

"Proyecciones regionales de Cambio Climático para vientos extremos en España para el s.XXI: Caracterización de valores de retorno y frecuencia de configuraciones atmosféricas de peligro"

Informe Final

Realizado por el Grupo de Meteorología de Santander.
Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación, MACC-UC

Coordinado por Sixto Herrera García (herrerass@unican.es)



TABLA DE CONTENIDOS

1. Introducción y antecedentes del estudio	3
2. Datos	4
2.1. Daily Peak Wind Gusts (DPWG)	4
2.2. ERA-Interim y NCEP/NCAR Reanalysis 1	5
2.3. Proyecciones Globales del Clima: CMIP5	6
2.4. Proyecciones Regionales del Clima: CORDEX	6
2.5. Descarga y Preparación de los datos	7
3. Métodos	8
3.1. Corrección del Sesgo	8
3.2. Caracterización de Vientos Extremos	8
3.3. Clasificación de Patrones Atmosféricos	9
3.4. Detección y seguimiento de ciclones	9
4. Resultados	10
4.1. Glosario de eventos extremos	10
4.2. Validación de los modelos regionales del clima	13
4.3. Escenarios de Cambio Climático de Viento	14
4.4. Patrones Atmosféricos de Riesgo	17
4.5. Detección y Seguimiento de Ciclones	18
4.6. Escenarios de Frecuencia de Ciclones	22
5. Conclusiones	25
7. Referencias	28

1. Introducción y antecedentes del estudio

La proyección regional de cambio climático es una de las prioridades actuales del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). Los modelos climáticos globales (GCM) suponen la primera fuente de información para el desarrollo de escenarios de cambio climático y, por ello, desde el World Climate Research Program (WCRP) se coordinan distintos experimentos multi-modelo de intercomparación y proyección de distintos escenarios (el más actual CMIP5, que contempla los escenarios RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5, ver Collins et al. 2013).

Los métodos de regionalización, estadística o dinámica, permiten transferir la salida directa de los GCMs, con escalas espaciales de 100 km aproximadamente, a escalas regionales (~ 12 km) o locales/puntuales para su uso en estudios de impacto que requieren habitualmente una mayor resolución. En este sentido, han surgido diferentes iniciativas nacionales (PNACC: Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático) e internacionales (CORDEX, VALUE, etc...) para la regionalización de los escenarios globales de cambio climático del CMIP5. En el ámbito Europeo, las proyecciones regionales de cambio climático han sido producidas y actualizadas en distintos proyectos Europeos de investigación utilizando modelos climáticos regionales (RCMs): PRUDENCE (2001-2004; 50km, Christensen *et al.*, 2007), ENSEMBLES (2004-2009; 25km, Déqué et al., 2012), y actualmente Euro-CORDEX (Jacob et al., 2014), que se basa en distintos RCMs acoplados a las proyecciones del CMIP5, ofreciendo simulaciones a 11 km de resolución sobre un dominio que cubre Europa. En particular, se considerarán los escenarios futuros correspondientes a concentraciones medias y altas (RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente), ya que son los más utilizados y presentan un mayor número de simulaciones globales y regionales disponible.

En el marco de las proyecciones de eventos de viento extremo e identificación de los patrones atmosféricos de riesgo, Mölter et al. (2016) realiza una extensa revisión bibliográfica reflejando las variables e índices relevantes en este ámbito. Más recientemente, Steptoe et al. (2018) realiza una detallada revisión de la dependencia de la localización e intensificación de los ciclones en Europa con diferentes patrones de circulación como las fases positiva y negativa de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), la Oscilación del Atlántico (AO) o el Patrón de Escandinavia (SCP), ya que dichos patrones establecen bloqueos que desplazan el flujo favoreciendo la intensificación/debilitamiento de los ciclones en diferentes partes del continente. En lo que respecta a la Península Ibérica, diferentes autores (Gómara et al. 2016, Zubiate et al. 2017, Comas-Bru and Mc Demott 2014) han encontrado una correlación negativa ($0.38 \leq r \leq 0.74$, significativa al 95%), entre la NAO y la variación interanual del número de ciclones explosivos en el sur de Europa, si bien la interacción entre los diferentes patrones hace que esta relación sea no estacionaria a escala multi-decadal, como la que ocupa este estudio. A nivel continental, Donat et al. (2011) y Dawkins et al. (2016) analizan las proyecciones futuras de vientos extremos, interpretando éstas en términos de pérdidas e impacto económico reflejando un decrecimiento de este impacto. A escala peninsular o nacional, Azorín-Molina et al. (2016) analizan las tendencias observadas en la segunda mitad del siglo 20 y principios del siglo 21 de rachas máximas de viento en la Península Ibérica reflejando un decrecimiento en la frecuencia de estos eventos y un cambio en su estacionalidad.

El presente proyecto tiene dos objetivos principales:

1) Obtener los escenarios de cambio climático para diferentes indicadores de viento extremo en la Península Ibérica a partir de las proyecciones regionales de la iniciativa Euro-CORDEX.

2) Identificar y caracterizar patrones atmosféricos asociados a la ocurrencia de eventos de viento extremo (en particular ciclones y ciclogénesis explosivas), en la Península Ibérica y obtener posibles cambios futuros en la frecuencia de ocurrencia de estos patrones a partir de las proyecciones de los modelos globales del CMIP5.

En las siguientes secciones describiremos las diferentes fases del proyecto reflejando la consecución de los objetivos definidos anteriormente. En particular, en las secciones 2 y 3 se describen los datos y métodos utilizados para afrontar el proyecto, en la sección 4 se presentan los principales resultados obtenidos en los diferentes experimentos planteados. Finalmente, en la sección 5 se obtienen las principales conclusiones y describen las publicaciones y herramientas a que ha dado lugar el desarrollo del proyecto.

2. Datos

Para el desarrollo de los experimentos propuestos en el proyecto se requieren bases de datos (observaciones locales, reanálisis y proyecciones de modelos climáticos regionales y globales) con características muy diferentes tanto en su representatividad espacial (local o promedio areal) y temporal (promedio diario, dato instantáneo, etc.), como en su formato, acceso, descarga y postproceso. En esta sección describimos cada una de las bases de datos consideradas, su descarga y su preparación para acceder de forma sistemática a través de las herramientas implementadas en climate4R (<http://meteo.unican.es/en/climate4R>, Iturbide et al. 2018).

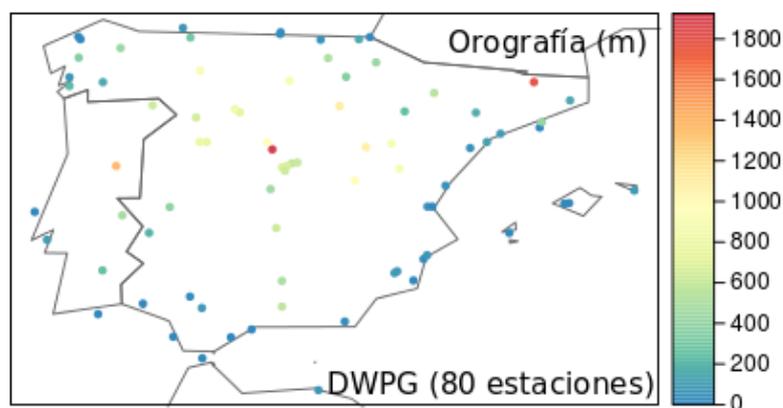


Figura 1: Red de estaciones y orografía de la base de datos DPWG.

2.1. Daily Peak Wind Gusts (DPWG)

A diferencia del viento medio, que es el promedio de la velocidad del viento en periodos de 10 minutos, la definición estándar de racha de viento dada por la Organización Mundial de la Meteorología se refiere a fluctuaciones del viento sostenidas al menos 3 segundos (WMO, 1987 y 2008). Para obtener una referencia observacional de este tipo de eventos en la Península Ibérica se analizaron distintas bases de datos (p.e. ECA&D Blended, Klein Tank et al. 2002), optando finalmente por la base de datos de racha diaria máxima de viento desarrollada por Azorín-Molina et al. (2016), denominada DPWG. Dicha base de datos contiene 80 estaciones en la Península Ibérica y las Islas Baleares (Fig. 1) con dato diario para el periodo 1961-2014. Dicho conjunto de estaciones fue seleccionado de las bases de datos de la Agencia Estatal de Meteorología

(AEMET) y el Instituto Portugués del Mar y la Atmósfera (IPMA), en base a la longitud de las series temporales y a los cambios en la localización y la altura del anemómetro de la estación, considerando estaciones con pocas lagunas en el periodo 1961-2014 y pocos cambios de localización. Una vez seleccionadas las estaciones, éstas fueron sometidas a un proceso de homogenización (Azorín et al. 2014) utilizando como series de referencia las simuladas con el modelo de mesoscala MM5 (Grell et al. 1994) desarrollado por la Universidad del Estado de Pennsylvania y el Centro Nacional de Investigación de la Atmósfera (NCAR).

En el marco del presente proyecto, la base de datos DPWG fue solicitada a sus autores y procesada para su acceso a través de la herramienta de acceso y análisis de datos climáticos climate4R (<http://meteo.unican.es/en/climate4R>, Iturbide et al. 2018) desarrollada por el Grupo de Meteorología de Santander.

2.2. ERA-Interim y NCEP/NCAR Reanalysis 1

Los reanálisis son una de las principales herramientas para el análisis histórico del clima ya que constituyen bases de datos homogéneas con información diaria del estado de la atmósfera en una rejilla regular mundial cubriendo un periodo largo de tiempo (al menos 30 años) y generadas con un mismo GCM. Dicho modelo asimila día a día las observaciones disponibles en diferentes bases de datos internacionales a través de un proceso de asimilación, proporcionando una estimación de las distintas variables que caracterizan la circulación atmosférica en una rejilla regular. En este sentido, se considera que el reanálisis es la mejor aproximación al estado de la atmósfera y se suele utilizar como una pseudo-observación.

En este estudio se han considerado los datos de dos reanálisis distintos: ERA-Interim (Dee et al. 2011) y NCEP/NCAR Reanalysis 1 (Kalnay et al. 1996), desarrollados por el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (ECMWF, <https://www.ecmwf.int/>) y los Centros Nacionales de Predicción del Medioambiente (NCEP, <http://www.ncep.noaa.gov/>) y de Investigación de la Atmósfera (NCAR, <https://ncar.ucar.edu/>), respectivamente. Por un lado, la consideración de los dos reanálisis nos permite evaluar la incertidumbre observacional asociada a la base de datos de referencia utilizada (ver, por ejemplo, Kotlarski et al. 2018). Por otro lado, la disponibilidad de dato 6-horario y diario nos permite evaluar cuan dependiente de la resolución temporal es la correcta identificación de los patrones atmosféricos de riesgo. Finalmente, la diferencia en sus resoluciones ~ 70 km ERA-Interim y ~ 200 km NCEP/NCAR- nos permite evaluar la sensibilidad de los métodos utilizados a la resolución espacial. En la Tabla 1 se muestran las características de ambos reanálisis y las variables consideradas en el presente proyecto.

Estos datos se utilizarán con el objetivo de:

- caracterizar los patrones atmosféricos asociados con eventos de viento extremo,
- desarrollar y verificar el algoritmo de detección y seguimiento de ciclones, y
- evaluar los modelos globales del clima (Sec. 2.3) para la adecuada interpretación de las proyecciones obtenidas a partir de dichos modelos y las dadas por los modelos regionales (Sec. 2.4) del clima anidados a ellos.

Reanálisis	Resolución	Variabes
ERA-Interim	0.75° y 2.0° // 6h y diario	slp, zg, uas, vas y windgust
NCEP/NCAR Reanalysis 1	2.5° // 6h y diario	slp, zg, uas y vas

Tabla 1: Características de los reanálisis y variables utilizadas (slp: presión a nivel del mar; zg: geopotencial; uas y vas: componentes del viento en superficie; windgust: racha máximo de viento).

2.3. Proyecciones Globales del Clima: CMIP5

Para la detección de configuraciones de riesgo se considerarán datos diarios de proyecciones multi-modelo para el experimento *historical*, como escenario de referencia o histórico, y los escenarios de emisiones *RCP4.5* y *RCP8.5* del CMIP5 para el siglo 21. La Tabla 2 recoge las simulaciones disponibles en el momento del desarrollo del proyecto que han sido descargadas y serán utilizadas en el marco del presente proyecto.

Los periodos climáticos considerados son 1971-2000 para el experimento historical y 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100 para los escenarios de emisiones RCP4.5 y RCP8.5. Dichos periodos fueron consensuados con el CCS en la primera reunión celebrada en su sede de Madrid, siendo el de mayor interés para el CCS el intermedio de cara a la planificación a medio plazo del impacto de los eventos de vientos extremo que afecten a la Península Ibérica en el ámbito de las aseguradoras.

ID	Earth System Model (ESM)	Escenarios	¹ Institución
1	CanESM2_r11p1	historical, rcp45 y rcp85	CCCMA
2	CNRM-CM5_r11p1	historical, rcp45 y rcp85	CERFACS
3	EC-EARTH_r11p1	historical, rcp45 y rcp85	EC-EARTH
4	IPSL-CM5A-MR_r11p1	historical, rcp45 y rcp85	IPSL
5	MIROC-ESM_r11p1	historical, rcp45 y rcp85	MIROC
6	MPI-ESM-MR_r11p1	historical, rcp45 y rcp85	MPI-M
7	MPI-ESM-LR_r11p1	historical, rcp45 y rcp85	MPI-M
8	NorESM1-M_r11p1	historical, rcp45 y rcp85	NCC
9	GFDL-ESM2M_r11p1	historical, rcp45 y rcp85	NOAA-GFDL

Tabla 2: Proyecciones globales del CMIP5 consideradas.

2.4. Proyecciones Regionales del Clima: CORDEX

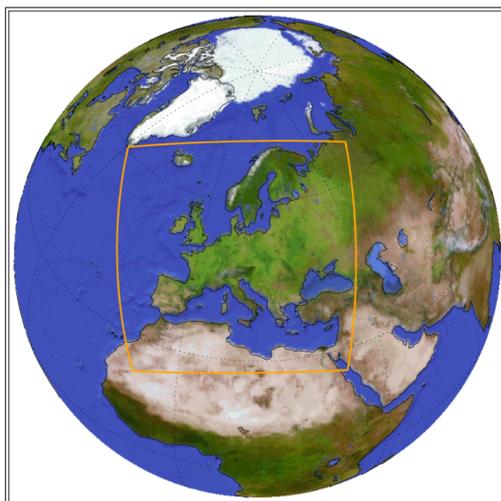


Figura 2: Dominio común de simulación para los RCMs de la iniciativa Euro-CORDEX.

