

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS
MÁSTER EN METEOROLOGÍA Y GEOFÍSICA



**VARIABILIDAD CLIMÁTICA ASOCIADA AL ESTANCAMIENTO
ATMOSFÉRICO EN EUROPA A LO LARGO DEL SIGLO XX**

Por:

Veronika Berenisse Castro Asenjo

Tutores:

David Barriopedro Cepero (IGEO, CSIC)

Marta Ábalos Alvarez (UCM)

Jacob William Maddison (UCM)

TRABAJO FIN DE MASTER

Firmado por ABALOS
ALVAREZ MARTA -
53618577B el día
13/09/2021 con un
certificado emitido
por AC FNMT Usuarios

Madrid, 13 de setiembre de 2021

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres por el amor y el apoyo incondicional, por los valores inculcados, los sabios consejos, por los ánimos cada vez que el camino se tornaba difícil, por todo estoy inmensamente agradecida. A mis hermanos por los gratos momentos, sus cálidos mensajes y sus continuas muestras de afecto.

A Dayana, Daniela, José Antonio y Juan Carlos, por su amistad y gratos momentos durante el máster, y como no, a Emilio, por los tours en Madrid, por las torrijas, la deliciosa paella, pero sobre todo por los ánimos y su sincera amistad; a Carlos, Noelia, Polet, Andreé, Alen, Christian y Diego porque a pesar de la distancia, me acompañaron todo este tiempo.

A mis asesores Marta Ábalos, David Barriopedro y Jacob Maddison, por sus sabios y acertados consejos, paciencia y guía. Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todos los profesores del Máster en Meteorología y Geofísica de la UCM, por transmitirme sus conocimientos, por la buena educación que he recibido y por su disposición en todo momento.

Resumen

El estancamiento atmosférico es una situación sinóptica de calma, con vientos débiles y sin precipitación, que favorece la ocurrencia de eventos extremos. Sin embargo, no existen estudios de la relación entre la variabilidad climática y las tendencias a largo plazo de la ocurrencia de estancamiento en el pasado, para Europa. En este trabajo se describe la climatología, patrones de variabilidad y tendencias del estancamiento de invierno en Europa para el periodo 1901-2009, así como la relación con los modos de variabilidad de circulación atmosférica predominantes en el área de análisis. Para ello, se emplearon datos de los reanálisis NOAA-20CR y ERA-20C, ambos reanálisis con la información necesaria para el cálculo del estancamiento y los índices de circulación atmosférica predominantes en el sector Euro-Atlántico: Oscilación del Atlántico Norte (NAO), y patrones del Atlántico Este (EA) y Escandinavo (SCAN).

Los reanálisis del siglo XX capturan los patrones climatológicos de la frecuencia de estancamiento en Europa, así como las principales regiones con un comportamiento espacialmente coherente: Escandinavia (SC), Europa del Norte (NEU), Europa Central y Sur (CSEU) y Suroeste de Europa (SW). Así también, se obtuvo que la circulación a gran escala puede explicar más del 50% de la variación del estancamiento en Europa. En general, el análisis de las tendencias a largo plazo indica cambios no significativos en la frecuencia de estancamiento durante el siglo XX, a excepción de NEU y CSEU que sí muestran tendencias significativas, aunque sólo en ERA-20C. La tendencia (no significativa) hacia un aumento de estancamiento durante el periodo 1951-2009 (particularmente en regiones del sur, como SW) está de acuerdo con cambios recientes y proyecciones de cambio climático.

Los resultados confirman que el estancamiento y la circulación a gran escala están estrechamente relacionados, siendo la NAO y SCAN los principales modos que modulan el estancamiento en Europa, explican el 50% de este.

Palabras clave: Estancamiento atmosférico, reanálisis del siglo XX, circulación a gran escala, tendencias a largo plazo.

ABSTRACT

Atmospheric stagnation is a synoptic situation of calm, with weak winds and no precipitation, which favors the occurrence of extreme events. However, there are no studies of the relationship between climate variability and long-term trends in the occurrence of stagnation in the past, for Europe. In this work it is describes the climatology, variability patterns and trends of winter stagnation in Europe for the period 1901-2009, as well as the relationship with the predominant modes of atmospheric circulation variability in the area of analysis. For this, data from the NOAA-20CR and ERA-20C reanalyses were used, both reanalyses with the necessary information to calculate the stagnation and prevailing atmospheric circulation indices in the Euro-Atlantic sector: North Atlantic Oscillation (NAO), and Eastern Atlantic (EA) and Scandinavian (SCAN) patterns.

The 20th century reanalyses capture the climatological patterns of the frequency of stagnation in Europe, as well as the main regions with a spatially coherent behavior: Scandinavia (SC), Northern Europe (NEU), Central and Southern Europe (CSEU) and Southwest (SW). Likewise, it was found that large-scale circulation can explain more than 50% of the variation in stagnation in Europe. In general, the analysis of long-term trends indicates non-significant changes in the frequency of stagnation during the 20th century, an exception for NEU and CSEU that do show significant trends, although only in ERA-20C. The (not significant) trend towards an increase in stagnation during the period 1951-2009 (particularly in southern regions, such as SW) is in accordance with recent changes and projections of climate change.

The results confirm that stagnation and large-scale circulation are closely related, with NAO and SCAN being the main modes that modulate stagnation in Europe, accounting for 50% of this.

Keywords: Atmospheric stagnation, 20th century reanalysis, large-scale circulation, long-term trends.

ÍNDICE

Agradecimientos	II
Resumen.....	III
Abstract.....	VI
Índice	V
Introducción	10
Datos y Metodología	3
2.1 Reanálisis	3
2.2 Índices de circulación atmosférica.....	4
2.3 Índice de estancamiento... ..	5
2.4. Otros métodos	5
Resultados	6
3.1 Climatología y regionalización del estancamiento.....	6
3.2 Patrones de variabilidad.....	10
3.3 Relación de los índices de circulación y estancamiento	17
3.4 Estacionariedad de las relaciones	19
Conclusiones	22
Bibliografía	24

Introducción

El estancamiento se refiere a un período en el que una masa de aire estable se asienta sobre una región y permanece casi estacionaria durante un período de tiempo. Es común durante situaciones de altas presiones y pantanos barométricos (ausencia de gradiente de presiones). Los vientos débiles en la troposfera baja y media y la ausencia de precipitación durante el estancamiento imposibilitan la ventilación, lo que favorece la concentración de contaminantes. El estancamiento es frecuente durante episodios de contaminación por lo que tiene evidentes impactos socioeconómicos, ambientales y de salud (Doherty et al. 2017).

Estudios recientes han permitido identificar las condiciones favorables de estancamiento y diagnosticar su ocurrencia mediante índices basados en umbrales predeterminados de ciertas variables meteorológicas básicas (p.ej., Wang y Angell, 1999; Horton et al., 2012, 2014; Wang et al., 2016, 2018; Huang et al., 2017). Dichos estudios muestran que las latitudes medias, como América del Norte, China y el Mediterráneo presentan frecuencias de estancamiento superiores al 40% (p. ej., Horton et al., 2012, 2014; Huang et al., 2017; Garrido-Perez et al., 2018). Además, se espera que el cambio climático aumente su ocurrencia (Mickley et al., 2004; Leung y Gustafson Jr, 2005; Horton et al., 2012, 2014; Caserini et al., 2017; Gao et al., 2020; Lee et al., 2020). La mayoría de estudios se han centrado principalmente en aspectos locales y cambios recientes (últimas décadas), sin considerar la circulación atmosférica a gran escala o la variabilidad temporal de estancamiento a largo plazo (siglo XX).

La variabilidad de la circulación atmosférica se manifiesta en forma de patrones atmosféricos recurrentes, denominados modos de variabilidad (Barnston and Livezey, 1987). Los principales modos de variabilidad de circulación atmosférica en el sector Euro-Atlántico para invierno son la Oscilación del Atlántico Norte (NAO, en inglés), y los patrones del Atlántico Este (EA) y Escandinavo (SCAN) (Falkena et al., 2020). La NAO consiste en un dipolo norte-sur de anomalías (Barnston and Livezey, 1987), con un centro ubicado sobre Groenlandia y el otro centro de signo opuesto que abarca las latitudes centrales del Atlántico Norte entre [35°- 40°] N, este patrón presenta altas presiones entre las latitudes mencionadas anteriormente, la segunda es lo contrario), las cuáles están asociadas con cambios en la intensidad y ubicación de la corriente en chorro del Atlántico norte. El EA consiste en un dipolo norte-sur de centros de anomalías que se extienden por el Atlántico Norte de este a oeste, el centro de latitudes inferiores de EA presenta un fuerte vínculo subtropical en asociación con modulaciones en la intensidad y ubicación de la circulación subtropical. Estructuralmente EA es similar a la NAO, aunque desplazado hacia el sur, la diferencia entre ambos reside en el centro de baja latitud, que presenta fuertes relaciones con la

circulación subtropical. El patrón SCAN se caracteriza por tener un centro predominante sobre Escandinavia, y centros más débiles de signo opuesto sobre Europa occidental y Rusia oriental, la fase positiva de este patrón se asocia con importantes anticiclones de bloqueo, sobre Escandinavia y Rusia occidental.

El presente trabajo está motivado por la escasez de estudios que analicen la influencia de los principales patrones de circulación en el estancamiento, y su variabilidad a largo plazo. Así, los objetivos de este estudio son: (i) comparar la frecuencia invernal de estancamiento europeo en los reanálisis del siglo XX, NOAA-20CR y ERA-20C, (ii) analizar la relación entre la frecuencia del estancamiento y los principales modos de variabilidad que afectan el sector Euro-Atlántico, y (iii) determinar posibles tendencias a largo plazo en el estancamiento del aire en el siglo XX, a nivel continental y regional.

La estructura de este trabajo es la siguiente: la sección 2 contiene una descripción de los reanálisis del siglo XX y los métodos aplicados, incluyendo la definición de los índices de circulación y estancamiento analizados en el estudio. La sección 3 presenta los principales resultados relacionados con la climatología y regionalización del estancamiento de invierno en Europa (sección 3.1), la variabilidad espacio-temporal del estancamiento (sección 3.2), su relación con los índices de circulación (sección 3.3) y la estacionariedad de dichas relaciones (sección 3.4). La sección 4 resume las principales conclusiones del trabajo.

Datos y Metodología

2.1 Reanálisis

Los datos empleados para el cálculo del índice de estancamiento y los principales modos de variabilidad de circulación atmosférica en el sector Euro-Atlántico proceden de los reanálisis del siglo XX, NOAA-20CR y ERA-20C, extraídos de https://portal.nersc.gov/project/20C_Reanalysis/ y <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-20c>, respectivamente.

NOAA-20CR es un reanálisis del proyecto Twentieth Century Reanalysis (20CR), que es un producto conjunto de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), el Instituto Cooperativo de Investigación en Ciencias Ambientales (CIRES) y el Departamento de Energía de EE. UU. NOAA 20C incluye 28 niveles y 4 capas de subsuelo, proporciona datos con una resolución $1^\circ \times 1^\circ$ y temporal subdiaria, diaria y mensual. Asimila datos de presión superficial, temperatura de la superficie del mar y distribuciones de hielo marino observadas mensualmente como condiciones de frontera y abarca el periodo 1836-2015 (Slivinski et al., 2019).

