
**Predicción climática del riesgo
de eventos de precipitación intensa
en el Mediterráneo occidental
y de la frecuencia de ciclones
tropicales en el Atlántico
a escala decadal**

**Aida Pintó Biescas
y col.**

Ayudas a la investigación 2010

Investigador Principal

Aida Pintó Biescas

Lda. en Ciencias Ambientales por la Universidad Autónoma de Barcelona y con un master en Meteorología por la Universidad de Barcelona. Actualmente estudiante de doctorado en el Institut Català de les Ciències del Clima (IC3), en el ámbito de la predicción estacional y decadal de eventos extremos con modelos climáticos dinámicos, y bajo la supervisión de Francisco J. Doblas-Reyes

Equipo Investigador

Louis Philippe Caron

Recientemente ha obtenido el doctorado en la Universidad de Québec en Montreal en los temas de modelización y predicción de huracanes y el modelado climático regional. Actualmente es miembro post-doctoral en el departamento de meteorología de la Universidad de Estocolmo (MISU). Su investigación actual se basa principalmente en el estudio de la predicción de la actividad de huracanes a escala decadal

Francisco Javier Doblas-Reyes

Profesor de investigación de la Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats (ICREA) y responsable de la Climate Forecasting Unit de IC3. Doctor en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid. Autor de más de 60 publicaciones científicas y autor líder del próximo informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC)

Renato Vitolo

Profesor honorario de la Willis Research Network en la Universidad de Exeter (UK). Doctor en matemáticas por la Universidad de Groningen, en Holanda. Autor de diversas publicaciones relacionadas con análisis estadísticos del clima y con especial énfasis en la modelización de eventos extremos

Índice

	Página
1. INTRODUCCIÓN	4
2. OBJETIVOS	7
3. MATERIALES Y METODOLOGÍA	7
3.1. Datos	7
3.2. Métodos	8
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	12
4.1. Predicción estacional de precipitación extrema	12
4.1.1. Resultados de las observaciones	12
4.1.2. Resultados del modelo	17
4.1.3. Casos de estudio: Eventos de precipitación extrema en Europa Central Agosto 2002 y 200	18
4.1.4. Verificación de resultados	24
4.2. Predicción decadal de ciclones tropicales	28
5. CONCLUSIONES	30
6. AGRADECIMIENTOS	33
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34
8. ANEXO	36

RESUMEN

Esta investigación pretende ilustrar la capacidad predictiva de diferentes aspectos extremos del clima a escala estacional y decadal. Los sucesos seleccionados son de gran impacto económico. El estudio se centra en dos eventos distintos: los episodios de precipitación extrema sobre la región del Mediterráneo occidental, usando las simulaciones del sistema de predicción DePreSys con simulaciones de 9 miembros para la escala estacional; y la frecuencia de ciclones tropicales en el Atlántico con el sistema de predicción EC-Earth, con el que se han realizado una larga serie de simulaciones de cinco miembros con un horizonte temporal de 10 años. Se muestran dos tipos de resultados: a) una capacidad limitada para predecir eventos de precipitación extrema en regiones específicas a escala estacional, aunque se reproduzcan la mayor parte de las características de los valores observados, y b) la capacidad de predicción de ciertos aspectos ligados a la actividad de los ciclones tropicales en el Atlántico con un horizonte temporal de hasta diez años. Estos resultados sugieren que existe información climática útil para la industria del seguro y que mejorando los sistemas de predicción actuales y la interacción con los usuarios, se puede llegar a ofrecer información climática útil de tipo predictivo en el marco de los servicios climáticos que se desarrollan en la actualidad.

Palabras clave: clima, extremo, precipitación, ciclón, predicción, modelo.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de información climática probabilista fiable es de gran relevancia para la sociedad y, con la interacción adecuada con los actores socioeconómicos relevantes, posee un gran impacto económico potencial. Según los escenarios previstos por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC en inglés), se espera que el cambio climático conduzca a final de siglo a cambios en la frecuencia y la intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos, como ciclones tropicales y precipitaciones intensas. Sin embargo, no existe información disponible sobre en qué momento estos cambios comenzarán a tener un impacto apreciable.

La distinción entre la variabilidad interna y los cambios climáticos de origen antropogénico es un aspecto de la investigación sobre el clima que ha comenzado a ser explorado por las predicciones climáticas. La mejora de la previsión de los sucesos extremos en los próximos años y, en particular, la predicción del impacto del cambio climático en un futuro cercano, pasa por el análisis exhaustivo de las predicciones estacionales y decadales que se vienen realizando en varios institutos de investigación alrededor del mundo, entre los que se cuenta IC3.

