

## **ESTUDIO DE LA HABILIDAD DE LAS PREDICCIONES CLIMÁTICAS DECENALES PARA REPRODUCIR PATRONES DE CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA DE GRAN ESCALA**

Juan José ROSA CÁNOVAS<sup>1,2</sup>, Matilde GARCÍA-VALDECASAS OJEDA<sup>3,4</sup>,  
Emilio ROMERO JIMÉNEZ<sup>1</sup>, Patricio YESTE<sup>1,2</sup>, Sonia Raquel GÁMIZ FORTIS<sup>1,2</sup>,  
Yolanda CASTRO DÍEZ<sup>1,2</sup>, María Jesús ESTEBAN PARRA<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de Física Aplicada, Universidad de Granada, Granada 18071,  
España.*

<sup>2</sup>*Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía  
(IISTA-CEAMA), Granada 18006, España.*

<sup>3</sup>*Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS), Sgonico  
34010, Italia.*

<sup>4</sup>*Earth System Physics Section, International Centre for Theoretical Physics (ICTP),  
Trieste 34151, Italia.*

[jjrc@ugr.es](mailto:jjrc@ugr.es), [mgvaldecasas@ugr.es](mailto:mgvaldecasas@ugr.es), [emiliori@ugr.es](mailto:emiliori@ugr.es), [pveste@ugr.es](mailto:pveste@ugr.es),  
[sgamiz@ugr.es](mailto:sgamiz@ugr.es), [ycaastro@ugr.es](mailto:ycaastro@ugr.es), [esteban@ugr.es](mailto:esteban@ugr.es)

### **RESUMEN**

El objetivo de este trabajo es evaluar la capacidad del Decadal Prediction Large Ensemble (DPLE) para reproducir los principales patrones de circulación atmosférica del hemisferio norte. El DPLE está constituido por una serie de simulaciones climáticas decenales llevadas a cabo con el Community Earth System Model (CESM) e inicializadas cada año en noviembre desde 1954 hasta 2015. Para cada fecha de inicialización, un total de 40 realizaciones fueron generadas mediante la perturbación aleatoria de las condiciones iniciales atmosféricas. En este estudio se han analizado los principales modos de variabilidad espaciotemporal en invierno (diciembre, enero y febrero) de la presión a nivel del mar (SLP) del DPLE mediante un análisis de componentes principales (PCA). Se ha tomado como referencia la SLP del reanálisis del Japanese 55-year Reanalysis (JRA-55) en la evaluación de los resultados. La mayor correspondencia entre los modos de variabilidad del DPLE y los de referencia se da para el rango de predicción de 1-4 años, aunque las correlaciones existentes entre las componentes principales rotadas no superan el valor de 0.5. Las correlaciones disminuyen para los rangos de predicción de 3-6 y 6-9 años.

**Palabras clave:** circulación atmosférica, predicción climática decenal, DPLE, SLP, PCA.

### **ABSTRACT**

The aim of this study is to evaluate the skill of Decadal Prediction Large Ensemble (DPLE) in reproducing the main atmospheric circulation patterns in the Northern Hemisphere. The DPLE encompasses a collection of near-term climate simulations carried out with the Community Earth System Model (CESM) and initialised every

year in November from 1954 to 2015. For each initial date, an ensemble of 40 members was generated by randomly perturbing the initial atmospheric conditions. In this study, the main spatio-temporal variability modes of DPLE sea level pressure (SLP) in winter (December, January, and February) have been analysed by means of a principal component analysis (PCA). SLP data from the Japanese 55-year Reanalysis (JRA-55) has been used as a reference dataset in the evaluation of the results. The largest similarities between the DPLE and reference variability modes have been found in the forecast range of 1-4 years, although the correlations between the rotated principal components do not surpass 0.5. The correlations decrease for the forecast ranges of 3-6 and 6-9 years.