En la elaboración de las proyecciones climáticas futuras se han utilizado datos de velocidad de viento medio (*sfcWind*) y máximo (*sfcWindmax*) en superficie (10 m)

¹ Más detalles sobre las instituciones en el documento:
https://cmip.llnl.gov/cmip5/docs/CMIP5_modeling_groups.pdf

generados por los RCMs de la iniciativa Euro-COREX (ver Figura 1) a una resolución de 0.11° (~12km). En concreto, en el presente trabajo se consideran los experimentos historical (histórico) y los escenarios de emisiones RCP4.5 y RCP8.5, para los 17 RCMs disponibles (Tabla 3).

ID	Earth System Model (ESM)	Regional Climate Model (RCM)	² Institución
1	CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1	CCLM4-8-17_v1	CLMcom
2	CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1	RCA4_v1	SMHI
3	ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CCLM4-8-17_v1	CLMcom
4	ICHEC-EC-EARTH_r3i1p1	HIRHAM5_v1	DMI
5	ICHEC-EC-EARTH_r1i1p1	RACMO22E_v1	KNMI
6	ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	RACMO22E_v1	KNMI
7	ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	RCA4_v1	SMHI
8	IPSL-CM5A-MR_r1i1p1	RCA4_v1	SMHI
9	IPSL-CM5A-MR_r1i1p1	WRF331F_v1	IPSL-INERIS
10	MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	CCLM4-8-17_v1	CLMcom
11	MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	RACMO22E_v1	KNMI
12	MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	RCA4_v1	SMHI
13	MPI-ESM-LR_r1i1p1	CCLM4-8-17_v1	CLMcom
14	MPI-ESM-LR_r1i1p1	REMO2009_v1	MPI-CSC
15	MPI-ESM-LR_r2i1p1	REMO2009_v1	MPI-CSC
16	MPI-ESM-LR_r1i1p1	RCA4_v1	SMHI
17	NCC-NorESM1-M_r1i1p1	HIRHAM5_v2	DMI

Tabla 3: Proyecciones regionales obtenidas con distintos acoplamientos de GCMs/RCMs de la iniciativa Euro-CORDEX considerados en el presente trabajo.

Los periodos climáticos considerados son 1971-2000 para el clima observado y el histórico simulado por los RCMs, y 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100 para los periodos futuros correspondientes a las proyecciones de los RCMs según los escenarios de emisiones RCP4.5 y RCP8.5.

2.5. Descarga y Preparación de los datos

La búsqueda y descarga de las proyecciones globales y regionales descritas anteriormente se ha realizado a través de la infraestructura de almacenamiento y descarga de la Earth System Grid Federation (ESGF), que es el punto de acceso establecido por el Programa Mundial de Investigación del Clima (WRCP, World Climate Research Programme) para las simulaciones regionales y globales de cambio climático. Se consideraron únicamente aquellas simulaciones cuya política de datos es “*unrestricted*” para asegurar tanto la reproducibilidad de los resultados del proyecto como el acceso a los datos originales y procesados para el proyecto. Dichos datos fueron descargados y procesados para su lectura a través del paquete de R *climate4R*, y enlazados para su distribución a través del Servicio de Datos Climáticos de la Universidad de Cantabria gestionado por el Grupo de Meteorología y Computación de la Universidad de Cantabria (<http://meteo.unican.es/en/dataservices>).

² Más detalles sobre las instituciones en el documento:

<http://www.euro-cordex.net/imperia/md/content/csc/cordex/20160204a-eurocordex-simulations.pdf>

3. Métodos

3.1. Corrección del Sesgo

Como ha sido reflejado en multitud de estudios, los modelos del clima (tanto globales como regionales) presentan sesgos que limitan su uso en estudios de impacto y hacen necesaria la aplicación de algún tipo de post-proceso que corrija, en la medida de lo posible, la parte sistemática de dichos sesgos. Este problema es especialmente importante cuando se trabaja con magnitudes y umbrales absolutos (por ejemplo, viento superior a 100 km/h), que se ven afectados por los sesgos. En el marco del presente proyecto, la disponibilidad de la base de datos DPWG permite la aplicación de diferentes técnicas de calibración o corrección del sesgo de los modelos regionales del clima. En particular, en este proyecto se parte del análisis desarrollado en el marco de la COST Action VALUE (Maraun et al. 2015) en el que se compararon las principales metodologías de regionalización estadística y de corrección de sesgos (Gutiérrez et al. 2018).

Dentro de las diferentes técnicas analizadas en Gutiérrez et al. (2018), los métodos basados en el ajuste de cuantiles (quantile-quantile mapping, en inglés), empíricos o paramétricos, son los más utilizados en la actualidad por su sencilla formulación (más de una tercera parte de los métodos que contribuyeron a Gutiérrez et al. 2018). En líneas generales, dichos métodos pueden definirse a través de la ecuación:

$$z = CDF_{obs}^{-1}(CDF_{mod}(y))$$

donde z e y son los valores corregido y originales del modelo respectivamente, CDF_{obs} y CDF_{mod} son las funciones de distribución acumuladas, empírica o paramétrica, de las observaciones y el modelo respectivamente. En el presente proyecto se ha considerado el método empírico de identificación de cuantiles definido en Gutiérrez et al. 2018, identificado con el código EQM en dicho artículo, e implementado en la librería de R `downscaleR` (Bedia et al. 2017) incluida en el conjunto de paquetes de acceso (`loaderR`, Bedia et al. 2018a), post-proceso (`transformeR`, Bedia et al. 2018b), verificación y visualización (`visualizeR`, Frías et al. 2017) de datos climáticos `climate4R`.

La corrección se ha llevado a cabo ajustando los percentiles y considerando la aplicación de una ventana de calibración mensual (30 días) y una ventana de corrección de 7 días, de forma que la corrección de los datos se realiza de 7 en 7 días considerando un periodo más extenso de calibración (30 días) centrado en la serie de días a corregir. Por último, en el caso de existir valores fuera del rango observado en el periodo de entrenamiento, se aplica una extrapolación constante considerando el ajuste lineal dado por los dos últimos percentiles.

3.2. Caracterización de Vientos Extremos

La distribución generalizada de valores extremos (GEV, Coles 2001; Nikulin et al. 2011) es, según el teorema de valores extremos, la distribución límite para una secuencia de valores máximos independientes e idénticamente distribuidos. Para su aplicación asumiremos que las series mensual, estacional y anual de valores máximos de viento diario está constituida por eventos independientes e igualmente distribuidos. De este modo, para cada estación o punto de rejilla analizado se puede ajustar, maximizando la función de verosimilitud (Mínguez et al. 2013), una distribución GEV con parámetros de localización (μ), escala (ψ) y forma (ξ) dados. Éste último parámetro, ξ , controla el comportamiento de la cola de la distribución, dando lugar a tres

familias de distribuciones, Gumbel ($\xi = 0$), Frèchet ($\xi > 0$) ó Weibull ($\xi < 0$), según la cola presente un decaimiento exponencial ó polinomial, o esté acotada, respectivamente.

Una vez ajustados los parámetros óptimos, la función de distribución acumulada, $CDF_{gev}(x)$, puede ser utilizada para obtener los valores de retorno para diferentes periodos, habitualmente expresados en años (T). Dichos valores de retorno se corresponden con los cuantiles q_T los cuales tienen una probabilidad $\frac{1}{T}$ de ser excedidos (i.e. se exceden 1 vez cada T años): $CDF_{gev}(q_T) = 1 - \frac{1}{T}$.

3.3. Clasificación de Patrones Atmosféricos

Para la identificación y caracterización de los patrones y configuraciones atmosféricas que dan lugar a situaciones de riesgo por viento extremo en la Península Ibérica se consideraron diferentes metodologías de clasificación de patrones de circulación. Una vez obtenida cada clasificación, la distribución de la frecuencia de ocurrencia de eventos de viento extremo en cada tipo de tiempo identifica los tipos de tiempo asociados a estos eventos.

Tres tipos de clasificación, dos automáticas y una basada en reglas, fueron consideradas. En todos los casos la variable considerada para la clasificación fue el promedio diario de la presión al nivel del mar. En primer lugar, siguiendo la propuesta de Brands et al. (2013) se consideró la clasificación de tipos de tiempo propuesta por Lamb (1972), basada en un conjunto de clases predefinidas en base a criterios meteorológicos expertos, que ha sido utilizada anteriormente en diferentes estudios en la Península Ibérica (p.e. Trigo and DaCamara, 2000). En segundo lugar, dos métodos automáticos de clasificación, K-medias (Gutiérrez et al. 2004) y máquinas auto-organizativas (SOM, Hewiston and Crane 2002; Gutiérrez et al. 2005), fueron aplicados a la misma variable para poder establecer una comparación entre ambas aproximaciones.

Finalmente, en el marco de la colaboración con el grupo GIMENA de la Universidad de Cantabria, se extendió el análisis a patrones atmosféricos relacionados con eventos de oleaje extremo en el Cantábrico (Rasilla et al. 2018), asociando dichos eventos a dos tipos de tiempo característicos, si bien dicha clasificación no ha sido aplicada a los eventos de viento extremos, ya que en los eventos de oleaje extremo el viento en superficie es sólo uno de los múltiples factores determinantes (Le Cozannet et al. 2011, Bromirski et al. 2015, Martínez-Asensio et al. 2016, Rasilla et al. 2018).

3.4. Detección y seguimiento de ciclones

Para la detección y seguimiento de ciclones existen en la literatura diferentes aproximaciones principalmente basadas en la evaluación de la presión a nivel del mar (slp), la vorticidad a distintos niveles de presión y variables derivadas de éstas (p.e. el laplaciano de la slp). Del mismo modo, una vez detectados los posibles centros de ciclones, existen diferentes algoritmos para realizar el seguimiento de dichas tormentas a lo largo del tiempo. Dado que la vorticidad no es una variable habitualmente disponible en los modelos, en el presente proyecto hemos considerado su aproximación quasi-geostrófica a partir del geopotencial (zg) a 850 hPa (Chen and Bromwich, 1999).

$$\xi = \frac{1}{f_o} \Delta z g, f_o = \text{Parámetro de Coriolis}$$

$$NDR = \frac{\Delta slp}{24} \cdot \frac{\sin(60)}{\sin(\phi)}, \phi = \text{latitud}$$

$$\Delta slp = slp_{day} - slp_{day-1}$$

En el presente proyecto hemos utilizado inicialmente los siguientes criterios para considerar que, en un tiempo dado, un punto del modelo se corresponde con un centro de tormenta:

- Que se de un mínimo local de la slp.
- Que se de un máximo local del laplaciano de la slp.
- Que se de un máximo local de la vorticidad a 850 hPa.
- Que la vorticidad a 850 hPa en ese punto supere un determinado umbral.
- Que la derivada temporal normalizada (NDR: Normalized Deepening Ratio, Sanders and Gyakum 1980) sea superior a un umbral determinado.

Una vez derivados todos los posibles centros existentes en una fecha dada, para evitar las redundancias dadas por centros asociados a una misma tormenta, se separan por criterios de distancia y se definen como centros de las tormentas detectadas a aquellos que dan lugar, al menos teóricamente, a una situación más extrema o inestable según diferentes criterios: mínima presión, máxima vorticidad, máximo valor de NDR o la combinación de los tres anteriores.

Para realizar el seguimiento de las tormentas asociadas a los centros encontrados y asignar cada centro a una única tormenta se desarrolló y aplicó un algoritmo basado en el implementado en Fortran 77 por Serreze (1995) y Serreze et al. (1997), modificado para tener en cuenta los criterios citados anteriormente. De este modo, para cada día:

- se considera un centro no asignado a ninguna tormenta,
- se busca en el día siguiente los centros cercanos no asignados,
- se asigna a dicha tormenta el de mayor intensidad,
- se repite hasta que no exista ningún centro candidato en los días siguientes y
- se pasa al siguiente centro no asignado o fecha.

Los pasos anteriores se repiten hasta que no queden centros sin asignar obteniendo todas las trayectorias de las tormentas ocurridas o simuladas. Tanto la detección de centros como el algoritmo de seguimiento de las trayectorias ha sido implementado en el lenguaje R y está disponible públicamente en el repositorio GitHub del Grupo de Meteorología de Santander (<https://github.com/SantanderMetGroup>).

4. Resultados

En la presente sección detallaremos los resultados obtenidos para cada una de las tareas propuestas en el marco del proyecto.

4.1. Glosario de eventos extremos

Para la identificación de los eventos extremos históricos registrados se realizó una reunión conjunta en Madrid a la que se convocaron a representantes de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), la Oficina Española de Cambio Climático (OECC), Consorcio de Compensación de Seguros (CCS) y la Universidad de Cantabria (UC).

En dicha reunión se proponen por parte de la UC las diferentes aproximaciones a considerar en el marco del proyecto, por un lado el análisis de vientos extremos y por otro lado la identificación de configuraciones atmosféricas de riesgo, y se propone una discusión para definir las diferentes metodologías a utilizar en el desarrollo del proyecto. Por otro lado, desde el Consorcio de Compensación de Seguros se proponen como eventos extremos los registrados en su base de datos de incidencias de daños por

causa de viento, que recoge la cantidad y cuantía de las compensaciones asociadas a dichos eventos (incidencias). Con el objetivo de tener una muestra lo más representativa posible del tipo de evento de interés, el listado propuesto por el CCS se complementó con una búsqueda bibliográfica exhaustiva, tanto en prensa como en publicaciones científicas o en los registros de AEMET, de eventos asociados a la ocurrencia de vientos extremos en la Península Ibérica distinguiendo su carácter explosivo o no. La Tabla 4 refleja las principales incidencias registradas, cuyos costes superaran un millón de euros, mientras que el archivo Anexo (Incidencias.xls) refleja todos los eventos encontrados.