La predicción estacional tiene como objetivo de la predicción de anomalías climáticas con algunos meses de

antelación. Esta es un área que ya lleva tiempo estudiándose pero que está en auge en los últimos años debido a su influencia directa en una gran variedad de aplicaciones en diferentes sectores socio-económicos como son la administración de energía, la planificación de los recursos agrícolas o la elaboración de planes de salud y turismo. Asimismo también está relacionado con la planificación de riesgos climáticos y temas de seguridad como el abastecimiento de alimentos y la administración de los recursos hídricos. Los beneficios económicos potenciales de esas predicciones están dirigidos a la planificación de futuro en todos aquellos campos que, en alguna medida, dependen del clima, siendo de especial interés dentro del contexto de adaptación al cambio climático. El ciclo de El Niño-Oscilación del Sur es el fenómeno que proporciona mayor predictibilidad a esta escala, no sólo en el Pacífico tropical donde se produce, sino también en otras zonas muy distantes. Además de El Niño, hay otras causas de la variabilidad climática estacional, como las anomalías de temperatura del agua del mar en las zonas tropicales de los océanos Índico y Atlántico, que condicionan el clima en las regiones continentales vecinas. También otros factores, como la cobertura de nieve y el contenido de humedad del suelo, pueden tener también influencia en las variaciones del clima a escala estacional [1].

Las predicciones decadales por otro lado, son un nuevo desafío para la investigación sobre el cambio climático. Estas empezaron a desarrollarse sólo hace unos años y establecen un puente entre las predicciones estacionales y proyecciones de cambio climático a largo plazo, ya que se centra en las escalas de tiempo de varios años a unas pocas décadas [2, 1]. Esa escala de tiempo incluye elementos tanto de la variabilidad natural interna como del cambio antropogénico [3]. Hasta el momento, y debido a la novedad de este tipo de predicciones, no existen análisis disponibles de eventos extremos a largo plazo como son las estimaciones de la variación de la frecuencia de ciclones tropicales para la próxima década, por lo que el estudio realizado es completamente innovador. Es importante recordar que, aunque estimaciones de este tipo de información podrían obtenerse de las simulaciones de cambio climático a largo plazo disponibles, esas simulaciones no poseen información sobre la evolución reciente del sistema climático, como la aceleración de la desaparición del hielo ártico en verano o el calentamiento del Atlántico norte, que sin duda son de relevancia para poder predecir el clima en un futuro más cercano.

Actualmente hay dos tipos de métodos para elaborar predicciones tanto de tipo estacional como decadal: Los métodos estadísticos que tienen en cuenta relaciones empíricas entre los factores tales como la temperatura del agua del mar, humedad del suelo etc. y las anomalías de las variables climáticas. Y los métodos dinámicos que utilizan modelos acoplados de circulación general océano-atmósfera para generar una predicción por conjuntos basada, fundamentalmente, en diferentes valores iniciales de la temperatura del agua del mar. Aún así el uso de ambos métodos es típicamente usado ya que se necesita un pro-

ceso estadístico de tratamiento de los datos obtenidos con las predicciones dinámicas como es el caso del presente estudio.

Ha habido intentos para predecir las variaciones interanuales del clima mediante modelos empíricos que tengan en cuenta los cambios en las condiciones de contorno, que son una descripción estadística del estado medio y de la variabilidad de un sistema, como por ejemplo, la composición atmosférica y la radiación solar [4]. Como alternativa, la predicción dinámica explora la capacidad de los modelos climáticos utilizados por los expertos del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) para predecir los cambios climáticos regionales en un futuro próximo aprovechando la información de las condiciones iniciales así como de los cambios en las condiciones de contorno. Este enfoque tiene como objetivo aprovechar la previsibilidad de la variabilidad natural del clima para hacer predicciones [5]. Sin embargo, la cuestión fundamental es hasta cuántos años vista se puede predecir el clima y con que fiabilidad. Relacionado con esto está la cuestión de en que medida un mejor conocimiento de las condiciones iniciales del sistema climático contribuye a la calidad de las previsiones. Poco se sabe sobre su contribución en la bondad de las predicciones más allá del primer año de las previsiones, por ejemplo; como varían con las distintas variables (temperatura, precipitación, vientos de bajo nivel, etc.), las regiones donde se este haciendo la predicción, si depende de la estación del año en que el pronóstico se ha iniciado o la calidad requerida de las condiciones iniciales del océano, la atmósfera, el suelo y el hielo ártico para tener un impacto positivo en la calidad del pronóstico. En otras palabras, no está claro cómo los actuales sistemas de predicción climática pierden información según las condiciones iniciales en los primeros años de la previsión, sobre todo porque la reducción de la información depende de qué aspecto del clima se considera, como la fase del El Niño-Oscilación del sur (ENSO), la temperatura media global, las características del monzón, etc. La importancia relativa de las condiciones iniciales en la predicción del clima varía con la escala temporal, en las predicciones estacionales estas juegan un papel muy importante, pero se ha asumido como una función continua que disminuye con el tiempo, para convertirse en despreciable después de varias décadas [6]. Trabajos previos [1, 7] han demostrado la evidencia de que el estado inicial del océano puede influir en los pronósticos climáticos desde pocos años, a una década o de incluso más largo plazo.