ERA-20C es el primer reanálisis atmosférico del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF) para el siglo XX (Poli et al., 2016). El modelo cuenta con 91 niveles, 4 capas de subsuelo y ondas oceánicas. Los datos presentan una resolución horizontal $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ y temporal subdiaria, diaria y mensual.

Para el cálculo de los principales modos de variabilidad de circulación atmosférica se usaron datos mensuales de altura geopotencial a 500 hPa sobre el dominio $[75^\circ\text{W}, 15^\circ\text{E}]$ y $[20,90]^\circ\text{N}$ que cubre el Atlántico Norte. Para el cálculo del índice de estancamiento se emplearon datos diarios de viento en superficie y a 500 hPa, y precipitación sobre el dominio $[15^\circ\text{W}, 30^\circ\text{E}]$ y $[33,75]^\circ\text{N}$ que cubre el continente europeo.

2.2 Índices de circulación atmosférica

La NAO, EA y SCAN se definen como la primera, segunda y tercera componente principal del campo mensual de anomalías estandarizadas de altura geopotencial a 500 hPa, en el dominio $[75^\circ\text{W}, 15^\circ\text{E}]$ y $[20,90]^\circ\text{N}$ para la temporada de invierno en el periodo 1901-2009. Para su cálculo se empleó la función *eofAsCovariance* de Python, realiza un análisis EOF de una matriz de datos con dimensiones espaciales que representan latitud y longitud y una dimensión temporal. Esta función aplica el método Singular Value Decomposition (SVD) a la matriz de covarianza (Bjornsson y Venegas, 1997); este método estadístico permite reducir la dimensionalidad del

campo analizado en sus componentes principales (Principal Components, PCs) de forma que la varianza de los datos puede ser descrita por unos pocos modos ortogonales (Empirical Orthogonal Functions, EOFs). El método identifica los modos ortogonales (patrones espaciales o autovectores) y sus componentes principales (series temporales o autovalores) asociadas, junto con la varianza explicada por cada uno de ellos.

2.3 Índice de estancamiento

El índice de estancamiento ASI (del inglés, Air Stagnant Index) fue introducido por primera vez por Wallace et al. (1981) mediante un conjunto de condiciones atmosféricas que deben satisfacerse simultáneamente en un mismo punto durante al menos 4 días consecutivos:

- Velocidad del viento en superficie menor que 4.0 m s^{-1}
- Velocidad del viento a 500 hPa menor que 13.0 m s^{-1} .
- Ausencia de precipitación.

En este trabajo se usa la definición empleada por Horton et al. (2012) donde se actualizan los anteriores umbrales, para su uso en datos de reanálisis

- Promedio diario de la velocidad del viento a 10 m menor que 3.2 m s^{-1} .
- Promedio diario de la velocidad del viento a 500 hPa menor que 13.0 m s^{-1}
- Precipitación total diaria menor que 1.0 mm.

Estas condiciones se evaluaron diariamente por cada punto del dominio utilizado para el análisis de estancamiento, creando un indicador que contabiliza los eventos con 0 (denota ausencia) y 1 (denota la ocurrencia de estancamiento). Finalmente, el índice ASI se define como el número de días del invierno que satisface estas tres condiciones anteriores.

Debido a la fuerte variabilidad espacial que presenta el estancamiento en Europa, se ha aplicado una regionalización del índice ASI mediante el análisis de agrupamiento, basado en la técnica k-means (Wilks, 2006). Este análisis permite identificar un número predeterminado de puntos con características similares y los agrupa formando regiones espacialmente coherentes en lo que respecta a la frecuencia de ocurrencia de estancamiento. Siguiendo la metodología de Garrido-Pérez et al. (2018), se han obtenido cuatro regiones de las series de invierno de ASI para el periodo en común 1901-2009, tomando en cuenta sólo los puntos de continente. Una vez identificadas las regiones se procedió a calcular la frecuencia regional de estancamiento. Para ello, se define un día de estancamiento regional como aquel en el que al menos la mitad de los puntos de la región cumplen con las tres condiciones del índice de estancamiento.

Finalmente, para identificar los patrones que gobiernan la variabilidad regional del estancamiento en Europa, se ha aplicado el método SVD descrito en la sección 2.2 a la matriz de covarianza de las anomalías mensuales estandarizadas del ASI en invierno para el periodo 1901-2009 sobre el dominio [15°W, 30°E] y [33,75] °N.

2.4 Otros métodos

Las tendencias de las series temporales obtenidas en las secciones anteriores se han evaluado mediante un análisis de regresión lineal. La tendencia se define como la pendiente de la regresión lineal en el periodo analizado, y su significatividad se ha evaluado al 95% de nivel de confianza (test-t). Se calcularon las tendencias de las series regionales de ASI para el periodo completo (1901-2009) y para los subperiodos 1901-1950 y 1951-2009.

Para evaluar el grado de acuerdo de los reanálisis en lo que respecta a los índices de estancamiento y circulación, así como la influencia de los índices de circulación en el estancamiento, se ha calculado el coeficiente de correlación de Pearson y la significatividad asociada de las series temporales correspondientes.

Resultados

3.1 Climatología y regionalización del estancamiento

En la Figura 1 se muestra la climatología del índice ASI para el invierno del periodo 1901-2009 en los reanálisis NOAA-20CR y ERA-20C. Ambos reanálisis muestran patrones similares con mayor estancamiento en el suroeste de Europa y centro y sureste de Europa, y menor estancamiento en el norte de Europa. La región de Escandinavia presenta frecuencias intermedias, aunque concentra las mayores discrepancias entre reanálisis, mostrando un mayor estancamiento con ERA-20C que con NOAA-20CR. Los patrones y frecuencias encontradas, en el presente trabajo, muestran un acuerdo con estudios basados en reanálisis de última generación Garrido-Pérez et al. (2018).

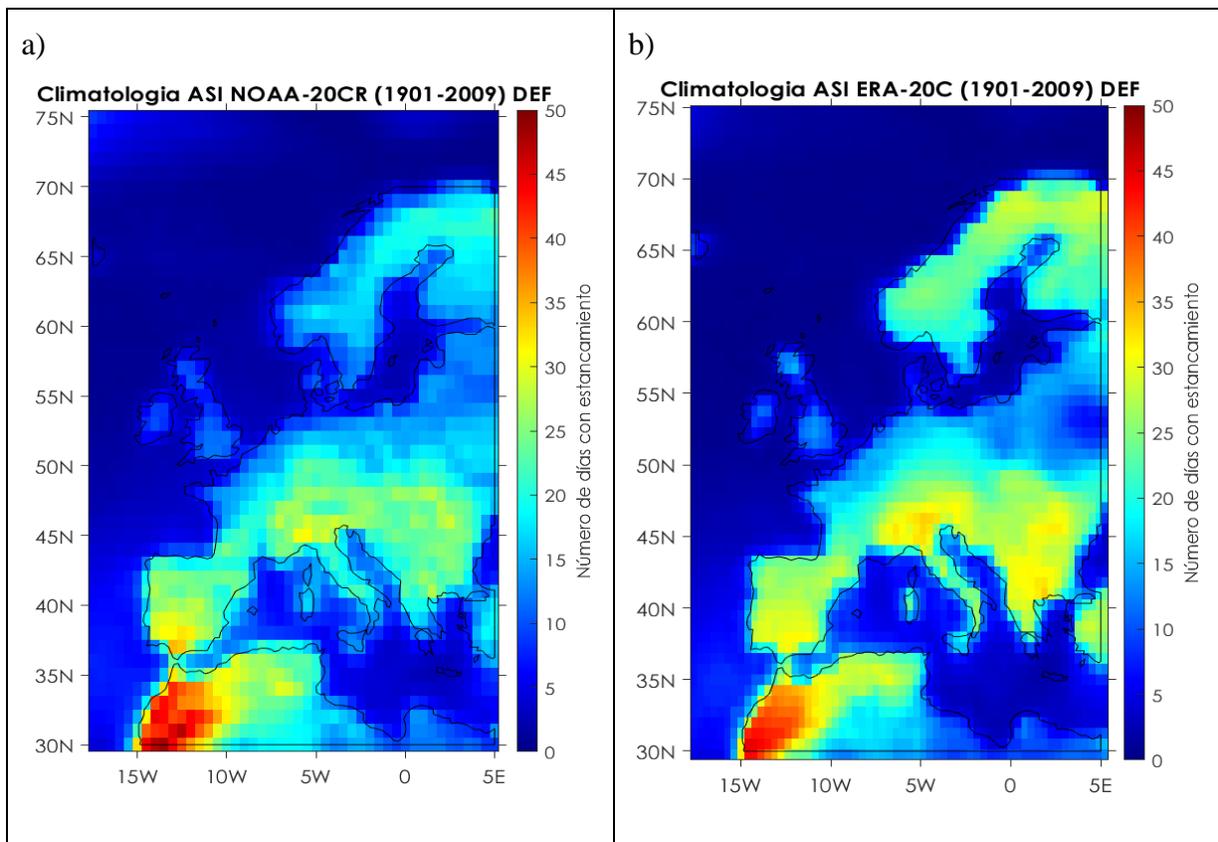


Figura 1: Climatología (1901-2009) del índice de estancamiento (ASI) para el invierno a) NOAA-20CR, b) ERA-20C. Los colores muestran la frecuencia media de días de invierno con estancamiento.

La Figura 2 muestra la regionalización del índice ASI, obtenida a partir de la técnica k-means, hallándose un buen acuerdo entre ambos reanálisis. Se identifican cuatro regiones espacialmente bien diferenciadas: Suroeste de Europa (SW), que abarca España, Portugal y norte de Marruecos; Europa del Norte (NEU) que incluye las islas Británicas, Dinamarca y Países Bálticos; Escandinavia (SC) que incluye Noruega, Suecia y Finlandia y Centro y sur de Europa (CSEU), que incluye la península Balcánica e Italia.

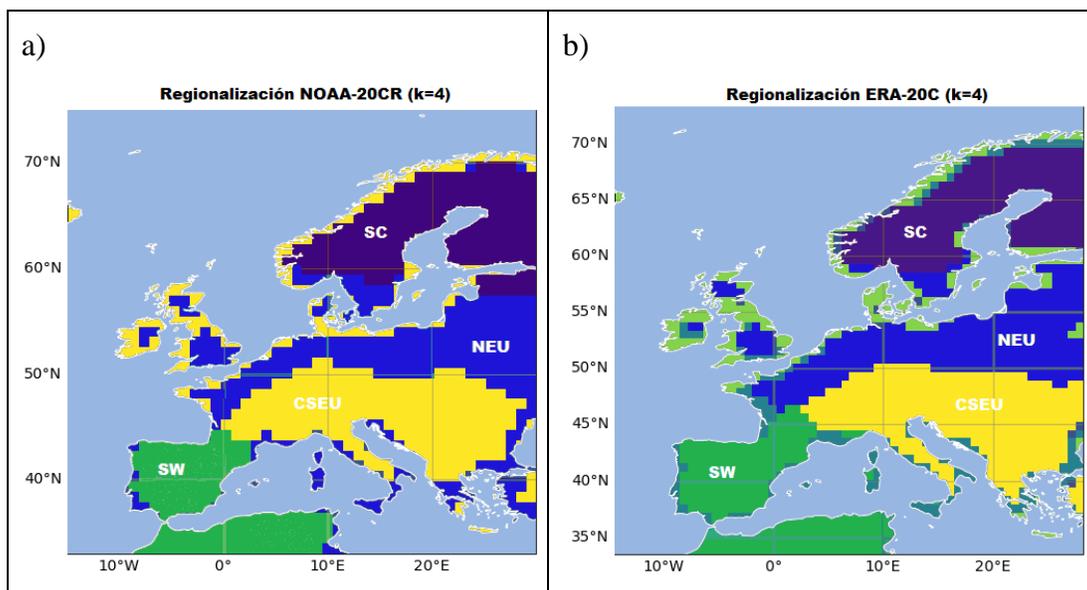


Figura 2. Regionalización (*k*-means) de las series (1901-2009) de invierno de ASI en el reanálisis: a) NOAA-20CR; b) ERA-20C. Los colores identifican los puntos que pertenecen a una misma región: Suroeste (SW; verde), Norte (NEU; azul), Escandinavia (SC; morado) y Centro y Sur de Europa (CSEU; amarillo).