Fecha	M€	Nombre	Fuente
1/23/2009	49.66	Klaus	http://www.aemet.es/
1/24/2009	435.503	Klaus	http://www.aemet.es/
11/28/2005	52.749	Delta	http://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-267.htm
11/29/2005	29.894	Delta	
2/26/2010	2.507	Xynthia	
2/27/2010	48.054	Xynthia	http://www.aemet.es/
2/28/2010	3.625	Xynthia	http://ecodiario.eleconomista.es
10/4/2007	40.283		http://www.elmundo.es
1/13/2010	4.685		www.lavozdegalicia.es
1/14/2010	37.944		http://www.abc.es
1/15/2010	2.19		http://www.atlantico.net
12/9/2014	23.701		http://www.publico.eswfrqafaw
2/1/2009	23.581		http://www.publico.es
12/23/2013	4.494		www.lavanguardia.com
12/24/2013	18.763		http://cadenaser.com
12/25/2013	2.523		http://www.aemet.es/
12/26/2013	1.793		http://www.abc.es
12/27/2013	0.285		
1/25/2009	16.257		http://www.abc.es
1/18/2013	1.661	Gong	http://ecodiario.eleconomista.es
1/19/2013	11.731	Gong	http://www.aemet.es/
1/20/2013	1.493	Gong	
11/28/2010	1.535		http://meteohuelva.blogspot.com.es
11/29/2010	10.695		
9/3/2004	9.352		https://elpais.com/
2/2/2017	3.873		https://noticias.eltiempo.es/
2/3/2017	9.241		
2/4/2017	3.777		www.lavanguardia.com
2/5/2017	2.27		http://www.elmundo.es
9/28/2012	8.653	Nadine	www.lavozdegalicia.es
10/2/2013	0.367		
10/3/2013	8.148		
10/29/2008	6.141		http://www.aemet.es/
2/16/2010	2.771		www.lavanguardia.com
2/17/2010	5.854		http://www.aemet.es/
2/18/2010	4.151		www.lavozdegalicia.es
8/30/2015	5.739		
11/2/2008	5.684		http://www.abc.es
8/25/2007	5.045		http://www.abc.es
9/7/2005	3.998		
9/4/2004	3.92		http://www.abc.es
9/13/2006	3.885		

7/19/2006	3.864		
2/3/2014	0.283	¿Nadja?	http://www.aemet.es/
2/4/2014	1.49	Petra	http://www.meteovigo.es
2/6/2014	3.255	Petra?	www.lavanguardia.com
9/21/2006	2.879		www.lavanguardia.com
3/7/2007	0.307		http://www.aemet.es/
3/8/2007	2.489		http://www.elmundo.es
11/20/2007	2.458		http://cadenaser.com
12/15/2011	0.473	Joachim	http://www.meteovigo.es
12/16/2011	2.453	Joachim	http://www.meteovigo.es
12/17/2011	0.051		http://www.aemet.es/
2/14/2014	2.384	Ulla	http://www.elmundo.es
6/19/2012	2.254		
3/3/2013	1.932		http://www.rtv.es
1/31/2015	1.862		http://www.aemet.es/
10/3/2006	1.842		https://elpais.com/
9/5/2014	1.77		https://elpais.com/
12/24/2009	1.516		http://www.aemet.es/
2/16/2007	1.5		http://www.euskalmet.euskadi.eus
11/28/2014	1.404		http://cadenaser.com
10/30/2012	1.285		http://www.europapress.es
2/12/2017	1.171		http://ecodiario.economista.es
9/15/2004	1.13		
2/7/2012	1.011		http://www.elmundo.es
2/9/2014	0.444	Ruth	
2/10/2014	0.859	Ruth/stephanie	http://www.abc.es
2/11/2014	0.128	Stephanie	
4/9/2008	0.293		http://www.aemet.es/
12/7/2010	0.265		http://www.aemet.es/
9/16/2015	0.137		http://www.aemet.es/
2/14/2016	0.067		http://www.aemet.es/
2/14/2005	0.029		http://www.aemet.es/
3/5/2009	0.008		http://www.aemet.es/
3/4/2008	-		http://www.aemet.es/
10/29/2013	-		http://www.aemet.es/
1/2/2013	-		http://www.aemet.es/
3/4/2009	-		http://www.aemet.es/
2/11/2016	-		http://www.aemet.es/
3/26/2006	-		http://www.aemet.es/
1/27/2007	-		http://www.aemet.es/
2/28/2006	-		http://www.aemet.es/
6/28/2012	-		http://www.aemet.es/
11/28/2004	-		http://www.aemet.es/
7/30/2011	-		http://www.aemet.es/

Tabla 4: Subconjunto de incidencias (fechas, primera columna) de siniestros con daños materiales por eventos de viento extremo (importes, segunda columna) y/o de efemérides atmosféricas de viento extremo catalogada, principalmente por AEMET (últimas dos columnas). El campo Fuente muestra la fuente de la que se extrajo la efeméride o noticia para cada fecha. El campo Nombre recoge el nombre de aquellas efemérides catalogadas como ciclogénesis explosiva. El código “-“ refleja la no existencia de siniestro en el listado facilitado por el CCS para una efeméride data. NOTA: Información completa facilitada en el archivo Anexo (Incidencias.xls).

La Figura 3 resume la información extraída de la búsqueda bibliográfica realizada, donde las incidencias de la Tabla 4 se clasifican como temporal de viento (línea naranja,

indicada con un punto cuando coincide con un siniestro) o ciclogénesis explosiva (punto rojo).

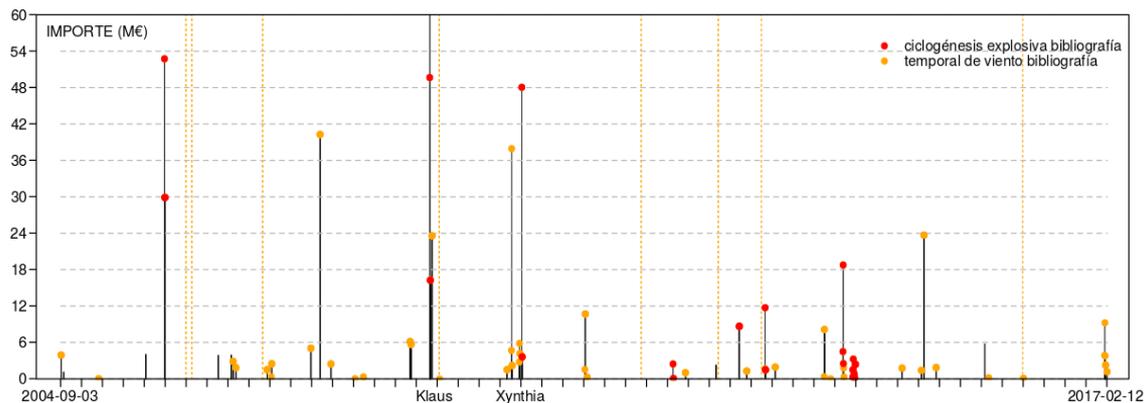


Figura 3: Importe en millones de euros (líneas verticales negras) de las incidencias de siniestros recogidas entre 2004-09-03 y 2012-02-12. Se muestran las clasificadas como ciclogénesis explosiva (punto rojo) o temporal de viento (punto naranja) en base a la búsqueda bibliográfica llevada a cabo. Las líneas verticales naranjas son eventos identificados en la bibliografía sin siniestrabilidad asociada.

Como conclusión de la reunión, y en base a la concordancia entre los eventos de alto coste y la ocurrencia de ciclogénesis explosivas que se observa en la Figura 3, se establece como objetivo el análisis de los eventos de ciclogénesis explosivas ocurridos en la Península Ibérica para lo cual deben identificarse las configuraciones atmosféricas asociadas a dichos eventos y aplicar algoritmos de seguimiento de ciclones para establecer si dicho evento afecta o no a la Península Ibérica. De este modo, aplicando dichos algoritmos a las proyecciones futuras podrán establecerse los cambios producidos en los diferentes periodos futuros.

En paralelo al análisis anterior, se concluyó realizar el análisis de las proyecciones de los vientos diarios medios y extremos para los tres periodos futuros, haciendo énfasis en el periodo intermedio (2041-2070).

4.2. Validación de los modelos regionales del clima

En una primera fase se consideraron las simulaciones del experimento *historical* de Euro-CORDEX para los modelos reflejados en la Tabla 3 y las observaciones del dataset DPWG, y se estimaron tanto los valores de retorno a 50 años como los parámetros de las distribuciones GEV ajustadas. Al evaluar de forma cualitativa los modelos frente a las observaciones (Fig. 4) vemos que, en líneas generales, los RCMs recogen adecuadamente el tipo de distribución GEV asociada, una Weibull, así como la estacionalidad y el patrón espacial de los valores de retorno. Nótese que las diferencias más notables se producen en aquellas localidades en las que el error del ajuste es alto para los datos observados, que es una indicación de mal ajuste y podría estar asociado con algún problema en los datos.

La figura 4 (inferior) muestra los resultados del *ensemble* de Euro-CORDEX (promedio de todos los modelos mostrados en la Tabla 3). El análisis de los resultados individuales releva un gran parecido entre los distintos modelos en cuanto al patrón espacial de los distintos resultados, con una dispersión espacial pequeña de los resultados (no mostrada). Por tanto, para el desarrollo de proyecciones de cambio climático se utilizarán los resultados del ensemble, junto con una caracterización de la variabilidad. De esta manera se tendrán en cuenta todas las fuentes de incertidumbre, en particular los escenarios de cambio climático y los diferentes anidamientos entre modelos globales y regionales, por lo que en adelante.

Por último, cabe mencionar que los resultados de los RCMs tienden a subestimar los valores de retorno observados en las estaciones por lo que, dependiendo de la aplicación, los resultados de los modelos tendrán que ser calibrados (corrección de sesgos) para su uso adecuado.

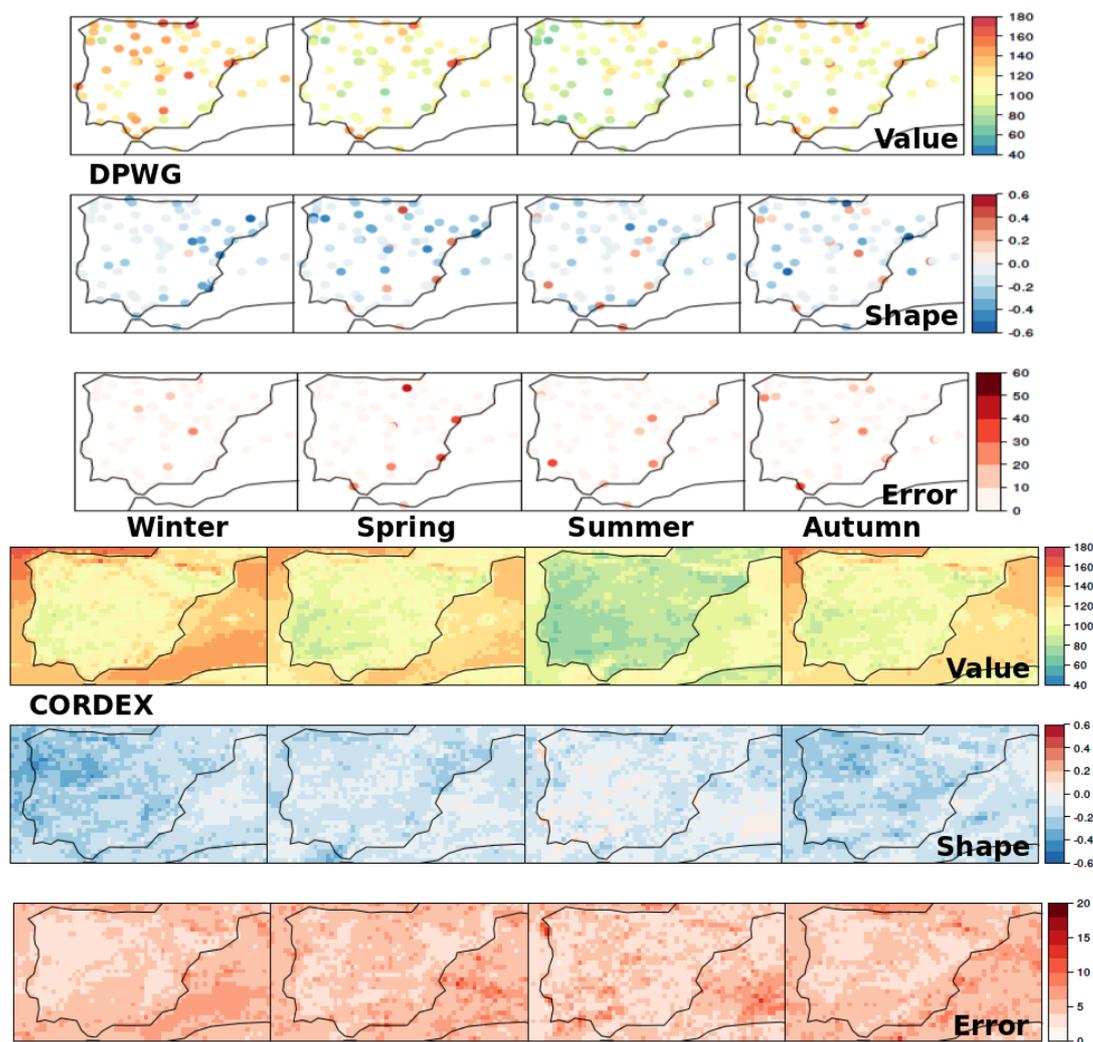


Figura 4: Valor de retorno estacional a 50 años de racha máxima diaria de viento (filas 1 y 4), parámetro de forma (filas 2 y 5) y error del valor de retorno ajustado (filas 3 y 6), obtenido para las observaciones (DPWG) y los modelos de Euro-CORDEX en el periodo histórico, 1971-2000.

4.3. Escenarios de Cambio Climático de Viento

En una primera fase, se obtuvieron las señales de cambio de los valores de retorno a 50 años dadas por los modelos regionales de Euro-CORDEX a escala estacional para los tres periodos futuros analizados. En la Figura 5 pueden observarse tanto el promedio como la desviación estándar (como medida de incertidumbre), de las señales de cambio de los modelos. En líneas generales el cambio proyectado para todas las estaciones y periodos oscila entorno a 0 m/s, con valores positivos y negativos, indicando que no existiría consenso entre modelos y, por tanto, un cambio significativo. En algunos casos (p.e. invierno para el periodo 2071-2100 o el otoño para los periodos 2011-2040 y 2041-2070) se proyecta un incremento de más de 10 m/s, si bien dicho incremento presenta una gran incertidumbre como puede verse en el panel correspondiente de la desviación estándar. Una medida adicional de incertidumbre que se suele considerar es el acuerdo entre modelos (model agreement), dado por el número de RCMs que muestran un cambio positivo (ver Figura 6). Un valor cercano a cero indica una gran

confianza en una señal de cambio negativa, mientras que un valor cercano a 12 (el tamaño del ensemble) indica una gran confianza en un señal de cambio positiva.