**Key words:** atmospheric circulation, decadal climate prediction, DPLE, SLP, PCA.

## **1. INTRODUCCIÓN**

La predicción decenal del clima (PD) surgió para satisfacer la demanda de información climática a corto plazo para la toma de decisiones y la gestión de recursos en diferentes sectores de la sociedad (Meehl et al., 2009). La PD actúa como nexo entre la predicción climática a escala estacional-interanual (PEI) y la proyección multidecenal de cambio climático (PMD). Mientras que la PEI emplea la inicialización de los modelos con datos observacionales para predecir la variabilidad climática natural a corto plazo, en la PMD son particularmente relevantes las condiciones de contorno que suministran la información sobre los cambios en los forzamientos radiativos para obtener la señal de cambio climático a largo plazo. En la escala temporal de la que se ocupa la PD, tanto las condiciones iniciales como las de contorno cumplen un papel fundamental (Boer et al., 2016).

Estudios previos han constatado capacidad de la PD para reproducir parte de la variabilidad de la circulación atmosférica de gran escala en el hemisferio norte (Dunstone et al., 2016; Smith et al., 2019). Este interés en disponer de predicciones fiables de la circulación atmosférica se debe a la influencia que ésta tiene en la evolución de campos como la temperatura o la precipitación a escala local. Hasta ahora, estas investigaciones se han centrado principalmente en el análisis de la predicción de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), el patrón de circulación más influyente en el tiempo atmosférico y la variabilidad climática durante los meses de invierno en el hemisferio norte. La NAO explica alrededor de un tercio de la varianza de la presión a nivel del mar (SLP) en esta época del año (Hurrell et al., 2003). Sin embargo, existen otros modos de variabilidad secundarios (Wallace y Gutzler, 1981) que no han recibido tanta atención en el ámbito de la PD. En este contexto, este estudio tiene como propósito evaluar la capacidad de una serie de experimentos decenales para reproducir el conjunto de los patrones de variabilidad que controlan la circulación atmosférica en el hemisferio norte durante los meses de invierno. Se ha hecho uso del análisis de componentes principales (PCA) para extraer los principales modos de variabilidad espaciotemporal de la SLP y evaluar el grado de correspondencia entre lo descrito por las predicciones decenales y una base de datos de reanálisis.

El documento se organiza como sigue: en la Sección 2 se detallan los datos analizados y los procedimientos empleados, en la Sección 3 se muestran los resultados y, finalmente, se realiza la discusión de estos en la Sección 4.

## **2. DATOS Y METODOLOGÍA**

### **2.1. Predicciones climáticas decenales y base de datos de referencia**

Las predicciones climáticas decenales de la SLP analizadas en este trabajo forman parte del Decadal Prediction Large Ensemble (DPLE; Yeager et al., 2018). El DPLE es un conjunto de predicciones climáticas a escala global llevadas a cabo por el National Center for Atmospheric Research (NCAR) con el Community Earth System Model (CESM) versión 1.1. El DPLE comprende una serie de simulaciones decenales inicializadas con el método full-field (Carrasi et al., 2014) cada año en noviembre desde 1954 hasta 2015. Los componentes del modelo inicializados con datos observacionales fueron el océano y el hielo. Para cada fecha de inicialización, un conjunto de 40 realizaciones fue generado mediante la perturbación aleatoria de las condiciones iniciales de las variables atmosféricas. Las simulaciones del DPLE utilizan los valores históricos del forzamiento radiativo hasta 2005 (Lamarque et al., 2010) y solamente el escenario representativo de concentración 8.5 (RCP 8.5) para los forzamientos radiativos futuros a partir de 2006 (Meinshausen et al., 2011). Una descripción en detalle sobre la configuración del modelo puede ser consultada en Yeager et al. (2018).

En este trabajo se ha utilizado el promedio de las 40 realizaciones del DPLE para los experimentos decenales inicializados cada año desde 1960 hasta 2008 (49 décadas). En la evaluación de los resultados se ha empleado la SLP del Japanese 55-year Reanalysis (JRA-55; Kobayashi et al., 2015) como base de datos de referencia. El JRA-55 es uno de los productos de reanálisis recomendados por SPARC (2022) para aquellos estudios que requieren un período de datos extenso de SLP. Un análisis sobre la representación de la circulación atmosférica en JRA-55 y sus sesgos puede ser consultado en Harada et al. (2016). Las medias mensuales de la SLP del JRA-55 son suministradas en una malla con resolución de  $1.25^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ . La SLP del DPLE, con una resolución original de  $1.25^{\circ} \times 0.94^{\circ}$ , ha sido interpolada a la malla del JRA-55 antes de realizar los cálculos.