La Figura 3 muestra las series temporales del número de días de invierno con estancamiento en cada región para ambos reanálisis en el periodo 1901-2009. De acuerdo con estudios recientes, el estancamiento es mayor en el sur de Europa (SW y CSEU; ~15-20 días) y, secundariamente en la región escandinava (SC; ~10-15 días), presentando un mínimo en el centro-Europa del Norte (NEU; ~5 días). En general, se observa un buen acuerdo entre reanálisis, con frecuencias similares, particularmente en la segunda mitad del siglo XX, con frecuencias similares.

Las mayores discrepancias se producen en SC donde ERA-20C indica una sobreestimación sistemática de la frecuencia de estancamiento con respecto a NOAA-20CR, con diferencias medias de ~9 días. De acuerdo con Garrido-Pérez et al. (2018), donde se evalúa el estancamiento en Europa utilizando un reanálisis de última generación, ERA-20C muestra un mejor acuerdo con

respecto a la frecuencia media de la región SC; mientras que NOAA-20CR subestima la frecuencia media de esta región en ~9 días. A pesar de ello, las series regionales muestran variaciones interanuales similares en ambos reanálisis, con correlaciones significativas ($p < 0.05$) en todas las regiones ($r = 0.90$, $r = 0.78$, $r = 0.79$ y $r = 0.81$, para SW, NEU, SC y CSEU, respectivamente).

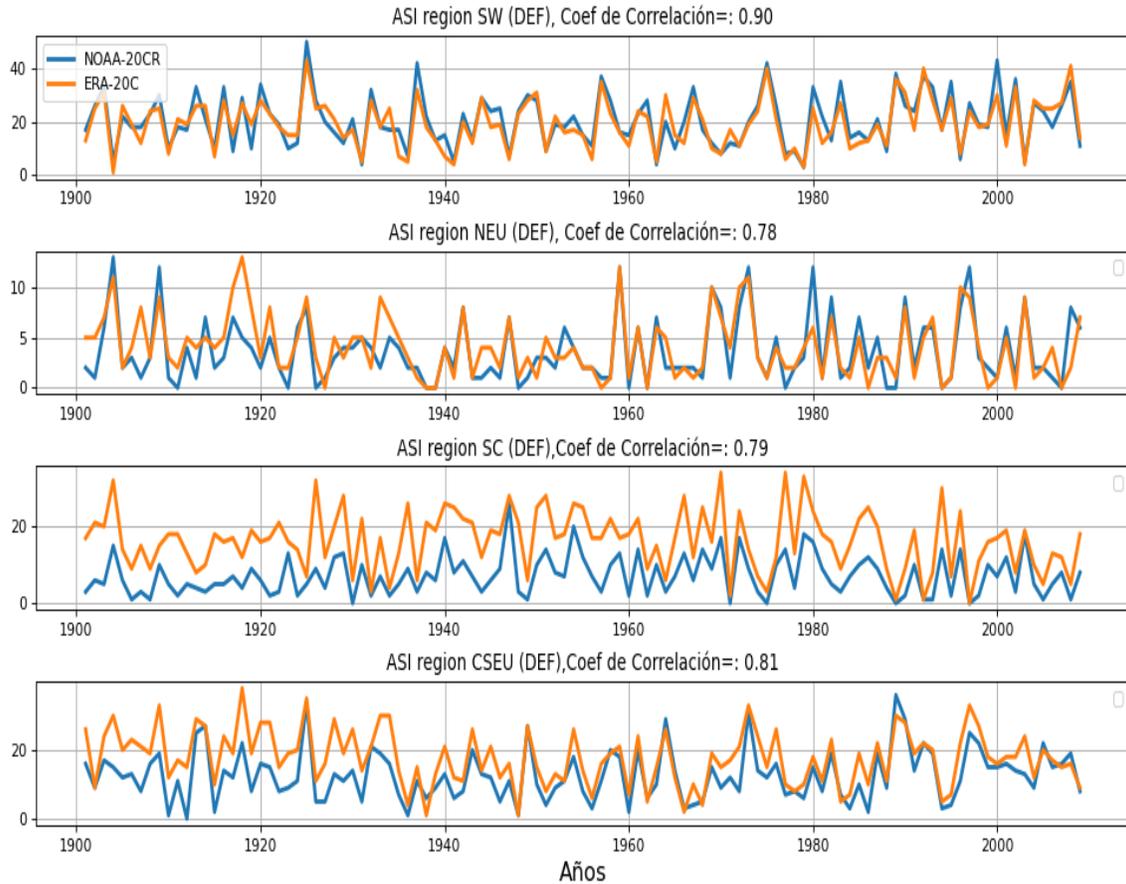


Figura 3. Series (1901-2009) regionales del índice ASI de invierno en el reanálisis NOAA-20CR (azul) y ERA-20C (naranja). Los paneles corresponden a las regiones SW, NEU, SC y CSEU. Los títulos de cada panel muestran el coeficiente de correlación entre las series regionales de ambos reanálisis.

Finalmente, se han calculado las tendencias de las series regionales de ASI en invierno para el periodo 1901-2009 y subperiodos 1901-1950 y 1951-2009 (Tabla 1). Los resultados para el periodo total, indican un acuerdo entre ambos reanálisis sólo para la región SW, que muestra un aumento del estancamiento, aunque no es significativo. Las regiones NEU, CSEU y SC muestran un descenso del estancamiento en ERA-20C, siendo significativas sólo las dos primeras regiones. Estas tendencias significativas representan el 49% y 28% de la frecuencia climatológica,

respectivamente, mientras que, éstas mismas regiones muestran un resultado contrario no significativo en NOAA-20CR.

Sin embargo, cuando se analizan las tendencias a partir de los subperiodos, ambos reanálisis muestran un acuerdo en los resultados, la primera mitad de siglo muestra un descenso de la ocurrencia de estancamiento en las regiones NEU y CSEU para la primera mitad de siglo, aunque solo es significativo en ERA-20C. Estas tendencias negativas representan cambios relativos del 81% y 46% respecto a la frecuencia climatológica. La única región que muestra un aumento (no significativo) es SC. En la segunda mitad de siglo ambos reanálisis indican un aumento del estancamiento generalizado, aunque no significativo, particularmente en las regiones del sur de Europa (SW y CSEU), a excepción de SC, que muestra un descenso (solo significativo en ERA-20C, este descenso representa el 63% respecto a la frecuencia climatológica). A pesar que NOAA-20CR muestra un buen acuerdo con ERA-20C y en algunas regiones el porcentaje de climatología que representa puede ser incluso mayor, éstos no son significativos, probablemente se deba a cambios en la disponibilidad de observaciones, no se observa una buena correspondencia entre la primera y segunda mitad del periodo, detalle que sí se observa en ERA-20C en sus dos subperiodos. Aunque los cambios regionales recientes no son significativos, los resultados están cualitativamente de acuerdo con estudios recientes que indican un aumento del estancamiento con el calentamiento global en regiones del sur de Europa (p.ej. Horton et al., 2014).

Periodo Total	1901-2009							
Pendiente 10 ⁻²	SW		NEU		SC		CSEU	
ERA-20C	2 (10%)		-2 (-49%)		-3 (18%)		-5 (-28%)	
NOAA-20CR	2 (10%)		1 (27%)		2 (28%)		2 (16%)	
Subperiodos	1901-1950				1951-2009			
	SW	NEU	SC	CSEU	SW	NEU	SC	CSEU
ERA-20C	-2 (-9%)	-4(-81%)	3 (19%)	-9 (-46%)	7 (34%)	0(0%)	-10 (-63%)	5 (29%)
NOAA-20CR	-1 (-0.2%)	-2 (-60%)	4 (66%)	-3 (-74%)	6 (29%)	1 (15%)	-5 (-60%)	6 (29%)

Tabla 1. Tendencias del índice ASI de invierno para cada una de las regiones (columnas) y el periodo completo 1901-2009 y los subperiodos 1901-1950 y 1951-2009 en los reanálisis NOAA-20CR y ERA-20C (filas). Las tendencias cuantifican los cambios absolutos de frecuencia de días de invierno por siglo (y en paréntesis el correspondiente cambio relativo de frecuencia respecto a la climatología). En negrita se indican los casos en los que la pendiente de la regresión lineal es estadísticamente significativa al 95% de confianza.

3.2 Patrones de variabilidad

Las Figuras 4, 5 y 6 muestran los patrones espaciales (a y b) y las series temporales (c) de los índices de circulación NAO, EA y SCAN en los reanálisis NOAA-20CR y ERA-20C. Las

varianzas explicadas por la NAO, EA y SCAN son muy próximas en ambos reanálisis (45%, 19% y 11% en NOAA-20CR, y 48%, 17% y 10% en ERA-20C). También se aprecia un buen acuerdo en los patrones espaciales, y las series temporales, que muestran una alta correlación (0.95, 0.96 y 0.94, respectivamente; $p < 0.05$). Los resultados confirman que los principales modos de variabilidad que influyen en el sector Euro-Atlántico son la NAO, EA y SCAN en ambos reanálisis.

