6	ECHAM6.3.04 p1, 192×96, 47 lv	FESOM 1.4, 126 859 wet nodes (unstructured mesh), 46 lv	r1i1p1f1	Semmler et al. (2020)	2222220100	JRA-55	0,78
BCC- CSM1.1	5	BCC- AGCM2.1, 128×64 (T42), 26 lv	GFDL-MOM4, 360×232, 40 lv	r1i1p1	Wu et al. (2013, 2014)	2222221120	None	1
BCC- CSM2-MR	6	BCC-AGCM3- MR, 320×160, 46 lv	GFDL-MOM4, 360×232, 40 lv	r1i1p1f1	Wu et al. (2019)	2222221120	None	0,88
CanESM2	5	CanAM4, 128×64, 35 lv	CanOM4, 256×192, 40 lv	r1i1p1	Chylek et al. (2011)	2222222021	JRA-55	0,79
CCSM4	5	CAM4, 288×192, 26 lv	POPv2, 384×320, 60 lv	r6i1p1	Gent et al. (2011)	2222221000	ERA- Interim	0,95
CMCC-CM	5	ECHAM5, 480×240, T159, 31 lv	OPA8.2- ORCA2, 31 lv	r1i1p1	Scoccimarr o et al. (2011)	2222000000	JRA-55	0,61
CMCC- CM2-SR5	6	CAM5.3, 288×192, 30 lv	NEMO3.6- ORCA1, 50 lv	r1i1p1f1	Cherchi et al. (2019)	2222002000	ERA- Interim	0,55
CMCC- ESM2	6	CAM5.3, 288×192, 30 lv	NEMO3.6- ORCA1, 50 lv	r1i1p1f1	Cherchi et al. (2019)	2222022020	ERA- Interim	0,55
CNRM- CM5	5	ARPEGE- Climat v5.2.1 256×128, 31 lv	NEMO3.2- ORCA1, 42 lv	r1i1p1	Voldoire et al. (2013)	2222101100	Mixed	0,6
CNRM- CM6-1	6	ARPEGE 6.3 256×128, 91 lv, T127 Gr 24572 gb	NEMO3.6- ORCA1, 75 lv	r1i1p1f2 + 2	Voldoire et al. (2019)	2222101100	Mixed	0,63
CNRM-	6	ARPEGE 6.3,	NEMO3.6-	r1i1p1f2	Voldoire et	2222101100	Mixed	0,68

CM6-1-HR		720×360, 91 lv, T359 Gr 181724 gb	ORCA025, 75 lv		al. (2019)			
CNRM- ESM2-1	6	ARPEGE 6.3, 720×360, T127 Gr 24572 gb, 91 lv	NEMO3.6- ORCA1, 75 lv	r1i1p1f2	Séférian et al. (2019)	2222222220	Mixed	0,65
CSIRO- MK3.6	5	AGCM v7.3.8, 192×96, T63 spectral, 18 lv	GFDL MOM2.2, 192×189, 31 lv	r1i1p1	Collier et al. (2011)	2222000000	ERA- Interim	1,04
EC-Earth- 2.3	5	IFS (modified cy31R1), 320×160, T159L62, 62 lv	Modified NEMO2- ORCA1, 42 lv	r12i1p1	Hazeleger et al. (2011)	2222001000	ERA- Interim	0,49
EC-Earth3	6	IFS (IFS cy36r4), 512×256, T255L91 Gr, 91 lv	NEMO3.6- ORCA1, 75 lv	r1i1p1f1 + 16	Döscher et al. (2021)	2222101000	ERA- Interim	0,41
EC-Earth3- Veg	6	IFS (IFS cy36r4), 512×256, T255L91 Gr, 91 lv	NEMO3.6- ORCA1, 75 lv	r1i1p1f1	Döscher et al. (2021)	2222221000	ERA- Interim	0,41
EC-Earth3- Veg-LR	6	IFS (IFS cy36r4), 320×160, T159L62 Gr, 62 lv	NEMO3.6- ORCA1, 75 lv	r1i1p1f1	Döscher et al. (2021)	2222221000	ERA- Interim	0,4
EC-Earth3- AerChem	6	IFS (IFS cy36r4), 512×256, T255L91 Gr, 91 lv	NEMO3.6- ORCA1, 75 lv	r1i1p1f1 + 16	Döscher et al. (2021)	2222102000	ERA- Interim	0,41
EC-Earth3- CC	6	IFS (IFS cy36r4), 512×256, T255L91 Gr, 91 lv	NEMO3.6- ORCA1, 75 lv	r1i1p1f1 + 16	Döscher et al. (2021)	2222221020	ERA- Interim	0,41