### **2.2. Análisis de componentes principales**

El análisis de componentes principales (PCA) es una herramienta frecuentemente utilizada en meteorología y climatología para el análisis de la variabilidad espaciotemporal de los campos físicos (e.g., Hurrell et al., 2003; Wallace y Gutzler, 1981). Dado un campo de anomalías  $z(x,t)$  en las localizaciones  $x = 1, \dots, p$  y en los tiempos  $t = 1, \dots, n$ , el PCA tiene como objetivo encontrar una base de vectores ortogonales sobre los que proyectar  $z(x,t)$  de forma que la varianza explicada por estas proyecciones sea máxima. Estos vectores reciben el nombre de funciones empíricas ortogonales (EOFs), mientras que las proyecciones de  $z(x,t)$  son las llamadas componentes principales (PCs). Un estudio teórico detallado sobre el PCA puede consultarse en Preisendorfer y Mobley (1998).

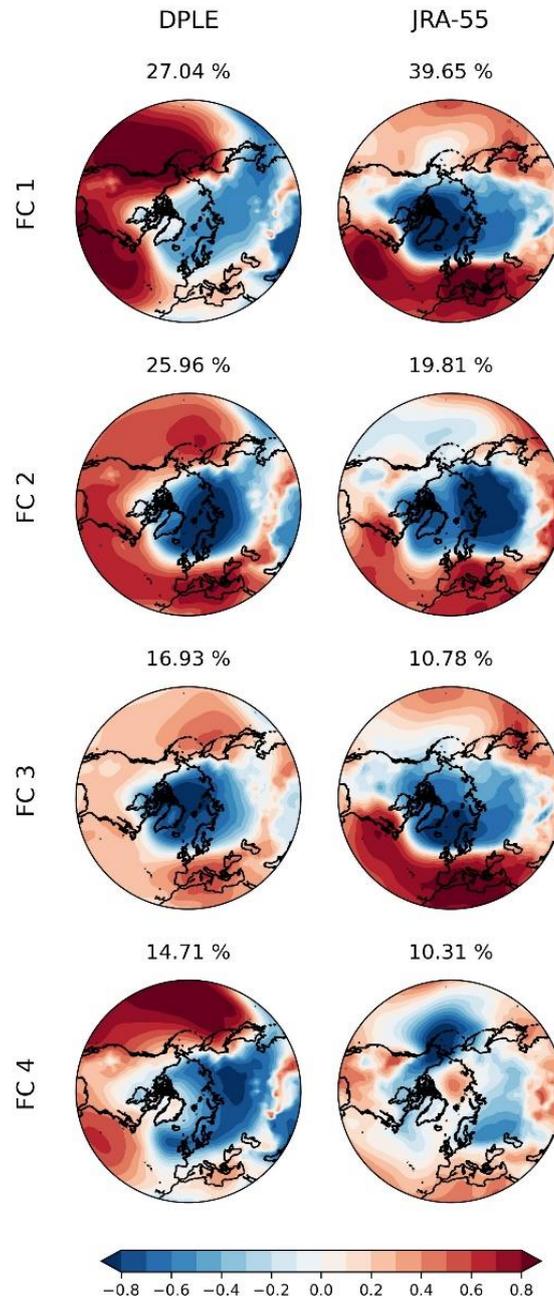
El PCA ha sido realizado en este trabajo en el modo S. Esto significa que cada EOF representa un determinado patrón de variabilidad espacial con una PC como serie temporal asociada (Preisendorfer y Mobley, 1988). El PCA ha sido aplicado a la SLP del DPLE y del JRA-55 en el hemisferio norte (20°N-90°N) durante los meses de invierno (diciembre, enero y febrero). Las anomalías de la SLP han sido calculadas de la siguiente manera. Partiendo de las series mensuales de la SLP en cada una de las 49 fechas de inicialización, se han obtenido las series estacionales en invierno. A continuación, se han promediado las series estacionales en la dimensión del tiempo de predicción para diferentes rangos de predicción: 1-4 años, 3-6 años y 6-9 años. Para cada rango de predicción, las anomalías han sido calculadas sustrayendo la climatología estacional a la SLP estacional en la dimensión de la fecha de inicialización. Para facilitar la interpretación física de los resultados del PCA, las EOFs han sido sometidas a una rotación varimax (Kaiser, 1958). De este proceso han resultado las EOFs rotadas (REOFs) y, de las proyecciones del campo  $z(x,t)$  en las REOFs, las PCs rotadas (RPCs). El número de EOFs sometidas a rotación ha sido escogido mediante la regla de North (North et al., 1982).