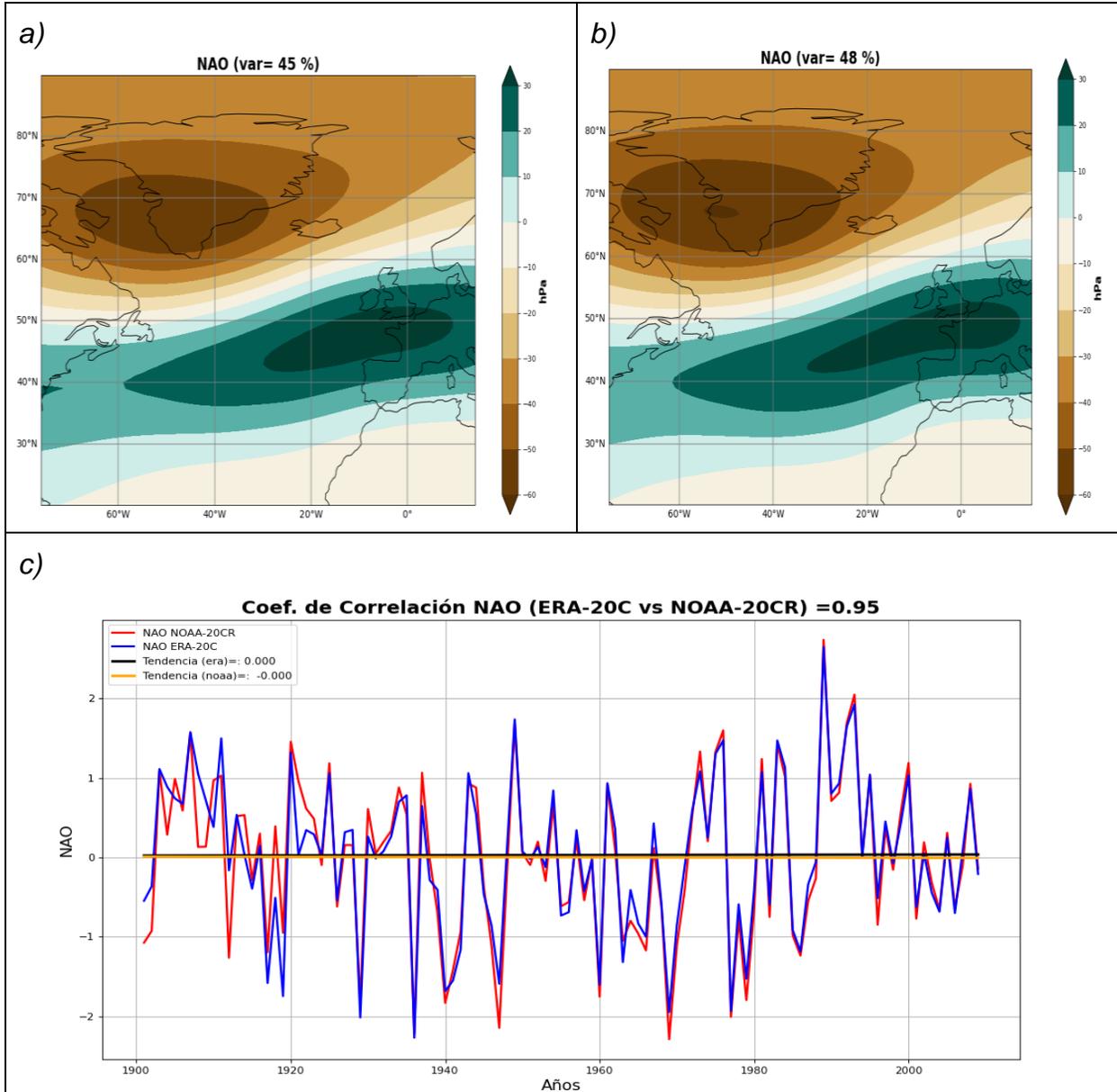


Figura 4. Primer modo de variabilidad del campo de altura geopotencial a 500 hPa (NAO) en: a) NOAA-20CR; b) ERA-20C. Fvar, indica la varianza explicada por cada modo. c) Series temporales (1901-2009) del índice NAO de invierno en NOAA-20CR (rojo) y ERA-20C (azul) y

tendencias asociadas (líneas negra y amarilla, respectivamente). El título muestra el coeficiente de correlación entre las series NAO de ambos reanálisis.

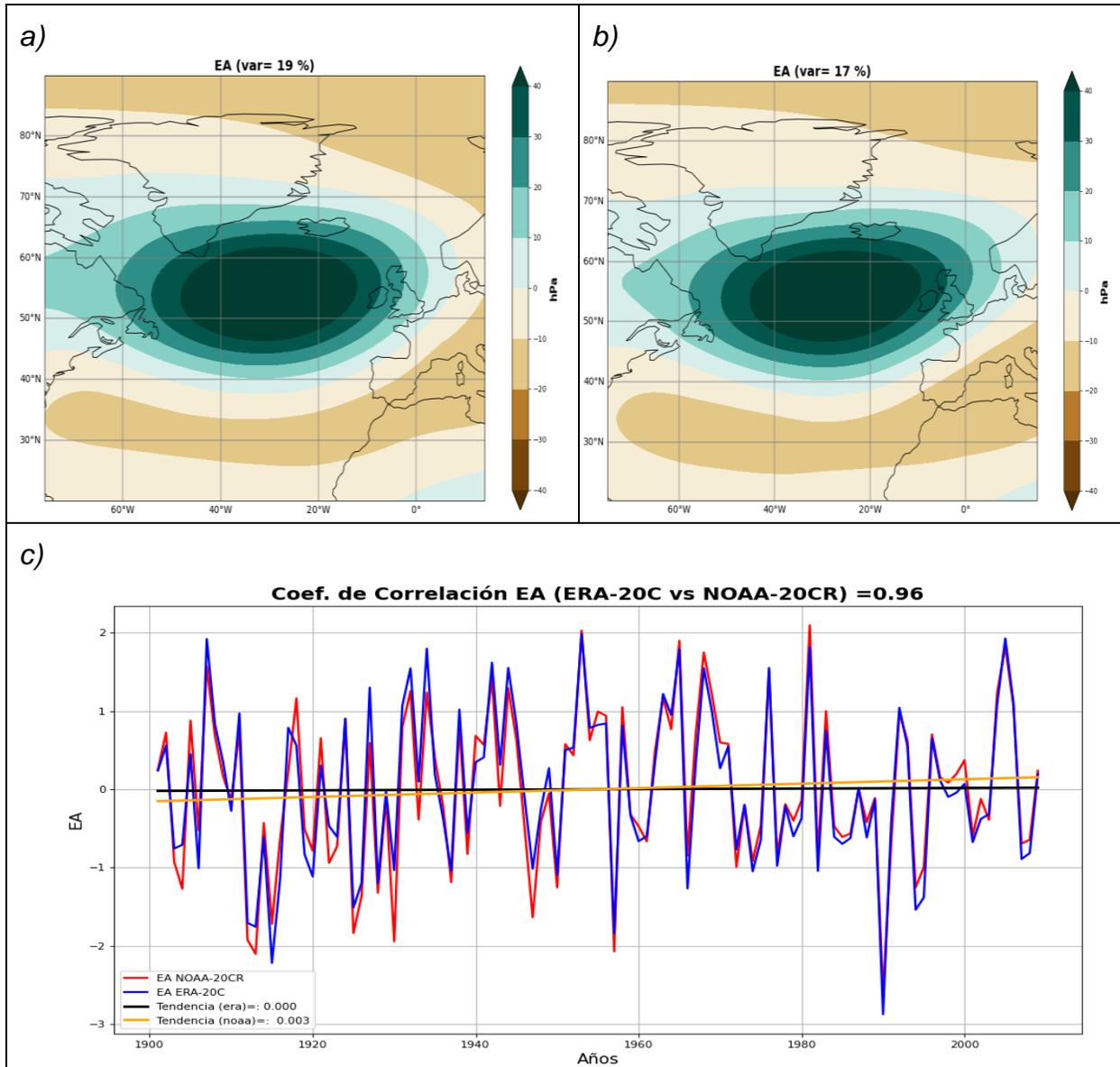


Figura 5. Segundo modo de variabilidad del campo de altura geopotencial a 500 hPa (EA) en: a) NOAA-20CR; b) ERA-20C. Fvar, indica la varianza explicada por cada modo. c) Series temporales (1901-2009) del índice EA de invierno en NOAA-20CR (rojo) y ERA-20C (azul) y tendencias asociadas (líneas negra y amarilla, respectivamente). El título muestra el coeficiente de correlación entre las series EA de ambos reanálisis.

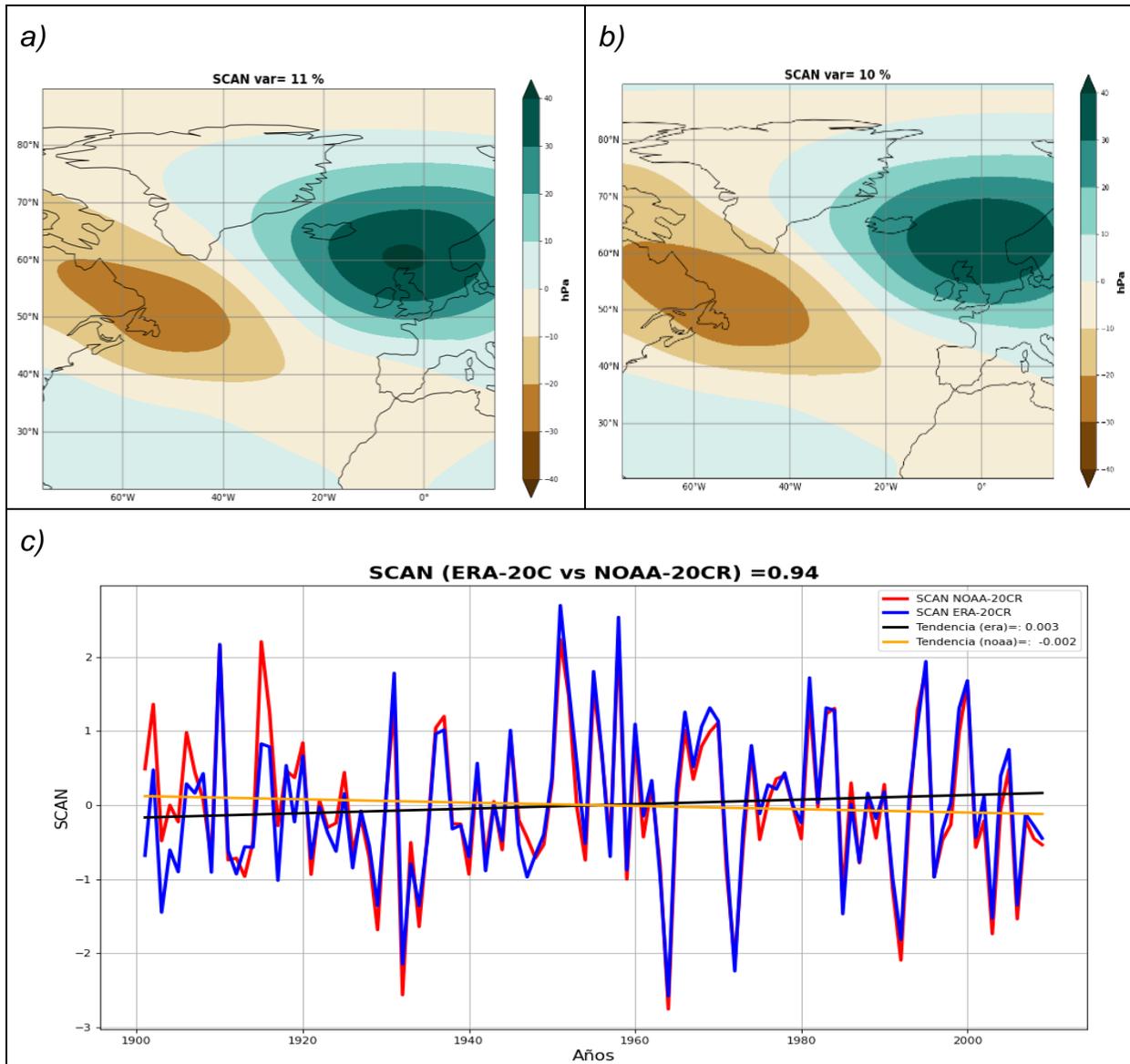


Figura 6. Tercer modo de variabilidad del campo de altura geopotencial a 500 hPa (SCAN) en: a) NOAA-20CR; b) ERA-20C. F_{var} , indica la varianza explicada por cada modo. c) Series temporales (1901-2009) del índice SCAN de invierno en NOAA-20CR (rojo) y ERA-20C (azul) y tendencias asociadas (líneas negra y amarilla, respectivamente). El título muestra el coeficiente de correlación entre las series SCAN de ambos reanálisis.