FGOALS- g2	5	GAMIL2, 128×60, hybrid, 26 lv	LICOM2, 360×196, tripolar grid, 1/2° in the tropics, 30 lv	r1i1p1	Li et al. (2013)	2222101000	JRA-55	1,17
FGOALS- g3	6	GAMIL3, 180×80, hybrid, 26 lv	LICOM3, 360×218, tripolar grid, 30 lv	r1i1p1	Li et al. (2020)	2222111000	Mixed	0,8
GFDL-CM3	5	AM3p9, 144×90, C48L48, 48 lv	MOM4p1, 360×200, tripolar grid, 1/3° at Equator, 50 lv	r1i1p1	Griffies et al. (2011)	2222222200	Mixed	0,61
GFDL-CM4	6	GFDL- AM4.0.1, 360×180, cubed sphere, c96, 33 lv	GFDL-MOM6, 1440×1080, tripolar 0.25° grid, 75 lv	r1i1p1f1	Held et al. (2019)	2222222210	Mixed	0,58
GISS-E2-H	5	GISS-E2, 144×90, 40 lv	HYCOM, 1×cos (lat) tripolar grid north of 58° N, Mercator below, 26 lv	r6i1p1	Schmit et al. (2014)	2222101100	ERA- Interim	0,82
GISS-E2-R	5	GISS-E2, 144×90, 40 lv	Russel Ocean, 288×180, regular lat– long, 32 lv	r1i1p1	Schmit et al. (2014)	2222101100	ERA- Interim	0,78
GISS-E2-1- G	6	GISS-E2.1, 144×90, 40 lv	GISS Ocean, 288×180, regular lat– long, 32 lv	r1i1p1f1	Kelley et al. (2020)	2222101100	None	0,75
HadGEM2 -CC	5	HadGAM2, 192×145, N96L60, 60 lv	HadGOM2, 360×216, 40 lv	r1i1p1	Collins et al. (2011)	2222222120	Mixed	0,63
HadGEM2 -ES	5	HadGAM2, 192×145, N96L38, 38 lv	HadGOM2, 360×216, 40 lv	r1i1p1 + 1	Collins et al. (2011)	2222222220	Mixed	0,57
HadGEM3	6	UM10.6-	NEMO-	r1i1p1f3	Roberts et	2222002000	Mixed	0,45

-GC31-		GA7.1,	HadGEM3-		al. (2019)			
MM		432×324,	GO6.0-					
		N216L85,	eORCA025,					
		85 lv	75 lv					
IITM-ESM	6	lITM-GFSv1, 192×94, 64 lv	MOM4p1, 360×200, tripolar, primarily 1° grid, 50 lv	r1i1p1f1	Swapna et al. (2015)	2222101020	Mixed	0,81
INMCM4	5	INM-CM4 atmosphere model, 180×120, 21 lv	INM-CM4 ocean model, 360×360, 40 lv	r1i1p1	Volodin et al. (2010)	2222220010	JRA-55	0,77
IPSL- CM5A-LR	5	LMDZ4v5, 96×95, 39 lv	NEMO3.2- ORCA2, 31 lv	r1i1p1 + 5	Dufresne et al. (2013)	2222221110	None	0,98
IPSL- CM5A-MR	5	LMDZ4v5, 144×143, 39 lv	NEMO3.2- ORCA2, 31 lv	r1i1p1	Dufresne et al. (2013)	2222221110	None	0,95
IPSL- CM6A-LR	6	LMDZ NPv6, 144×143, N96L79, 79 lv	NEMO-OPA- eORCA1.3, 75 lv	r1i1p1f1 + 17	Boucher et al. (2020)	2222221111	Mixed	0,72
KIOST- ESM	6	GFDL-AM2.0, 192×96, 32 lv	GFDL- MOM5.0, 360×200, tripolar nominal 1° grid, 52 lv	r1i1p1f1	Pak et al. (2021)	2222221120	JRA-55	0,84
MIROC5	5	MIROC- AGCM6, 256×128, T85L40, 40 lv	COCO4.5, 256×224, 50 lv	r1i1p1	Watanabe et al. (2010)	2222102000	ERA- Interim	0,91
MIROC- ESM	5	MIROC-AGCM 2010, 128×64, T42L80, 80 lv	COCO3.4, 256×192, 44 lv	r1i1p1	Watanabe et al. (2011)	2222222020	JRA-55	1,06
MIROC6	6	CCSR AGCM, 256×128, T85L81, 81 lv	COCO4.9, 360×256, tripolar primarily 1° grid, 63 lv	r3i1p1f1	Tatebe et al. (2019)	2222102000	Mixed	0,77