Para el estudio de los modos de variabilidad espacial se han analizado las distribuciones espaciales de correlaciones entre las RPCs y el campo  $z(x,t)$ , que reciben el nombre de loadings o factores de carga (FCs). También se han calculado las correlaciones entre las RPCs del DPLE y del JRA-55 para cuantificar la relación existente entre los principales modos de variabilidad de las predicciones decenales y del reanálisis. Siguiendo el procedimiento descrito en Goddard et al. (2013), en la evaluación de la significación estadística de los resultados se ha utilizado un bootstrapping no paramétrico para generar 4000 muestras (con reemplazamiento) del promedio de las 40 realizaciones del DPLE en los tres rangos de predicción. El PCA y el estudio de correlaciones entre RPCs ha sido aplicado a cada una de las muestras resultantes de este bootstrapping. A partir de estos resultados, se han calculado los intervalos de confianza del 90 % para la varianza explicada por la SLP del DPLE y las correlaciones entre RPCs.

### **3. RESULTADOS**

Los resultados obtenidos para los FCs en el rango de predicción de 1-4 años se muestran en la Fig. 1. Se ha obtenido un total de 4 modos de variabilidad para el DPLE, con una varianza explicada total del 84.64 %, y 5 modos para el JRA-55, que en conjunto explican el 87.20 % de la varianza de la SLP de invierno. Solamente se muestran los 4 primeros FCs del JRA-55 por motivos de limitación de espacio.

El primer modo de variabilidad del DPLE explica el 27.04 % de la varianza en invierno. Pueden observarse dos centros de acción de correlaciones positivas, uno en el Atlántico Norte y otro en el Pacífico occidental, con valores por encima de 0.8. Por otro lado, existe una región de correlaciones negativas que se expande desde Groenlandia hasta el Pacífico oriental, así como un centro de correlaciones negativas por debajo de -0.8 al sur de Asia. La RPC asociada a este modo presenta una correlación de solo 0.29 con la RPC 1 del JRA-55 (Tabla 1). El primer modo de la SLP del JRA-55, con varianza explicada del 39.65 %, presenta dos centros de acción bien diferenciados. Uno de ellos se encuentra sobre el océano Ártico y parte de



*Fig. 1: FCs de los cuatro modos de variabilidad (filas) de la SLP de invierno del DPLE (primera columna) y el JRA-55 (segunda columna). Sobre cada mapa se muestra el porcentaje de varianza explicada por cada modo.*

Groenlandia con correlaciones negativas muy intensas, mientras que el segundo se expande por prácticamente todo el Atlántico Norte con correlaciones positivas elevadas, superando el 0.8 sobre el Mediterráneo y la parte más occidental del Atlántico. Este modo de variabilidad es similar al correspondiente a la NAO (Hurrell et al., 2003). La correlación más alta para la RPC 1 del DPLE se observa con la RPC 4 de la SLP de referencia, que explica el 10.31 % de la varianza de la SLP, y tiene un

valor de 0.37 (Tabla 1). El FC 4 del JRA-55 muestra un centro de correlaciones negativas muy marcado sobre el norte del océano Pacífico con valores por debajo de  $-0.8$ . Se pueden apreciar tres centros de correlaciones positivas más moderadas al oeste de Estados Unidos, al norte de África y en el sudeste asiático.

		<i>JRA-55</i>				
		<b>RPC 1</b> 39.65 %	<b>RPC 2</b> 19.81 %	<b>RPC 3</b> 10.78 %	<b>RPC 4</b> 10.31 %	<b>RPC 5</b> 6.65 %
<i>DPLE</i>	<b>RPC 1</b> 27.04 % [23.22 %, 35.30 %]	0.29 [-0.22, 0.46]	0.18 [-0.14, 0.47]	0.29 [-0.17, 0.53]	0.37 [-0.13, 0.52]	-0.01 [-0.40, 0.36]
	<b>RPC 2</b> 25.96 % [18.98 %, 26.38 %]	0.19 [-0.25, 0.44]	0.17 [-0.17, 0.45]	0.37 [-0.18, 0.53]	0.41 [-0.11, 0.52]	-0.07 [-0.42, 0.38]
	<b>RPC 3</b> 16.93 % [14.65 %, 22.79 %]	0.23 [-0.22, 0.42]	0.27 [-0.16, 0.43]	0.33 [-0.17, 0.49]	0.21 [-0.13, 0.50]	-0.17 [-0.41, 0.36]
	<b>RPC 4</b> 14.71 % [6.66 %, 18.31 %]	0.13 [-0.26, 0.40]	-0.08 [-0.25, 0.42]	0.29 [-0.25, 0.47]	0.49 [-0.18, 0.50]	-0.07 [-0.40, 0.35]