Para identificar los patrones espaciales que gobiernan la variabilidad del estancamiento en Europa, se ha aplicado el método SVD a la matriz de covarianza de anomalías estandarizadas del ASI de invierno para el período 1901-2009 (sección 2.3). Los dos primeros modos de variabilidad del ASI explican más del 50% de varianza en ambos reanálisis (37% y ~15%, respectivamente), mientras que el tercero solo explica el 7% de varianza. En las Figuras 7 y 8 se muestran los patrones

espaciales (EOFs) y series temporales (PCs) de los dos primeros modos de variabilidad del ASI en los reanálisis NOAA-20CR y ERA-20C. Las correlaciones entre las PCs de NOAA-20CR y ERA-20C son 0.97 para la primera PC (PC1; $p < 0.05$) y 0.86 para la segunda (PC2; $p < 0.05$), lo que indica un alto grado de acuerdo. El primer modo de variabilidad (Figura 7) muestra un dipolo meridional con anomalías positivas del ASI en el sur (regiones SW y CSEU) y anomalías negativas al norte (SC y NEU) de Europa, lo que indica variaciones latitudinales del estancamiento (valores bajos al norte y altos al sur durante las fases positivas de la PC1). El patrón es muy similar al de la NAO, lo que sugiere una fuerte influencia de la NAO sobre la variabilidad del estancamiento en Europa. La serie temporal asociada está dominada por alta variabilidad interanual y ausencia de tendencias significativas.

El segundo modo de variabilidad (Figura 8) se caracteriza por un monopolio en el centro y norte de Europa (CSEU y NEU). Las fases positivas de la PC2 favorecen el estancamiento en estas regiones, pero el patrón no muestra semejanzas con ninguno de los modos dominantes de circulación atmosférica, por lo que podría sugerirse una posible relación con la ocurrencia de sistemas regionales de altas presiones (p.ej. bloqueos o dorsales subtropicales). Aunque los dos reanálisis presentan variaciones interanuales similares de la PC2, discrepan en sus tendencias: ERA-20C muestra una tendencia negativa significativa ($p < 0.05$) que no captura el reanálisis NOAA-20CR, probablemente esta tendencia se deba a que, en la primera mitad del periodo, hay un predominante descenso del estancamiento regional, lo que se refleja en el periodo completo, a pesar que, en la segunda mitad del periodo, se observa una tendencia positiva, aunque leve. Esta discrepancia está de acuerdo con los mayores cambios observados en el análisis regional de las tendencias a largo plazo en la ocurrencia de estancamiento de NEU y CSEU detectados en ERA-20C. No obstante, la tendencia de la PC2 en ERA-20C no se traduce necesariamente en un descenso significativo en la ocurrencia de estancamiento en dichas regiones, lo que pone de manifiesto la utilidad del análisis regional.

Los resultados sugieren una influencia de la circulación atmosférica, en concreto existe una influencia dominante de la NAO, en la variabilidad del estancamiento. Dichas relaciones se explorarán con más detalle en la próxima sección. Aunque la PC2 del ASI no parezca tener una relación obvia con los modos dominantes de variabilidad atmosférica, ello no necesariamente supone una influencia despreciable en la ocurrencia regional de estancamiento. Por tanto, también se analizará la influencia de los índices de circulación en las series regionales de estancamiento.

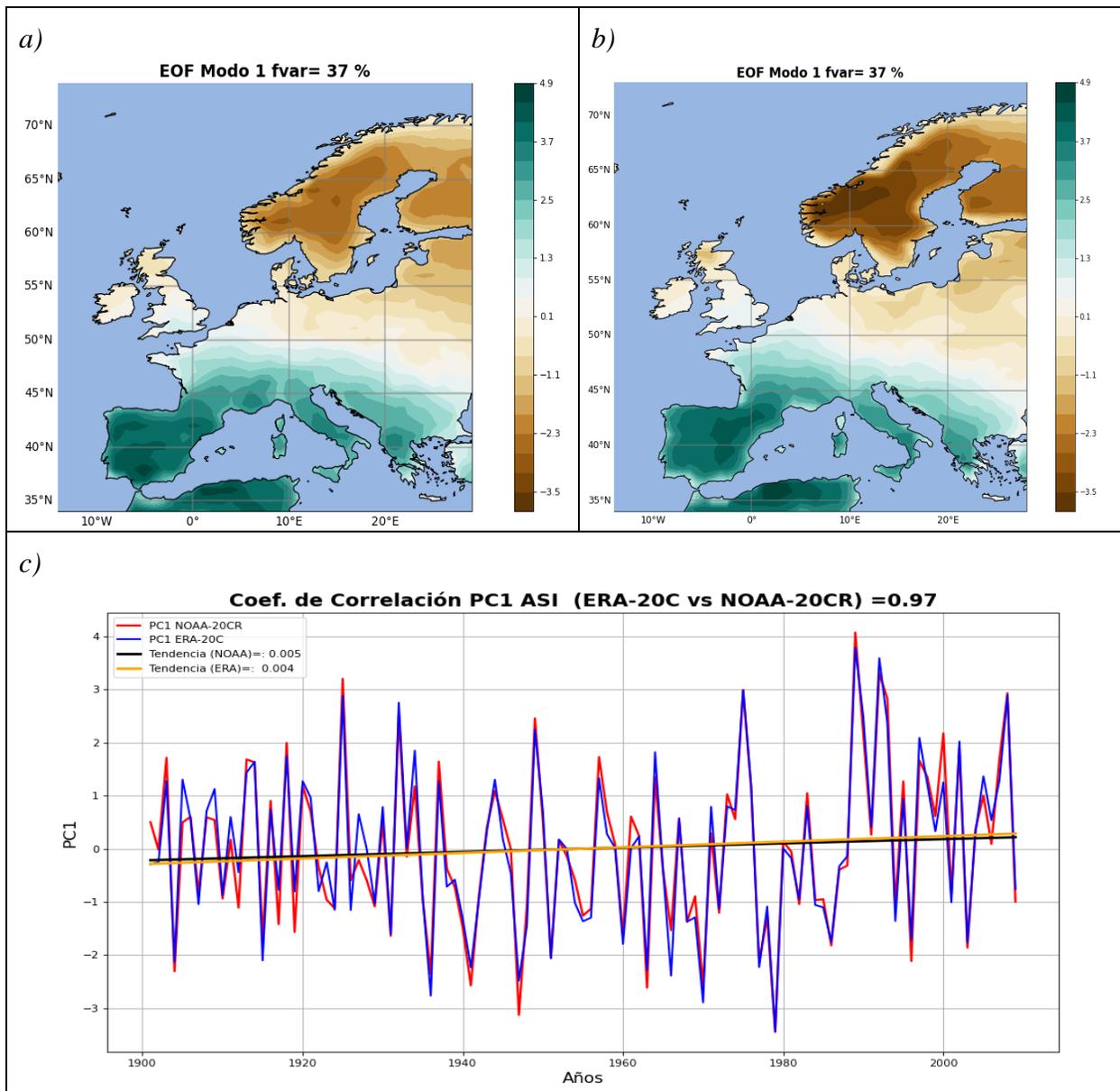


Figura 7. Primer modo de variabilidad del estancamiento de invierno en Europa (PC1 ASI): a) NOAA-20CR; b) ERA-20C. Fvar, indica la varianza explicada por cada modo. c) Series temporales (1901-2009) de invierno en NOAA-20CR (rojo) y ERA-20C (azul) y tendencias asociadas (líneas negra y amarilla, respectivamente). El título muestra el coeficiente de correlación entre las series PC1 de ambos reanálisis.

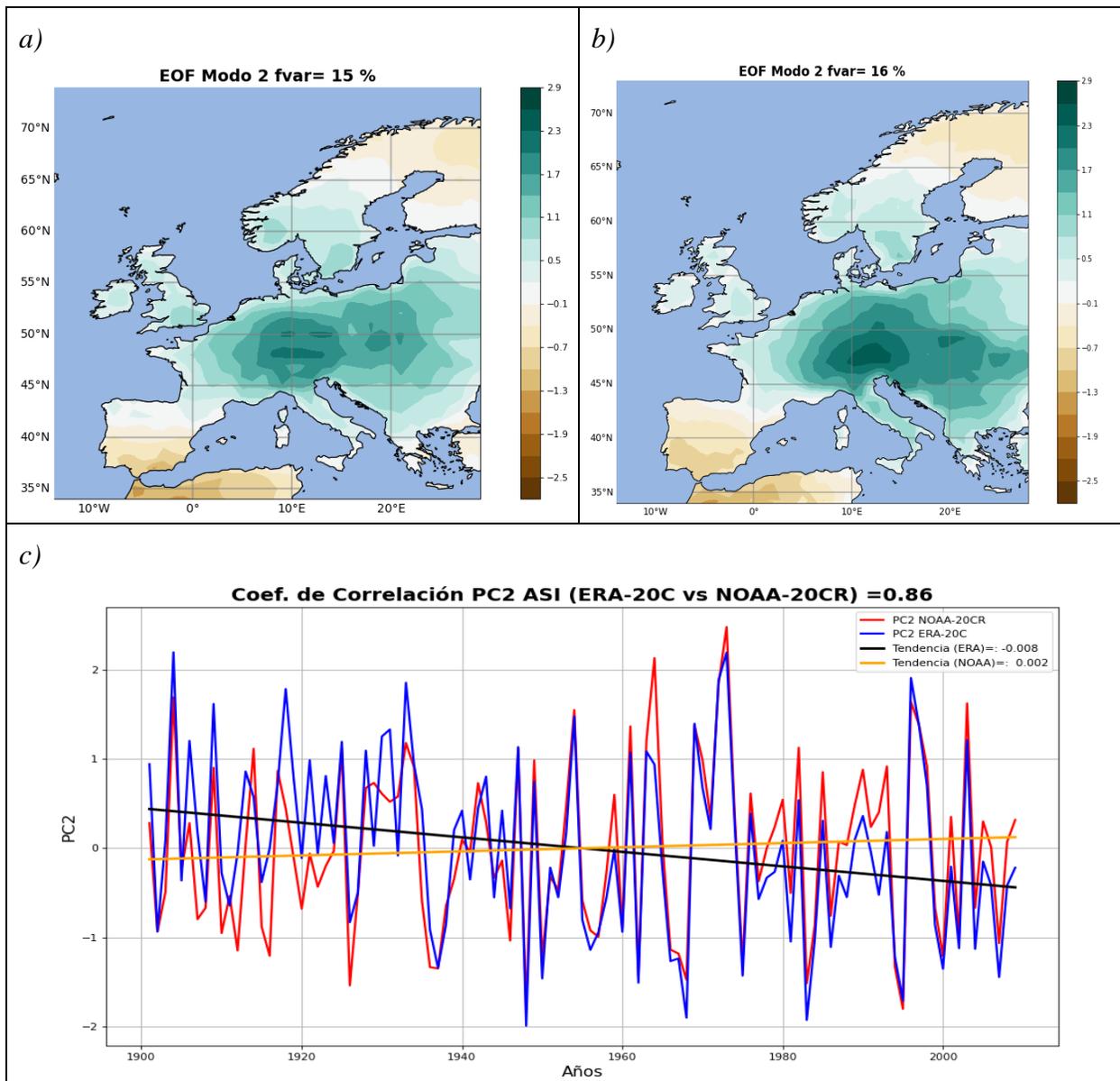


Figura 8. Segundo modo de variabilidad del estancamiento de invierno en Europa (PC2 ASI): a) NOAA-20CR; b) ERA-20C. Fvar, indica la varianza explicada por cada modo. c) Series temporales (1901-2009) de invierno en NOAA-20CR (rojo) y ERA-20C (azul) y tendencias asociadas (líneas negra y amarilla, respectivamente). El título muestra el coeficiente de correlación entre las series PC2 de ambos reanálisis