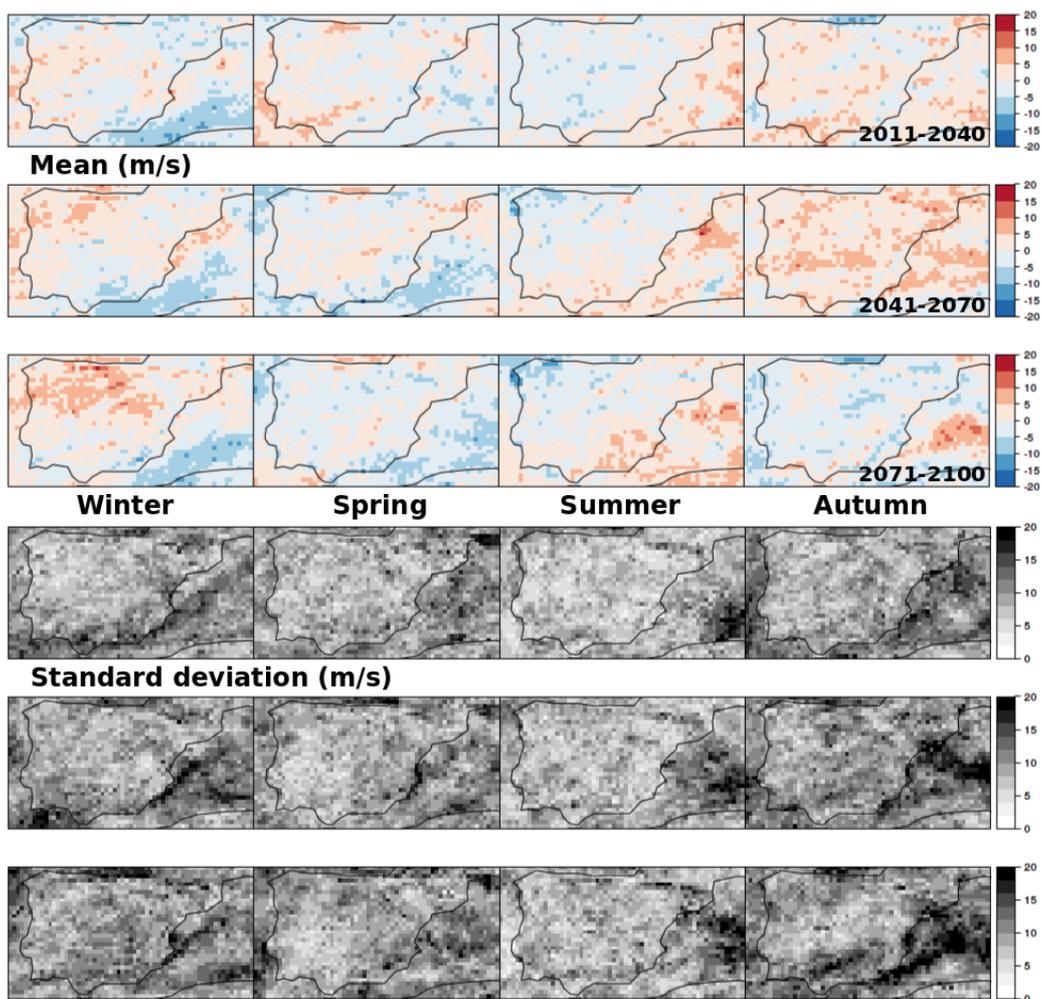


Figura 5: Incremento/Decremento (Media) e Incertidumbre (desviación estándar) del valor de retorno estacional a 50 años de la racha máxima diaria de viento proyectados para los tres periodos futuros y el escenario RCP8.5.

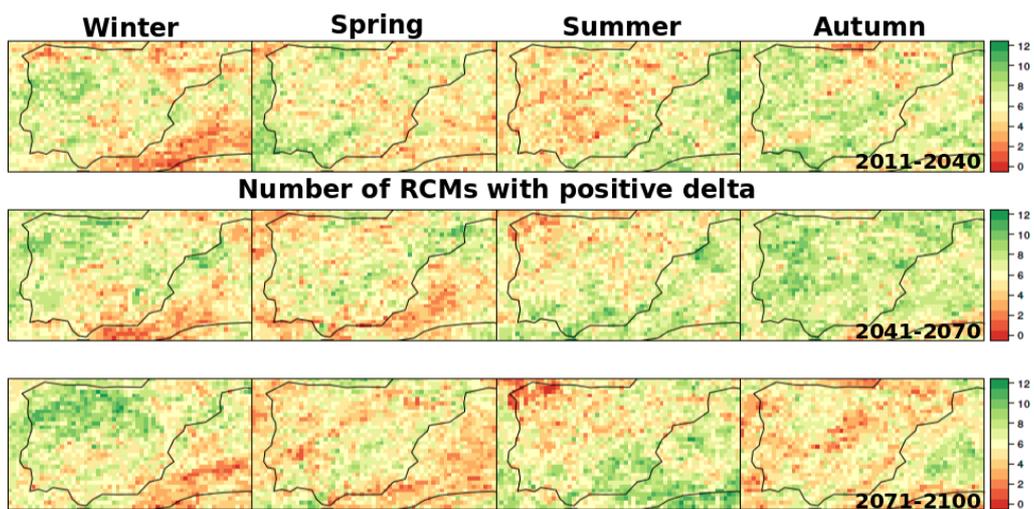


Figura 6: Número de RCMs proyectando un incremento en el valor de retorno estacional a 50 años de racha máxima diaria de viento para los tres periodos futuros y el escenario RCP8.5. Verde indica acuerdo entre modelos para cambio positivo y rojo para negativo.

Las figuras anteriores no reflejan, en general, ninguna tendencia significativa de consenso, salvo algunos casos aislados como, por ejemplo, el caso de los descensos proyectados en el noroeste peninsular en verano para los dos últimos periodos, cuyo descenso (~ 10 m/s) tiene asociada una desviación estándar menor y una gran coherencia entre los modelos en el signo de la señal. Sin embargo, y como queda reflejado en el glosario de eventos extremos (Tabla 4), los episodios de mayor impacto no se dan en esta estación y por tanto este descenso tiene un impacto leve en el ámbito de las aseguradoras.

Como resultado general de esta parte, se ha constatado que los modelos regionales de Euro-CORDEX no muestran ningún cambio significativo de consenso en el valor de retorno a 50 años de la velocidad diaria del viento. Se ha comprobado que algunos modelos individuales sí que presentan un patrón de cambio pronunciado para el aumento de extremos. Sin embargo, los resultados de un modelo particular no tienen validez.

En una segunda parte, se analizan las proyecciones de cambio para frecuencias de días de viento superando distintos umbrales extremos de interés (incluyendo 80, 100 y 120 km/h). La disponibilidad de la base de datos observacionales DPWG permite realizar, en aquellos puntos donde existe observación, un análisis detallado al poder calibrar la salida directa de los modelos regionales, eliminando sus sesgos sistemáticos como se refleja en la Figura 7 para la estación de Igueldo (San Sebastián).

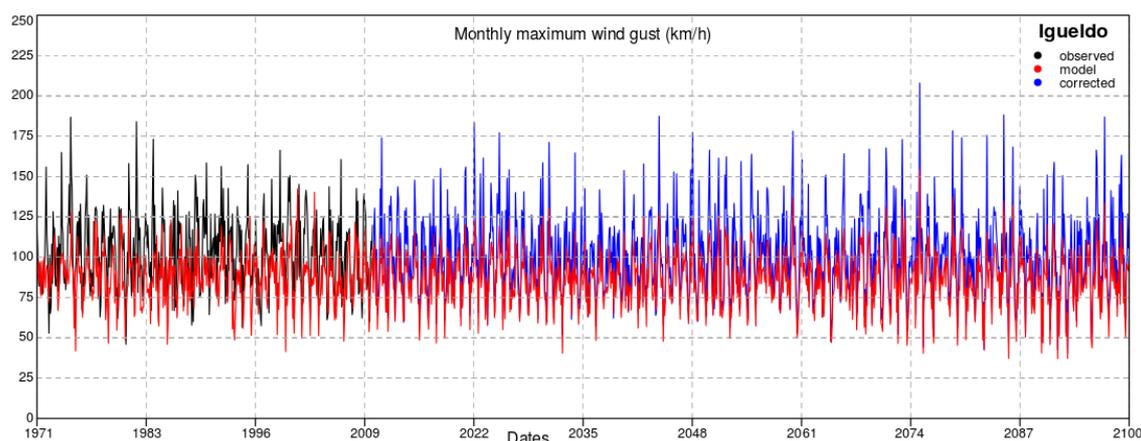


Figura 7: Series temporales observada (DWPG, línea negra), modelada (CORDEX, línea roja) y corregida (CORDEX, línea azul) para la estación de Igueldo (San Sebastián) dada por la simulación 7 de la Tabla 3 y los escenarios histórico y RCP8.5.

En la Figura 8 se muestran las proyecciones para los diferentes umbrales y periodos considerados. Al igual que ocurriera para el valor de retorno a 50 años, no se proyectan cambios significativos en líneas generales. En el caso del número de eventos con vientos suaves (>70 km/h) se refleja un decrecimiento progresivo hasta finales de siglo, mientras que para vientos intensos (>90 km/h) se da un incremento generalizado en casi toda la Península Ibérica los dos primeros periodos, siendo mayor en el primer periodo y perdiendo intensidad a lo largo del siglo.

Estos resultados se reflejan también en el número de modelos con cambios positivos los cuales muestran una gran coherencia en el signo proyectado para los mismos eventos y periodos, incrementando la confianza en los cambios proyectados.

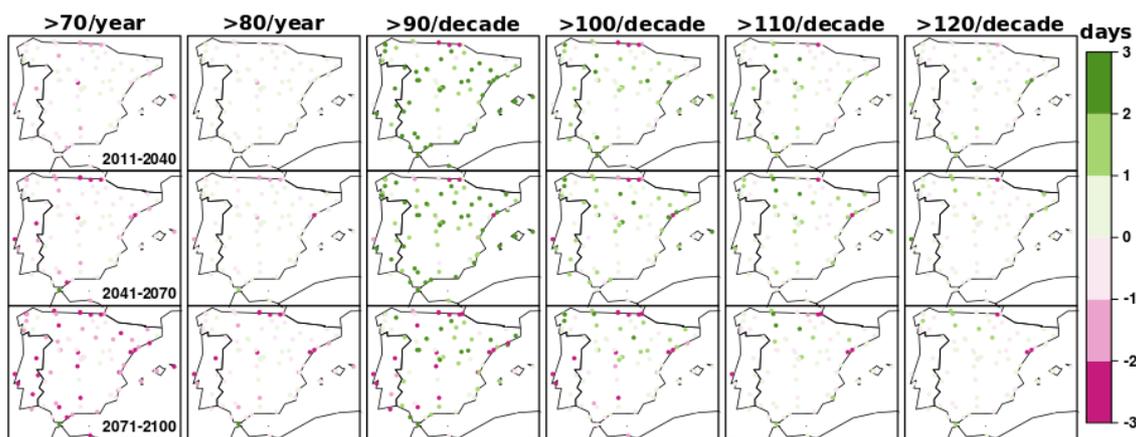


Figura 8: Incremento/Decremento del número de días con velocidades de viento superiores a diferentes umbrales (columnas) proyectadas por los modelos de Euro-CORDEX corregidos para el escenario RCP8.5 y los tres periodos futuros (filas).

4.4. Patrones Atmosféricos de Riesgo

Como se acordó en la reunión celebrada en Madrid con AEMET, la OECC y el CCS, además del análisis estándar realizado con las proyecciones dadas por los modelos regionales, se propuso analizar los patrones atmosféricos de riesgo asociados a eventos con vientos extremos y de alto impacto para las aseguradoras.

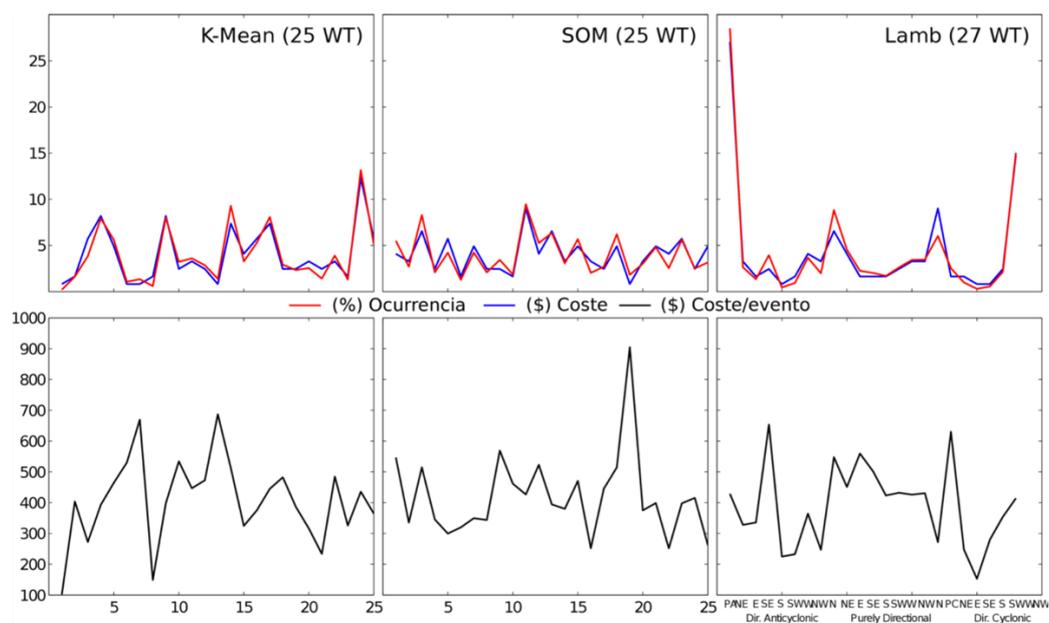


Figura 9: Distribución de la ocurrencia, el coste y el coste promedio por evento en los tipos de tiempo obtenidos aplicando tres técnicas de agrupación: K-Medias, SOM y Lamb.

Tres algoritmos, dos automáticos (K-means y SOM) y uno experto (Lamb), fueron considerados para clasificar la situación atmosférica en el Atlántico Norte. En la Figura 9 se muestra la distribución entre los tipos de tiempo de la ocurrencia y coste de los eventos registrados por el CCS para cada algoritmo.

Como puede verse, en el caso de los clasificadores automáticos, los eventos no se asocian con ningún patrón atmosférico y únicamente en el caso de la clasificación de Lamb se identifican dos patrones con una mayor incidencia de los eventos extremo, anticiclónico puro y ciclónico direccional del noroeste (en los extremos del eje x), pudiendo considerarse a estos como posibles patrones de riesgo.