El proceso de inicialización de los sistemas de predicción ofrece la posibilidad de predecir la variabilidad interna, además del cambio climático forzado desde el exterior. Hay varias estrategias para la inicialización de las predicciones. En las decadales dos métodos distintos pueden usarse: El método de la inicialización anómala donde se usa la climatología del modelo y las anomalías observadas, las cuales son introducidas en el modelo para evitar que este derive [2], al contrario del método de la inicialización completa, donde se usa la climatología y las

anomalías de las observaciones. La siguiente figura ilustra los dos enfoques.

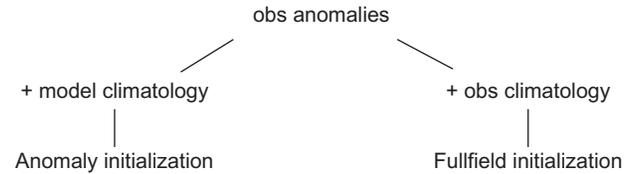


Figura 1. Métodos de inicialización: esquema de la anomalía de inicialización en el lado izquierdo se utiliza la climatología es la dada por el modelo. La inicialización completa del esquema del lado derecho, se utiliza la climatología dada por las observaciones.

Recientemente se ha publicado un gran número de estudios sobre el análisis de los fenómenos climáticos extremos usando diferentes métodos estadísticos. Algunos autores que han trabajado en la predicción del cambio climático a grandes escalas de tiempo incluyen, [8], quien observó la evolución de la intensidad de las precipitaciones en Italia; [9] que estudió las tendencias históricas en las precipitaciones durante 24 horas en el Reino Unido; [10] que analizaron la intensidad de la precipitación diaria, la probabilidad de los días de lluvia, y los parámetros de una distribución gamma adaptada a la precipitación observada y simulada mediante un modelo climático global (GCM) y sugirieron aumentos de fuertes precipitaciones en las zonas terrestres con precipitaciones de mayor magnitud que la media. En un estudio más reciente, utilizó un valor generalizado extremo (GEV) de distribución para analizar los períodos de retorno de la precipitación acumulada en 24 h en una serie de modelos climáticos regionales (RCM) [11].

Para la adaptación al cambio climático, la mayoría de las evaluaciones se basan en información obtenida a partir de la reducción de escala de modelos de circulación general. La calidad (en términos de fiabilidad) de estos resultados depende tanto de los GCM, como de los métodos de reducción de escala. Además de los RCM, que resuelven ecuaciones que representan los procesos relevantes conocidos, los modelos empírico-estadísticos pueden reproducir aspectos no conocidos, pero que sin embargo, están incorporados en los datos observados [12]. Hay un gran número de estudios que han tratado la precipitación extrema sobre la base de un modelo de regionalización estadística por períodos que van desde meses hasta años usando ambos modelos GCM y RCM [13, 14, 15], pero debido a la novedad de la predicción decadal, aún no hay análisis disponibles de las precipitaciones extremas ni de los ciclones tropicales referentes a las predicciones decadales que utilizan estos métodos.