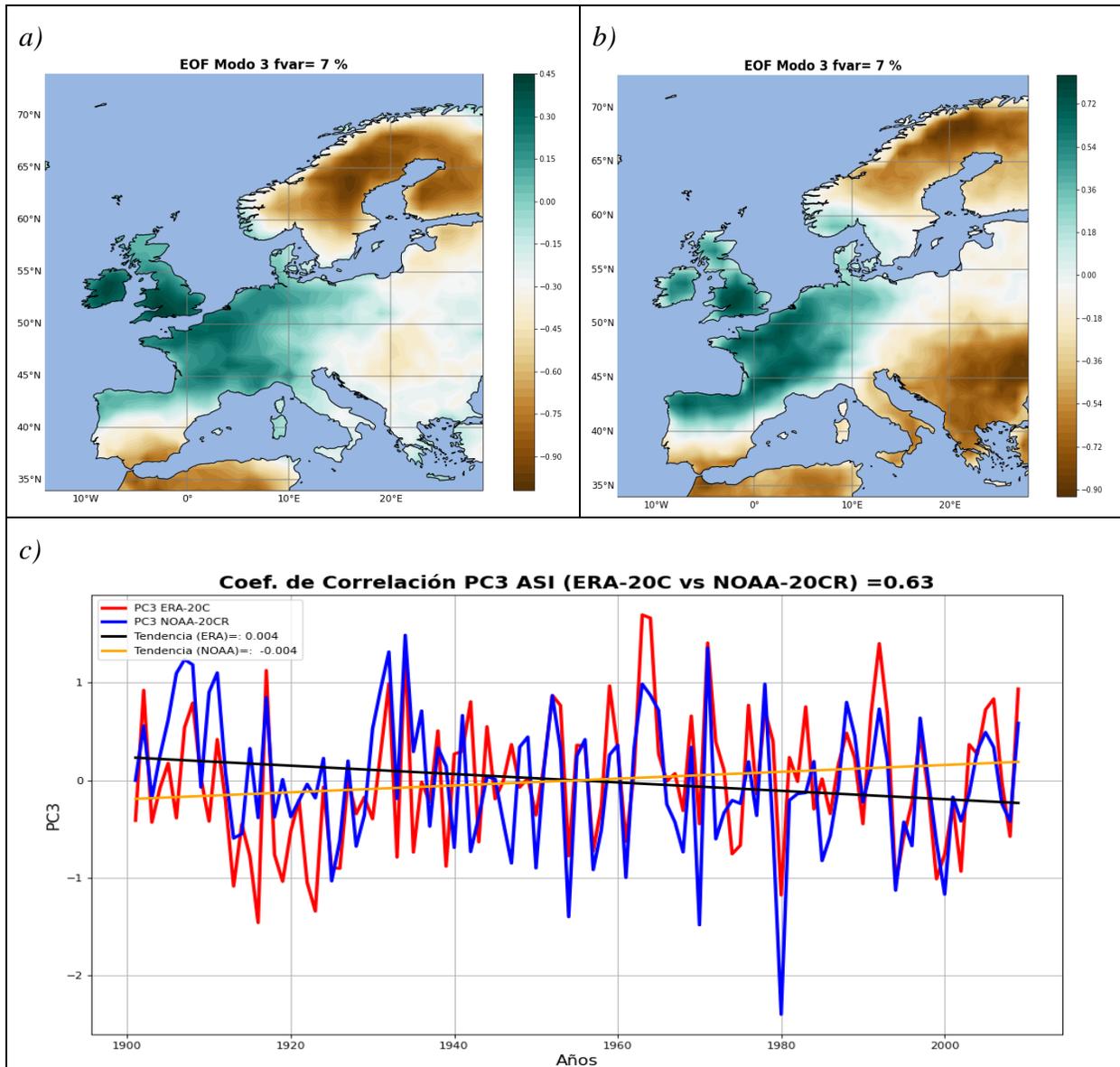


Figura 9. Primer modo de variabilidad del estancamiento de invierno en Europa (PC3 ASI): a) NOAA-20CR; b) ERA-20C. Fvar, indica la varianza explicada por cada modo. c) Series temporales (1901-2009) de invierno en NOAA-20CR (azul) y ERA-20C (rojo) y tendencias asociadas (líneas amarilla y negra, respectivamente). El título muestra el coeficiente de correlación entre las series PC3 de ambos reanálisis

3.3 Relación de los índices de circulación y el estancamiento.

La posible relación entre los modos de variabilidad del estancamiento y los índices de circulación en el sector Euro-Atlántico se ha analizado mediante un análisis de correlaciones de sus series temporales para el periodo 1901-2009. Este análisis confirma una importante influencia

de la NAO sobre el primer modo de variabilidad del ASI (PC1) en ambos reanálisis (Tabla 2). La correlación entre las series de la NAO y de la PC1 del ASI es $r=0.70$ ($p<0.05$) en NOAA-20CR y $r=0.66$ ($p<0.05$) en ERA-20C. Así, las fases positivas de la NAO favorecen el estancamiento en el sur de Europa e inhiben su ocurrencia en el norte. A pesar de que el EA es el segundo modo de variabilidad en el sector Euro-Atlántico, no influye en los dos primeros modos de variabilidad del ASI ($r<0.05$, $p>0.1$ en ambos reanálisis). Sin embargo, presenta una correlación significativa con el tercer modo de variabilidad de ASI (PC3), aunque este represente apenas el 7% de variabilidad del estancamiento ($r=0.35$, $p<0.05$ en NOAA-20CR y $r=0.59$, $p<0.05$ en ERA-20C). Curiosamente, es el índice SCAN el que presenta una influencia (moderada) en el segundo modo de variabilidad (PC2) del ASI ($r = 0.49$, $p<0.05$ en NOAA-20CR y $r=0.40$, $p<0.05$ en ERA-20C). En general, ambos reanálisis capturan estas relaciones, aunque con distinto grado en el caso de la relación PC3 ASI-EA.

Correlaciones NOAA-20CR	PC1 ASI	PC2 ASI	PC3 ASI
NAO	0.70	-0.01	0.06
EA	-0.02	0.05	0.35
SCAN	0.16	0.49	0.06
Correlaciones ERA-20C	PC1 ASI	PC2 ASI	PC3 ASI
NAO	0.66	0.01	-0.09
EA	0.02	0.02	0.59
SCAN	0.18	0.40	0.24

Tabla 2. Correlación de los índices de circulación (NAO, EA y SCAN; filas) con las componentes principales del ASI (PC1, PC2 y PC3; columnas) para el período 1901-2009 y los reanálisis NOAA-20CR y ERA-20C. En negrita se indican las correlaciones estadísticamente significativas al 95% de confianza.

A excepción de la NAO y la PC1 del ASI, la relación entre los índices de circulación y estancamiento es moderada. Para confirmar estos resultados se han calculado las correlaciones entre las series regionales de ASI y los índices de circulación. Los resultados indican correlaciones significativas entre la NAO y el ASI de SW, SC y CSEU en ambos reanálisis (las fases positivas de la NAO favorecen el estancamiento en las regiones del sur, SW y CSEU, y reducen su frecuencia en el extremo norte de Europa, SC). EA, en cambio, no presenta correlaciones significativas con el estancamiento regional en ninguno de los reanálisis, confirmando su limitada influencia sobre el continente europeo. Finalmente, los reanálisis muestran buen acuerdo en las correlaciones del estancamiento regional con SCAN, e indican correlaciones positivas en las regiones de NEU y CSEU. Estas regiones conforman el nodo principal de la PC2 del ASI, por lo

que este resultado está de acuerdo con las correlaciones entre la PC2 del ASI y SCAN, que muestra una importante influencia sobre dichas regiones (Tabla 2).

En general, los índices regionales ASI muestran una concordancia espacial respecto a la influencia de los índices de circulación: las regiones del centro de Europa se ven más afectadas por SCAN (bloqueos sobre esta zona), mientras que la NAO afecta al norte y sur de Europa (principalmente SW y SC, y en menor proporción a CSEU).

Correlación	1900-2009		
	NAO	EA	SCAN
NOAA-20CR			
SW	0.58	0.10	0.01
NEU	-0.05	0.06	0.29
SC	-0.45	0.07	0.01
CSEU	0.42	0.03	0.36
ERA-20C			
SW	0.53	-0.08	0.11
NEU	-0.06	0.00	0.33
SC	-0.52	-0.11	-0.13
CSEU	0.35	-0.07	0.38

Tabla 3. Coeficiente de correlación de los índices de circulación (NAO, EA y SCAN; columnas) con las series regionales (filas) de estancamiento para el período 1901-2009 de los reanálisis NOAA-20CR y ERA-20C. En negrita se indican las correlaciones estadísticamente significativas al 95% de confianza.

3.4 Estacionariedad de las relaciones

Para evaluar si las relaciones encontradas en la sección anterior son estacionarias a lo largo del periodo analizado, se han calculado correlaciones entre la frecuencia regional de estancamiento y los índices de circulación de ambos reanálisis para ventanas móviles de 30 años (desde 1901-1930 hasta 1980-2009). Los resultados para el reanálisis NOAA-20CR y ERA-20C se muestran en las Figuras 10 y 11 respectivamente. Los reanálisis muestran un buen acuerdo, por lo que la discusión se centrará en los índices de circulación y regiones de estancamiento con correlaciones significativas durante el periodo completo 1901-2009 (Tabla 3): NAO con SW, SC y CSEU, y SCAN con NEU y CSEU.

La correlación de la NAO y el ASI de SW (Figs. 10a, 11a) y CSEU (Fig. 10d) es significativa y relativamente estable durante todo el periodo analizado, con la excepción de un corto intervalo centrado en la década de 1950 en el caso de CSEU. Además, la evolución de las correlaciones sugiere una influencia creciente de la NAO en el estancamiento de SW, aunque dicho efecto podría deberse a cambios temporales en la disponibilidad y asimilación

de observaciones en los reanálisis. Por otro lado, la relación NAO - ASI en SC (Figs. 10c, 11c) muestra un comportamiento no estacionario, con variabilidad multidecadal caracterizada por correlaciones no significativas en el intervalo comprendido entre 1935-1960 en NOAA-20CR y en la década de 1940 en ERA-20C, y significativas en los periodos anterior y posterior.