*Tabla 1: Correlación entre las RPCs del DPLE y del JRA-55 para el rango de predicción de 1-4 años. Para cada RPC se indica su varianza explicada. Entre corchetes se muestran los intervalos de confianza del 90% (ver Sección 2.2)*

El FC 2 del DPLE, cuya RPC explica un 25.96 % de la varianza de la SLP, muestra cuatro centros de acción, dos de correlaciones negativas y dos de correlaciones positivas. Se observa una región de correlaciones negativas por debajo de  $-0.8$  sobre el norte de Eurasia. Además, las correlaciones negativas observadas al sur del continente asiático en FC 1 se mantienen, aunque con menor intensidad. El primero de los centros de acción positivos se encuentra sobre el Mediterráneo y el Atlántico norte, mientras que el segundo se sitúa sobre el norte del océano Pacífico, ambos con correlaciones cercanas a 0.8. De nuevo, la mayor correlación para la RPC 2, con valor de 0.41, se da con la RPC 4 del JRA-55 (Tabla 1).

El tercer modo de variabilidad del DPLE muestra un 16.93% de la varianza explicada y tiene un FC con un centro de correlaciones negativas muy marcado al norte de Groenlandia con valores por debajo de  $-0.8$ . Se obtienen correlaciones positivas más discretas en las latitudes más meridionales del dominio. La correlación más alta con las RPCs de referencia se da para la RPC 3 con un valor de 0.33. El FC 3 de referencia es parecido al FC 1, pero con el centro de correlaciones negativas más concentrado y desplazado hacia el norte de Europa y con el de correlaciones positivas algo más homogéneo y mostrando los valores más altos sobre la Europa mediterránea y el norte de África.

Por último, el cuarto modo de variabilidad del DPLE explica un 14.71 % de la varianza de la SLP. En el mapa de FC 4 se observa un dipolo de correlaciones muy marcado con resultados positivos por encima de 0.8 al norte del Pacífico central y correlaciones negativas al norte de Europa y en Rusia, con valores por debajo de  $-0.8$ . Otro dipolo de correlaciones más moderadas se observa con centros de acción en el centro-este del Atlántico (correlaciones positivas) y el sur de Asia (correlaciones

negativas). La RPC del JRA-55 que mejor correlaciona con la RPC del DPLE asociada a este modo de variabilidad vuelve a ser la RPC 4, con un resultado de 0.49 (Tabla 1). En lo que respecta a los modos de variabilidad de la SLP en los rangos de predicción de 3-6 y 6-9 años, las similitudes que se puedan encontrar con los patrones de referencia son menores que para el rango de 1-4 años. No se han representado los mapas de los FCs por limitación de espacio, aunque sí se muestran los resultados para el cálculo de correlaciones entre las RPCs (Tabla 2).

