

Coherencia entre los modos de variabilidad del Atlántico Norte y los tipos de circulación del NW de la Península Ibérica

A.M. RAMOS*, M.N. LORENZO y L. GIMENO

* alexramos@uvigo.es

*Environmental Physics Laboratory, Facultade de Ciencias,
Universidade de Vigo
Campus As Lagoas s/n, Ourense, Spain*

RESUMEN

Los modos de variabilidad de baja frecuencia presentan una influencia importante en la variabilidad del sistema climático para diversas escalas temporales y espaciales. Aunque la Oscilación de Atlántico Norte (NAO) explique una porción substancial de la variabilidad del clima en Europa, es también necesario considerar otros modos de variabilidad de baja frecuencia, como el índice Escandinavo (SCA), el índice del Atlántico Este (EA) o el índice del Atlántico Este/Oeste de Rusia (EA/WR). Además, el link entre los modos de variabilidad de baja frecuencia y el clima en Europa no se puede considerar estable. El objetivo de este estudio es evaluar la compatibilidad entre los modos de variabilidad de baja frecuencia en Europa (calculada utilizando un análisis de componentes principales, PCA) y regímenes de la circulación local (usando una versión automatizada de los Lamb weather type classification). Esto permitiría observar cómo los cambios en las posiciones de los modos de variabilidad de baja frecuencia en Europa podrían afectar a la circulación local. Para el área bajo estudio (ubicada en el noroeste de la Península Ibérica) los resultados muestran que hay un alto nivel de correlación entre los modos regionales de variabilidad de baja frecuencia derivados de un acercamiento estadístico (usando el PCA) y las circulaciones físicas verdaderas (según lo representado por los tipos de la circulación). Además, los cambios en la posición de modos de variabilidad de baja frecuencia tienden a favorecer la aparición de algunos tipos de la circulación mientras que otros tendrían menor probabilidad de aparición.

Keywords: Tipos de circulación, modos climáticos, clasificación, cambio climático regional, variabilidad climática.

1 Introducción

Observaciones recientes han destacado el hecho de que las tendencias significativas del clima son evidentes en diversas escalas temporales sobre el norte del sector Atlántico-Europeo (IPCC 2007; Trigo et al. 2008). La variabilidad en la circulación atmosférica es la cuestión más importante en términos de cambios en la distribución espacial, no sólo de la temperatura o la precipitación, sino también de otras variables climatológicas.

Una característica distintiva de la variabilidad interanual de los patrones de circulación a gran escala es el grado en el cual están organizados espacialmente, según lo representado por sus modos de variabilidad de baja frecuencia. Estos patrones, que son considerados por muchos autores como los modos preferentes de variabilidad de baja frecuencia de la circulación atmosférica, consisten en variaciones de la misma fase o desfasadas de la presión geopotencial o del nivel del mar en áreas que normalmente reciben el nombre de “áreas de acción”. Los modos de variabilidad de baja frecuencia son conceptos utilizados para entender la compleja unión entre la escala planetaria de la circulación y el clima regional, incluyendo la ocurrencia de eventos extremos.

Los primeros estudios de modos de variabilidad de baja frecuencia fueron los de Wallace y Gutzler (1981) realizados para el invierno y el de Barnston y Livezey (1987) utilizado para el análisis de todas las estaciones. Para el sector europeo del Atlántico Norte (NAE), los principales patrones según Barnston y Livezey (1987) son NAO, EA, patrón 1 de la región Euro-Asiática (también conocido como EA/WR) y el patrón 2 de la región Euro-Asiática (también conocido como SCA). Durante

las dos décadas pasadas, varios estudios han evaluado el impacto de estos modos en el clima europeo (particularmente con la temperatura y la precipitación). La NAO es el modo principal de variabilidad de baja frecuencia en el sector NAE y se correlaciona con el clima superficial en la mayor parte de la región europea (Hurrell y van Loon 1997; Trigo et al. 2002; Jones et al. 2003; Bojariu y Gimeno 2003). Se ha observado, por ejemplo, que la NAO positiva durante los meses de invierno se asocia con un cambio al norte del storm track, y una disminución de las tormentas al sur, que causan condiciones más secas en regiones del sur de Europa (Hurrell et al. 2003).

Sin embargo, esta relación entre la NAO y el clima europeo no se puede considerar completamente estable. Chen y Hellström (1999) fueron pioneros en el estudio de la no estacionariedad de las conexiones entre la circulación y el tiempo atmosférico en Europa. Existe un gran número de estudios que también demuestran la naturaleza no estacionaria de este link, en términos de temperatura superficial (Slonosky et al. 2001; Gimeno et al. 2003), temperatura superficial del mar (Gualterio y Graf 2002) o precipitación (Zveryaev 2006; Beranová y Huth 2007). Jung et al., en el 2003 fue el primero que sugirió que la razón de la no estacionariedad del nexo entre los modos de variabilidad y el tiempo superficial estaba en las posiciones cambiantes de los centros de acción de NAO. En un estudio reciente, Vicente-Serrano y López-Moreno (2008) acentuaron que el link no estacionario entre la NAO y la precipitación está asociado con la variabilidad interdecadal en la posición de los centros de presión de NAO.

Aunque NAO es el principal modo de variabilidad de baja frecuencia del Hemisferio Norte que influye en el clima europeo, algunos estudios también se han centrado en la influencia de otros

modos de variabilidad de baja frecuencia en el sector NAE. Así se ha observado la influencia de estos otros modos sobre la precipitación, Rodríguez-Puebla et al. (1998); Wibig (1999); Blackburn y Hoskins (2001), en el flujo del río (Lorenzo y Taboada 2005) y en la intensidad del afloramiento costero (deCastro et al. 2008). Las relaciones entre otros modos de variabilidad de baja frecuencia y temperatura en la región NAE se pueden encontrar en Sáenz et al. (2001) y Beranová y Huth (2008).

Los estudios de la variabilidad temporal de los efectos de otros modos de variabilidad de baja frecuencia concluyen que la influencia de estos otros modos de variabilidad de baja frecuencia (aparte de la NAO) sobre la temperatura y la precipitación varían tanto espacial como temporalmente (Krichak y Alpert 2005; Beranová y Huth 2008).

Al mismo tiempo, su importancia varía estacionalmente, con tendencia a fortalecerse durante algunas estaciones y debilitarse en otras. Por ejemplo, NAO es más influyente durante invierno y menos durante los meses de verano (Corte-Real et al. 1995; Trigo et al. 2001). En general, el impacto de los modos principales de variabilidad de baja frecuencia (especialmente los dipolos zonales) sobre la precipitación en Europa es generalmente más marcado durante los meses de invierno (Glowienka-Henze 1990; Dunkeloh y Jacobeit 2003), por ser la baroclinidad más alta en las latitudes extratropicales de lo que suele ser durante el verano. Como resultado de esto, en este trabajo, el estudio se centrará en los meses de invierno.

Uno de los métodos más utilizados para estudiar el efecto de los cambios en los patrones de circulación sobre el clima regional es la valoración de cambios en estos patrones. Los patrones de circulación son específicos para una región dada y son resultado del análisis

de los datos sinópticos meteorológicos generalmente sobre una celda regular, obtenida utilizando gran variedad de metodologías (Huth et al. 2008). Los tipos de circulación se definen para cada día y suelen reflejar de forma simple la circulación local que tiene lugar. En cambio, los modos de variabilidad se calculan con una escala temporal y espacial mayor que la que utilizan los tipos de circulación y son caracterizados por patrones de presión a gran escala recurrentes y persistentes que cubren áreas geográficas extensas. Los modos de variabilidad de baja frecuencia reflejan cambios a gran escala en las ondas atmosféricas y el jet stream y se definen generalmente por medio de un análisis de componentes principales. Por lo tanto el campo de circulación se puede aproximar por medio de una combinación lineal de varios modos de variabilidad de baja frecuencia. De esta manera, no hay razón para suponer que los modos de variabilidad de baja frecuencia se asemejen a patrones individuales de circulación.

En este estudio, se utilizará una versión automatizada de los patrones sinópticos de circulación que fueron desarrollados inicialmente para las islas británicas (Jones et al. 1993) y que describen la circulación local en función de parámetros de la circulación, en este caso, el flujo y la vorticidad.

Los principales objetivos de este trabajo son evaluar la compatibilidad entre los modos de variabilidad de baja frecuencia y los patrones regionales de la circulación y determinar en qué medida los cambios en intensidad o los cambios en la posición de los modos de variabilidad de baja frecuencia producen cambios en la circulación local.

La región seleccionada para este estudio es Galicia, localizada en el noroeste de la Península Ibérica. Es una región caracterizada por el paso de los frentes fríos asociados a los storm track del Atlántico norte (Trigo 2005). Tres son

las razones principales por las que se eligió esta región. En primer lugar, los estudios anteriores han mostrado que la variabilidad de la precipitación y de la temperatura está conectada a los modos principales de la variabilidad de baja frecuencia en el Atlántico Norte, NAO, SCA y EA/WR (Lorenzo y Taboada 2005; de Castro et al. 2006). En segundo lugar, esta región ha sufrido una disminución significativa de la precipitación durante los 40 últimos años, especialmente durante el invierno (e.g. Paredes et al. 2006; Trigo et al. 2008). Finalmente, en tercer lugar, la metodología de los patrones regionales de la circulación usada aquí se ha aplicado con éxito a la Península Ibérica en otros estudios, Trigo y DaCamara (2000) y Lorenzo et al. (2008).

El resto del artículo se ordena como sigue. En la sección 2, se describirán los diversos conjuntos de datos y las metodologías utilizadas para su análisis. En la sección 3, se describen los tipos de circulación. En la sección 4, se introducirá el concepto de modos de variabilidad de baja frecuencia, calculados usando el análisis de componentes principales para los campos de presión a nivel del mar (SLP) y de geopotencial en 500hPa, así como su relación con los tipos de circulación. En la sección 5 se discutirá la naturaleza no estacionaria de los modos de variabilidad de baja frecuencia y su influencia en la frecuencia de cada tipo de circulación. Por último en la sección 6 se exponen las conclusiones.

2 Datos y metodología

La principal base de datos que se utiliza es la de presión diaria a nivel del mar tomada de los datos de reanálisis del NCEP/NCAR (Kalnay et al. 1996). Se utilizaron campos diarios de SLP de

invierno (correspondiente a los meses de enero, febrero y marzo, en adelante EFM) a partir de 1948 y hasta 2005 con una celda de 2.5°. La ventana espacial cubre el área 30°N-76°N y 37°O-56°E.