MIROC- ES2L	6	CCSR AGCM, 128×64, T42L40, 40 lv	COCO4.9, 360×256, tripolar primarily 1° grid, 63 lv	r5i1p1f2 + 1	Hajima et al. (2020)	2222022020	None	1,14
MPI-ESM- LR	5	ECHAM6, 192×96, T63L47, 47 lv	MPIOM, 256×220, bipolar grid with 1.5° at Equator, 40 lv	r1i1p1	Giorgetta et al. (2013)	2222220020	JRA-55	0,66
MPI-ESM- MR	5	ECHAM6, 192×96, T63L95, 95 lv	MPIOM, 802×404, tripolar grid with 0.4° at Equator, 40 lv	r1i1p1	Giorgetta et al. (2013)	2222220020	JRA-55	0,72
MPI- ESM1.2- LR	6	ECHAM6.3, 192×96, T63L95, 47 lv	MPIOM1.63, 360×256, bipolar grid, 1.5° at Equator, 40 lv	r1i1p1f1 + 9	Mauritsen et al. (2019)	2222221020	JRA-55	0,66
MPI- ESM1.2- HR	6	ECHAM6.3, 384×192, T127L95, 95 lv	MPIOM1.63, 802×404, tripolar grid, 0.4° at Equator, 40 lv	r1i1p1f1 + 9	Müller et al. (2018)	2222221020	JRA-55	0,57
MPI- ESM1.2- HAM	6	ECHAM6.3, 192×96, T63L95, 47 lv	MPIOM1.63, 256×220, bipolar grid, 1.5° at Equator, 40 lv	r1i1p1f1	Mauritsen et al. (2019)	2222222120	JRA-55	0,75
MRI-ESM1	5	GSMUV- 110120oc, 320×160, TL159L48, 48 lv	MRICOM-3-0, 368×364, tripolar primarily 0.5×1.0° grid, 51 lv	r1i1p1	Yukimoto et al. (2011)	2222122220	ERA- Interim	0,65
MRI- ESM2.0	6	MRI- AGCM3.5, 320×160, TL159L80, 80 lv	MRICOM-4-4, 364×360, tripolar primarily 0.5×1.0° grid,	r1i1p1f1 + 4	Yukimoto et al. (2019)	2222112210	ERA- Interim	0,57

			61 lv					
NESM3	6	ECHAM v6.3, 192×96, T63L47, 47 lv;	NEMO3.4- ORCA1, 46 lv	r1i1p1f1 + 4	Cao et al. (2018)	2222221000	None	0,71
NorESM1- M	6	CAM4-Oslo, 144×96, f19L26, 26 lv;	MICOM- noresm-ver1- gx1v6, 384×320, 53 lv	r1i1p1	Bentsen et al. (2013)	2222122000	JRA-55	0,87
NorESM2- LM	6	CAM-Oslo, 144×96, 32 lv;	MICOM. 384×360, 1.0° at Equator, 70 lv	r1i1p1f1 + 2	Seland et al. (2020)	2222122120	Mixed	0,74
NorESM2- MM	6	CAM-Oslo, 288×192, 32 lv;	MICOM, 384×360, 1.0° at Equator, 70 lv	r1i1p1f1 + 1	Seland et al. (2020)	2222122120	ERA- Interim	0,54
SAM0- UNICON	6	CAM5.3 with UNICON, 288×192, 30 lv	POP2D, 320×384, 60 Iv	r1i1p1f1	Park et al. (2019)	2222222000	ERA- Interim	0,6
TaiESM 1.0	6	TaiAM1, 288×192, 30 lv	POP2, 320×384, 60 lv	r1i1p1f1	Lee et al. (2020)	2222222000	Mixed	0,58

Tabla 1. Descripción general de los experimentos del modelo aplicado, incluidas las abreviaturas de los modelos acoplados y sus componentes atmosféricos y oceánicos, su resolución expresada como número de casillas de cuadrícula longitudinales x latitudinales (gb), número de niveles verticales del modelo (lv), identificadores de ejecución, artículos de referencia, códigos de complejidad del modelo, afinidad del reanálisis y error absoluto medio (MAE) con respecto a ERA - Interim; Gr indica la cuadrícula reducida gaussiana (ver Tabla 1 en (Brands, 2022))).