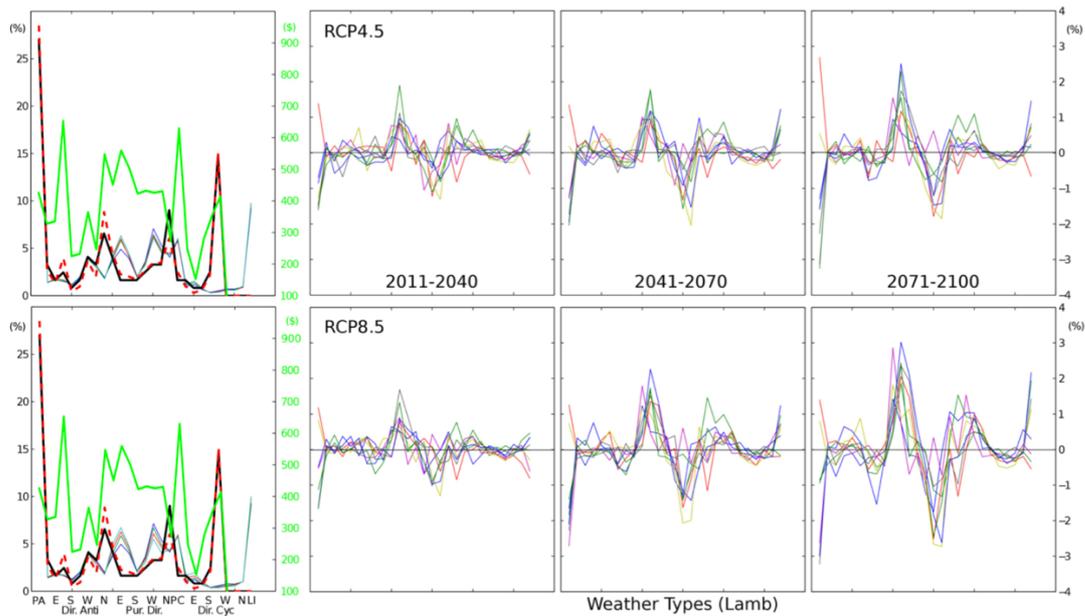


Figura 10: Cambios proyectados en la distribución de frecuencia de ocurrencia de cada tipo de tiempo definido por Lamb para los tres periodos futuros y los dos escenarios, RCP4.5 y RCP8.5.

En base a los resultados obtenidos para el tiempo presente únicamente se ha considerado la clasificación de Lamb para realizar las proyecciones, si bien, como se muestra en la Figura 10, no se aprecian cambios significativos en la distribución de frecuencias de cada tipo de tiempo en ninguno de los tres periodos futuros y escenarios considerados.

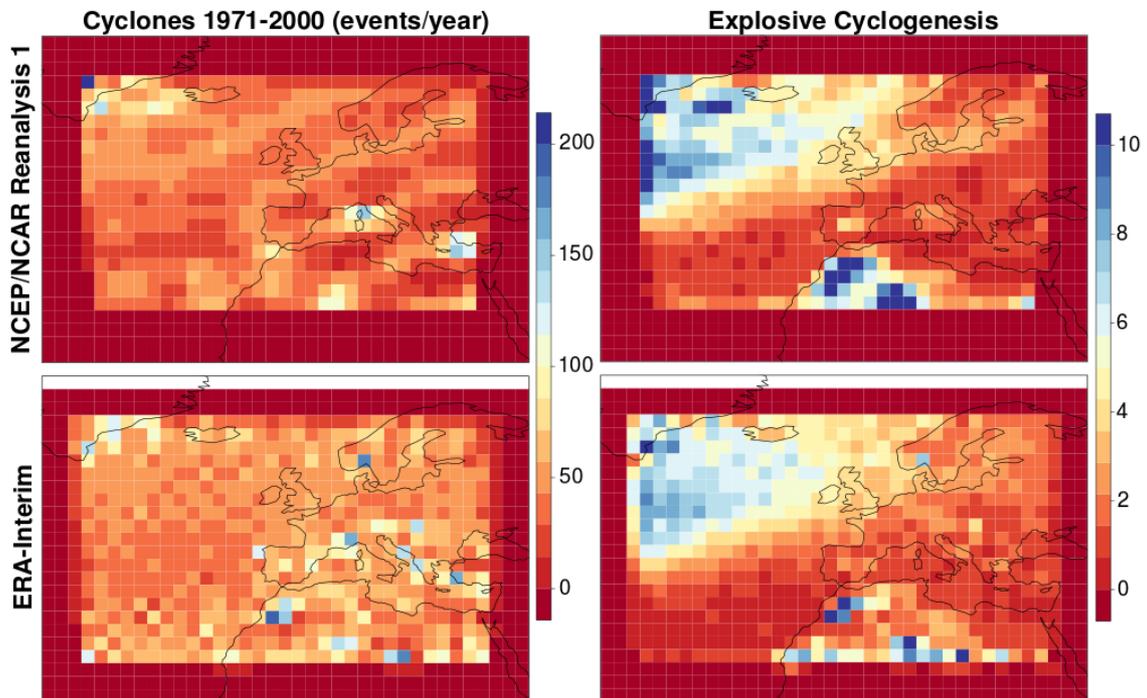


Figura 11: Número de ciclones (izquierda) y ciclogénesis explosivas (derecha) por año detectadas en los dos reanálisis, ERA-Interim (debajo) y NCEP/NCAR reanalysis 1 (arriba).

4.5. Detección y Seguimiento de Ciclones

En una primera fase se evalúa el algoritmo de detección y seguimiento de ciclones de forma cualitativa comparando con la literatura los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo a los datos de dos reanálisis, ERA-Interim y NCEP/NCAR reanalysis 1, a su mayor resolución temporal, 6-horaria.

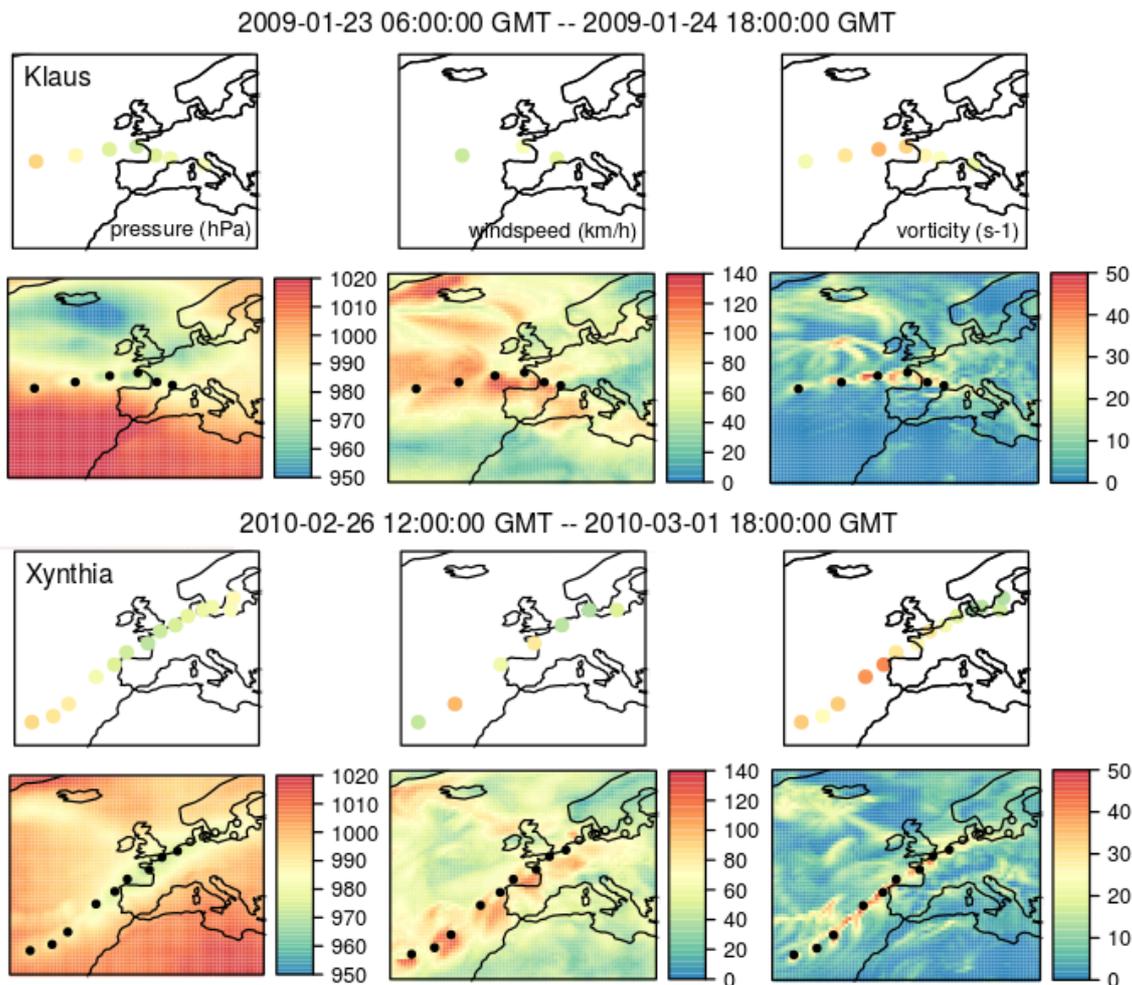


Figura 12: Trayectoria detectada para las tormentas Klaus y Xynthia, y valores máximos de vorticidad y velocidad de viento, y mínimos de presión a nivel del mar del reanálisis durante la trayectoria.

La Figura 11 refleja el número de eventos, ciclones y ciclogénesis explosivas, detectados al año en el Atlántico Norte al aplicar el algoritmo a ambos reanálisis. Como puede verse, en ambos casos se refleja un patrón espacial cuyos máximos se localizan al sur de Groenlandia y en el norte de África, con algunos puntos aislados en el Mediterráneo. Dicho patrón coincide con el reflejado en trabajos previos (Michaelis et al., 2017; Donat et al., 2010; Neu, 2009; Semmler et al., 2008), concluyendo que el algoritmo de detección de eventos es correcto.

Una vez comprobado que la detección de eventos funciona adecuadamente para la evaluación del algoritmo de seguimiento de trayectorias se consideraron varios eventos recogidos como efemérides por la AEMET y cuyas trayectorias han sido reflejadas en diversos estudios previos (Liberato et al., 2011, Liberato et al., 2013, Liberato 2014) y en diferentes repositorios (p.e. [XWS Catalogue](#)). La figura 12 refleja las trayectorias obtenidas para las ciclogénesis Klaus y Xynthia así como los valores máximos, para la velocidad del viento y la vorticidad, y mínimos, para la presión, observada en el periodo de desarrollo de la trayectoria. Por un lado, ambas trayectorias reproducen adecuadamente las observadas. Por otro lado, el patrón de máximos y mínimos en el periodo de vida del ciclón se asocia en gran medida con la trayectoria reflejando la adecuación de las variables consideradas para la detección de ciclones. Finalmente, como era de esperar los valores máximos de viento se asocian con la trayectoria detectada siendo, por tanto, adecuado el algoritmo para detectar trayectorias que dan lugar a episodios de viento extremos afectando a la Península Ibérica.

Con el fin de establecer el dominio geográfico en el cual se generan los ciclones que afectan a la Península Ibérica, que llamaremos “Cuenca de afección”, y que se asocian con los eventos de alto impacto económico registrados por el CCS, se consideraron diferentes distancias a la Península Ibérica y la tasa de aciertos del algoritmo en la detección de los eventos registrados por el CCS (ver Fig 13).

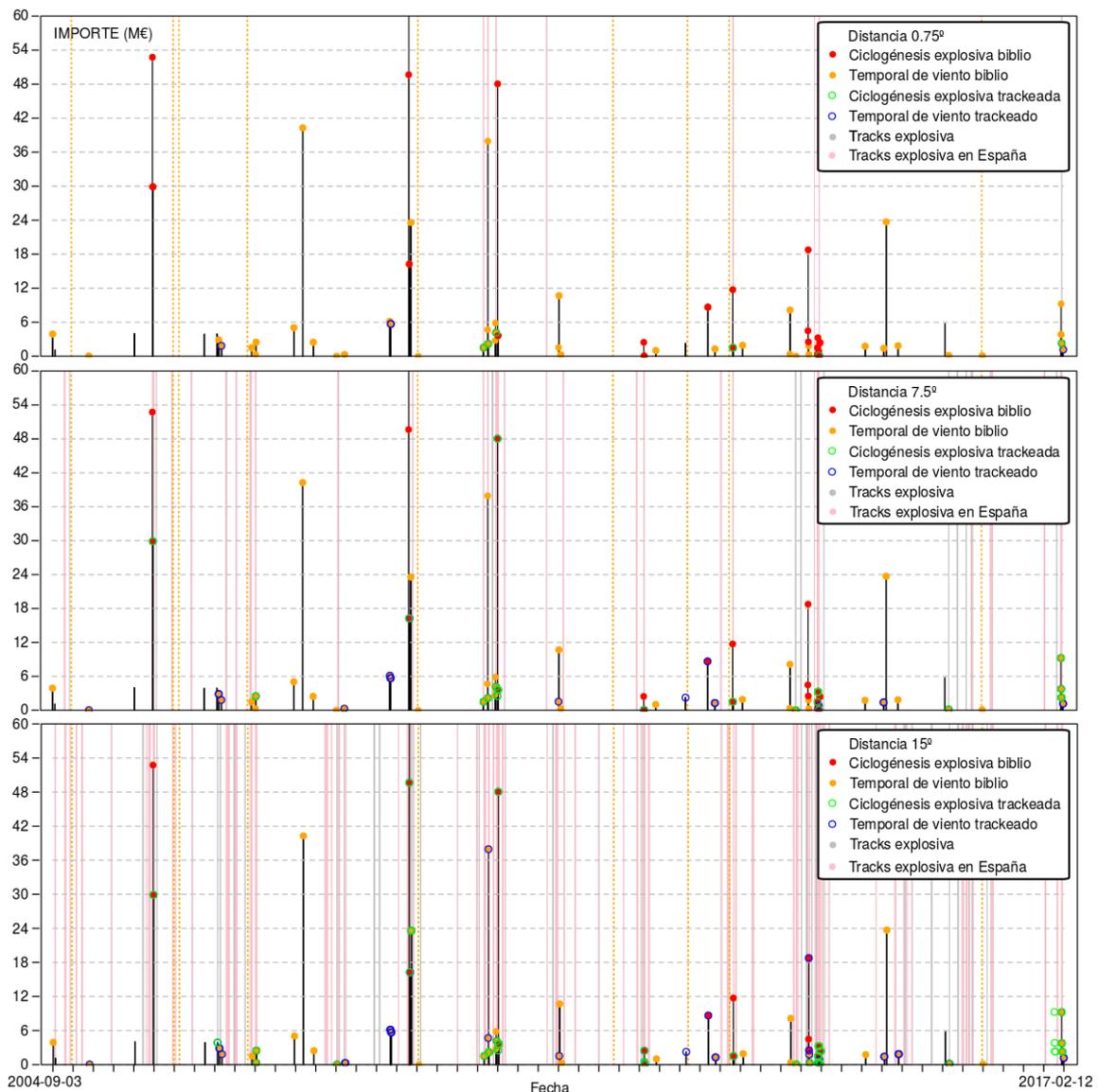


Figura 13: Importe en millones de Euros de las incidencias recogidas entre 03-09-2004 y 12/02/2017 (líneas negras). Se muestran las clasificadas como ciclogénesis explosiva (punto rojo) o temporal de viento (punto naranja) en base a la búsqueda bibliográfica llevada a cabo (Las líneas naranjas son eventos identificados en la bibliografía que no coinciden con ninguna fecha de incidencia observada). Los círculos azules y verdes corresponden a eventos identificados por el algoritmo de seguimiento utilizando el reanálisis ERA-Interim y para las distancias a España mínima (0.75°), media (7.5°) y máxima (15°) consideradas en este estudio. Las líneas rosas y grises son las trayectorias de ciclogénesis explosiva identificadas por el algoritmo que no coinciden con ninguna fecha de incidencia observada.