		<i>JRA-55</i>				
		<b>RPC 1</b> 31.24 %	<b>RPC 2</b> 25.62 %	<b>RPC 3</b> 13.64 %	<b>RPC 4</b> 10.70 %	<b>RPC 5</b> 7.41 %
<i>DPLE</i>	<b>RPC 1</b> 21.40 % [20.42 %, 31.24 %]	0.26 [-0.29, 0.42]	0.12 [-0.24, 0.46]	0.40 [-0.18, 0.45]	0.45 [-0.21, 0.41]	0.11 [-0.32, 0.30]
	<b>RPC 2</b> 20.38 % [15.12 %, 23.63 %]	0.07 [-0.25, 0.37]	0.14 [-0.22, 0.42]	0.23 [-0.15, 0.46]	0.02 [-0.19, 0.43]	-0.09 [-0.37, 0.36]
	<b>RPC 3</b> 14.97 % [12.20 %, 18.41 %]	0.16 [-0.24, 0.39]	0.23 [-0.22, 0.42]	0.40 [-0.16, 0.45]	0.07 [-0.17, 0.43]	0.11 [-0.35, 0.33]
	<b>RPC 4</b> 13.65 % [8.94 %, 15.21 %]	0.16 [-0.25, 0.40]	0.08 [-0.23, 0.41]	0.11 [-0.24, 0.47]	0.15 [-0.24, 0.44]	-0.14 [-0.36, 0.33]
	<b>RPC 5</b> 11.74 % [5.76 %, 12.50 %]	-0.14 [-0.38, 0.26]	0.01 [-0.39, 0.27]	-0.03 [-0.45, 0.31]	-0.29 [-0.45, 0.26]	0.20 [-0.10, 0.38]

*Tabla 2: Como la Tabla 1 pero para el rango de predicción de 3-6 años.*

En el rango de predicción de 3-6 años (Tabla 2) se han obtenido 5 modos de variabilidad para el DPLE y otros 5 para el JRA-55. La RPC 1 del DPLE, con 21.40 % de varianza explicada, muestra las correlaciones más altas con la RPC 3 y la RPC 4 de referencia, que explican el 13.64 % y el 10.70 % de la varianza de la SLP, con valores de 0.40 y 0.45, respectivamente. También se aprecia cierto grado de similitud entre la RPC 3 del DPLE (14.97% de varianza explicada) y la RPC 3 de referencia con una correlación de 0.40.

Se han obtenido 5 modos de variabilidad significativos para el DPLE y 9 para el JRA-55 en el rango de predicción de 6-9 años, aunque en la Tabla 3 únicamente se muestran los resultados para las RPCs de los 5 primeros. En este caso, las correlaciones más altas se observan entre la RPC 4 del DPLE (12.71 % de varianza explicada) y la RPC4 de referencia 4 y (7.68 % de varianza explicada) y entre la RPC 5 del DPLE (11.32 % de varianza explicada) y la RPC 1 de referencia (29.48 % de varianza explicada). Mientras que la RPC 4 del DPLE presenta una correlación de 0.44 con la RPC 4 de referencia, la RPC 5 muestra una correlación de -0.38 con la RPC 1 de referencia.

#### **4. DISCUSIÓN**

Aunque numerosos estudios corroboran la gran eficacia de la PD en la predicción de la temperatura (e.g., Boer et al., 2016; Kushnir et al., 2019), propiciada en parte por las tendencias positivas asociadas al calentamiento global, los resultados en la predicción de campos como la precipitación o la SLP no suelen ser tan optimistas.

		<i>JRA-55</i>				
		<b>RPC 1</b> 29.48%	<b>RPC 2</b> 20.98 %	<b>RPC 3</b> 12.72 %	<b>RPC 4</b> 7.68 %	<b>RPC 5</b> 7.05 %
<b>DPLE</b>	<b>RPC 1</b> 30.93 % [24.29 %, 40.08 %]	0.21 [-0.12, 0.38]	0.01 [-0.23, 0.35]	0.17 [-0.24, 0.36]	0.04 [-0.27, 0.39]	0.26 [-0.30, 0.41]
	<b>RPC 2</b> 14.31 % [12.95 %, 21.73 %]	0.23 [-0.13, 0.38]	0.23 [-0.19, 0.37]	0.29 [-0.17, 0.39]	0.01 [-0.19, 0.40]	-0.24 [-0.36, 0.28]
	<b>RPC 3</b> 13.01 % [10.33 %, 16.03 %]	-0.10 [-0.25, 0.33]	0.10 [-0.31, 0.34]	-0.03 [-0.27, 0.36]	0.19 [-0.25, 0.38]	-0.02 [-0.34, 0.28]
	<b>RPC 4</b> 12.71 % [8.40 %, 13.36 %]	0.08 [-0.23, 0.37]	0.16 [-0.26, 0.40]	-0.05 [-0.25, 0.39]	0.44 [-0.26, 0.38]	0.33 [-0.31, 0.34]
	<b>RPC 5</b> 11.32 % [5.87 %, 11.14 %]	-0.38 [-0.33, 0.34]	-0.22 [-0.38, 0.38]	-0.33 [-0.39, 0.36]	-0.13 [-0.38, 0.34]	-0.10 [-0.35, 0.35]

Tabla 3: Como la Tabla 1 pero para el rango de predicción de 6-9 años. Solamente se muestran las correlaciones con las 5 primeras RPCs del JRA-55.