4. MÉTODOS

4.1 TIPOS DE CLIMA DE LAMB

El esquema de clasificación utilizado está basado en el método de Lamb (Lamb, 1972) en el que se agrupan mapas diarios instantáneos de SLP para las Islas Británicas y se interpreta su relación con el clima regional. Este esquema de clasificación subjetiva está compuesto de 27 clases y se aplicó a un enfoque automatizado y objetivo en lo que se conoce como el enfoque de "tipo de circulación Lamb" o "tipo meteorológico Lamb" (LWT).•



Figura 1. Ejemplo del uso del método de Lamb para tipos meteorológicos de la Península Ibérica central. Se muestra el sistema de coordenadas configurado para esta región y un subconjunto de 14 tipos, así como sus frecuencias relativas de ocurrencia. Cabe destacar que en este estudio se utilizan los 27 tipos definidos originalmente en Lamb.•

La extensión espacial del sistema de coordenadas de 16 puntos que define esta clasificación es de 30 longitudes x •20 latitudes, con incrementos longitudinales y latitudinales de 10 y 5° respectivamente (ver Figura 1 para un ejemplo sobre la Península Ibérica). Los siguientes números representan valores instantáneos de SLP (en hPa) en la ubicación p correspondiente (de oeste a este y de norte a sur):

	<i>p</i> 01	<i>p</i> 02	
<i>p</i> 03	<i>p</i> 04	<i>p</i> 05	<i>p</i> 06
<i>p</i> 07	<i>p</i> 08	<i>p</i> 09	<i>p</i> 10
<i>p</i> 11	<i>p</i> 12	<i>p</i> 13	<i>p</i> 14
	<i>p</i> 15	<i>p</i> 16,	

y las variables que se necesitan para la clasificación se definen de la siguiente forma:

Westerly flow (W) =
$$\frac{1}{2}(p12 + p13) - \frac{1}{2}(p04 + p05).$$
 (1)
Southerly flow (S) = $a \left[\frac{1}{4}(p05 + 2 \times p09 + p13)\right]$

$$-\frac{1}{4}(p04 + 2 \times p08 + p12) \bigg]. \tag{2}$$

Resulting flow $(F) = (S^2 + W^2)^{1/2}$. (3)

Westerly shear vorticity $(ZW) = b \left[\frac{1}{2} (p15 + p16) - \frac{1}{2} (p08 + p09) \right]$ $- c \left[\frac{1}{2} (p08 + p09) - \frac{1}{2} (p01 + p02) \right].$ (4) Southerly shear vorticity $(ZS) = d \left[\frac{1}{4} (p06 + 2 \times p10 + p14) - \frac{1}{4} (p05 + 2 \times p09 + p13) - \frac{1}{4} (p04 + 2 \times p08 + p12) \right].$

$$-\frac{1}{4}(\rho 04 + 2 \times \rho 08 + \rho 12) + \frac{1}{2}(\rho 03 + 2 \times \rho 07 + \rho 11) \bigg],$$
(5)

donde a=1/cos ϕ , b=sin ϕ /sin(ϕ - $\delta\phi$), c=sin ϕ /sin(ϕ + $\delta\phi$) y d=0.5 \cdot cos^2 \phi; ϕ es la latitud central y $\delta\phi$ la distancia latitudinal.

Las 27 clases se definen de la siguiente forma:

- La dirección del flujo es tan⁻¹(W/S). Si W es positivo, añadir 180°. La dirección apropiada es calculada con una brújula de ocho puntas, permitiendo 45° por sector. Por ejemplo, un flujo del oeste se produciría entre 247.5° y 292.5°.
- Si |Z| es menor que F, entonces el flujo es esencialmente recto y corresponde a uno de los ocho tipos puramente direccionales definidos por Lamb: noreste (NE), este (E), SE, S, SO, O, NO, N.
- Si |Z| es mayor que 2F, entonces el patrón es fuertemente ciclónico (para Z>0) o anticiclónico (para Z<0), lo que corresponden al tipo ciclónico puro (PC) o anticiclónico (PA) de Lamb, respectivamente.
- 4. Si |Z| está entre F y 2F, el flujo es parcialmente direccional y ciclónico o anticiclónico, lo que corresponde a los tipos híbridos de Lamb. Existen ocho tipos direccionales anticiclónicos (anticiclónico noreste (ANE), anticiclónico este (AE), ASE, AS, ASW, AW, ANW, AN) y otros ocho tipos direccionales ciclónicos (ciclónico noreste (CNE), ciclónico este (CE), CSE, CS, CSW, CW, CWN, CN).
- 5. Si F es menor que 6 y |Z|, hay un flujo ligero indeterminado correspondiente al tipo U no clasificado de Lamb. La elección de 6 depende del espaciado de la cuadrícula y necesitaría ajustes si se utiliza con una resolución de cuadrícula más fina.