La Figura 13 muestra los eventos registrados en la bibliografía, incluidas las identificadas por el CCS, junto con los identificados por el algoritmo utilizando el reanálisis ERA-Interim y considerando diferentes distancias a la Península Ibérica. Como puede verse, a una distancia de 7.5° de la Península Ibérica se identifican correctamente aquellas trayectorias con ciclogénesis explosivas que dan lugar a mayores costes si bien se pierden algunas de menor costes y gran parte de los temporales de viento registrados en la literatura.

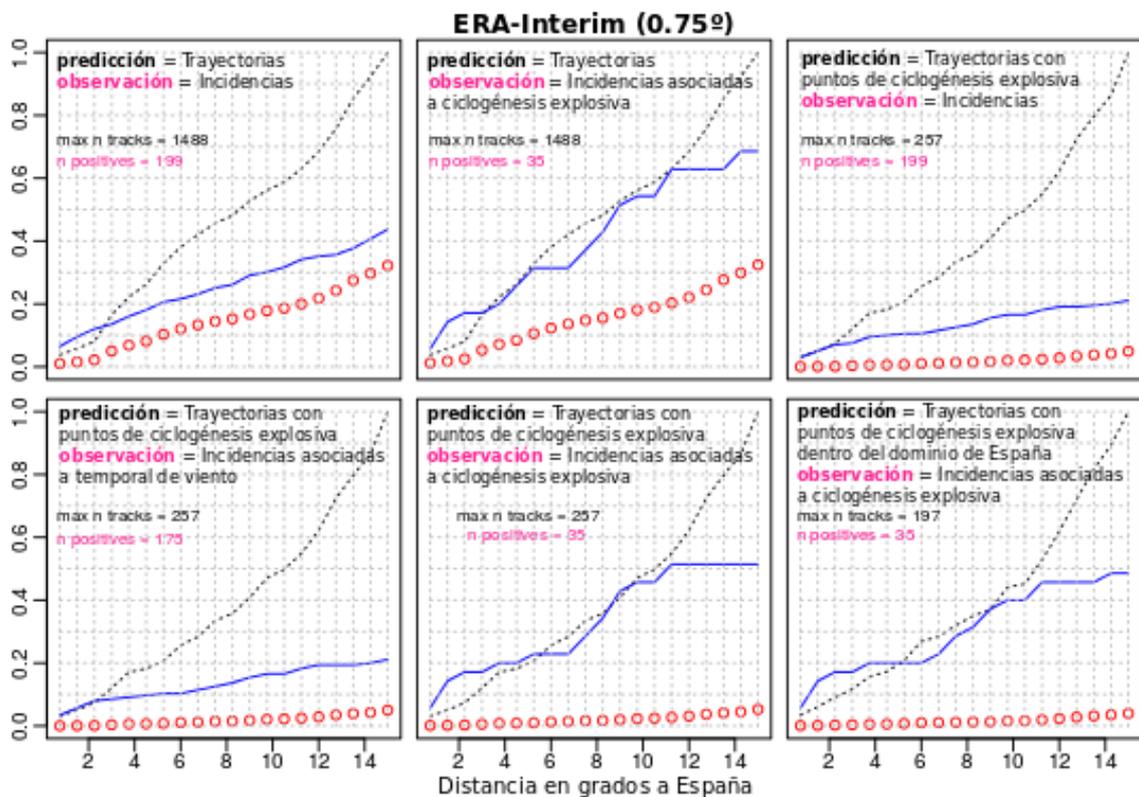


Figura 14: Tasa de aciertos (TPR, línea azul) y tasa de falsas alarmas (FAR, puntos rojos) obtenidos al incrementar el dominio geográfico determinado por la distancia a la España peninsular y los archipiélagos. La línea discontinua negra indica la tasa de trayectorias identificadas por el algoritmo sobre el total (max n tracks) que corresponde al mayor dominio, a una distancia de 15° a España.

La Figura 14 muestra como varía la tasa de aciertos y de falsas alarmas al incrementar la “Cuenca de afección” considerando diferentes predicciones y observaciones. En primer lugar, se observa como considerando como predicción aquellas trayectorias con puntos de ciclogénesis explosiva se reduce sensiblemente la tasa de falsas alarmas, mientras que en todos los casos la tasa de aciertos crece al incrementar el dominio, obteniendo los ratios óptimos al considerar como observaciones las incidencias asociadas a ciclogénesis explosivas y como predicciones las trayectorias con puntos de ciclogénesis explosiva, esté o no dentro del dominio de España. Por lo tanto, ampliar el dominio a una distancia de 12°-15° de la Península Ibérica permite incrementar la tasa de aciertos de forma significativa, identificando casi todos los eventos con ciclogénesis explosivas y parte de los temporales de viento, sin un gran incremento de las falsas alarmas. Por lo tanto, la distancia óptima a considerar como “Cuenca de afección” de la Península Ibérica se sitúa entorno a esos 12°-15° de la Península, y será la considerada para establecer la frecuencia de eventos que afectan a la Península Ibérica proyectada por los modelos globales del CMIP5 reflejados en la Tabla 2 y los posibles cambios en dicha frecuencia.

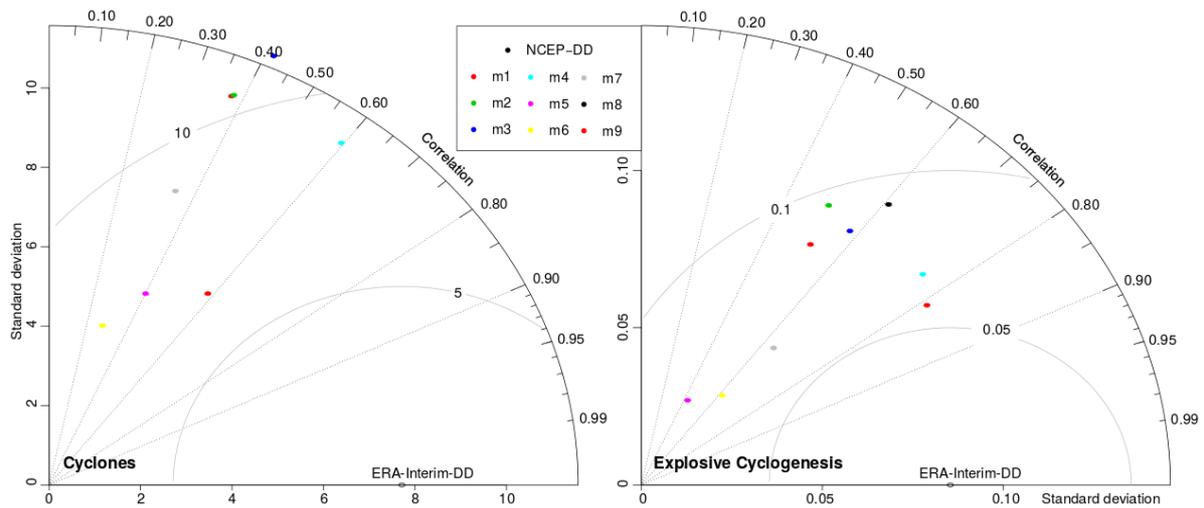


Figura 15: Diagramas de Taylor para los patrones espacial de ocurrencia de ciclones (izquierda) y ciclogénesis explosivas (derecha) en el Atlántico Norte dados por los reanálisis y los modelos globales del CMIP5 en el experimento histórico, considerando ERA-Interim como referencia.

4.6. Escenarios de Frecuencia de Ciclones

Para la obtención de los escenarios de cambio climático de la frecuencia de ciclones y ciclogénesis explosivas en el Atlántico Norte consideraremos los modelos globales del CMIP5 reflejados en la Tabla 2 para los escenarios histórico, rcp4.5 y rcp8.5, y los periodos 1971-2000, 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100.

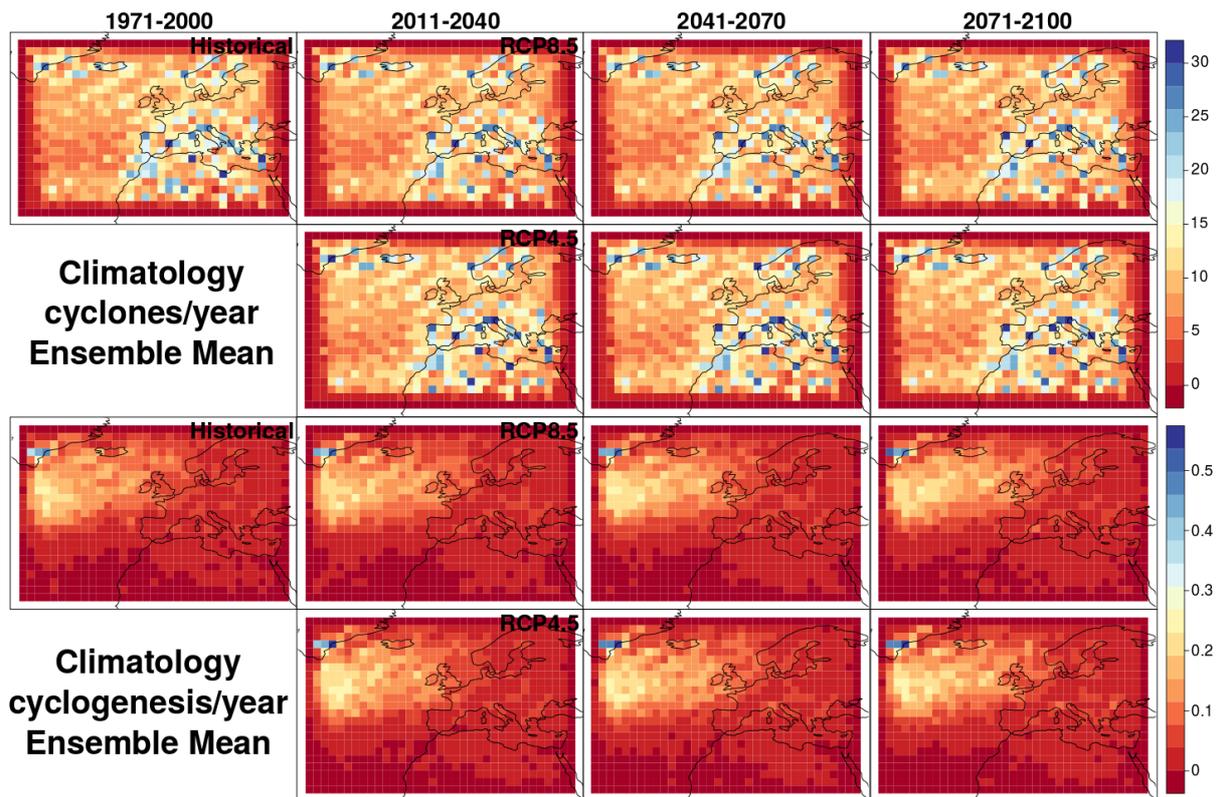


Figura 16: Climatologías histórica y futuras de ocurrencia de ciclones y ciclogénesis explosivas en el Atlántico Norte proyectadas por los modelos del CMIP5 para los tres periodos futuros.

En primer lugar, se evalúa la capacidad de los modelos para reproducir el patrón espacial y las frecuencias anuales de ciclones y ciclogénesis explosivas en el Atlántico Norte. Para ello, el diagrama de Taylor enfrenta los patrones espaciales “observado” (ERA-Interim) y proyectados por los modelos, y expresa los resultados en términos de la correlación, la variabilidad y el erro cuadrático medio. La Figura 15 muestra los

resultados para la frecuencia de ciclones (izquierda) y ciclogénesis explosivas (derecha). Por un lado, en ambos casos existe una gran disension en la variabilidad espacial reflejada por los modelos y el error para casi todos los modelos es del mismo orden que la desviación estándar. Por otro lado, en el caso de los ciclones la correlación oscila entre 0.2 y 0.6, mientras que para las ciclogénesis explosivas la correlación se incrementa, oscilando entre 0.4 y 0.8, lo cual refleja una mayor coherencia entre los modelos en este caso.

Este hecho se refleja también en la Figura 16 que muestra las climatologías simuladas por los modelos para los diferentes periodos y escenarios. En dicha figura se aprecia claramente como se reproduce con mayor claridad el patrón observado para el caso de la ciclogénesis explosiva que en el caso de los ciclones, siendo éste patrón más ruidoso, y que en ambos casos se subestima significativamente el número de eventos por año. De la Figura 16 se desprende que no se proyecta para ningún periodo y escenario un cambio significativo en la frecuencia de eventos en el Atlántico Norte. Este hecho se reflejan con mayor claridad en las Figuras 17 y 18 que muestran los cambios relativos al periodo histórico (delta) y la razón señal-ruido (SNR) de los tres periodos futuros 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100.