En este estudio, se utilizaron cuatro conjuntos de datos, de los cuales tres corresponden a diversos métodos de cuantificación de la variabilidad atmosférica de la circulación (secciones (2.1) - (2.3)) y una que corresponde a la identificación de los modos no estacionarios de variabilidad de baja frecuencia en el sector NAE (sección (2.4)).

2.1 Clasificación de tipos de circulación diaria.

La clasificación usada es una versión automatizada del procedimiento (Jones et al. 1993) de los Weather types de Lamb. En estos últimos años, este método se ha aplicado con éxito a otras regiones europeas (Goodess y Palutikof 1998; Trigo y DaCamara 2000). Lorenzo et al. (2008) realizaron un estudio comprensivo que conectaba estos tipos de circulación con los modos de variabilidad de baja frecuencia del Hemisferio Norte y su influencia en la precipitación de Galicia.

Se utilizó la base de datos de tipos diarios de circulación que fue calculada para Galicia por Lorenzo et al. (2008). Estos tipos de circulación fueron calculados utilizando la SLP diaria de los datos del reanálisis de NCEP/NCAR (Kalnay et al. 1996). Las condiciones de circulación fueron determinadas usando parámetros físicos o geométricos, tales como la dirección y la fuerza de flujo de aire, y el grado de ciclonicidad calculados a partir de 16 puntos ° y separados entre sí 2.5° y centrados sobre el área de estudio (figura. 1).

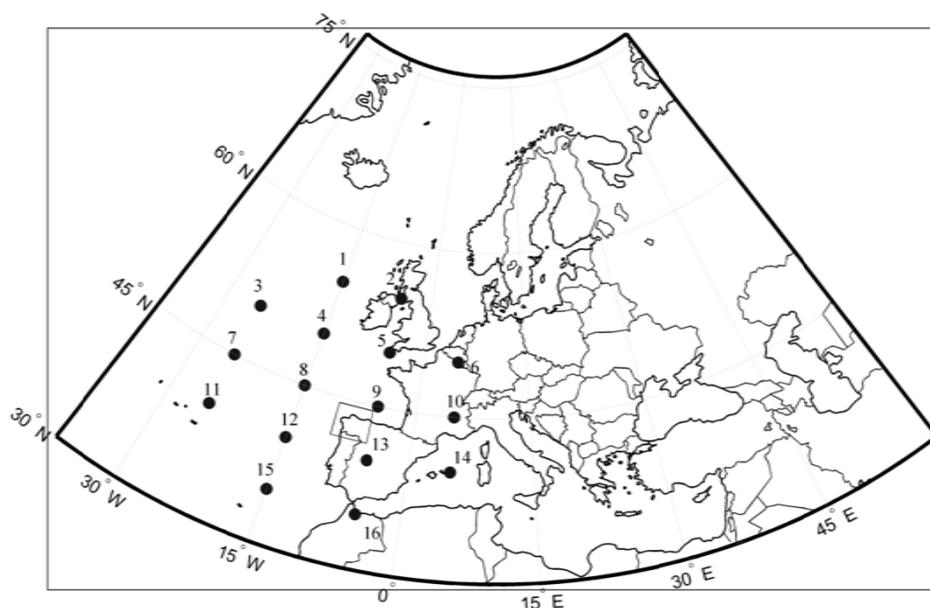


FIG 1: El sector euro-Atlántico con la localización del área bajo estudio.

Se consideraron solamente 10 tipos de circulación - ocho condicionados por la dirección del flujo (NE, E, SE, S, SW, W, NW, N) y dos por el cizallamiento de la vorticidad (cyclónico o anticiclónico). Una descripción comprensiva de esta metodología se puede encontrar en Lorenzo et al. (2008). Los datos fueron obtenidos solamente para la estación de invierno (EFM) y entre los años 1948 y 2005.

2.2 Modos hemisféricos de variabilidad de baja frecuencia.

Los modos estándar NAO, EA, EA/WR, y SCA de índices de variabilidad de baja frecuencia fueron obtenidos del centro de predicción del clima de la administración oceánica y atmosférica nacional para el período temporal comprendido entre 1950-2005 (<http://www.cpc.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml>). Estos índices fueron calculados con el campo de altura del geopotencial a 500hPa para el Hemisferio Norte completo (20°N-90°N), usando análisis de componentes principales rotados (Barnston y Livezey 1987). De aquí en adelante los modos

hemisféricos de variabilidad de baja frecuencia ((NAO, EA, EA/WR, y SCA) recibirán el nombre de modos hemisféricos.

2.3 Modos estacionarios de variabilidad de baja frecuencia en el sector NAE.

La técnica de PCA es de las más aplicadas para la detección de modos de variabilidad de baja frecuencia y se ha utilizado en una amplia variedad de estudios climatológicos, e.g. Jolliffe (1990); Wibig (1999); Huth (2006); Zveryaev (2006).

Para identificar los modos de variabilidad de baja frecuencia en el sector NAE, se utilizó la técnica de PCA. Aquí se recurrió a la misma metodología que Barnston y Livezey (1987) pero con dos diferencias: (1) se tomaron campos diarios y (2) se consideró solamente el sector NAE (30°N - 76°N y 37°O - 56°E). El PCA fue aplicado al campo diario de SLP invierno (EFM) y al campo diario de la altura del geopotencial en 500-hPa (H500), para el período temporal considerado en el análisis (1948-2005). Esta técnica fue aplicada primeramente al campo diario de SLP de invierno

(EFM) durante el período bajo estudio (1948-2005) y en el sector NAE (30°N-76°N y 37°O-56°E). La matriz de covariancia fue creada usando los valores temporales en cada celda. Esto corresponde a un PCA en modo-S (siguiendo la terminología empleada por Richman (1986)), lo que significa que el vector propio describe el modelo espacial de los modos de variabilidad de baja frecuencia y las componentes principales describen las variaciones temporales (en nuestro caso los índices de los modos de variabilidad de baja frecuencia en el sector NAE). Debido al hecho de que nuestra celda cubre un área entre 30°N y 76°N, cada recuadro en los datos es del mismo tamaño, pero cada recuadro sobre tierra presenta un tamaño diferente según su latitud. Para asegurar la igualdad en las áreas de la malla, los datos cuadrículados fueron corregidos por la raíz cuadrada del coseno de la latitud (Chungkin y Nigam 1999). Finalmente, se aplicó una rotación ortogonal Varimax. La misma metodología también fue aplicada al campo diario de altura del geopotencial en 500-hPa (H500).

De aquí en adelante, los modos de variabilidad de baja frecuencia serán nombrados como los “modos”, diferenciando solamente el nivel de altura en el cual se calculó el PCA (los modos de SLP o los modos H500).

2.4 Identificación de los modos no estacionarios de variabilidad de baja frecuencia en el sector NAE

Para identificar los posibles cambios que puedan sufrir los modos durante el periodo estudiado y en los meses de invierno (EFM) en el sector NAE, utilizamos una PCA con ventana móvil (con un período de 30 años) para EFM, que permitió analizar los cambios en la

posición y la intensidad de los modos. La metodología y el dominio espacial usados para computar el PCA del período de 30 años están descritos en la sección 2.3. El primer período usado en el PCA cubre el período entre los años 1948 y 1977 (donde 1962 es el año central), el período siguiente es 1949-1978, y así sucesivamente hasta el período final 1976-2005 (donde 1990 es el año central). En la sección 4 y 5, se hacen varios análisis de correlación. Para ello, se crearon nuevas series temporales. Estas series son estacionales (EFM), promediadas de series diarias (en el caso de los modos y de los tipos de la circulación) y de series mensuales (en el caso de los modos hemisféricos).

3 Tipos sinópticos de la circulación para Galicia

Para entender mejor la naturaleza de cada tipo de circulación en el área de estudio, se calcularon los mapas de cada uno de los tipos de circulación para el período comprendido entre 1950 y 2005 (figura 2). El objetivo de este estudio no es describir cada tipo exhaustivamente, los lectores deberán buscar información adicional sobre esta técnica en la referencia de Lorenzo et al. (2008).

En la figura 3, se muestra la frecuencia de los tipos de circulación observados durante el invierno. El resultado más obvio es que en los días de invierno, el tipo de circulación que presenta la mayor frecuencia de ocurrencia es la circulación anticiclónica, que se produce en la mitad de los días analizados aproximadamente. Los tipos de circulación conducidos por un flujo de aire con una dirección oeste (es decir NW, W y SW) tienen una frecuencia más alta (6.2%, 17.2%, y 13.6% respectivamente) que los tipos del este