Así pues el estudio de extremos es gran importancia para monitorizar el cambio, ya que los cambios en las colas de las distribuciones tienden a ser más “detectables” que los cambios en las medias a largo plazo. Por otra parte, la importancia social de los extremos climáticos está fuera duda. Sin embargo, el análisis de la variabilidad

del clima reflejado en la frecuencia de eventos extremos es algo que como se ha mencionado ha venido limitándose a estudios nacionales y locales [16]. Las estimaciones de los riesgos socioeconómicos asociados al clima con un horizonte temporal de unos meses hasta diez años son necesarias para la planificación a largo plazo de las distintas acciones a llevarse a cabo. En horizontes temporales más largos, como los 50 años con los que típicamente se ofrece la información relativa al cambio climático de origen antropogénico, la información es de uso limitado porque predominan otras fuentes de incertidumbre, lo que reduce la eficacia de los métodos de adaptación al cambio. La posibilidad de una estimación fiable de la probabilidad de futuros riesgos de origen climático requiere de una respuesta por parte de la comunidad climática de manera que, la información climática de tipo predictivo pueda ser útil para la sociedad.

La necesidad de una respuesta a esta pregunta surge en un momento de cambio global en las características de las fuentes de riesgo relacionadas con el clima. Existe un consenso cada vez más amplio en el hecho de que el clima está cambiando más de lo que se puede explicar con las características de la variabilidad natural y que, la humanidad es responsable de este cambio. Existen evidencias científicas de que este cambio será inevitable en las próximas décadas [17], independientemente de las estrategias que se adopten para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Además un tema recurrente en la literatura de evaluación de riesgos es que los aumentos en los eventos extremos debido al cambio climático se están produciendo en combinación con el aumento alarmante de la vulnerabilidad, y que por lo tanto, los riesgos adicionales debidos al cambio climático no deben ser analizados y tratados de forma aislada sino integrados en programas más amplios para reducir el riesgo de los desastres naturales [18]. Es en este sentido donde aparecen los llamados "*teachable moments*", como una nueva estrategia de comunicación del cambio climático mediante el uso de los eventos extremos como señal de alarma de que el clima, conjuntamente con el efecto del hombre sobre él está cambiando y el ser humano es uno de los primeros afectados como se puede derivar de las consecuencias de los eventos extremos que cada vez más se dan con más frecuencia e intensidad [16].

La variabilidad natural del clima y la evolución del cambio climático están interconectadas, de manera que, en una escala temporal de unos meses a varios años, es la combinación de ambos procesos la que permite explicar el incremento del impacto de los eventos que pueden provocar daños extremos, así como en la disponibilidad de agua, la seguridad alimenticia, la salud humana y las infraestructuras socioeconómicas [2]. El cambio climático está añadiendo tensión en aquellos sectores de la sociedad que ya de por sí son vulnerables a los cambios inesperados del clima y a los fenómenos meteorológicos extremos asociados. La adaptación de estos sectores a estos cambios inevitables es crítica para su estabilidad.

Catástrofes naturales como huracanes, inundaciones o sequías pueden causar daños económicos muy importantes. El año 2005 fue el peor en este sentido. En este año las compañías de seguros sufrieron más de cien mil millones de dólares de pérdidas debidas a catástrofes¹. El huracán Katrina en 2005 es considerado como el desastre natural más destructivo y de mayor coste en la historia de EE.UU., con unas pérdidas económicas asociadas estimadas en más de 125 mil millones de dólares, de los que al menos 38 mil serían debidas a costes de la industria del seguro². Otro ejemplo es el del huracán Andrew que produjo pérdidas en 1992 de más de 26 mil millones de dólares. En asociación con estos sucesos extraordinarios algunos autores han notado una tendencia en las pérdidas normalizadas por la inflación, población y riqueza [19].

Asimismo, los eventos relacionados con inundaciones son el riesgo de causa atmosférica más importante en Europa. Podemos distinguir dos realidades diferentes: los desbordamientos masivos de los grandes ríos causados por lluvias abundantes y continuadas o deshielos rápidos y, por otro lado, las avenidas de los ríos mediterráneos debidas a lluvias intensas y torrenciales en escaso intervalo de tiempo; que normalmente se producen en otoño o primavera.

De esta manera, la sensibilidad de la sociedad y la industria a los fenómenos climáticos extremos en un clima que ya está cambiando requiere el acceso a la mejor información disponible sobre los diferentes aspectos que describen la evolución del tiempo y el clima a escala global, regional y local, así como en escalas temporales que van desde varios días hasta una o varias décadas. Igualmente, requiere la comprensión de la manera en que las sociedades y sectores económicos toman decisiones cuando éstas están influidas de alguna manera por el tiempo y el clima, de manera que las predicciones climáticas puedan integrarse de manera eficiente en el proceso. La ciencia de la predicción del clima se encuentra en un estado suficientemente maduro como para permitir explorar los beneficios que las predicciones climáticas pueden aportar. Este es el objetivo de una nueva iniciativa conocida como "*servicios climáticos*" que se encuentra en plena expansión siguiendo su reciente definición en la World Climate Conference³. El Institut Català de Ciències del Clima (IC3) está actualmente desarrollando diversos aspectos de su capacidad para proporcionar un servicio climático, en particular en lo que se refiere a la producción de información climática basada en predicciones probabilistas.