En la Figura 1 se observan los resultados obtenidos con este esquema para el caso de la Península Ibérica central. También se muestran el sistema de coordenadas y los mapas SLP compuestos para un subconjunto de 14 LWT, así como sus respectivas frecuencias relativas de ocurrencia.

Para cada ejecución del modelo y el reanálisis ERA - Interim o JRA - 55, los datos instantáneos de SLP cada 6 horas del 1 de enero de 1979 al 31 de diciembre de 2005 se interpolan bilinealmente a una cuadrícula regular de latitud - longitud con una resolución de 2.5°. Luego, se aplica el esquema de clasificación de Lamb para cada instancia de tiempo y casilla de la cuadrícula, utilizando un sistema de coordenadas deslizantes cuyo centro se desplaza de una casilla de la cuadrícula a otra en un bucle que repite todas las latitudes y longitudes de la cuadrícula mencionada dentro de una banda de 35° a 70° N. Destacar que el dominio geográfico se corta a 35° N (y no a 30° N) porque se sabe que los diversos reanálisis disponibles producen diferencias comparativamente grandes en sus estimaciones de la atmósfera "real" al acercarse a los trópicos. Además, dado que algunos modelos no aplican el calendario gregoriano, sino que funcionan con 365 o incluso 360 días al año, se consideran frecuencias de LWT relativas en lugar de absolutas. Además, dado que HadGEM2-CC y HadGEM2-ES carecen de datos de SLP para diciembre de 2005, este mes también se omite en ERA - Interim o JRA - 55 en comparación con estos modelos.

Como se mencionó anteriormente, el enfoque LWT se ha aplicado con éxito para muchos regímenes climáticos del NH, lo que confirma la propuesta realizada en (Jones et al. (2013)) de que el método, en principio, se puede aplicar en una banda latitudinal de 30 a 70° N. Se introduce un criterio para probar explícitamente esta suposición, en el que se establece que el método LWT no debe usarse en una caja de cuadrícula dada si la frecuencia relativa para cualquiera de los 27 tipos es inferior al 0.1% (es decir, 1.5 ocurrencias anuales en promedio). Hay que tener en cuenta que algunos LWT ocurrirían con frecuencias relativas tan pequeñas como el 0.47%. Es por esto que el umbral del 0.1% parece razonable. Si en una casilla de cuadrícula determinada no se cumple este criterio en el catálogo LWT derivado de ERA - Interim o, alternativamente, JRA - 55, entonces esa casilla de cuadrícula no se tendrá en cuenta.

4.2 COMPLEJIDAD DEL MODELO EN TÉRMINOS DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA CLIMÁTICO CONSIDERADOS

Además de evaluar el rendimiento del modelo, se utiliza una forma sencilla para describir la complejidad de las configuraciones acopladas del modelo según los términos de los componentes considerados del sistema climático. Los 10 componentes que se tienen en cuenta son los siguientes: (1) atmósfera, (2) superficie terrestre, (3) océano, (4) hielo marino, (5) propiedades de la vegetación, (6) procesos del ciclo del carbono terrestre, (7) aerosoles, (8) química atmosférica, (9) biogeoquímica oceánica y (10) dinámica de la capa de hielo. A cada componente se le asigna un número entero dependiendo de si no se tienen en cuenta en absoluto (0), representado por un modelo interactivo que retroalimenta al menos otro componente (2) o cualquier valor intermedio (1), incluyendo la prescripción de archivos externos, enfoques seminteractivos o componentes simulados en línea pero sin ninguna retroalimentación sobre otros componentes.