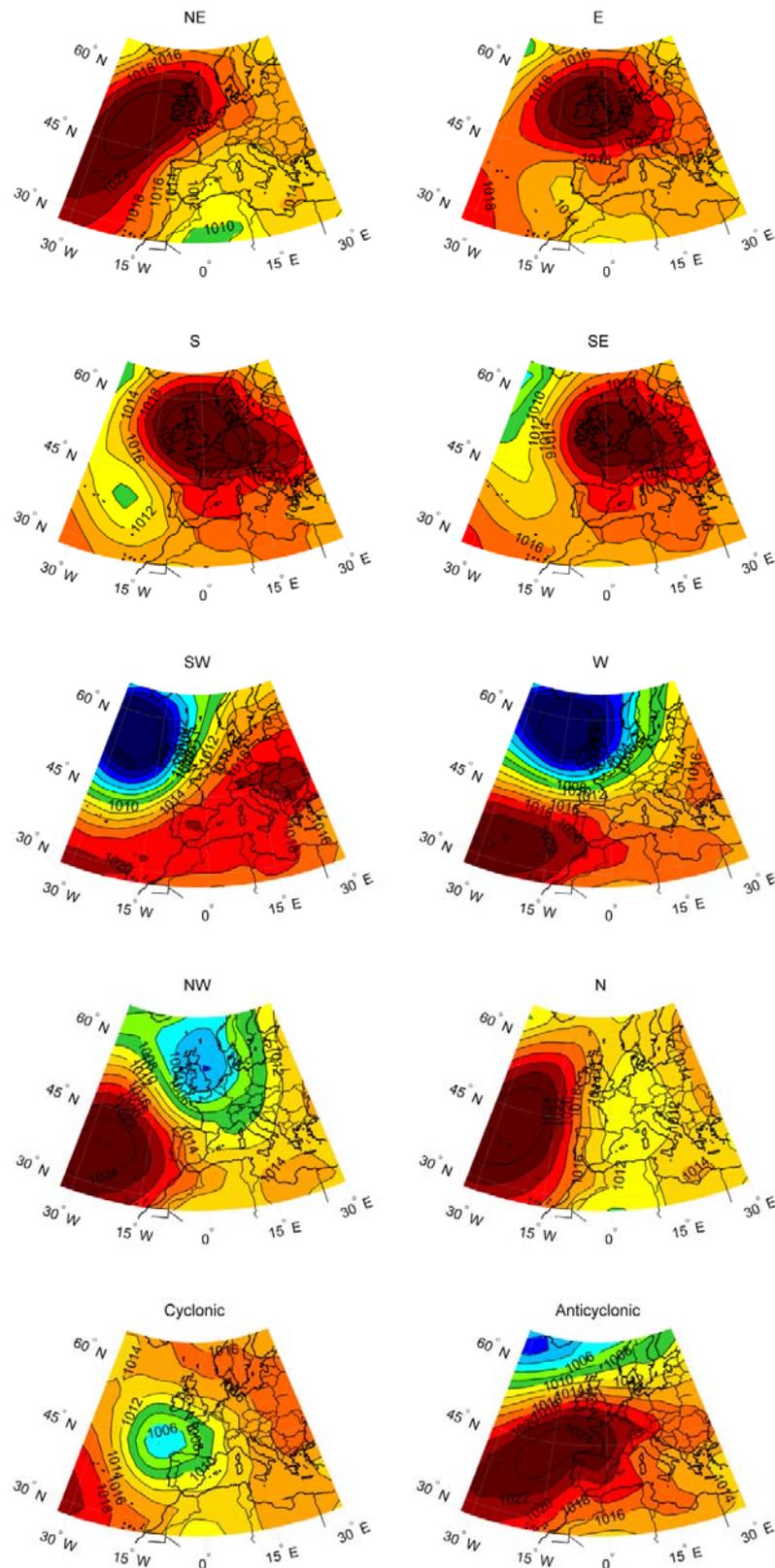


FIG 2: La media de la presión a nivel del mar (hPa) de los meses de Enero-Febrero-Marzo (EFM). La presión a nivel del mar es un campo que caracteriza los 10 tipos de tiempo utilizados en este trabajo.

(menos del 5% por cada uno). Los tipos ciclónicos de circulación tienen lugar cerca del 10% de los días de invierno.

4 Compatibilidad entre la clasificación de los tipos de modos de circulación

local y los modos de variabilidad de baja frecuencia en el sector NAE

La clasificación de Lamb de los tipos de tiempo es una herramienta importante en el estudio de la variabilidad sinóptica diaria de una determinada región. Sin embargo, en la mayoría de los casos, estas circulaciones locales diarias se relacionan con los modos. Para investigar esta influencia, calculamos el PCA para el campo de invierno (EFM) de la SLP en el sector NAE y también para el campo de altura del geopotencial en 500hPa en la región considerada (30°N-76°N y 37°O-56°E).

En las figura 4 y 5 se muestran los cuatro primeros patrones de las funciones ortogonales empíricas (EOF) y la varianza explicada por cada uno para los campos invernales de SLP y de H500 respectivamente. A primera vista, parece ser que los resultados para ambos campos son muy similares. Para los dos primeros EOFs aparece el mismo modo en ambos campos, mientras que los modos EOF 3 y EOF 4 se cambian entre ellos, es decir, el modo EOF 3 en el campo de SLP corresponde al EOF 4 en el campo H500 y el EOF 4 en SLP corresponde al EOF 3 en el campo H500. A pesar de las fuertes semejanzas observadas entre los dos campos, se calcularon las correlaciones entre la serie de SLP y la de H500 para proporcionar una comparación más completa (Tabla 1). Los resultados corroboran las semejanzas visuales observadas con altas correlaciones (significativas en un nivel del 1%) entre los dos primeros modos correspondientes (SLP y H500). Si analizamos la correlación cruzada para el cambio observado en las posiciones de

los modos EOF 3 y EOF 4 con respecto a la variación explicada en SLP y en H500, aparecen altas correlaciones en ambos casos, con un valor de más de 0.92 (significativo en un nivel del 1%). Para poner estos modos en contexto, también se calcularon las correlaciones entre las series temporales de las EOFs (PC) de los modos y los modos hemisféricos. (NAO, EA, EA/WR y SCA - sección 2.2. Los resultados se presentan en la Tabla 1. Para ambos campos (SLP y H500), la primera PC presenta la correlación más alta (0.77 y 0.75) con NAO. Para la segunda PC, las correlaciones más altas están con SCA para ambos campos. En el caso de la tercera PC, el campo de SLP tiene la correlación más alta con el modo NAO y el campo H500 tiene la correlación más alta con EA/WR. En cambio, la cuarta PC, para SLP se correlaciona más con EA/WR y para el campo H500 tiene la correlación más alta con NAO. Los resultados encontrados para las terceras y cuartas PC, eran esperados, debido al cambio en la posición de EOF3 y de EOF4 con respecto a las variancias explicada en los campos SLP y H500. Los resultados observados muestran que, generalmente para la ventana espacial elegida, existe una correspondencia entre los modos de SLP y H500. Dado que los tipos de circulación que consideramos en este trabajo están basados en los campos superficiales, de ahora en adelante, nos centraremos solamente en los modos del campo de SLP. Los cuatro modos principales en el sector NAE para el campo de SLP son mostrados en la figura 4.

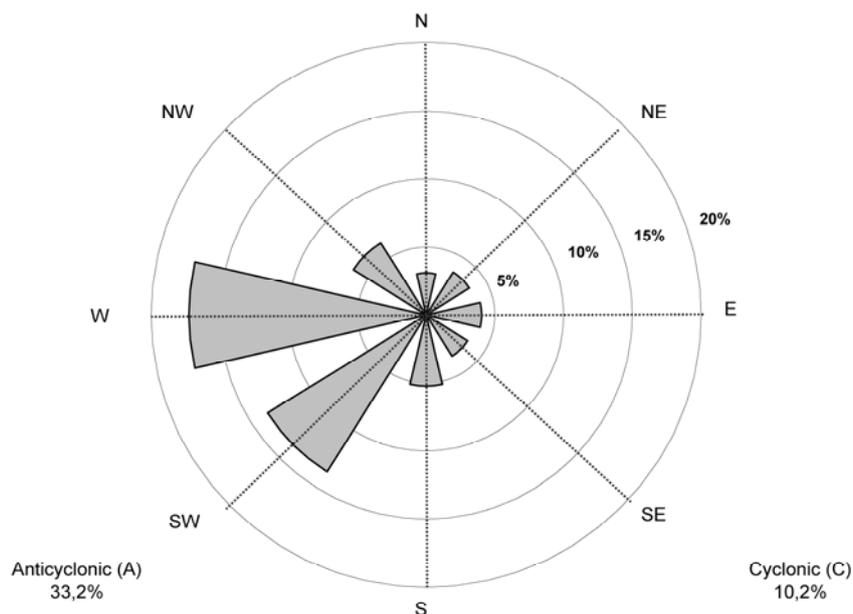


FIG 3: Frecuencia (%) de los patrones de circulación en los meses invernales (EFM)

El primer EOF (EOF1) es un dipolo zonal continental (CZD) que explica cerca del 30% de la variancia total y está caracterizado por la presencia de centros fuertes en Escandinavia (con signo negativo) y en la Península Ibérica (positivos), separados por un gradiente norte-sur fuerte. Este modo es similar en estructura a la estructura de NAO (tiene 0.77 de correlación con él) pero con una cierta influencia del modo SCA ya que la correlación entre el PC-CZD y SCA es también importante (- 0.69).

El EOF2 es un dipolo meridional continental (CMD), caracterizado por dos estructuras de gran tamaño, con sus centros principales de acción localizados sobre la región atlántica y sobre Europa occidental. Explica el 22% de la variabilidad. Este modo se puede asociar al modo eurasiático 1 (EU1) descrito por Barnston y Livezy (1987), conocido como SCA. En la Tabla 1 podemos ver que presenta una correlación con SCA de -0.54 significativo en un nivel del 5%. El EOF3 es un dipolo zonal oceánico (OZD), que se asemeja al modo NAO. La diferencia más importante es que el

OZD está desplazado hacia el norte si lo comparamos con NAO. Además también se extiende más sobre Europa occidental presentando una escala horizontal más grande. Explica el 21% de la variancia total. Este modo tiene los valores máximos y mínimos de los centros de acción situados sobre Groenlandia y la región de Azores respectivamente, favoreciendo un valor de correlación con NAO de -0.83.

El EOF4 es un dipolo meridional oceánico (OMD) y explica el 12% de la variabilidad total. Este modo tiene un centro principal (positivo) situado entre las islas británicas y Dinamarca. Tiene otros dos centros, localizados al noroeste de las Azores y sobre el norte de Rusia. Este modo se asemeja al modo eurasiático 2 (EU2) descrito por Barnston y Livezey (1987), que también se conoce como EA/WR usando la terminología del Climate Prediction Centre de la NOAA. De hecho, este modo tiene sus correlaciones más altas con el modo EA/WR (0.72).