Un servicio climático pretende acelerar el desarrollo de la generación de distintas categorías de información climática, incluida la de tipo predictivo, para poder ser utilizada de manera eficiente por los distintos sectores sensibles a la variabilidad climática. El desarrollo de un servicio climático permite construir puentes con los agen-

¹ <http://www.gccapitalideas.com/2009/12/21/2009-catastrophe-update-global-insured-losses-in-2009/>

² <http://www.fema.gov/hazard/flood/recoverydata/katrina/index.shtml>

³ http://www.wmo.int/wcc3/page_en.php

tes implicados en la investigación sobre los impactos del clima y proporciona la oportunidad de implicar a los sectores socioeconómicos afectados en la elaboración de productos y servicios que respondan a necesidades reales. Esta estrategia requiere de la promoción de formas efectivas de comunicación que permitan integrar la información climática en el proceso de toma de decisiones.

En conclusión el trabajo que aquí se presenta tiene algunas similitudes con los estudios previos de análisis estadístico, que conciernen los fenómenos climáticos extremos, pero en tal caso es innovador, porque evalúa la capacidad de un sistema de pronóstico para producir predicciones dinámicas del clima, en dos tipos de eventos y en distintos horizontes temporales, como son la predicción estacional de la precipitación extrema en el área mediterránea (30 N ° N-55 ° y 10 ° W-40 ° E) ;utilizando los datos más recientes, obtenidos a partir de los datos EObs como base de datos de referencia, y la predicción decadal de la frecuencia de ciclones tropicales en el Atlántico Norte.

2. OBJETIVOS

En este trabajo se pretende **analizar** la capacidad de predicción de los modelos dinámicos a distintos horizontes temporales con el estudio de la evolución de dos tipos de sucesos extremos: la frecuencia de los ciclones tropicales en el Atlántico Norte, de gran incidencia para América Central y el sur de Estados Unidos, como ejemplo de predicción decadal, y los episodios de precipitación intensa en el Mediterráneo occidental como ejemplo de predicción estacional.

Además se pretende **usar** los resultados obtenidos como una herramienta de comunicación de la información predictiva en el marco del desarrollo de un servicio climático con aplicaciones en la industria del seguro.

En base a estos objetivos el equipo de investigación evaluará el potencial de las técnicas de predicción estacional y decadal de estas situaciones con el objetivo de diseñar en un futuro, y en colaboración con MAPFRE, la mejor estrategia de comunicación de la información obtenida en el marco del servicio climático que se está desarrollando en IC3.

Debido a las limitaciones de tiempo y el gran alcance que tiene este proyecto, los análisis del ejemplo de predicción de ciclones tropicales en el Atlántico son aun preliminares. Se continuará trabajando en esta línea y proporcionando nuevos resultados y conclusiones obtenidos.

3. MATERIALES Y METODOLOGÍA

3.1. Datos

Datos del modelo

Este trabajo analiza dos ejemplos de predicción usando modelos climáticos dinámicos. Para la predicción de precipitación extrema se han usado las predicciones estacio-

nales producidas por el Sistema de Predicción del Clima Decadal (DePreSys) del proyecto de la unión Europea ENSEMBLES (<http://www.ensembles-eu.org>), que es el referente internacional actual de estrategias de aproximación probabilística al cambio climático y pretende limitar las incertidumbres en las predicciones de cambio climático mediante integraciones de escenarios de emisión diferentes, modelos globales diferentes, modelos regionales diferentes y técnicas estadísticas de regionalización diferentes, y que proporciona asimismo métodos de tratamiento estadístico del peso estadístico de cada resultado.. Para abordar los diferentes tipos de incertidumbres asociadas se han estudiado diferentes técnicas [20] que se utilizan en los diferentes sistemas de predicción para formar la base del sistema estacional a decadal de predicción por conjuntos en el proyecto de ENSEMBLE.