Smith et al. (2019), en un estudio en el que se analiza un conjunto muy amplio de realizaciones llevadas a cabo por varios modelos climáticos, muestran que el grado de habilidad predictiva de la SLP depende de la región de estudio. Una representación inexacta de la SLP en los experimentos decenales, particularmente en algunas zonas del hemisferio norte, influiría de manera negativa en la obtención de los modos principales de variabilidad espaciotemporal y sería responsable de las discrepancias observadas entre los resultados del PCA aplicado a la SLP del DPLE y del JRA-55. El principal modo de variabilidad del hemisferio norte en invierno en el período analizado según la SLP de referencia, con un patrón espacial similar al de la NAO (Hurrell et al., 2003), no es captado adecuadamente por la SLP de los experimentos decenales del DPLE para ninguno de los rangos de predicción considerados. Aunque en algunos de los FCs se observan centros de acción muy marcados situados en el norte, no hay ningún FC que capte claramente el centro de acción de las latitudes más meridionales del dominio.

El estudio sobre los patrones de circulación atmosférica en la PD podría ampliarse con la incorporación de métodos alternativos al PCA. Por ejemplo, el análisis a través de índices de teleconexión calculados a partir de anomalías de la SLP o en la altura geopotencial en localizaciones puntuales (Wallace y Gutzler, 1981) podría conducir a mejores resultados si la variabilidad del campo analizado en esas localizaciones concretas está bien representada en los experimentos decenales, como en Smith et al. (2019) en el caso de la NAO.

Smith et al. (2019) también explican que la fracción señal-ruido en la SLP o la precipitación es considerablemente menor que en la temperatura. Ante esto, acentúan la necesidad de emplear un elevado número tanto de realizaciones como de modelos climáticos para poder captar adecuadamente la señal de variabilidad de estos campos. Aunque en este estudio han sido utilizadas 40 realizaciones, todas fueron generadas con el CESM. Las PDs presentan incertidumbres que tienen su origen en el comportamiento caótico natural de la atmósfera, así como en los errores introducidos por imperfecciones en los modelos y en las condiciones iniciales. Smith et al. (2019)

señalan que utilizar un conjunto amplio de realizaciones permitiría disminuir la incertidumbre asociada al carácter caótico de la variabilidad climática al eliminar a través del promedio el componente no predecible de esta señal o, al menos, parte de él. Incluyendo varios modelos en el promedio se podría reducir también la incertidumbre ligada a las condiciones iniciales y a la propia configuración del modelo.

## **AGRADECIMIENTOS**

J. J. Rosa-Cánovas muestra su agradecimiento al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades por su contrato predoctoral (PRE2018-083921). Este estudio ha sido realizado en el marco del proyecto CGL2017-89836-R, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, y con fondos FEDER adicionales: B-RNM-336-UGR18, financiado por FEDER/Junta de Andalucía - Conserjería de Economía y Conocimiento, y P20\_00035, financiado por FEDER/Junta de Andalucía-Conserjería de Transformación Económica, Industria, Conocimiento y Universidades, y Ministerio de Ciencia e Innovación (proyecto LifeWatch-2019-10-UGR-01).