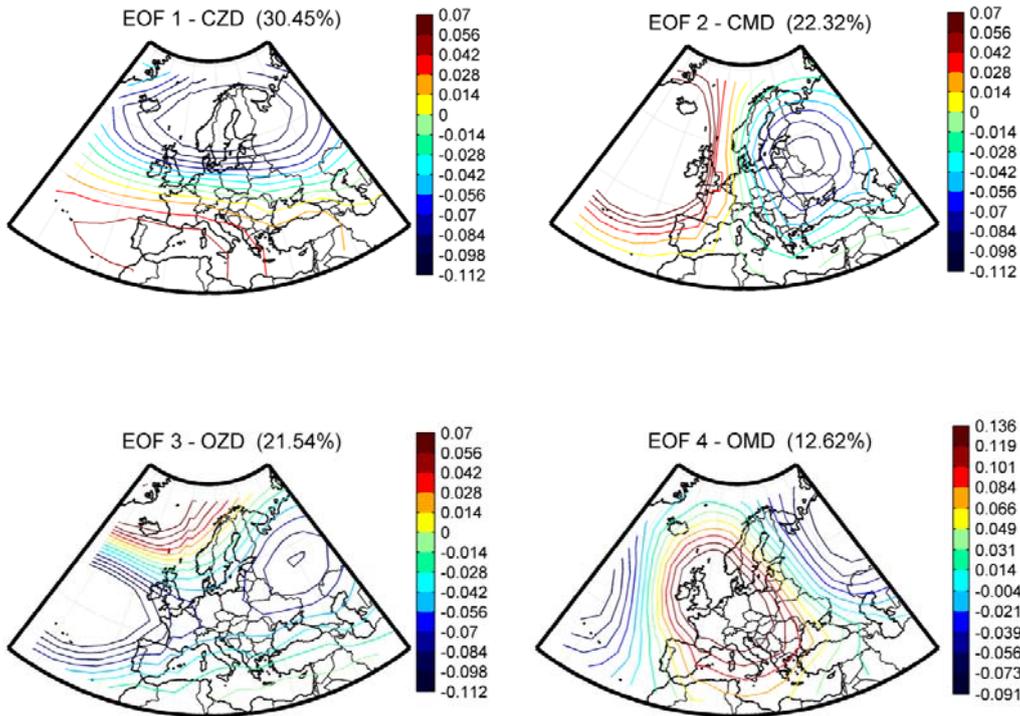


FIG 4: Las cuatro primeras funciones ortogonales empíricas destacadas para los meses invernales (EFM) para el campo de presión superficial del mar junto con su respectiva varianza (%) explicada para cada una.

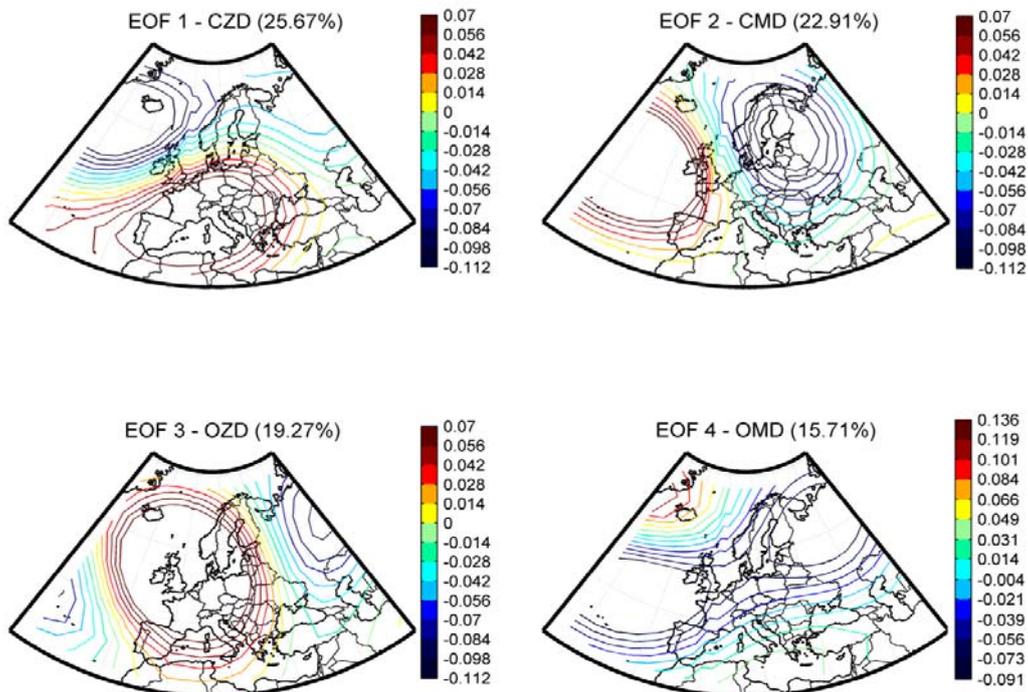


FIG 5: Las cuatro primeras funciones ortogonales empíricas destacadas para los meses invernales (EFM) para el campo de geopotencial en 500 hPa junto con su respectiva varianza (%) explicada para cada una.

SLP	NAO	EA	EAWR	SCA
PC1	0.7704	0.2853	0.2017	-0.6919
PC2	-0.1466	-0.4079	0.0803	-0.5374
PC3	-0.8291	0.0756	-0.0849	0.0377
PC4	0.2979	0.2763	0.7238	-0.4019
H500	NAO	EA	EAWR	SCA
PC1	0.7536	0.4744	0.2176	-0.5461
PC2	0.2278	-0.3391	0.1623	-0.7206
PC3	0.0581	0.1503	0.7622	-0.2149
PC4	-0.7884	0.0424	0.0143	-0.0556
SLP ↓ \ H500 →	PC1	PC2	PC3	PC4
PC1	0.9103	0.4982	0.1439	-0.4666
PC2	-0.1847	0.8663	0.1633	0.0327
PC3	-0.4130	-0.3106	-0.2054	0.9264
PC4	0.4017	0.2899	0.9209	-0.2359

TABLA 1: Correlación entre las series temporales de los modos hemisféricos (sección 2.2) y las series temporales de los EOF calculados para el campo de SLP y el campo del geopotencial en 500. También se muestra la correlación entre las series temporales de las EOFs calculadas para los dos campos sobre nuestra región. (Los valores en negrita representan las correlaciones que son estadísticamente significativas al 99%).

Se ha demostrado que los modos calculados de SLP o H500 son similares en esta ventana espacial. Sin embargo, no existe una correspondencia obvia entre los modos SLP/H500 y los modos hemisféricos. Esto se puede explicar debido a las diversas metodologías utilizadas al realizar el análisis de PCA (niveles atmosféricos, dominio, plazo, rotación). Este hecho fue discutido en otros estudios, e.g. Beranová y Huth (2008); Jolliffe (2002). En nuestro caso, el resultado más importante es que falta la presencia de EA en los modos calculados para esta ventana espacial. Esto puede ser debido al dominio utilizado. Barnston y Livezey (1987) describen a EA con sus centros cercanos a 55°N, y 20°-30°O con un gradiente fuerte del norte-oeste-sureste sobre Europa occidental y una anomalía sobre 25N°-35N y 0°-10°O. Debido a que el dominio utilizado se limita a 30°N - 76°N creemos que esta es la

razón por la cual este modo falta en el análisis. Es también interesante observar que la ausencia del modo EA es compensada por otro semejante a NAO como el modo (OZD) en parte debido a que EA es estructuralmente similar a NAO pero con los centros de las anomalías desplazados hacia el sur. Una vez caracterizados los modos en nuestro dominio el siguiente paso es evaluar las relaciones entre los tipos de circulación en Galicia y los modos. En primer lugar, nos centraremos en los modos hemisféricos principales (sección 2.2) que afectan la variabilidad de la circulación atmosférica sobre esta región (Tabla 2). En segundo lugar, se reducirá el dominio y centraremos nuestra atención sobre los modos del sector NAE (figura 4 y figura 5). Dado que hemos demostrado ya el nexo entre los modos hemisféricos y los modos en el sector NAE, el primer tema será considerado abreviadamente.

Invierno	NE	E	SE	S	SW	W	NW	N	C	A
NAO	-0,13	-0,24	-0,38	-0,28	-0,03	0,18	-0,08	-0,06	-0,61	0,54
EA	-0,29	-0,09	-0,13	0,00	0,52	0,23	-0,27	-0,40	-0,12	-0,13
EA/WR	-0,16	0,23	0,34	0,17	0,28	-0,49	-0,42	-0,06	-0,09	0,23
SCA	0,12	0,08	-0,15	0,02	-0,01	0,17	0,31	0,23	0,42	-0,50

TABLA 2. Correlación entre las series temporales de los modos hemisféricos y la frecuencia de los tipos de circulación sinópticos en invierno (los valores en negrita representan las correlaciones que son estadísticamente significativas al 99%). Los tipos de circulación ciclónicos y anticiclónicos se representan por C y A respectivamente.

La Tabla 2 muestra los valores obtenidos al realizar la correlación entre los cuatro modos hemisféricos y la frecuencia de los 10 tipos de circulación durante los meses de invierno (EFM). Según lo esperado, las correlaciones más significativas son las obtenidas entre NAO y la frecuencia de los tipos de circulación ciclónicos y anticiclónicos. Esta correlación inversa con la frecuencia del tipo ciclónico coincide con la disminución de la ocurrencia del storm track en la región cuando NAO está en su fase positiva (Trigo 2005). El índice EA también muestra correlaciones altas con la frecuencia del tipo de circulación SW, que es el tercero en importancia de frecuencia que ocurre en invierno. El índice EA/WR muestra una correlación bastante alta con la frecuencia de los tipos de la circulación W, SW y SE. Finalmente, SCA exhibe un comportamiento contrario al de NAO, mostrando una alta correlación negativa con el tipo anticiclónico y una alta correlación positiva con la frecuencia del tipo ciclónico.

Finalmente, se analiza la relación entre los tipos de circulación local diario y los modos en el sector NAE, utilizando las

cuatro PC de los modos obtenidos a partir de los campos de SLP.

Combinando la correspondencia diaria de los tipos de circulación con las cuatro PC podemos calcular, para cada tipo de circulación, la distribución estadística de las PCs. Los resultados se resumen en la figura 6. Aquí, las PCs reciben la notación PC-CZD, PC-CMD, PC-OZD, y PC-OMD, respectivamente. Los rectángulos en la figura muestran los valores inferior, medio y superior de los cuartiles. Los marcadores representan 1.5 veces el rango inter-cuartil.

Para la primera PC (PC-CZD), el resultado más llamativo es la diferencia entre los tipos de circulación ciclónicos (índice negativo para PC-CZD) y anticiclónicos (índice positivo para PC-CMD), que coinciden con los resultados para el storm track en la Península Ibérica (Trigo 2005; García-Herrera et al. 2007) y las que está representadas en la Tabla 2. Es interesante observar que los tipos de circulación que son conducidos por la dirección del flujo (véase la sección 2.1) ocurren con valores negativos de PC-CZD.