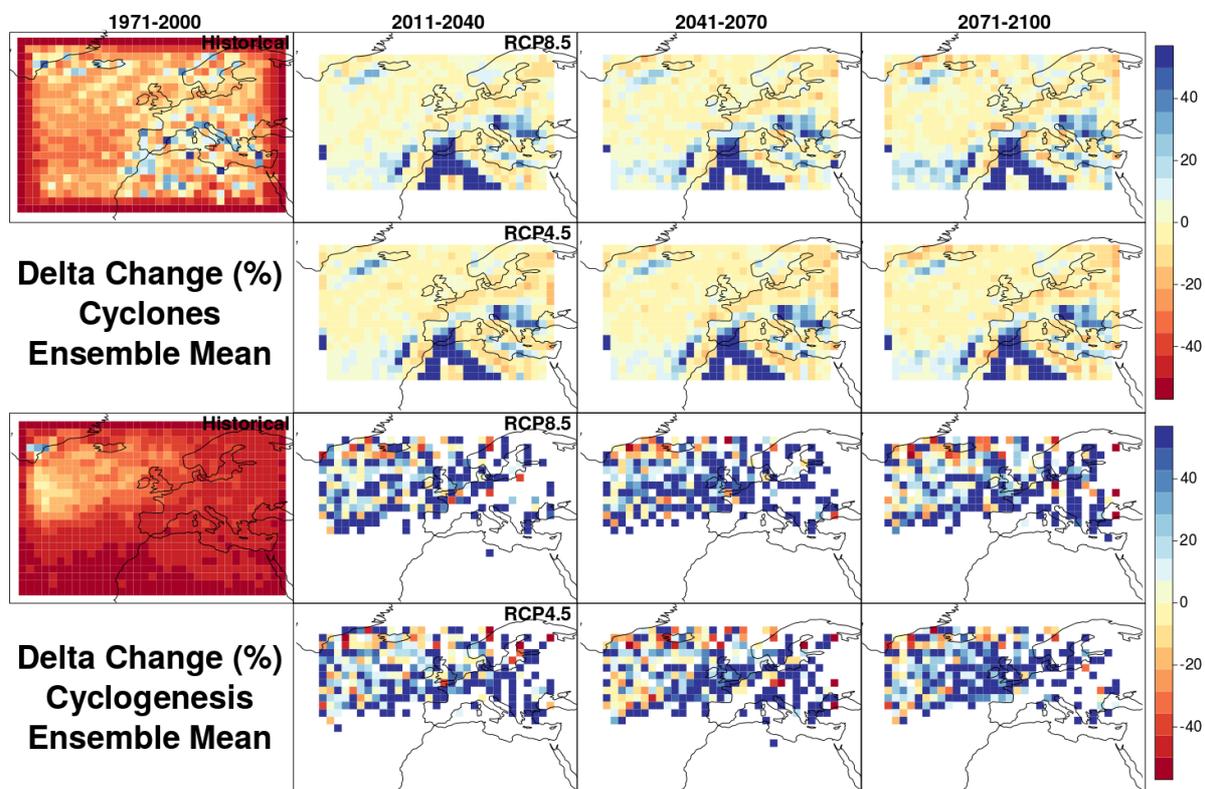


Figura 17: Cambio futuro relativo al periodo histórico proyectadas por los modelos del CMIP5 en el Atlántico Norte para los tres periodos futuros.

Notar que al aplicarlo a la señal de cambio, el SNR puede ser interpretado en términos de la coherencia de los modelos en el signo del cambio (p.e. ver el IPCC-AR4). Suponiendo una distribución Gaussiana para el ensemble, el SNR se asocia con los siguientes porcentajes de coherencia: 0.5 \rightarrow 70%; 1 \rightarrow 85%; 2 \rightarrow 97.5%; $>3 \rightarrow$ 99.5%.

En ambas figuras se aprecia que el cambio proyectado es nulo en casi todo el dominio en el caso de los ciclones y con poca coherencia de los modelos en el signo del cambio. En el caso de la ciclogénesis explosiva, si bien se proyectan cambios superiores al 40%, no existe apenas coherencia entre los modelos, salvo en puntos aislados. En base a

ambas figuras, se concluye que no se espera un cambio significativo en la frecuencia de la ocurrencia de ciclones y/o ciclogénesis explosivas en el dominio de interés.

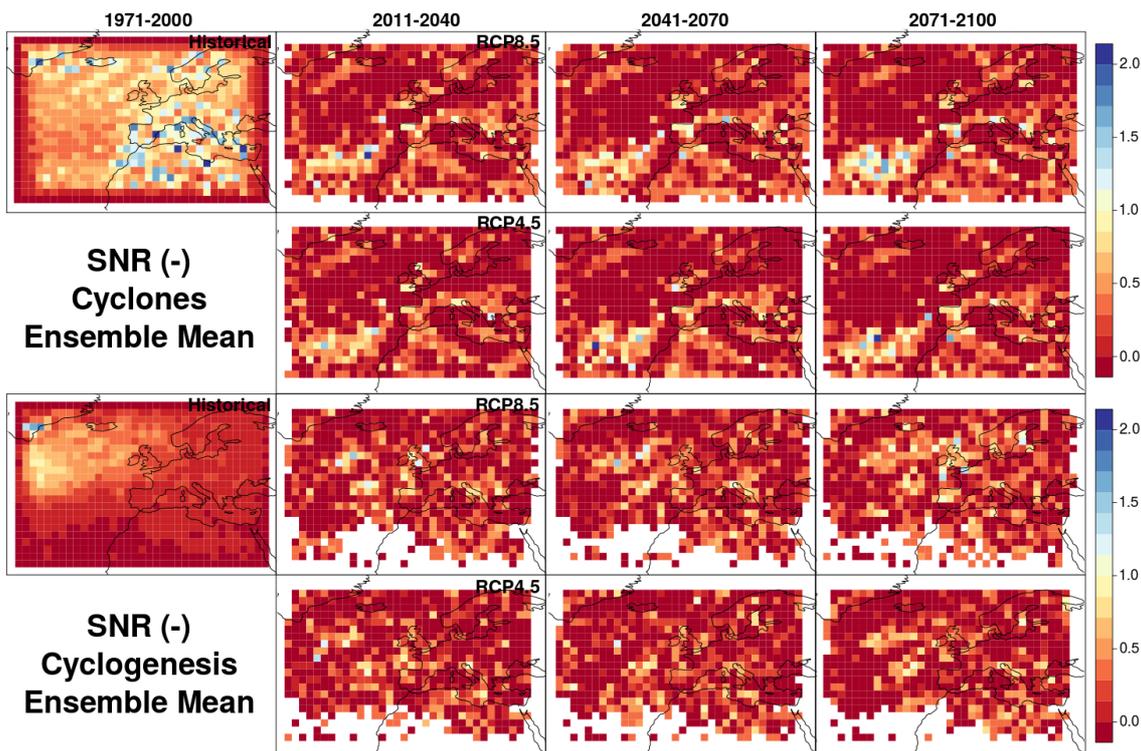


Figura 17: Razón entre la señal (media) y el ruido (desviación estándar) de las señales de cambio proyectadas por los modelos del CMIP5 en el Atlántico Norte para los tres periodos futuros.

Finalmente, considerando el dominio completo y el dado por la “Cuenca de afección” de la Península Ibérica establecida en la Sección 4.5 podemos evaluar para cada modelo el número de trayectorias al año con ciclogénesis explosiva que afecta a la Península Ibérica y analizar cambios o tendencias en esa cantidad. La figura 18 muestra las series temporales de cada modelo, la media del ensemble y los dos reanálisis considerados.

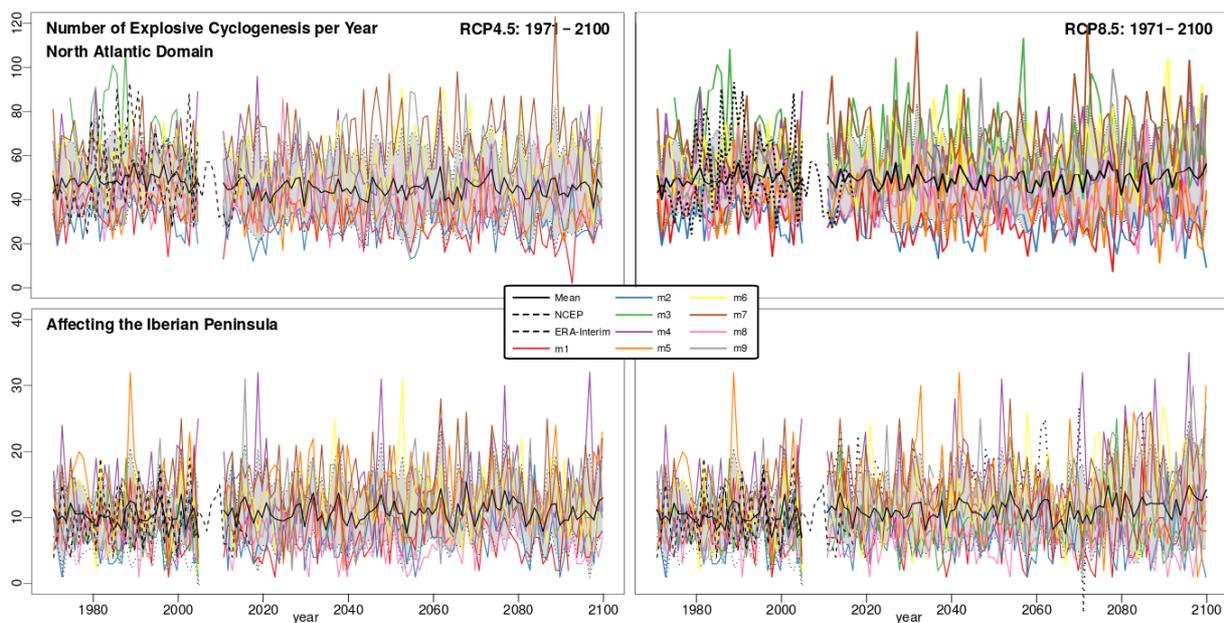


Figura 18: Número de trayectorias por año con ciclogénesis explosivas ocurridas en el Atlántico Norte (arriba) y en la “Cuenca de afección” de la Península Ibérica (debajo) para los escenarios RCP4.5 (izquierda) y RCP8.5 (derecha) proyectadas por los modelos del CMIP5 para el siglo 21.

En el primer caso, para todo el dominio, en ambos escenarios se aprecia una gran variabilidad entre los modelos, con ambos reanálisis siendo englobados en el ensemble como si de otro miembro se tratase. Sin embargo, al considerar el subdominio definido en base a su efecto sobre la Península Ibérica, esta variabilidad disminuye, por un lado, y se observa cierta tendencia positiva del multi-modelo para el escenario RCP8.5. Dichas tendencias se reflejan para diferentes periodos en la Tabla 5, siendo sólo significativas al 95% de confianza las tendencias positivas del escenario RCP8.5 al considerar el periodo completo (2011-2100) o el periodo final (2071-2100).

Experimento	2011-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100
RCP4.5	0.004974	-0.01079	0.02058	-0.05175
RCP8.5	0.01662*	-0.03085	-0.05507	0.07467*

Tabla 5: Tendencias del número de trayectorias por año con ciclogénesis explosivas ocurridas en la “Cuenca de afección” de la Península Ibérica para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 proyectadas por los modelos del CMIP5. El asterisco (*) indica que la tendencia es significativa al 95%.

Extendiendo el análisis de tendencias a otras “Cuencas de afección” se observa en algunos casos que bajo el escenario RCP4.5 la tendencia negativa resulta significativa en algunos periodos, reforzando las conclusiones obtenidas a lo largo del presente estudio respecto a que no se proyecta ningún cambio, u oscila entorno al 0, en la frecuencia de eventos extremos que afecten a la Península Ibérica a lo largo del próximo siglo.

5. Conclusiones

Este proyecto se ha centrado en el estudio de proyecciones futuras de cambio climático para vientos extremos en la Península Ibérica desde el punto de vista de su incidencia en la siniestrabilidad y cuantía de daños causados por este tipo de eventos. Para ello se han considerado las proyecciones globales y regionales de viento existentes y se han aplicado dos aproximaciones complementarias para el estudio de extremos: 1) valores de retorno y frecuencias de días con viento superior a un umbral extremo dado (e.g. 80, 100 y 120 km/h); 2) frecuencia de configuraciones atmosféricas de peligro de vientos extremos (e.g. ciclogénesis explosivas). En este último caso, la caracterización de configuraciones de peligro se ha llevado a cabo teniendo en cuenta las fechas de siniestros con daños materiales por eventos de viento extremo registrados en la base de datos del Consorcio de Compensación de Seguros (CCS). En particular, se han considerado las proyecciones dadas por los modelos globales del CMIP5 (correspondientes al 5ª informe del IPCC), así como los modelos regionales de la iniciativa Euro-CORDEX (con aproximadamente 10 km de resolución espacial) anidados a estos modelos globales. Se han utilizado los datos de un escenario histórico (*historical*, período 1971-2000), y dos escenarios futuros de emisiones medias (RCP4.5) y altas (RCP8.5), analizando los periodos cercano (2011-2040), medio (2041-2070) y lejano (2071-2100).

En lo que respecta a los escenarios regionales dados por Euro-CORDEX, en líneas generales no se proyectan cambios significativos en los vientos extremos sobre la Península Ibérica, salvo un leve descenso del valor de retorno a 50 años en el noroeste peninsular en verano a medio (2041-2070) y largo plazo (2071-2100). Del mismo modo, y en concordancia con estudios previos, se proyecta un progresivo descenso en toda la Península Ibérica a lo largo del siglo 21 en el número de días con vientos de intensidad media (~70 km/h) y un leve aumento de los días con vientos intensos (~90 km/h) en la mitad norte, principalmente, con la excepción de la costa del Mar Cantábrico.

Para el análisis de los patrones atmosféricos de riesgo se han abordado diferentes aproximaciones:

1) En primer lugar, se han distribuido los eventos y costes recogidos por el Consorcio de Compensación de Seguros entre los tipos de tiempo definidos aplicando tres tipos diferentes de algoritmos de agrupación. A pesar de localizar cierta incidencia en los tipos de tiempo Puramente Anticiclónico y Ciclónico Direccional del Noroeste de la clasificación de Lamb, no se proyecta en el futuro ningún cambio significativo en la frecuencia de estos patrones de circulación.

2) En segundo lugar, se ha implementado un algoritmo de detección de ciclones basado en variables sinópticas (slp, vorticidad, etc.), el cual se distribuye públicamente a través del repositorio de GitHub [cyclonTrack](#), y se ha aplicado tanto a dos reanálisis, ERA-Interim y NCEP/NCAR reanalysis 1, como a los modelos globales del CMIP5. Por un lado, el algoritmo reproduce las regiones de mayor incidencia de ciclones y ciclogénesis explosivas en el Atlántico Norte reflejadas en la literatura. Por otro lado, los modelos globales no reproducen adecuadamente los patrones espaciales de frecuencia de ciclones y/o ciclogénesis explosivas, recogiendo mejor el de éstas últimas, y tienden a subestimar su ocurrencia. Finalmente, al aplicar el algoritmo a los escenarios futuros no se encuentran cambios estadísticamente significativos en la frecuencia de ocurrencia de ciclones y/o ciclogénesis explosivas al existir discrepancias en el signo del cambio por parte de los modelos globales.