DePreSys [2] está basado en HadCM3, un modelo climático acoplado océano-atmósfera desarrollado en el Hadley Centre [21, 22]. La resolución atmosférica es de 2.75°x3.75° y de 1.25°x1.25° para el océano con 19 y 20 niveles verticales respectivamente. DePreSys genera un conjunto de parámetros perturbados compuesto por ocho variantes del modelo con simultáneas perturbaciones de hasta 29 parámetros, más la variante estándar del modelo, para finalmente crear un conjunto de 9 miembros. La selección de las variantes se divide en dos fases distintos [24]; la primera en la que se elijen los 16 miembros con la mejor simulación del clima, de entre un conjunto de 128 combinaciones de los parámetros del modelo utilizado anteriormente, para simular el cambio climático a largo plazo. En una segunda fase, se escogen 8 de los 16 miembros con el objetivo de simular la más amplia gama de sensibilidades climáticas y de amplitudes de ENSO. Los nueve miembros resultantes son entonces inicializados con asimilaciones de las observaciones de la atmósfera y de los océanos. De esta manera no sólo se tienen en cuenta los forzamientos externos, sino también la variabilidad interna del clima [23].

En este trabajo los datos analizados son un conjunto de predicciones retrospectivas de diez años (hindcasts) que comienzan cada de noviembre de 1960 hasta 2005 para la precipitación diaria total en la región del Mediterráneo. En la figura 2 se ilustra este proceso.

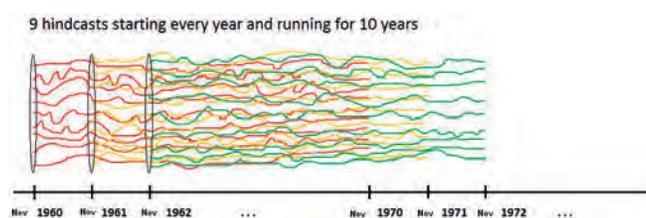


Figura 2. Ejemplo de simulación de DePreSys: 9 versiones del modelo que se ejecutan para 10 años durante el periodo 1960-2005, para cada mes de noviembre de cada año.

Para la predicción de la frecuencia de ciclones tropicales en el Atlántico se han usado los datos obtenidos con

el modelo EC-Earth. Se trata igual que DePreSys de un GCM [24] desarrollado por distintos servicios meteorológicos y grupos de investigación europeos basado en los modelos de estado de la técnica de la atmósfera, el océano, el hielo marino y la biosfera. El modelo se basa también en el concepto de “predicciones por conjuntos” (ENSEMBLES). EC-Earth combina la circulación atmosférica del modelo IFS que es el sistema de predicción numérica usado en el Centro para la predicción meteorológica a mediano plazo (ECMWF), con el modelo para el océano (NEMO) que incluye los componentes del hielo del mar (LIM2) y la superficie de la tierra (HTESSEL). También incluye el modelo de transporte químico atmosférico TM5. El funcionamiento del proceso de inicialización del modelo es muy similar al de DePreSys explicado anteriormente y no se va a entrar en detalle a su descripción.

Datos observados

Para el estudio de la predicción estacional de la precipitación extrema se ha elegido el conjunto de datos de EObs para las observaciones y de los datos procedentes de reanálisis de ERA-Interim (para la evaluación del error de la fuente de datos observados).

EObs [25], es un conjunto de datos diarios para la presión a nivel del mar, la precipitación y la temperatura para Europa (10 N-60 ° N, 10 ° W-40 ° E), basado en el conjunto de datos del proyecto europeo de Evaluación del Clima (ECAD). El conjunto completo de datos cubre el período 1950-2010 y ha sido desarrollado originalmente como parte del proyecto ENSEMBLES. En la actualidad se mantiene como parte del proyecto EURO4M UE. El conjunto de datos ECAD consiste en series diarias obtenidas de distintas estaciones distribuidas por toda Europa y la región mediterránea. EObs ha sido desarrollado para varios propósitos, incluyendo la evaluación de modelos climáticos regionales (RCM) y para las evaluaciones de impactos climáticos [26], con especial énfasis en la evaluación de la capacidad de los modelos climáticos regionales para simular el clima diario y los extremos.

EObs está disponible en cuatro resoluciones; $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, $0,44^\circ \times 0,44^\circ$ y $0,22^\circ \times 0,22^\circ$. En este trabajo los datos de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ de resolución son usados en lugar de los de más resolución debido a la baja resolución del modelo con el que se van a comparar y ahorrar tiempos de computación innecesarios (como más alta es la resolución más tiempo de computación se requiere para su tratamiento). La figura 3 muestra las estaciones que proporcionaron los datos diarios de precipitación total durante el período 1950-2010, aunque hay que tener en cuenta que algunas estaciones no tienen registros de todos los días dentro del período, y algunos registros de las estaciones comenzaron en 2000, sobretudo para las estaciones más aisladas.