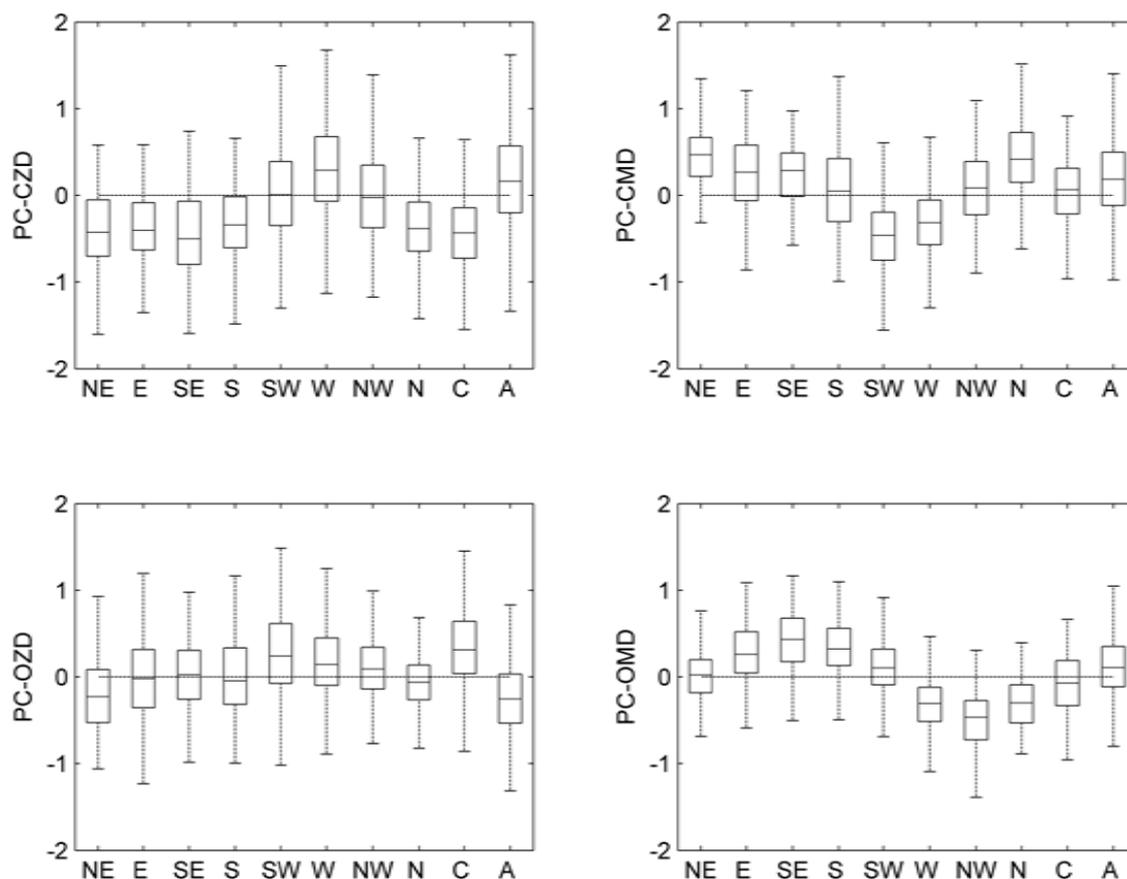


FIG 6: Distribución de los índices de los cuatro componentes principales para cada patrón de circulación. Las cajas representan los valores por debajo, media y por encima de los cuartiles. Los marcadores están dibujados en una escala de 1.5 veces el rango intercuartil.

El fuerte gradiente oeste-este presente en el modo CMD en la Península Ibérica influye sobre algunos de los tipos direccionales de circulación, especialmente sobre NE, E, SW y W, donde se puede observar claramente una distribución opuesta (NE y E contra el SW y W). No hay diferencia evidente entre el ciclónico y anticiclónico en el CMD.

Para el PC-OZD, el único resultado claro es, de nuevo, la diferencia de señal entre los tipos de circulación ciclónica (índice positivo para PC-CZD) y anticiclónica (índice negativo para PC-OZD). El CZD y el OZD comparten algunas características comunes pero de signos opuestos (véase la descripción arriba) por lo que era de esperar que su comportamiento fuera similar.

Finalmente, los resultados para PC-OMD muestran una distribución simétrica interesante entre los E, SE, S y los de W, SW, N, consistente con el dipolo meridional de este modo el cual se muestra en la figura 4. Cuando el PC-OMD tiene un índice positivo los tipos de circulación E, SE y S son más comunes, y cuando PC-OMD tiene un índice negativo los tipos de la circulación W, NW, y N prevalecen.

5 No-estacionariedad de los modos de variabilidad de baja frecuencia en el sector NAE y estudio de su influencia en la frecuencia de los modos de circulación

En la sección 4, se identificaron los cuatro modos principales del sector NAE

que afectan al clima europeo en invierno. Algunos estudios han tratado los efectos de la variabilidad temporal de los modos. Estos trabajos muestran que hay cambios importantes en la relación entre las variables atmosféricas y estos modos tanto en el espacio como en el tiempo (Krichak y Alpert 2005; Beranová y Huth 2008; Vicente-Serrano y López-Moreno 2008).

Para identificar los cambios temporales en la posición y la intensidad de los modos, sobre el sector NAE (30°N-76°N y 37°W-56°E), utilizamos la técnica de PCA y una ventana móvil con un período de 30 años para los meses de invierno (EFM), cubriendo 29 períodos de 30 años para el período bajo estudio entre los años 1948-2005. Así, el primer período de análisis fue 1948-1977 (centrado en el 1962) y el último período considerado es el correspondiente a los años 1976-2005 (centrado en 1990). A partir de cada período considerado, se obtuvo la variancia para los cuatro modos principales junto con el modelo del EOF y su PC correspondiente.

La configuración básica de estos modos presenta un comportamiento similar, los dipolos tienen la misma configuración, cambiando solamente en la posición o la intensidad (véase abajo). Por lo tanto se utilizará la misma terminología que se usó en la sección 4 para los modos EOF y los factores de carga correspondientes.

En la figura 7 se representa la variancia explicada por cada EOF durante el período 1948-2004 para cada ventana de 30 años. El resultado más interesante es un aumento en la variación explicada de EOF1 (el CZD) a partir del 27% en la primera ventana hasta el 32% en la última, esto es consistente con el modo principal de cada una de las ventanas de 30 años. Este aumento es más obvio entre 1952-1981 y 1962-1991. Notar que al principio del período de análisis el CMD representa la segunda mayor variancia total, que se reduce con el tiempo (esta reducción va acompañada

de un aumento en la variancia explicada por el CZD). Después de la ventana 1956-1985, aparecen algunos cambios en el orden de la segunda y tercera variancia explicada entre el CMD y el OZD. Después de la ventana 1962-1991, en general el OZD representa el segundo modo con mayor variancia. La contribución del OMD no muestra ningún cambio significativo durante el período de análisis.

La figura 8 muestra los cuatro modos principales en la región representada, usando seis de las 30 ventanas (1951-1980, 1956-1985, 1961-1990, 1966-1995, 1971-2000 y 1976-2005). Además, se analizaron los cambios en la intensidad de estos modos (figura 9). La intensidad de los modos se calcula utilizando el promedio estacional para invierno (EFM) de las PC diarias de los modos calculados en la figura 4. Con esta medida clásica (serie temporal del método de las PCA) podemos evaluar los cambios en la intensidad de los modos y su signo (Jolliffe 2002). El resultado más obvio es el cambio de la posición del CZD, con los centros positivos (negativos) de acción situados en la región de Azores (Islandia) al principio de la primera ventana de 30 años (1948-1977) y al Sur de Iberia (Escandinavia) en la última ventana de 30 años (1976-2005). Estos resultados coinciden con lo presentados por Ulbrich y Cristóbal (1999) y Vicente-Serrano y López-Moreno (2008), que demostraron que la localización de la NAO experimenta cambios multi-decadales. Estos resultados son acordes al trabajo hecho por Cassou et al. (2004) y Peterson et al. (2003), que demostraron que la NAO puede experimentar una significativa dislocación en dirección este hacia Europa cuando está en su fase positiva y una dislocación que va hacia el oeste durante su fase negativa. Además, junto a este cambio pronunciado en la posición del CZD, aparece también un aumento

(significativo en un nivel del 5%) en su intensidad, mayor en los últimos 20 años (figura 9).

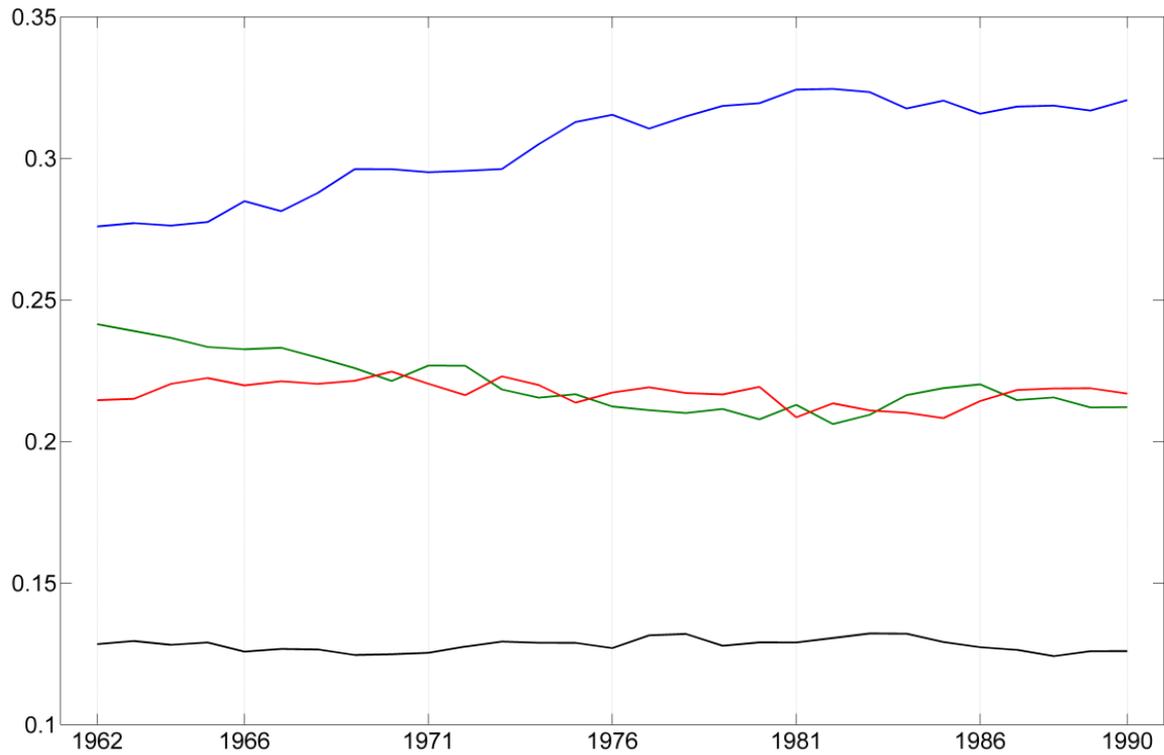


FIG 7: La varianza explicada por cada EOF sobre el tiempo. la primera ventana de análisis es 1948-1977 (centrada en 1962) y la última es 1976-2005 (centrada en 1990). El dipolo continental zonal, el dipolo continental meridional, el dipolo oceánico zonal y el dipolo oceánico meridional se representan por las líneas azul, verde, roja y negra respectivamente.