## **REFERENCIAS**

- Boer, G. J., Smith, D. M., Cassou, C., Doblas-Reyes, F., Danabasoglu, G., Kirtman, B., ... Eade, R. (2016). The Decadal Climate Prediction Project (DCPP) contribution to CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(10), 3751–3777. doi: <http://dx.doi.org/10.5194/gmd-9-3751-2016>
- Carrasi, A., Weber, R. J. T., Guemas, V., Doblas-Reyes, F. J., Asif, M., y Volpi, D. (2014). Full-field and anomaly initialization using a low-order climate model: a comparison and proposals for advanced formulations. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 21(2), 521–537. doi: <http://dx.doi.org/10.5194/npg-21-521-2014>
- Dunstone, N., Smith, D., Scaife, A., Hermanson, L., Eade, R., Robinson, N., Andrews, M., y Knight, J. (2016). Skilful predictions of the winter North Atlantic Oscillation one year ahead. *Nature Geoscience*, 9(11), 809–814. doi: <https://dx.doi.org/10.1038/ngeo2824>
- Goddard, L., Kumar, A., Solomon, A., Smith, D., Boer, G., Gonzalez, P., ... Delworth, T. (2013). A verification framework for interannual-to-decadal predictions experiments. *Climate Dynamics*, 40(1–2), 245–272. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-012-1481-2>
- Harada, Y., Kamahori, H., Kobayashi, C., Endo, H., Kobayashi, S., Ota, Y., ..., Takahashi, K. (2016). The JRA-55 reanalysis: Representation of atmospheric circulation and climate variability. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 94(3), 269–302. doi: <https://dx.doi.org/10.2151/jmsj.2016-015>
- Hurrell, J. W., Kushnir, Y., Ottensen, G., y Visbeck, M. (2003). An overview of the North Atlantic Oscillation. En J. W. Hurrell, Y. Kushnir, G. Ottensen, & M. Visbeck (Eds.), *Geophysical Monograph Series* (Vol. 134, pp. 1-35). American Geophysical Union. doi: <http://dx.doi.org/10.1029/134GM01>
- Kaiser, H. F. (1958). The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*, 23(3), 187–200. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/bf02289233>

- Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebata, A., Moriya, M., Onoda, H., Onogi, K., ..., Takahashi, K. (2015). The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 93(1), 5–48. doi: <http://dx.doi.org/10.2151/jmsj.2015-001>
- Kushnir, Y., Scaife, A. A., Arritt, R., Balsamo, G., Boer, G., Doblas-Reyes, F., ... Wu, B. (2019). Towards operational predictions of the near-term climate. *Nature Climate Change*, 9(2), 94–101. doi: <http://dx.doi.org/10.1038/s41558-018-0359-7>
- Lamarque, J.-F., Bond, T. C., Eyring, V., Granier, C., Heil, A., Klimont, Z., ... van Vuuren, D. P. (2010). Historical (1850–2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: methodology and application. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(15), 7017–7039. doi: <http://dx.doi.org/10.5194/acp-10-7017-2010>
- Meehl, G. A., Goddard, L., Murphy, J., Stouffer, R. J., Boer, G., Danabasoglu, G., ... Stockdale, T. (2009). Decadal prediction: Can it be skillful? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(10), 1467–1486. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2009bams2778.1>
- Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L. T., Lamarque, J.-F., ... van Vuuren, D. P. P. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, 109(1–2), 213–241. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>
- North, G. R., Bell, T. L., Cahalan, R. F., & Moeng, F. J. (1982). Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Monthly Weather Review*, 110(7), 699–706. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1982\)110%3c0699:seiteo%3e2.0.co;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1982)110%3c0699:seiteo%3e2.0.co;2)
- Preisendorfer, R. W., y Mobley, C. D. (1988). Principal component analysis in meteorology and oceanography. Londres, Inglaterra: Elsevier Science.
- Smith, D. M., Eade, R., Scaife, A. A., Caron, L.-P., Danabasoglu, G., DelSole, T. M., ..., Yang, X. (2019). Robust skill of decadal climate predictions. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 2(1). doi: <http://dx.doi.org/10.1038/s41612-019-0071-y>
- SPARC (2022). SPARC Reanalysis Intercomparison Project (S-RIP) Final Report. SPARC Report No. 10, WCRP Report 6/2021. SPARC Office. <https://doi.org/10.17874/800DEE57D13>
- Wallace, J. M., y Gutzler, D. S. (1981). Teleconnections in the geopotential height field during the northern hemisphere winter. *Monthly Weather Review*, 109(4), 784–812. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109%3c0784:titghf%3e2.0.co;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109%3c0784:titghf%3e2.0.co;2)
- Yeager, S. G., Danabasoglu, G., Rosenbloom, N. A., Strand, W., Bates, S. C., Meehl, G. A., ... Lovenduski, N. S. (2018). Predicting Near-Term Changes in the Earth System: A Large Ensemble of Initialized Decadal Prediction Simulations Using the Community Earth System Model. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(9), 1867–1886. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/bams-d-17-0098.1>