3) Finalmente, se ha implementado un algoritmo de seguimiento de ciclones basado en los eventos identificados por el algoritmo de detección de ciclones, el cual se distribuye públicamente a través del repositorio de GitHub [cyclonTrack](#), y se ha aplicado tanto a dos reanálisis, ERA-Interim y NCEP/NCAR reanalysis 1, como a los modelos globales del CMIP5. Por un lado, se evaluó el algoritmo considerando diferentes eventos cuyas trayectorias han sido extensamente descritas en la literatura, reproduciendo éstas con el algoritmo implementado. Por otro lado, cruzando los datos de eventos y costes registrados por el Consorcio de Compensación de Seguros con las trayectorias identificadas por el algoritmo se ha identificado la “Cuenca de afección” de la Península Ibérica, definida como el dominio geográfico en el cual se generan las trayectorias que dan lugar a un evento de ciclogénesis que afecta a la Península Ibérica. Finalmente, se aplicó el algoritmo a los modelos globales del CMIP5 obteniendo el número de eventos por año que afectan a la Península Ibérica a lo largo del siglo 21. En el caso del escenario RCP4.5 no se aprecia ningún cambio significativo en el número de eventos respecto al periodo histórico, mientras que para el escenario RCP8.5 sí se aprecia un leve incremento en el número de eventos a escala global en el siglo 21, aunque éste incremento se concentra principalmente en el último tercio del siglo, 2071-2100.

Como conclusión general del análisis de patrones atmosféricos de riesgo, en ninguna de las aproximaciones se ha encontrado un cambio significativo en los patrones de frecuencia ni en la incidencia de ciclones y/o ciclogénesis explosivas en la Península Ibérica a lo largo del siglo 21 con la excepción del leve crecimiento proyectado para finales de siglo en el escenario RCP8.5.

En el marco del desarrollo de este proyecto se ha publicado un artículo científico (Rasilla et al. 2018), se ha desarrollado un Trabajo Fin de Máster (Iparraguirre I. 2018) y una herramienta para la detección y seguimiento de ciclones, [cyclonTrack](#), distribuida públicamente a través del repositorio GitHub del Grupo de Meteorología de Santander (<https://github.com/SantanderMetGroup>).

El uso de datos públicamente distribuidos, así como el desarrollo y uso de herramientas y software de acceso libre, como R, aseguran la reproducibilidad de los resultados presentados en este proyecto y su extensión a otras regiones, otros análisis, etc.

7. Referencias

Azorin-Molina C, Guijarro J-A, McVicar T R, Vicente-Serrano S M, Chen D, Jerez S and Espírito-Santo F (2016), Trends of daily peak wind gusts in Spain and Portugal, 1961–2014, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, doi:10.1002/2015JD024485.

Azorin-Molina C, Vicente-Serrano S M, McVicar T R, Jerez S, Sanchez-Lorenzo A, López-Moreno J I, Revuelto J, Trigo R M, Lopez-Bustins J A and Espirito-Santo F (2014), Homogenization and assessment of observed near-surface wind speed trends over Spain and Portugal, 1961–2011, *J. Clim.*, 27(10), 3692-3712, doi:10.1175/JCLI-D-13-00652.1.

Bedia J, Iturbide M, Baño-Medina J, Herrera S, Manzanas R and Gutiérrez J M (2017), *downscaleR: An R Package for Statistical Downscaling*. URL: <http://github.com/SantanderMetGroup/downscaleR/wiki>. [R package version 3.0-2. Accessed: 23-08-2018].

Bedia J, Herrera S and Iturbide M (2018a), *loaderR: The generic data loading package of the climate4R Bundle*. URL: <https://github.com/SantanderMetGroup/loaderR/wiki>. [R package version 1.4.6. Accessed:23-08-2018].

Bedia J, Iturbide M, Herrera S and Baño-Medina J (2018b), *transformerR: An R package for climate data manipulation and transformation*. URL: <http://github.com/SantanderMetGroup/transformerR/wiki>. [R package version 1.4.4. Accessed: 23-08-2018].

Brands S, Herrera S and Gutiérrez J M (2014), Is Eurasian snow cover in October a reliable statistical predictor for the wintertime climate on the Iberian Peninsula?. *Int. J. Climatol.*, 34: 1615-1627. doi:10.1002/joc.3788

Bromirski P D and Cayan D R (2015), Wave power variability and trends across the North Atlantic influenced by decadal climate patterns. *J. Geophys. Res. Oceans*, 120, no. 5, 3419-3443; doi: 10.1002/2014JC010440.

Chen Q and Bromwich D H (1999), An Equivalent Isobaric Geopotential Height and Its Application to Synoptic Analysis and a Generalized ω Equation in σ Coordinates, *Monthly Weather Review*, 127 (2), 145-172.

Christensen J H et al. (2007), *Regional Climate Projections*. In: *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, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, Tignor M and Miller H L (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Coles S (2001), *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Value*. Springer-Verlag: berlin and Heidelberg, Germany.

Collins M, Knutti R J, Arblaster J L D, Fichet T, Friedlingstein P, Gao X, Gutowski W, Johns T, Krinner G, Shongwe M, Tebaldi C, Weaver A and Wehner M (2013), *Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility*, pages 1029–1136. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA URL http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_Chapter12_FINAL.pdf

Comas- Bru L and McDermott F (2014), Impacts of the EA and SCA patterns on the European twentieth century NAO- winter climate relationship. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140(679), 354–363. <https://doi.org/10.1002/qj.2158>

Dawkins L C, Stephenson D B, Lockwood J F and Maisey P E (2016), The 21st century decline in damaging European windstorms, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16 (8), 1999-2007, DOI: 10.5194/nhess-16-1999-2016

Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, Andrae U, Balmaseda M A, Balsamo G, Bauer P, Bechtold P, Beljaars A C, van de Berg L, Bidlot J, Bormann N, Delsol C, Dragani R, Fuentes M, Geer A J, Haimberger L, Healy S B, Hersbach H, Hólm E V, Isaksen I, Kållberg P, Köhler M, Matricardi M, McNally A P, Monge- Sanz B M, Morcrette J, Park B, Peubey C, de Rosnay P, Tavolato C, Thépaut J and Vitart F (2011), The ERA- Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 137: 553-597. doi:10.1002/qj.828

Déqué M, Somot S, Sanchez-Gomez E, Goodess C M, Jacob D, Lenderink G and Christensen O B (2012), The spread amongst ENSEMBLES regional scenarios: regional climate models, driving general circulation models and interannual variability. *Climate Dynamics*, 38 (5-6): 951-964.

Donat M G, Leckebusch G C, Pinto J G and Ulbrich U (2010), Examination of wind storms over central europe with respect to circulation weather types and nao phases. *International Journal of Climatology*, 30(9): 1289–1300 URL <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.1982>

Donat M G, Leckebusch G C, Wild S and Ulbrich U (2011), Future changes in European winter storm losses and extreme wind speeds inferred from GCM and RCM multi-model simulations, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11 (5), 1351-1370, doi: 10.5194/nhess-11-1351-2011

Frías M, Iturbide M, Manzanas R, Bedia J, Fernández J, Herrera S, Cofiño A and Gutiérrez J M (2017), visualizer: Visualizing and communicating uncertainty in seasonal climate prediction. *Environmental Modelling and Software* 99, 101–110.

Gómara I, Rodríguez- Fonseca B, Zurita- Gotor P, Ulbrich S, and Pinto J G (2016), Abrupt transitions in the NAO control of explosive North Atlantic cyclone development. *Climate Dynamics*, 47(9–10), 3091–3111. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3015-9>

Grell G A, Dudhia J and Stauffer D R (1994), A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR Technical Note (398+STR), doi:10.5065/D60Z716B, <http://opensky.ucar.edu/islandora/object/technotes:170>

Gutiérrez J M, Maraun D, Widmann M, Huth R, Hertig E, Benestad R, Roessler O, Wibig J, Wilcke R, Kotlarski S, San Martín D, Herrera S, Bedia J, Casanueva A, Manzanas R, Iturbide M, Vrac M, Dubrovsky M, Ribalaygua J, Pórtolés J, Rättyö O, Räisänen J, Hingray B, Raynaud D, Casado M J, Ramos P, Zerenner T, Turco M, Bosshard T, Štěpánek P, Bartholy J, Pongracz R, Keller D E, Fischer A M, Cardoso R M, Soares P M M, Czernecki B and Pagé C (2018), An intercomparison of a large ensemble of statistical downscaling methods over Europe: Results from the VALUE perfect predictor cross- validation experiment. *International Journal of Climatology*. 1-36. <https://doi.org/10.1002/joc.5462>

Gutierrez J M, Cofino A, Cano R and Rodriguez M (2004), Clustering methods for statistical downscaling in short- range weather forecasts. *Monthly Weather Review* 132(9): 2169–2183. DOI: 10.1175/1520- 0493(2004)132<2169:CMFSDI>2.0.CO;2

Gutierrez J M, Cano R, Cofino A S and Sordo C (2005), Analysis and downscaling multi- model seasonal forecasts in Peru using self- organizing maps. *Tellus A* 57(3): 435–447. DOI: 10.1111/j.1600- 0870.2005.00128.x

Hewitson B and Crane R (2002), Self- organizing maps: applications to synoptic climatology. *Climate Research* 22(1): 13–26. DOI: 10.3354/cr022013

IPCC-AR4: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.) (2007), Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>.

Iturbide M, Bedia J, Herrera S, Baño-Medina J, Fernández J, Frías M D, Manzanar R, San-Martín D, Cimadevilla-Alvarez E, Cofiño A S and Gutiérrez J M (2018), climate4R: An R-based framework for Climate Data Access, Post-processing and Bias Correction. Submitted to *Environmental Modelling and Software*.

Jacob D et al (2014), EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14(2):563-578.

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Gandin L, Iredell M, Saha S, White G, Woollen J, Zhu Y, Chelliah M, Ebisuzaki W, Higgins W, Janowiak J, Mo K C, Ropelewski C, Wang J, Leetmaa A, Reynolds R, Jenne R and D Joseph (1996), The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437–472, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRNP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRNP>2.0.CO;2)

Klein Tank A M G et al (2002), Daily dataset of 20th-Century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *International Journal of Climatology*, 22, 1441-153.

Lamb H (1972), *British Isles Weather Types and a Register of Daily Sequences of Circulation Patterns, 1861–1971*. Geophysical Memoir, Vol. 116. HMSO: London.

Le Cozannet G, Lecacheux S, Delvallée E, Desramaut N, Oliveros C and Pedreros R (2011), Teleconnection pattern influence on sea-wave climate in the Bay of Biscay. *J. Clim.*, 24, 641-652; doi:10.1175/2010JCLI3589.1.

Liberato M, Pinto J, Trigo I and Trigo R (2011), Klaus - an exceptional winter storm over northern iberia and southern france. *Weather*, 66:330 – 334

Liberato M L R, Pinto J G, Trigo R M, Ludwig P, Ordóñez P, Yuen D and Trigo I F (2013), Explosive development of winter storm Xynthia over the Southeastern North Atlantic Ocean. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 1:443–470

Liberato M (2014), The 19 january 2013 windstorm over the north atlantic: large-scale dynamics and impacts on iberia. *Weather and Climate Extremes*, 5-6:16 – 28 URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212094714000620>

Maraun D , Widmann M, Gutiérrez J M, Kotlarski S, Chandler R E, Hertig E, Wibig J, Huth R and Wilcke R A (2015), VALUE: A framework to validate downscaling

approaches for climate change studies. *Earth's Future*, 3: 1-14. doi:10.1002/2014EF000259

Martínez-Asensio A, Tsimplis M N, Marcos M, Feng X, Gomis D, Jordà G and Josey S A (2016), Response of the North Atlantic wave climate to atmospheric modes of variability. *Int. J. Climatol.* 36, no. 3, 1210-1225; doi: 10.1002/joc.4415.

Michaelis A C, Willison J, Lackmann G M and Robinson W A (2017), Changes in winter north atlantic extratropical cyclones in high-resolution regional pseudo-global warming simulations. *Journal of Climate*, 30(17):6905–6925

Mölter T, Schindler D, Albrecht A T and Kohnle U (2016), Review on the Projections of Future Storminess over the North Atlantic European Region. *Atmosphere*, 7, 60.

Neu U (2009), Influence of global warming on extratropical storms. Technical report, Swiss Reinsurance Company Ltd URL http://www.sepanso.org/gironde/IMG/pdf/influence_of_extratropical_storms_factsheet.pdf

Nikulin G, Kjellstrom E, Hansson U, Strandberg G and Ullerstig A (2011), Evaluation and future projections of temperature, precipitation and wind extremes over Europe in an ensemble of regional climate simulations. *Tellus*, 63A, 41-55, doi: 10.1111/j.1600-0870.2010.0046.x.

Sander F and Gyakum J R (1980), Synoptic-Dynamic Climatology of the “Bomb”, *Monthly Weather Review*, 108 (10), 1589-1606.

Semmler T, Varghese S, McGrath R, Nolan P, Wang S, Lynch P and O’Dowd C (2008), Regional model simulation of north atlantic cyclones: Present climate and idealized response to increased sea surface temperature. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D2)

Serreze M (1995), Climatological aspects of cyclone development and decay in the arctic. *Atmosphere - Ocean*, 33:1–23

Serreze M, Carse F, Barry R and Rogers J (1997), Icelandic low cyclone activity: Climatological features, linkages with the nao and relationships with recent changes in the northern hemisphere circulation. *Journal of Climate*, 10(3):453–464

Stephens H, Jones S E O and Fox H (2018), Correlations between extreme atmospheric hazards and global teleconnections: Implications for multihazard resilience. *Reviews of Geophysics*, 56, 50–78. <https://doi.org/10.1002/2017RG000567>

Trigo R M, DaCamara C C (2000), Circulation weather types and their influence on the precipitation regime in Portugal. *International Journal of Climatology* 20(13): 1559–1581. DOI: 10.1002/1097-0088(20001115)20:13<1559::AID-JOC555>3.0.CO;2-5

WMO (1987), The measurement of gustiness at routine wind stations: A review, (A.C.M. Beljaars), Instruments and Observing Methods Report No. 31, Geneva.

WMO (2008), Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, World Meteorol. Organ. No. 8, 7th. ed., Geneva, Switzerland.

Zubiante L, McDermott F, Sweeney C and O'Malley M (2017), Spatial variability in winter NAO- wind speed relationships in western Europe linked to concomitant states of the East Atlantic and Scandinavian patterns. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 143(702), 552–562. <https://doi.org/10.1002/qj.2943>