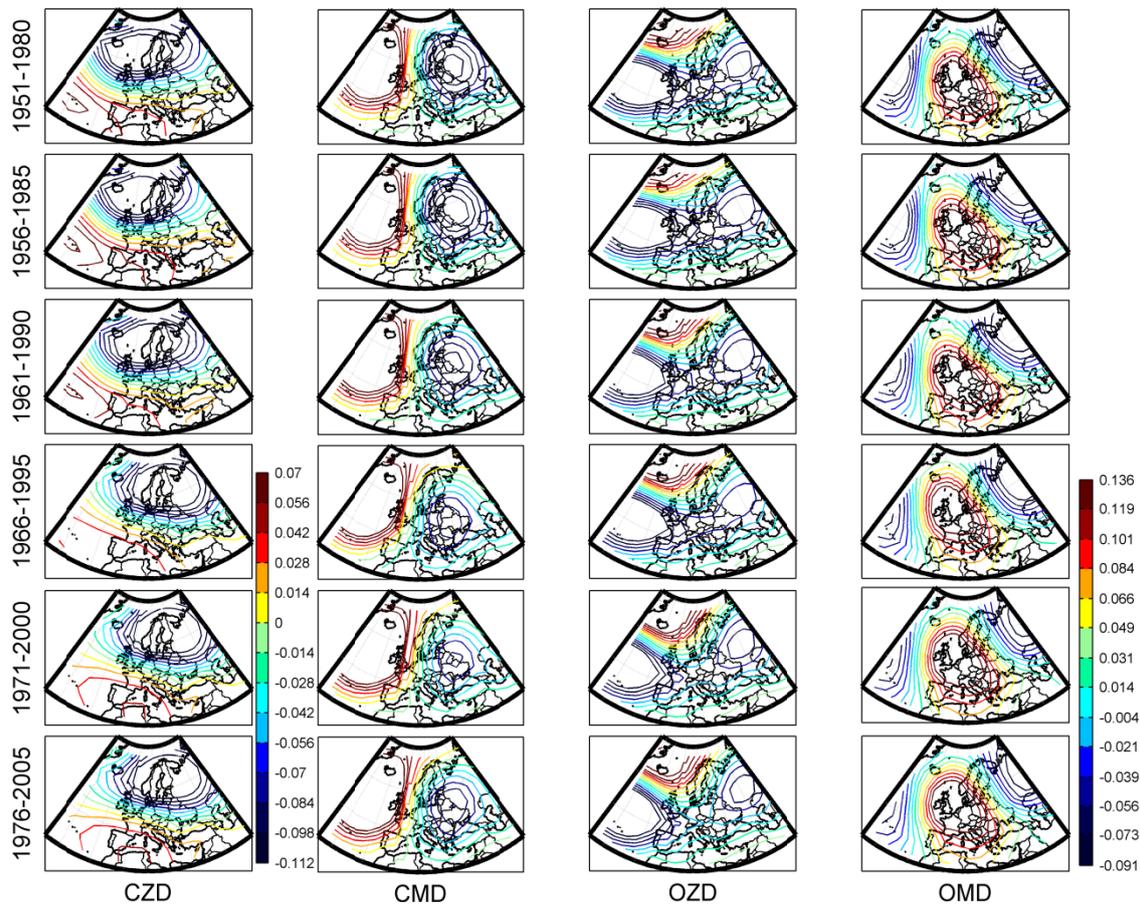


FIG 8: Las cuatro primeras funciones ortogonales empíricas destacadas para los meses invernales (EFM) obtenidas utilizando un análisis de componentes principales en el campo de SLP utilizando una ventana móvil de 30 años.

En los otros modos (CMD, OZD, y OMD), no se observan cambios obvios en las posiciones de los dipolos. En realidad, el OMD tiene tres centros de acción, dos negativos localizados al oeste y al este de Europa central y un centro positivo sobre Europa central, pero debido a que nuestro campo de interés está situado en la parte occidental de la región, nos centraremos en el lado izquierdo de estos centros de acción. En este caso, parece que hay un aumento muy leve en la parte positiva del tripolo, empujando la parte (negativa) izquierda del tripolo hacia el oeste.

A pesar de la ausencia de cualquier cambio en la posición de estos modos (CMD, OZD y OMD), existen algunos puntos interesantes debido a los cambios en sus intensidades (figura 9). Para las intensidades, se determinó si los cambios

descritos más abajo son significativos, realizando un análisis T-student. Para todo el período de análisis la PC-CZD presenta un aumento de su intensidad significativa en un nivel de 5%. En el PC-CMD, no existe ningún cambio significativo en la intensidad y la señal. Por el contrario, el PC-OZD muestra un incremento inicial pero en las últimas tres décadas aparece una disminución del PC de este modo (significativo en el nivel del 5%). Finalmente, la PC-OMD parece tener un aumento muy leve en la intensidad (no significativa en un nivel del 5%).

Ahora que los cambios en la posición y la intensidad de los cuatro modos principales del sector NAE que afectan Europa y a nuestra área de estudio han sido estudiados, se determinarán los efectos de estos cambios en los modos

de circulación local. Para conseguir esto, se calculó la correlación entre los cuatro componentes principales del PCA (usando las 29 ventanas de 30 años) y la frecuencia estacional respectiva de tipos de circulación (figura 10).

Cuando se analizó la figura 3 el resultado más relevante que se observó fue que había determinados tipos de circulación que presentaban baja frecuencia en invierno, especialmente los que está en los primeros y los segundos cuadrantes (NE, E, SE, S, y N). Cada uno de estos tipos representa, en promedio, menos de 5 días por invierno, y por este motivo se deben tratar con precaución, a pesar de la existencia de algunos cambios significativos evidentes. Por lo tanto, no se discutirán en esta sección. Para los cambios principales en los coeficientes de correlación (los tipos de SW, NW, y A) también se realizaron las correspondientes pruebas de significancia (el T-student para las tendencias lineales y la prueba de Mann-Whitney cuando ocurre un "step change").

El tipo de circulación A (que no produce virtualmente ninguna lluvia en Galicia) y los siguientes más frecuentes (SW, W, NW y ciclónico) (que juntos explican casi toda la precipitación en Galicia (Lorenzo et al. 2008)), requieren discusión adicional. Para el SW, es evidente que la correlación entre el PC-OZD y la frecuencia de este es siempre positiva, pero comienza a disminuir linealmente después de 1970, pasando de ser significativo a no significativo en un cierto plazo. Este cambio en el coeficiente de correlación es significativo en un nivel del 5%. Puesto que no hay cambio en la posición de este modo (OZD), este fenómeno se puede atribuir a cambios en la intensidad de su dipolo asociado. De hecho, aparece un aumento en su intensidad hasta el año 80, seguido por una disminución "step decrease" (figura 9). El modo OZD en la Península Ibérica queda caracterizado por un flujo SW/NW (figura 8), y presenta una dependencia con la intensidad de la señal (positiva/negativa) del modo.

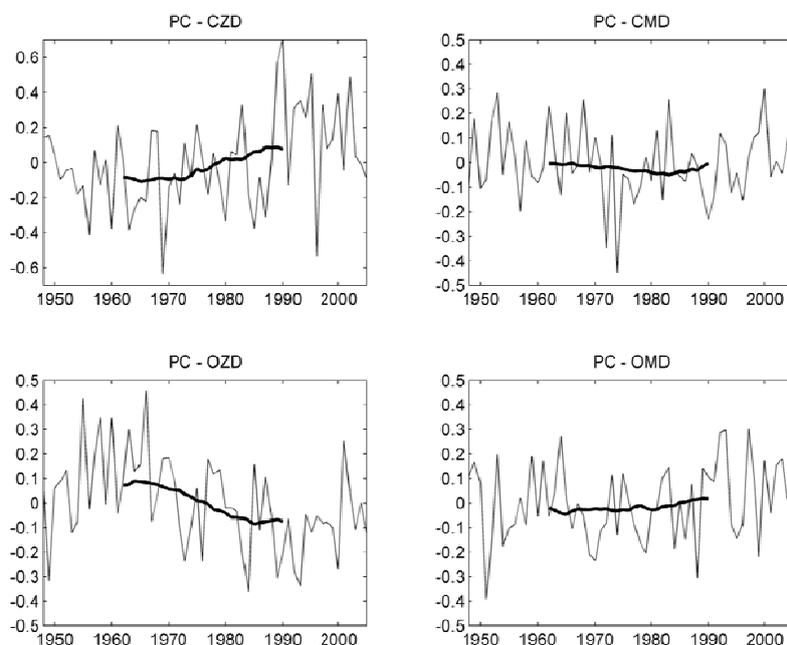


FIG 9: Intensidad de los modos obtenida calculando la media estacional (EFM) de los PCs diarios de los modos representados en la figura 4. Se representa también la media móvil de 30 años en líneas negras sombreadas.

Es de esperar que la correlación entre el PC-OZD y la frecuencia del tipo del SW disminuya cuando la intensidad del modo de OZD tiende a valores negativos. Para los otros modos (CZD, CMD, y OMD), no hay cambios obvios en la correlación.