La influencia de SCAN en el estancamiento de NEU (Figs. 10b, 11b) y CSEU (Figs. 10d, 11d) es igualmente no estacionaria. En el caso de CSEU se aprecia una correlación significativa y estable a partir de la mitad de la década de 1920 en NOAA-20CR y a partir de 1940 en ERA-20C, lo que, de nuevo, podría reflejar limitaciones de los datos de reanálisis en la primera parte del periodo, y no tanto cambios intrínsecos de las relaciones. Por el contrario, la correlación de SCAN con NEU solo es significativa y no estacionaria a partir de la década de 1970, lo que indica que la influencia de SCAN en el estancamiento de NEU detectada en el periodo 1901-2009 no es robusta con NOAA-20CR, pero sí con ERA-20C donde se aprecian mayores correlaciones significativas en la segunda mitad de siglo. Por otro lado, ambos reanálisis confirman que EA no muestra influencias en el estancamiento regional durante ningún período y para ninguna región.

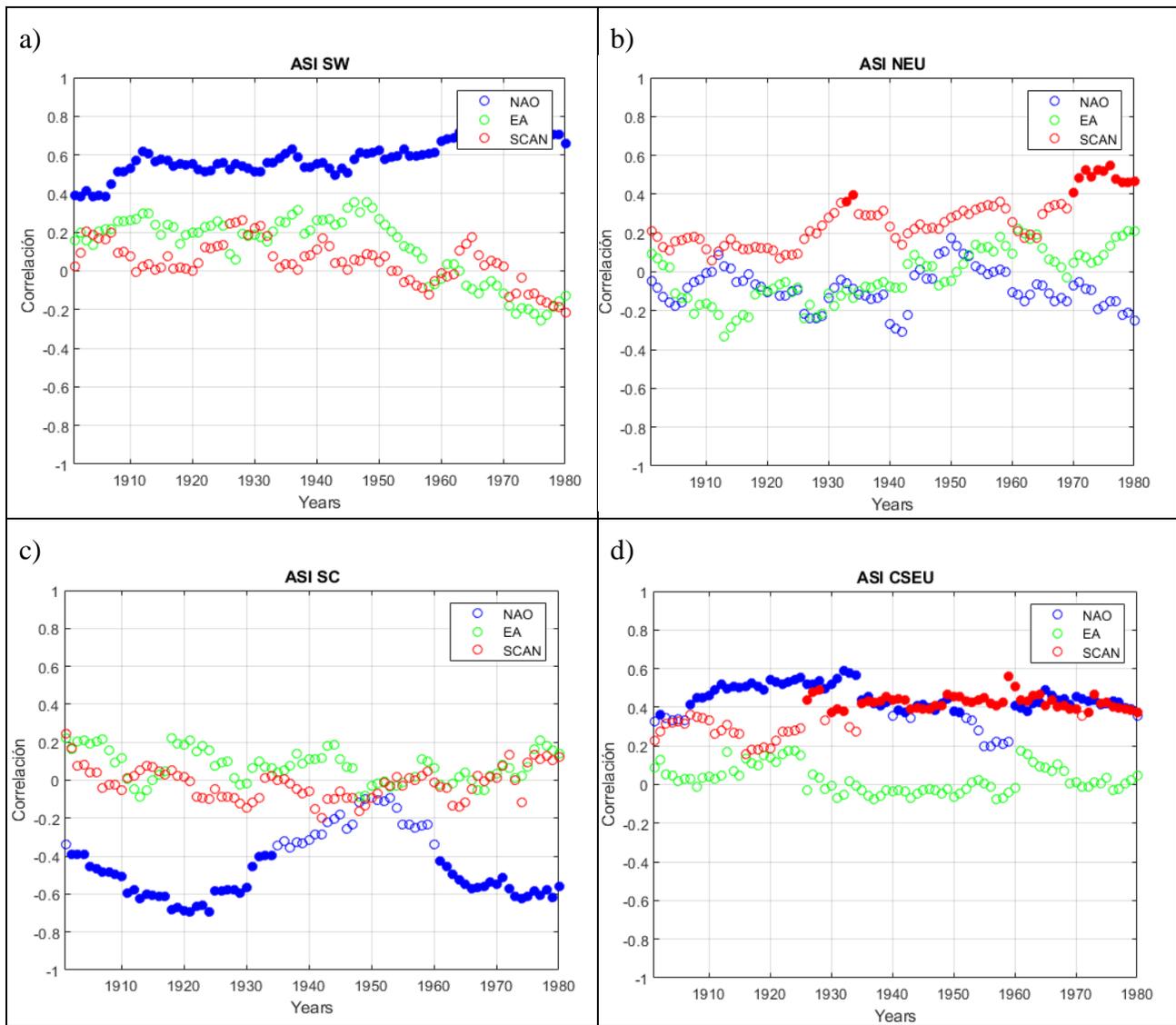


Figura 10. Coeficientes de correlación entre el índice de estancamiento regional y los índices de circulación (NAO, EA, SCAN) para ventanas móviles de 30 años (centradas en cada año del periodo 1916-1995) y el reanálisis NOAA-20CR: a) SW, b) NEU, c) SC y d) CSEU. Las correlaciones significativas al 95% de confianza se representan con círculos rellenos.

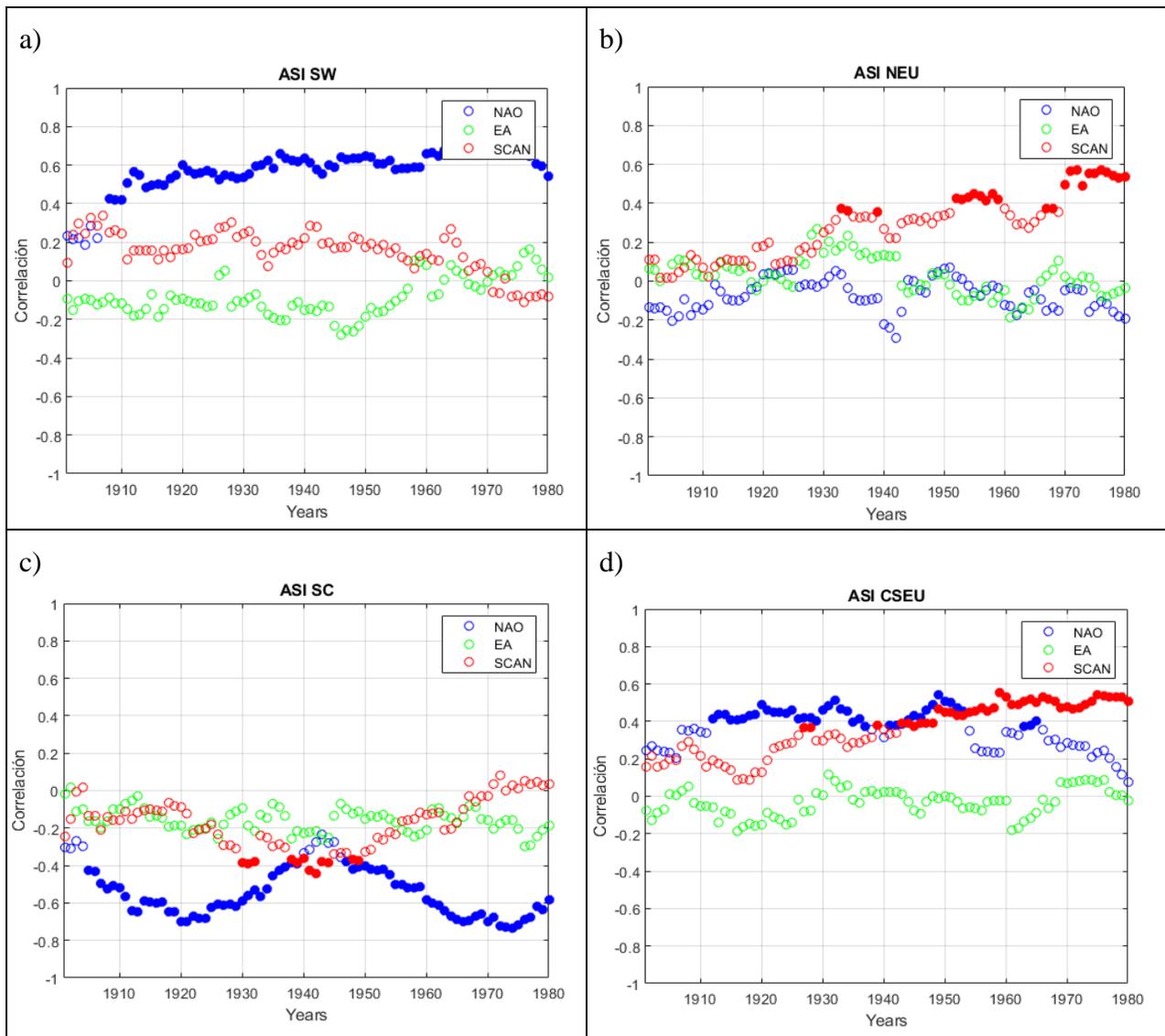


Figura 11. Coeficientes de correlación entre el índice de estancamiento regional y los índices de circulación (NAO, EA, SCAN) para ventanas móviles de 30 años (centradas en cada año del periodo 1916-1995) y el reanálisis ERA-20C: a) SW, b) NEU, c) SCAN y d) CSEU. Las correlaciones significativas al 95% de confianza se representan con círculos rellenos.

Conclusiones

El presente trabajo describe la climatología, patrones de variabilidad y tendencias del estancamiento de invierno en Europa para el periodo 1901-2009, así como la relación con los modos de variabilidad de circulación atmosférica predominantes en el área de análisis. Para ello, se emplearon datos de los reanálisis NOAA-20CR (Slivinski et. al., 2019) y ERA 20C (Poli et al., 2016), ambos reanálisis con la información necesaria para el cálculo del estancamiento y los índices de circulación atmosférica predominantes en el sector Euro-Atlántico: Oscilación del Atlántico Norte (NAO), y patrones del Atlántico Este (EA) y Escandinavo (SCAN).

Los reanálisis del siglo XX capturan los patrones climatológicos de la frecuencia de estancamiento descritos en reanálisis de última generación (p.ej. Garrido-Pérez et al. 2018), así como las principales regiones con un comportamiento espacialmente coherente: Escandinavia (SC), Europa del Norte (NEU), Europa Central y Sur (CSEU) y Suroeste de Europa (SW). De acuerdo con dichos estudios, las regiones con mayor estancamiento son SW y CSEU (~15-20 días de estancamiento por invierno), mientras que, la región con menor estancamiento es NEU (~5 días). En general, los resultados indican una buena concordancia entre reanálisis, si bien existen discrepancias en las frecuencias climatológicas regionales, en concreto en SC, de acuerdo a lo mostrado por Garrido-Pérez et al. (2018) para la región SC es en ERA-20C donde se obtienen resultados muy similares en la frecuencia de estancamiento regional para dicha zona; mientras que NOAA-20CR subestima en ~9 días el estancamiento en esta región. A pesar de la presencia de sesgos sistemáticos, los reanálisis muestran un buen acuerdo en la variabilidad interanual de estancamiento, tanto a nivel continental (patrones de variabilidad) como regional.