Los datos de reanálisis de ERA-Interim, se utilizan para comparar con las observaciones y poder evaluar los efectos del error intrínseco del conjunto de datos utilizados como base de datos de referencia. Para ello los datos de

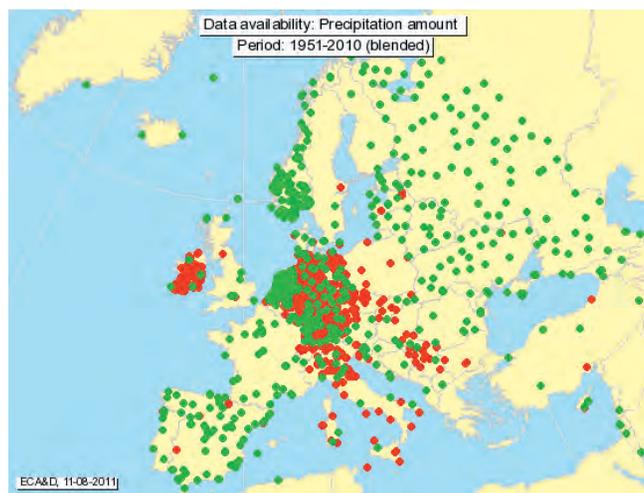


Figura 3. Estaciones disponibles con las cantidades totales precipitación diaria para el período 1950-2010. La serie recoge todos los países participantes en general, aunque algunos solo contienen datos de los años más recientes. Los datos que faltan en algunas series diarias han sido interpolados con los datos observados de las estaciones cercanas, siempre que estén dentro de un radio de distancia de 12.5 kilómetros.

EObs, originalmente con una resolución de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, se han interpolado a la rejilla de ERA-Interim ($1,5^\circ \times 1,5^\circ$) y evaluados por un período común (1989-2010).

Para los ciclones tropicales, las simulaciones obtenidas se comparan con los datos de base de datos del Centro Nacional de Huracanes (HURDAT, disponible en línea en <http://www.nhc.noaa.gov/pastall.shtml>). Esta base de datos contiene la información de los tracks (posición, intensidad, duración) de todas las tormentas que se produjeron en el Atlántico Norte y el Pacífico Oriental en el pasado más reciente y está construido mediante una combinación de las mediciones de tierra, aire y las hechas por satélite.

3.2. Métodos

Para el desarrollo de este trabajo se han llevado a cabo líneas distintas para la obtención de los resultados y su evaluación, y dependiendo del tipo de predicción; estacional o decadal.

El software de código abierto utilizado a lo largo de todo este trabajo para hacer todos los cálculos y análisis estadísticos es R.¹

Métodos para los análisis estadísticos de la precipitación extrema

Para el estudio de los eventos extremos de precipitación en la región del Mediterráneo se deben incluir tanto los grandes eventos de lluvias diarias, como los eventos en que las precipitaciones acumuladas mensuales o estacionales son inusuales, e incluso las situaciones en que los eventos extremos de precipitación se producen muy cerca de forma temporal (clustering). Todos ellos podrían ser la

causa de las inundaciones más grandes ocurridas en las últimas décadas.

El modelado de la lluvia ha sido un tema de mucho interés y de amplio desarrollo en los últimos años, por la importancia que este tema tiene en la resolución de problemas en el campo de la hidrología, la climatología, la agricultura, la ecología y, más recientemente, en estudios relacionados con la evaluación de los riesgos a eventos extremos. El desarrollo en los últimos años de diferentes técnicas de modelado ha permitido incrementar el grado de complejidad en los modelos de lluvia, permitiendo una mejor captura de toda la dinámica física que gobierna a este fenómeno natural. Actualmente surge la necesidad de desarrollar modelos de lluvia que permitan no sólo comprender la estructura probabilística que sigue un fenómeno físico sometido a fuertes cambios, sino también poder modelar el comportamiento predecir la ocurrencia e intensidad de eventos extremos de lluvia bajo condiciones más dinámicas, acorde con el escenario de cambio climático global y poder medir el impacto en zonas que puedan ser altamente vulnerables. En ese contexto se puede incluir la teoría de valores extremos definiéndola como el área de la estadística dedicada a desarrollar modelos y técnicas que permitan estimar el comportamiento de eventos inusuales o raros [12]. Estos eventos raros son los que pertenecen a la cola de la distribución y están alejados del centro (media, mediana). Sin embargo, no hay una definición formal de eventos extremos y las definiciones de "raro/extremo" varían. Según el último informe del IPCC, un evento extremo climatológicamente hablando, sería aquel que está por debajo o excede en magnitud algún umbral, como sería el percentil diez (P10) o el percentil 90 (P90) de su distribución climatología [27] (informe IPCC 2011⁴).