Es evidente que para el tipo W, no se observan cambios en la correlación con las PCs de las EOF. La única excepción es la disminución de la correlación con PC-OMD, con un mínimo (correlación no significativa) en 1967. En un cierto plazo, sin embargo, esta correlación aumenta y casi es estadísticamente significativa para el período entero de análisis. De hecho, parece que los cambios en la intensidad (hacia valores positivos) del OMD están correlacionados negativamente con los cambios en la frecuencia del tipo de W.

Para el NW, se observa un cambio llamativo en el comportamiento de PC-CZD (PC-OZD) donde se puede ver una correlación positiva (negativa) antes de 1976 y una correlación negativa (positiva) después de 1976. Además, la correlación en la ventana final parece ser más significativa, con los valores mayores del 95%. Comparando el tipo del NW (figura 2) y el CZD en las primeras ventanas móviles (figura 8), se hace evidente su similitud. Esto podría ayudar a explicar la correlación positiva significativa con la frecuencia de estos tipos de circulación. Con el tiempo, el cambio que el CZD sufre, moviéndose hacia Europa tiene una influencia negativa en la frecuencia de su ocurrencia. En el caso del OZD, parece observarse un aumento en la intensidad de este modo hasta 1965, con una disminución de la correlación entre PC-OZD y la frecuencia del tipo NW. En el momento en que hay un cambio en la intensidad del OZD (hacia valores más negativos), la correlación entre la

frecuencia del tipo del NW y PC-OZD cambia de valores negativos a valores positivos. Además, estos cambios (de la tendencia) en el coeficiente de correlación son también significativos a un nivel del 5%. Como explicamos para el tipo del SW (con un comportamiento opuesto en el tipo del NW) es esperable que, la correlación entre PC-OZD y la frecuencia del tipo del NW aumente cuando la intensidad del modo de OZD tienda a valores negativos.

Para el tipo ciclónico, existe un aumento de la anti-correlación (significativa en todos los períodos de análisis) con PC-CZD y puede ser observado para las 15 ventanas móviles. Esto está producido por el cambio que sufre la posición del primer modo que se desplaza hacia el este (figura 8), bloqueando el storm track en la región. Además, existe un aumento leve en la correlación (siempre significativa) con PC-OZD después de 1967.

Centrándose en la correlación entre la frecuencia del tipo anticiclónico y las PCs, se observa una fuerte semejanza entre la correlación para este tipo de circulación y PC-CZD y PC-OZD (pero con el signo opuesto). Debido al cambio de posición del centro de acción del CZD próximo a la región y que se mueve hacia el este, su influencia aumenta, no sólo en el tipo ciclónico sino también en el tipo anticiclónico, como se observa en los resultados. Existe también un resultado interesante con el modo CMD, con una correlación que disminuye con el tipo anticiclónico (una disminución importante del coeficiente de correlación significativo en un nivel del 5%). Es interesante observar que la curva de la correlación entre el PC-CMD y el tipo anticiclónico es semejante a la curva de la intensidad del modo CMD.

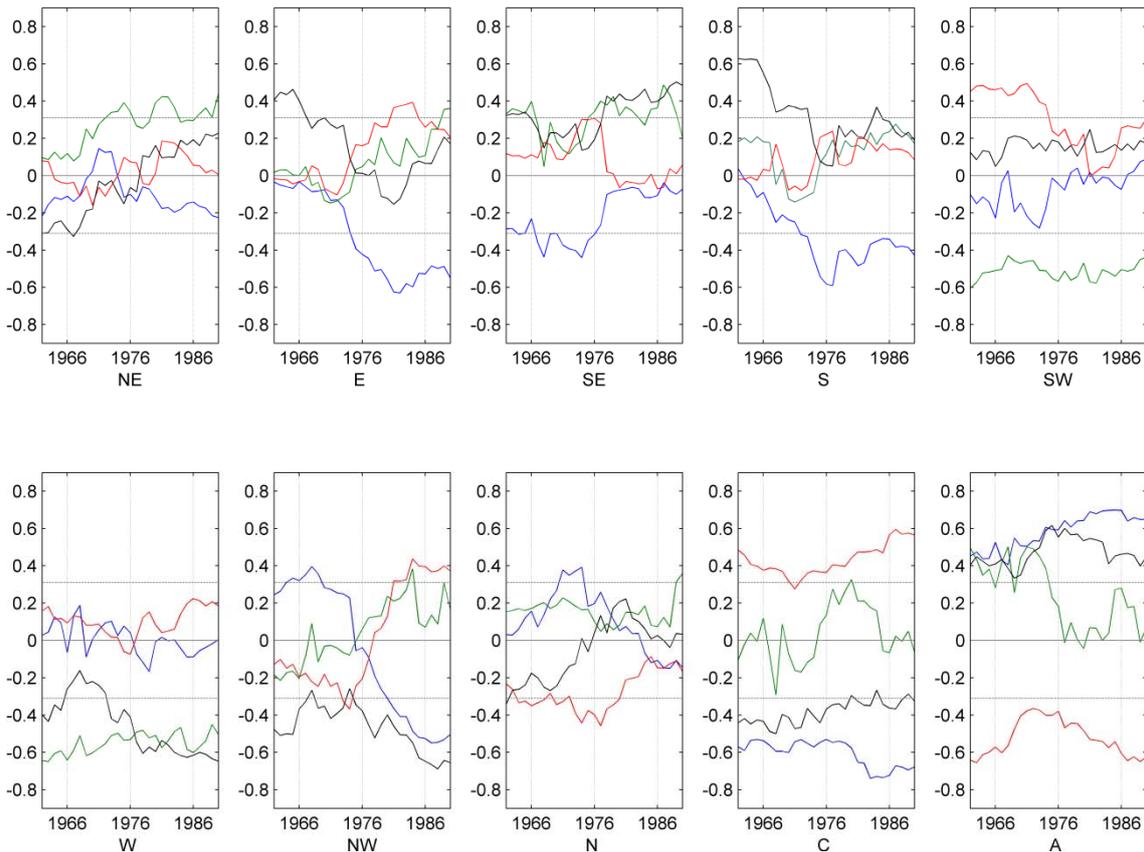


FIG 10: Correlación entre los cuatro factores principales y la frecuencia de invierno de los patrones de circulación. Se muestra la significancia al 95% en líneas punteadas. la primera ventana de análisis es 1948-1977 (centrada en 1962) y la última es 1976-2005 (centrada en 1990). Los tipos de circulación ciclónicas y anticiclónicas se representan por C y A respectivamente. El dipolo continental zonal, el dipolo continental meridional, el dipolo oceánico zonal y el dipolo oceánico meridional se representan por las líneas azul, verde, roja y negra respectivamente.

6 Conclusiones

Se ha descrito la compatibilidad entre los modos hemisféricos y los modos en sector NAE, utilizando los regímenes locales de circulación de un área de estudio localizada en el noroeste de la Península Ibérica durante los meses invernales (EFM). Se ha proporcionado la evidencia de que los modos calculados usando la SLP o el campo H500 son muy semejante en esta ventana espacial. Los resultados muestran que existe un alto nivel de coherencia entre los modos derivados de un acercamiento estadístico (usando el PCA) y los tipos de circulaciones físicas verdaderas (según lo representado por los tipos de circulación- Lamb weather types). Esta coherencia fue obtenida tanto con los

modos estacionarios como con los no estacionarios. El uso de un estudio de PCA con ventanas continuas temporales ha permitido evaluar si los cambios en la intensidad o la posición de estos modos podrían influenciar a la circulación local. Los resultados confirman que los cambios en la posición y la intensidad de los modos tienden a favorecer la ocurrencia de algunos tipos de circulación. Una vez más estos cambios son coherentes y constantes.

Los resultados más importantes son:

(i) Los coeficientes de correlación obtenidos entre los modos hemisféricos y las frecuencias de los 10 tipos de circulación durante el invierno muestran que NAO obtiene la correlación más alta con el tipo ciclónico y anticiclónico, responsables de una precipitación más alta y más baja sobre la Península

Ibérica, respectivamente. El modo EA tiene una correlación perceptiblemente alta con el tipo SW. El modelo de EA/WR muestra una correlación significativa con el W y los tipos de la circulación del NW. Finalmente, el modelo de SCA exhibe el comportamiento opuesto de NAO, con una correlación negativa con el tipo anticiclónico y positiva con el ciclónico. Es interesante observar que estos tipos ocurren con una alta frecuencia durante el invierno (más del 60% de la frecuencia total).

(ii) Estudiando la compatibilidad entre la clasificación de tipos de tiempo y los modos en el sector NAE, encontramos que, para los meses de invierno (EFM), los dipolos zonales (continentales y océano) tienen una influencia importante, no sólo en la ocurrencia de los tipos de tiempo ciclónico y anticiclónico, sino también en los tipos zonales. Según lo esperado, los dipolos meridionales influyen en los tipos de circulación que se relacionan con las circulaciones meridionales, tales como los tipos de E y de W.

(iii) También se ha mostrado cómo los cambios en la posición y la intensidad de los modos durante los 50 últimos años han influido sobre la circulación local en nuestra área de estudio. Existe un aumento en la varianza explicada del dipolo zonal continental de la primera a la última ventana del 27% al 32%. También se observa un cambio de posición de este modo, que está en consonancia con los resultados de Ulbrich y Cristóbal (1999) y Vicente-Serrano y López-Moreno (2008), junto con un aumento en su intensidad. Para los otros modos, que son el dipolo zonal del océano y los dos meridionales, no se encontró ningún cambio obvio en sus posiciones.

En resumen, se han identificado las relaciones entre las circulaciones locales físicas verdaderas (según lo representado por tipos de circulación) y los modos

obtenidos con el análisis estadístico. Los cambios en las posiciones y las intensidades de estos modos tienen un impacto en la circulación local (aquí evaluada por los tipos de circulación) en el área bajo estudio. El aumento en la variación explicada del dipolo zonal continental y la correlación (positiva) negativa cada vez mayor entre este modo y la circulación (anticiclónica) ciclónico pueden ayudar a explicar la disminución total de la precipitación de invierno en la región de estudio (Paredes et al. 2006; Trigo et al. 2008).

Agradecimientos

Alexandre M. Ramos quiere agradecer a la Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) La beca que le fue otorgada BD/46000/2008. Alexandre M. Ramos agradece a Isabel Iglesias la ayuda en la revisión del idioma.

Este proyecto fue respaldado por la Xunta de Galicia bajo el proyecto PGIDIT06PXIB383288PR.