5. RESULTADOS GENERALES DEL RENDIMIENTO DEL MODELO

En la Figura 2, se representa el Error Absoluto Medio (MAE) de JRA-55 con respecto a ERA-Interim (Figura 2. (a)), junto con la clasificación correspondiente dentro del conjunto multimodelo más JRA-55 (Figura 2. (b)). En el caso ideal, el MAE de JRA-55 es menor que el de cualquiera de los 56 modelos CMIP, lo que significa que el reanálisis alternativo ocupa el primer lugar y que un cambio en el reanálisis de referencia no influye en la clasificación del modelo. Este resultado se obtiene, de hecho, para una gran fracción del NH. Dado que diferentes reanálisis de aproximadamente la misma generación son, en principio, igualmente representativos de la realidad (Sterl, (2004)), los modelos se evalúan dos veces para obtener una visión robusta de su rendimiento. En este estudio, se representan los resultados de la evaluación con respecto a ERA-Interim y se señalan en el texto las desviaciones de la evaluación con respecto a JRA-55 en las tres regiones relevantes. En las regiones restantes, la incertidumbre del reanálisis es menor. Para una rápida visión general de los resultados, la Tabla 1 indica si un modelo dado concuerda mejor con ERA-Interim o JRA-55 en las tres regiones sensibles. En adelante, esto es lo que se denominará "afinidad del reanálisis".



Figura 2. Error absoluto medio (MAE) de las frecuencias relativas de los tipos meteorológicos Lamb de JRA-55 con respecto a ERA-Interim (a), así como su respectiva clasificación dentro del conjunto multimodelo más JRA-55 (b). Cuanto menor sea la clasificación, menor será el MAE y mayor será la concordancia entre JRA-55 y ERA-Interim.

El primer resultado común a todos los modelos es la estructura espacial del error absoluto expresado por el MAE. Es decir, los modelos tienden a tener un mejor rendimiento en zonas oceánicas que en zonas terrestres, y su rendimiento es menos en zonas de alta montaña.

5.1 RESUMEN DE RESULTADOS, PAPEL DE LA RESOLUCIÓN DEL MODELO, COMPLEJIDAD DEL MODELO Y VARIABILIDAD INTERNA

Para cada versión del modelo de la lista de la Tabla 1, la distribución espacial de los valores de MAE puntuales también puede representarse con un diagrama de cajas en lugar de un mapa, lo que permite una comparación general del rendimiento. Para cada muestra de valores de MAE corespondientes a un modelo específico, el rectángulo es el rango intercuartil (RIC) de esa muestra y la barra horizontal la mediana. Las barras de error son el percentil 75+1,5 x RIC y el percentil 25-1,5 x RIC. Todos los valores fuera de este rango se consideran valores atípicos, que son los indicados por puntos. Además, se muestran cuatro diagramas de caja adicionales para las muestras conjuntas de MAE de las versiones más complejas del modelo (que alcanzan una puntuacion \geq 14) y las versiones menos complejas utilizadas en CMIP5 y 6. En estos cuatro casos, no se representan los valores atípicos para simplificar. Las abreviaturas de las configuraciones de los modelos acoplados, así como su participación en CMIP5 o 6 (indicadas por el entero final), se muestran en el eje X. Además, en este eje, también se muestran los nombres de los componentes atmosféricos de los modelos acoplados, ya que algunos de ellos son compartidos por diversas instituciones de investigación (ver Tabla 1).



Figura 3. Resumen de rendimiento para cada uno de los modelos de la Tabla 1. Se representan los valores de MAE puntuales para cada uno de ellos, así como su participación en CMIP5 o CMIP6 (indicada por el número entero del final). Los resultados corresponden al período 1979-2005 y se refieren a ERA-Interim.

Los resultados indican una mejora en el rendimiento para la mayoría de las familias de modelos al cambiar de CMIP5 a CMIP6, donde los pares de modelos disponibles se muestran uno junto al otro. Las mayores mejoras se obtienen en los modelos con un rendimiento relativamente bajo en CMIP5. En concreto, FGOALS-g2 mejora respecto a FGOALS-2 (marrón oscuro), NorESM2-LM y NorESM-MM respecto a NorESM1-M (rosa), BCC-CSM1.1 respecto a BCC-CSM2-MR (naranja), MIROC6 respecto a MIROC5 (azul-verde) e IPSL-CM6A-LR respecto a IPSL-CM5A-LR e IPSL-CM5A-MR (gris). GISS-E2-R-5 mejora respecto a GISS-E2-H y GISS-E2-R (verde) en cuanto a rendimiento medio, pero presenta diferencias de rendimiento espacial ligeramente mayores, como lo indica el RIQ. Los modelos MPI (verde neón), CMCC (cian), GFDL (magenta) y MRI (marrón) funcionan bien en CMIP5 y mejoran aún más en

CMIP6. Sin embargo, entre los modelos MPI, solo se obtiene una ventaja sobre las dos versiones CMIP5 cuando se considera la versión CMIP6 de alta resolución (compare MPI-ESM1.2-HR con MPI-ESM-LR y MPI-ESM-MR). A diferencia de los modelos restantes, el rendimiento de los modelos CNRM (rojo) no mejora de CMIP5 a 6, lo que puede deberse al hecho de que la versión CMIP5 (CNRM-CM5) ya funcionaba muy bien. Sorprendentemente, la versión CMIP6 de alta resolución de CNRM (CNRM-CM6-1-HR) tiene el peor rendimiento dentro de esta familia de modelos. Del mismo modo, los modelos ACCESS (azul) tampoco mejoran si se toma ACCESS1.0 en lugar de ACCESS1.3 como modelo CMIP5 de referencia.