En general, el análisis de las tendencias a largo plazo indica cambios no significativos en la frecuencia de estancamiento durante el siglo XX, a excepción de NEU y CSEU que sí muestran tendencias significativas, aunque sólo en ERA-20C, estos cambios parcialmente resultan de tendencias opuestas en la primera y segunda mitad del periodo, con un descenso generalizado en el primer periodo, y aumentos en el segundo (excepto en SC, donde los cambios son opuestos). Los reanálisis muestran un acuerdo en el signo de las tendencias, si bien presentan algunas discrepancias regionales en su magnitud, principalmente en la primera mitad del siglo. Aunque parte de las tendencias podrían estar relacionadas con cambios en la disponibilidad de observaciones, la tendencia (no significativa) hacia un aumento de estancamiento durante el periodo 1951-2009 (particularmente en regiones del sur de Europa, como SW) está de acuerdo con cambios recientes y proyecciones de cambio climático (p.ej. Horton et al., 2014).

Los resultados muestran una importante influencia de la NAO en el estancamiento de invierno de Europa. De hecho, la NAO determina en gran medida el primer modo de variabilidad de estancamiento durante el siglo XX. La influencia de la NAO es particularmente pronunciada en

las regiones del extremo norte y sur de Europa, con anomalías opuestas en SW (ascensos) y SC (descensos) durante su fase positiva. Por su parte, el segundo modo de circulación con mayor influencia es SCAN, que modula parcialmente el segundo modo de variabilidad del estancamiento europeo, con influencias en las regiones más centrales del continente (NEU y CSEU). De hecho, NAO y SCAN explican más del 50% de variabilidad atmosférica en el área de estudio, valor similar al de los dos modos de variabilidad del ASI. A pesar de que EA es el segundo modo de circulación en el sector Euro-Atlántico, su influencia en el estancamiento europeo es secundaria (casi despreciable), probablemente debido a que su principal centro de acción se encuentra situado sobre el oeste del Atlántico Norte. Por el contrario, la NAO controla la posición e intensidad del chorro extratropical, y por tanto la trayectoria de las tormentas, con impactos en el viento y precipitación del norte y sur de Europa (e.g. Trigo et al., 2004). Las fases positivas conllevan aumentos de precipitación y viento en el norte de Europa (p.ej. SC) que inhiben la ocurrencia de estancamiento, con condiciones opuestas en el sur de Europa (p.ej. SW). De manera similar, la fase positiva de SCAN se asocia con la ocurrencia de bloqueos en Escandinavia, que desvían la corriente en chorro y las tormentas hacia regiones más al sur (p.ej. CSEU), inhibiendo la ocurrencia de estancamiento. Los resultados confirman que el estancamiento y el flujo a gran escala están estrechamente relacionados, siendo la NAO y SCAN los principales modos que modulan el estancamiento en Europa. A pesar de ello, los resultados indican que algunas de las relaciones entre los índices de circulación y el estancamiento regional no son estacionarias. Si bien algunos aspectos de la no estacionariedad podrían deberse a artificios de los reanálisis (p.ej. tendencias en las correlaciones de NAO y ASI en SW; ausencia de correlaciones entre SCAN y CSEU al principio del periodo), otros comportamientos sugieren variabilidad multidecadal en las relaciones circulación-estancamiento (p.ej. la relación NAO – ASI en SC) ya sean causadas por variabilidad interna o modulados por agentes externos (p.ej. la Oscilación Multidecadal del Atlántico, AMO). Las causas de dicha no estacionariedad pueden ser fruto de estudios futuros.

Si bien se conoce que los conjuntos de datos climáticos a largo plazo son fundamentales tanto para comprender las variaciones climáticas como para evaluar su simulación en modelos climáticos, el hecho de que la mayoría se remontan solo a mediados del siglo XX limita su utilidad para restringir los modelos climáticos. Es por eso que los reanálisis de largo plazo son un recurso valioso para la comunidad científica. Los resultados de ambos reanálisis del siglo XX en este estudio, indican que, para el dominio analizado, ERA-20C muestra un mayor acuerdo en el análisis de la frecuencia invernal de estancamiento europeo con estudios recientes que utilizan reanálisis de última generación, lo que nos brinda una mayor confiabilidad de este reanálisis sobre NOAA-20CR. En cuanto a la relación entre la frecuencia de estancamiento y los principales modos de variabilidad que gobiernan en el sector Euro-Atlántico, en ambas bases de datos, destaca la predominancia que tiene la NAO sobre el estancamiento regional y continental por encima de SCAN y el EA, lo que nos indica que los reanálisis del siglo XX nos podrían ayudar a comprender las variaciones e influencia de estos índices y sus posibles tendencias a largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

Barnston, A.G. y R.E. Livezey, 1987: Classification, seasonality and persistence of low frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review*, 115, 1083- 1126.

Caserini, S., Giani, P., Cacciamani, C., Ozgen, S., and Lonati, G. 2017: Influence of climate change on the frequency of daytime temperature inversions and stagnation events in the Po Valley: historical trend and future projections, *Atmospheric Research*, 184, 15–23.

Compo, G.P., J.S. Whitaker, P.D. Sardeshmukh, N. Matsui, R.J. Allan, X. Yin, B.E. Gleason, R.S. Vose, G. Rutledge, P. Bessemoulin, S. Brönnimann, M. Brunet, R.I. Crouthamel, A.N. Grant, P.Y. Groisman, P.D. Jones, M. Kruk, A.C. Kruger, G.J. Marshall, M. Maugeri, H.Y. Mok, Ø. Nordli, T.F. Ross, R.M. Trigo, X.L. Wang, S.D. Woodruff, and S.J. Worley, 2011: The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quarterly J. Roy. Meteorol. Soc.*, 137, 1-28. <http://dx.doi.org/10.1002/qj.776>.

Doherty, R.M., Heal, M.R. & O'Connor, F.M. Climate change impacts on human health over Europe through its effect on air quality. *Environ Health* 16, 118 (2017). <https://doi.org/10.1186/s12940-017-0325-2>

Falkena, S., de Wiljes, J., Weisheimer, A., and Shepherd, T.: Non-Stationarity of Wintertime Atmospheric Circulation Regimes in the Euro-Atlantic Sector, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-2087, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-2087>, 2021.

Falkena SK, de Wiljes J, Weisheimer A, Shepherd TG. Revisiting the identification of wintertime atmospheric circulation regimes in the Euro-Atlantic sector. *Q J R Meteorol Soc.* 2020; 146:2801–2814. <https://doi.org/10.1002/qj.3818>

Gao, Y., Zhang, L., Zhang, G., Yan, F., Zhang, S., Sheng, L., Li, J., Wang, M., Wu, S., Fu, J. S., et al. 2020: The climate impact on atmospheric stagnation and capability of stagnation indices in elucidating the haze events over North China Plain and Northeast China, *Chemosphere*, p. 127335.

Garrido-Perez, J. M., Ordóñez, C., García-Herrera, R., & Barriopedro, D. (2018). Air stagnation in Europe: Spatiotemporal variability and impact on air quality. *Science of the Total Environment*, 645, 1238-1252. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.238>

Horton, D. E., Harshvardhan, & Diffenbaugh, N. S. (2012). Response of air stagnation frequency to anthropogenically enhanced radiative forcing. *Environmental Research Letters*, 7(4). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044034>

Horton, D. E., Skinner, C. B., Singh, D., & Diffenbaugh, N. S. (2014). Occurrence and persistence of future atmospheric stagnation events. *Nature Climate Change*, 4(8), 698-703. <https://doi.org/10.1038/nclimate2272>

Huang, Q., Cai, X., Song, Y., and Zhu, T. 2017: Air stagnation in China (1985–2014): climatological mean features and trends., *Atmospheric Chemistry & Physics*, 17.

Lee, D., Wang, S.-Y. S., Zhao, L., Kim, H. C., Kim, K., and Yoon, J.-H. (2020): Long-term increase in atmospheric stagnant conditions over northeast Asia and the role of greenhouse gases-driven warming, *Atmospheric Environment*, 241, 117 772.

Lei, L. y Whitaker, JS (2016): Una actualización de análisis incremental en cuatro dimensiones para el filtro de conjunto de Kalman. *Monthly Weather Review*, 144, 2605–2621. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0246.1>

Leung, L. R. and Gustafson Jr, W. I. (2005): Potential regional climate change and implications to US air quality, *Geophysical Research Letters*, 32.

Mickley, L. J., Jacob, D. J., Field, B., and Rind, D. (2004): Effects of future climate change on regional air pollution episodes in the United States, *Geophysical Research Letters*, 31.

Poli, P., Hersbach, H., Dee, D. P., Berrisford, P., Simmons, A. J., Vitart, F., Fisher, M. (2016). ERA-20C: An Atmospheric Reanalysis of the Twentieth Century. *Journal of Climate*, 29(11), 4083-4097. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0556.1>

Poli, Paul y el personal del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (Eds). Última modificación el 29 de marzo de 2017. "La Guía de datos climáticos: ERA-20C: reanálisis atmosférico del ECMWF del siglo XX (y comparaciones con el 20CR de la NOAA)". Obtenido de: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/era-20c-ecmwf-atmospheric-reanalysis-20th-century-and-comparisons-noaa-20cr>.

Slivinski, L. C. and coauthors, (2019): Hacia un reanálisis histórico más confiable: Mejoras para la versión 3 del sistema de reanálisis del siglo XX. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145 (724), 2876-2908 (DOI: [10.1002 / qj.3598](https://doi.org/10.1002/qj.3598)).

Trigo M. Ricardo, David Pozo-Vázquez, Timothy J. Osborn, Yolanda Castro-Díez, Sonia Gámiz-Fortis, María Jesus Esteban-Parra (2004): North Atlantic oscillation influence on precipitation, river flow and water resources in the Iberian Peninsula. <https://doi.org/10.1002/joc.1048>

Vautard, R. (1990): Multiple weather regimes over the North Atlantic: analysis of precursors and successors. *Monthly Weather Review*, 118, 2056–2081.

Volinsky, C.T. and Raftery, A.E. (2000) Bayesian information criterion for censored survival models. *Biometrics*, 56(1), 256–262. <https://doi.org/10.1111/j.0006-341X.2000.00256.x>

Wallace, J. M., Gutzler, D. S., Wallace, J. M., & Gutzler, D. S. (1981). Teleconnections in the Geopotential Height Field during the Northern Hemisphere Winter. *Monthly Weather Review*, 109(4), 784-812. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2)

Wang, J. X. and Angell, J. K. (1999): Air stagnation climatology for the United States, NOAA/Air Resource Laboratory ATLAS.

Wang, X., Wang, K., and Su, L. (2016): Contribution of atmospheric diffusion conditions to the recent improvement in air quality in China, *Scientific reports*, 6, 36 404, 2016.

Wang, X., Dickinson, R. E., Su, L., Zhou, C., and Wang, K. (2018): PM2.5 pollution in China and how it has been exacerbated by terrain and meteorological conditions, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99, 105–119.

Wilks, D. S., 2006: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 2nd ed. Elsevier, 627 pp.