Las tablas y las imágenes de este trabajo han sido modificadas/reproducidas con el permiso de la American Geophysical Union, de Compatibility between modes of low frequency variability and circulation types: A case study of the northwest Iberian Peninsula, *J. Geophys. Res.*, 115, D02113, Copyright 2010 American Geophysical Union

Referencias

- Barnston, A. G., y R. E. Livezey, 1987: Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Wea. Rev.*, 115, 1083-1126.
- Beranová, R., y R. Huth, 2007: Time variations of the relationships between the North Atlantic Oscillation and European winter temperature and precipitation. *Stud. Geophys. Geod.*, 51, 575-590.

- Beranová, R., y R. Huth, 2008: Time variations of the effects of circulation variability modes on European temperature and precipitation in winter. *Int. J. Climatol.*, 28, 139-158, doi:10.1002/joc.1516.
- Blackburn, M., y B. J. Hoskins, 2001: The UK record-breaking wet autumn 2000. *UGAMP Newsletter*, 24, 38-40.
- Bojariu, R., y L. Gimeno, 2003: Modelling and predictability of the North Atlantic Oscillation. *Earth Sci. Rev.*, 63, 145-168.
- Cassou, C., T. Laurent, J.W. Hurrell, y C. Deser, 2004: North Atlantic Winter climate regimes: spatial asymmetry, stationarity with time and oceanic forcing. *J. Clim.*, 17, 1055-1068.
- Chen, D. y C. Hellström, 1999: The influence of the North Atlantic Oscillation on the regional temperature variability in Sweden: spatial and temporal variations. *Tellus* 51A, 505-516.
- Chung, C. y S. Nigam, 1999: Weighting of geophysical data in Principal Component Analysis. *J. Geophys. Res.*, 104(D14): 16925-16928.
- Corte-Real, J., X. Zhangzheng, y X. Wang, 1995: Large-scale Circulation Regimes and Surface Climatic Anomalies over the Mediterranean. *Int. J. Climatol.*, 15, 1135-1150.
- deCastro, M., M. N. Lorenzo, J. J. Taboada, M. Sarmiento, I. Álvarez, y M. Gomez-Gesteira, 2006: Teleconnection patterns influence on precipitation variability and on river flow regimes in the Miño River basin (NW Iberian Peninsula). *Clim. Res.*, 32, 63-73.
- deCastro, M., M. Gómez-Gesteira, M. N. Lorenzo, I. Álvarez, y A. J. C. Crespo, 2008: Influence of atmospheric modes on coastal upwelling along the western coast of the Iberian Peninsula. 1985 to 2005. *Clim. Res.*, 36, 169-179.
- Dunkeloh, A., y J. Jacobeit, 2003: Circulation Dynamics of Mediterranean precipitation variability 1948-98. *Int. J. Climatol.*, 23, 1843-1866.
- García-Herrera R., D. Paredes, R. M. Trigo, I. F. Trigo, H. Hernández, D. Barriopedro, y M. T. Mendes, 2007: The outstanding 2004-2005 drought in the Iberian Peninsula: associated atmospheric circulation, *Journal of Hydrometeorology*. 8, 483-498
- Gimeno, L., L. de la Torre, R. Nieto, R. García, E. Hernández y P. Ribera, 2003: Changes in the relationship NAO-Northern hemisphere temperature due to solar activity. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 206, 15-20.
- Glowienka-Henze, R., 1990: The North Atlantic Oscillation in the Atlantic-European SLP. *Tellus*, 42A, 497-507.
- Goodess, C.M., y J. P. Palutikof, 1998: Development of daily rainfall scenarios for southeast Spain using a circulation-type approach to downscaling. *Int. J. Climatol.*, 18: 1051-1083.
- Hurrell, J.W., y H. van Loon, 1997: Decadal Variations associated with the North Atlantic Oscillation. *Clim. Change*, 36, 301-326.
- Hurrell, J.W., Y. Kushnir, M. Visbeck, y G. Ottersen, 2003: An Overview of the North Atlantic Oscillation. in *The North Atlantic Oscillation: Climate Significance and Environmental Impact*, *Geophys. Monogr.*, vol 134 edit by J.W. Hurrell, Y. Kushnir et al., pp1-36, AGU, Washington, D.C.
- Huth, R., 2006: The effect of various methodological options on the detection of leading modes of sea level pressure variability. *Tellus*, 58A, 121-130.

- Huth, R., C. Beck, A. Philipp, M. Demuzere, Z. Ustrnul, M. Cahynová, J. Kysely y O. E. Tveito, 2008: Classifications of Atmospheric Circulation Patterns Recent Advances and Applications. in Trends and Directions in Climate Research: 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 [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor y H.L. Miller, (eds.)], 996 pp, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jenkinson, A.F. y F.P. Collison, 1977: An initial climatology of gales over the North Sea, Synoptic Climatology Branch Memorandum No. 62. Meteorological Office, Bracknell.
- Jolliffe, I. T., 1990: Principal component analysis: A beginner's Guide. Part I: Introduction and application. *Weather*, 45, 375-382.
- Jolliffe, I. T., 2002: *Principal Component Analysis*. Springer-Verlag, 2nd Edition, New York.
- Jones P.D., M. Hulme y K. R. Briffa, 1993: A comparison of Lamb circulation types with an objective classification scheme. *Int. J. Clim.* 13, 655-663.
- Jones P.D., T. J. Osborn y K. R. Briffa, 2003: Pressure-based measures of the North Atlantic Oscillation (NAO): A comparison and an assessment of changes in the strength of the NAO and in its influence on surface climate parameters, in *The North Atlantic Oscillation: Climate Significance and Environmental Impact*. Geophys. Monogr., vol. 134, edited by J.W. Hurrell et al., pp 51-62, AGU, Washington, DC.
- Jung T, M. Hilmer, E. Ruprecht, S. Kleppek, SK. Gulev, O. Zolina, 2003: Characteristics of the recent eastward shift of interannual NAO variability. *J. Climate*, 16, 3371-3382.
- Krichak, S., y P. Alpert, 2005: Decadal trends in the East Atlantic/West Russia pattern and the Mediterranean precipitation. *Int. J. Climatol.*, 25, 183–192.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, B. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, R. Jenne, y D. Joseph, 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 3(437-472).
- Lorenzo, M. N., y J. J. Taboada, 2005: Influences of atmospheric variability on freshwater input in Galician Rías in winter. *J. Atmos. Ocean. Sci.* 10, 377-387.
- Lorenzo, M. N., J. J. Taboada y L. Gimeno, 2008: Links between circulation weather types and teleconnection patterns and their influence on precipitation patterns in Galicia (NW Spain). *Int. J. Climatol.*, 28(11), 1493:1505 doi:10.1002/joc.1646.
- Paredes D., R.M. Trigo, R. Garcia-Herrera y I.F. Trigo, 2006: Understanding precipitation changes in Iberia in early Spring: weather typing and storm-tracking approaches. *Journal of Hydrometeorology*, 7, 101-113.
- Peterson, K. A., J. Lu, y R. J. Greatbatch, 2003: Evidence of nonlinear dynamics in the eastward shift of the NAO. *Geophys. Res.*

- Lett., 30(2), 1030, doi:10.1029/2002GL015585.
- Rodríguez-Puebla, C., A. H. Encinas, S. Nieto, y J. Garmendia, 1998: Spatial and temporal patterns of annual precipitation variability over the Iberian Peninsula. *Int. J. Climatol.*, 18, 299-316.
- Richman, M. B., 1986: Rotation of principal components. *Int. J. Climatol.*, 6, 293-335.
- Slonosky, V.C., P. D. Jones, y T. D. Davies, 2001: Atmospheric circulation and surface temperature in Europe from the 18th century to 1995. *Int. J. Climatol.*, 21, 63-75.
- Sáenz, J., C. Rodríguez-Puebla, J. Fernández, y J. Zubillaga, 2001: Interpretation of interannual winter temperature variations over Southwestern Europe. *J. Geophys. Res.*, 106(D18), 20,641-20,651.
- Trigo R. M., y C. C. DaCamara, 2000: Circulation weather types and their influence on the precipitation regime in Portugal. *Int. J. Climatol.*, 20, 1559-1581.
- Trigo R., y J. P. Palutikof, 2001: Precipitation scenarios over Iberia: a comparison between direct GCM output and different downscaling techniques. *J. Clim.*, 14, 4422-4446.
- Trigo R., T. J. Osborn y J. M. Corte-Real, 2002: The North Atlantic Oscillation influence on Europe: climate impacts and associated physical mechanisms. *Clim. Res.*, 20, 9-17.
- Trigo R., M. A. Valente, I. F. Trigo, P. M. A. Miranda, A. M. Ramos, D. Paredes y R. García-Herrera, 2008: The Impact of North Atlantic Wind and Cyclone Trends on European Precipitation and Significant Wave Height in the Atlantic. in *Trends and Directions in Climate Research: Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1146, 212-234. doi: 10.1196/annals.1446.014
- Trigo, I.F., 2005: Climatology and interannual variability of storm-tracks in the Euro-Atlantic sector: a comparison between ERA-40 and NCEP/NCAR reanalyses. *Clim. Dyn.*, doi:10.1007/s00382-005-0065-9.
- Ulbrich U., y Christoph M., 1999: A shift of the NAO and increasing storm track activity over Europe due to anthropogenic greenhouse gas forcing. *Clim. Dyn.*, 15, 551-559.
- Vicente-Serrano, S. M., y J. I. López-Moreno, 2008: Nonstationary influence of the North Atlantic Oscillation on European precipitation. *J. Geophys. Res.*, 113, D20120, doi:10.1029/2008JD010382.
- Wallace, J. M., y D. S. Gutzler, 1981: Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere Winter. *Mon. Wea. Rev.*, 109, 784-812.
- Walter, K., y H.-F. Graf, 2002: On the changing nature of the regional connection between the North Atlantic Oscillation and sea surface temperature. *J. Geophys. Res.*, 107 (D17), 4338, doi:10.1029/2001JD000850
- Wibig, J., 1999: Precipitation in Europe in relation to circulation patterns at the 500 hpa level. *Int. J. Climatol.*, 19, 253-269.
- Zveryaev, I. I., 2006: Seasonally varying modes in long-term variability of European precipitation during the 20th century. *J. Geophys. Res.*, 111, D21116.