Las familias de modelos CMCC, HadGEM y, en concreto, EC-Earth ofrecen un rendimiento mucho mayor, mostrando una mejora en el rendimiento entre CMIP5 y CMIP6. NorESM2-MM también se encuentra entre los modelos con mejor rendimiento y supera considerablemente a NorESM2-LM y NorESM1. Cabe destacar que, en cuatro de las cinco comparaciones posibles, la versión más compleja del modelo tiene un rendimiento similar al de la versión menos compleja (compárense ACCESS-ESM1.5 con ACCESS-CM2, CMCC-ESM2 con CMCC-CM2-SR5, CNRM-ESM2-2 con CNRM-CM6-1-HR y EC-Earth3-CC con EC-Earth3.). Solo la familia MIROC sufre una pérdida de rendimiento considerable al pasar de menor a mayor complejidad, y sólo en esta familia la resolución del AGCM es considerablemente menor en las configuraciones más complejas (compare MIROC-ESM con MIROC5 y MIROC-ES2L con MIROC6 en la Figura 3 y la Tabla 1).

La ausencia casi total de valores atípicos es otra ventaja notable de NorESM2-MM. MRI-ESM2 y GFDL-CM4 que también son relativamente robustos a los valores atípicos, pero menos que NorESM2-MM. La menor cantidad de valores atípicos entre todos los modelos se obtiene para EC-Earth, independientemente de la versión del modelo.

La evaluación del modelo con JRA-55 presenta resultados similares, lo que indica que los datos inciertos del reanálisis no afectan sustancialmente las estadísticas hemisféricas. Cabe destacar, sin embargo, la ligera, pero visible, pérdida de rendimiento de la familia de modelos EC-Earth, que sitúa a EC-Earth3 aproximadamente al nivel de rendimiento de HadGEM3-GC31-MM. Al evaluarse con JRA-55, todas las versiones del modelo EC-Earth también presentan más resultados atípicos. La afinidad de EC-Earth con ERA-Interim podría explicarse por el hecho de que este reanálisis también se realizó con ECMWF IFS.

El rendimiento promedio del modelo está más relacionado con la resolución horizontal que con la vertical en la atmósfera. Las asociaciones con la resolución oceánica tal y como se esperaba son más débiles, pero significativas. Dado que el aumento de la resolución en la mayoría de los modelos ha ido acompañado de mejoras en los parámetros internos (parametrización, física del modelo, errores), es difícil determinal cuál de éstos dos efectos influye más en el rendimiento del modelo. Sin embargo, la mayoría de los modelos que se someten a un cambio de versión sin aumento de resolución tampoco experimentan una mejora clara en el rendimiento. Esto se observa en las tres versiones de ACCESS que utilizan el mismo AGCM (es decir, GA en 1.3, CM2 y ESM1-5) y también en las tres versiones del modelo GISS, todas con la misma resolución horizontal en la atmósfera dentro de su respectiva familia de modelos. Asimismo, CNRM-CM6-1 y MPI-ESM1-2-LR incluso presentan un rendimiento ligeramente inferior a su respectivo anterior (CNRM-CM5 y MPI-ESM-LR), lo que significa que la actualización es contraproducente para su rendimiento, como se puede ver en la Figura 3. Esto indica que la resolución probablemente influya más en el rendimiento que las actualizaciones del modelo, siempre que éstas no sean demasiado grandes.



Figura 4. Igual que en la Figura 3, pero considerando 72 ejecuciones adicionales para un subconjunto de 13 modelos acoplados distintos. Se tienen en cuenta todas las ejecuciones disponibles por modelo, excepto para IPSL-CM6A-LR, cuyo análisis se detuvo tras considerar 17 miembros adicionales del conjunto. Se muestran, hasta dos conjuntos por instituto, y las abreviaturas de los modelos acoplados individuales se indician mediante números. Las especificaciones exactas de las ejecuciones se proporcionan en el eje X.

6. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Se evaluaron 56 versiones acopladas de modelos de circulación general que contribuyeron con experimentos históricos a CMIP5 y 6 en términos de su capacidad para reproducir la frecuencia observada de los 27 tipos de circulación atmosférica propuestos originalmente por Lamb (1972), según lo representado por los reanálisis ERA-Interim o JRA-55. El resultado es una relación objetiva de clasificación a escala regional que es de interés para el desarrollo de modelos y también para los modelos climáticos regionales y de downscalling que requieren criterios de selección de modelos. En este contexto, se evalúa el rendimiento de los modelos basada en la circulación. Además, se ha propuesto un método sencillo para describir la complejidad de las configuraciones de los modelos acoplados en términos de los componentes considerados del sistema climático.

En promedio, las versiones del modelo utilizadas en CMIP6 presentan un mejor rendimiento que sus predecesoras en CMIP5. Este resultado coincide con resultados anteriores (Cannon (2020)) y (Fernández-Granja et al. (2021)), y se mantiene para las configuraciones del modelo más y menos complejas, tal como se definen aquí. Entre los diferentes parámetros de resolución que se probaron, la resolución horizontal en la atmósfera es la que está más relacionada con el rendimiento, con contribuciones iguales de la resolución latitudinal y longitudinal, y una relación más débil con el número de capas verticales. Se observa un cambio abrupto hacia mejores resultados del modelo con un tamaño de malla horizontal de aproximadamente 25000 puntos, lo que podría indicar la existencia de una resolución atmosférica mínima que debería mantenerse al aumentar la complejidad de las configuraciones del modelo acoplado. Los vínculos correspondientes con la resolución oceánica son más débiles, pero significativos.

Mejorar los parámetros internos del modelo (física y esquemas de parametrización) o añadir más capas verticales a la atmósfera parece que no tiene mucho efecto en el rendimiento del modelo si no se depura adicionalmente la resolución horizontal. Este es el caso de ACCESS-CM2 con respecto a ACCESS1.3, CNRM-CM6-1 con respecto a ACCESS1.3, CNRM-CM6-1 con respecto a CNRM-CM5, GISS-E2-1-G con respecto a GISS-ES-R y MPI-ESM1.2-LR con respecto a MPI-ESM-LR.

Para un subgrupo de 13 de 56 modelos, se evaluó el impacto de la variabilidad interna del modelo en el rendimiento con 72 integraciones de modelos históricos adicionales, cada una inicializada a partir de una fecha de inicio única de la ejecución de control preindustrial correspondiente. La incertidumbre de las condiciones iniciales creadas tiene poco efecto en los resultados generales.

En conclusión podemos decir que los modelos que reproducen con más fiabilidad la circulación atmosférica en nuestra área de estudio son los de la familia EC-Earth, HadGem y CMCC.

REFERENCIAS

- Brands, S.: A circulation-based performance atlas of the CMIP5 and 6 models for regional climate studies in the Northern Hemisphere mid-to-high latitudes, Geosci. Model Dev., 15, 1375–1411, https://doi.org/10.5194/gmd-15-1375-2022, 2022.
- Cannon, A.: Reductions in daily continental-scale atmospheric circulation biases between generations of Global Climate Models: CMIP5 to CMIP6, Environ. Res. Lett., 15, 064006, https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab7e4f, 2020. a
- Fernandez-Granja, J. A., Casanueva, A., Bedia, J., and Fernández, J.: Improved atmospheric circulation over Europe by the new generation of CMIP6 earth system models, Clim. Dynam., 56, 3527–3540, https://doi.org/10.1007/s00382-021-05652-9, 2021. a, b
- Jones, P. D., Harpham, C., and Briffa, K. R.: Lamb weather types derived from reanalysis products, Int. J. Climatol., 33, 1129–1139, https://doi.org/10.1002/joc.3498, 2013. a, b, c, d
- Lamb, H.: British Isles Weather types and a register of daily sequence of circulation patterns, 1861– 1971, Geophysical Memoir, 116, 85 pp., hMSO, 1972. a, b, c, d
- Otero, N., Sillmann, J., and Butler, T.: Assessment of an extended version of the Jenkinson-Collison classification on CMIP5 models over Europe, Clim. Dynam., 50, 1559–1579, https://doi.org/10.1007/s00382-017-3705-y, 2017. a, b, c
- Sterl, A.: On the (In)Homogeneity of Reanalysis Products, J. Climate, 17, 3866–3873, https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<3866:OTIORP>2.0.CO;2, 2004. a