En este trabajo, para detectar los eventos extremos de precipitación en las observaciones, el P90 de la distribución diaria de datos, se ha calculado en base a diferentes muestras. Para calcular un percentil, como por ejemplo el P90, el 90% de las observaciones durante un período determinado debe ser inferior al P90, y por lo tanto, el 10% restante superior al P90. Las climatologías y el P90 de la precipitación diaria para diferentes períodos y regiones se han calculado para todos los datos disponibles (datos de referencia y datos obtenidos con el modelo). También el número de días que exceden el P90 para cada punto de la rejilla, y para un área específica se ha obtenido para al estudio de casos concretos.

Otro aspecto interesante y necesario en el marco del modelado de la lluvia es determinar la distribución matemática que siguen sus eventos extremos, por el impacto de los desastres que estos pueden causar sobre determinadas zonas de interés, además de permitir la evaluación de las amenazas y riesgos implícitos. En particular, en la teoría clásica de valores extremos (EVT) se desarrolla toda una metodología que permite determinar qué distribución

límite alcanza un conjunto de máximos o mínimos como eventos extremos de un proceso. Si

$$Mn = \text{máx}\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$$

Donde X_1, X_2, \dots, X_n son variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas, entonces el rango completo de distribuciones límites que se alcanzan para estos máximos, está especificado por el teorema de los tipos de extremos que establece sólo la existencia de tres posibles distribuciones límites: Gumbel (tipo I), Fréchet (tipo II) y Weibull (tipo III). Estas tres distribuciones se pueden unificar en una sola, conocida como la distribución generalizada de extremos (GEV). Se describe con tres parámetros conocidos como parámetros de localización y escala (μ y σ) y un parámetro de forma (ξ) [12]. El GEV tiene la función de densidad de probabilidad siguiente (PDF):

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} \exp(-(1 + \xi z)^{-1/\xi}) (1 + \xi z)^{-1-1/\xi} & \xi \neq 0 \\ \frac{1}{\sigma} \exp(-z - \exp(-z)) & \xi = 0 \end{cases}$$

Donde x es la variable a analizar, en este caso los datos de precipitación diaria, $z = (x - \mu) / \sigma$, y ξ, σ, μ son los parámetros de forma, escala y ubicación, respectivamente. Si bien la escala debe ser positiva ($\sigma > 0$), la forma (ξ) y ubicación (μ) pueden tomar cualquier valor real. El rango de las variables utilizadas en la distribución GEV depende de ξ :

$$\begin{aligned} 1 + \xi \frac{(x - \mu)}{\sigma} > 0 & \quad \text{for} \quad \xi \neq 0 \\ -\infty < x < +\infty & \quad \text{for} \quad \xi = 0 \end{aligned}$$

La PDF de la función de GEV para los tres tipos de distribuciones se muestra en la figura 4.

Cuando $\xi < 0$, la cola de la distribución tiene un comportamiento del tipo Weibull (tipo III) y está limitada, este ajuste se utiliza para ajustar la velocidad del viento y la temperatura del nivel del mar. Cuando $\xi > 0$, la cola de la distribución tiene un comportamiento del tipo Fréchet (tipo II) y su distribución está limitada en el extremo inferior ($x > 0$) y tiene una cola superior pesada, esta se utiliza para la modelización de precipitación, así como también para modelizar impactos económicos. Cuando ξ tiende a 0, la cola de la distribución tiene un comportamiento del tipo Gumbel (tipo I), con parámetros de localización y escala arbitrarios y la GEV es similar a la mayoría de las distribuciones comunes (por ejemplo, normal, lognormal, exponencial gamma) [28].

Estas distribuciones teóricas permiten describir el comportamiento de los extremos en una muestra a través

⁴ http://ipcc-wg2.gov/SREX/images/uploads/SREX-SPMbrochure_FINAL.pdf

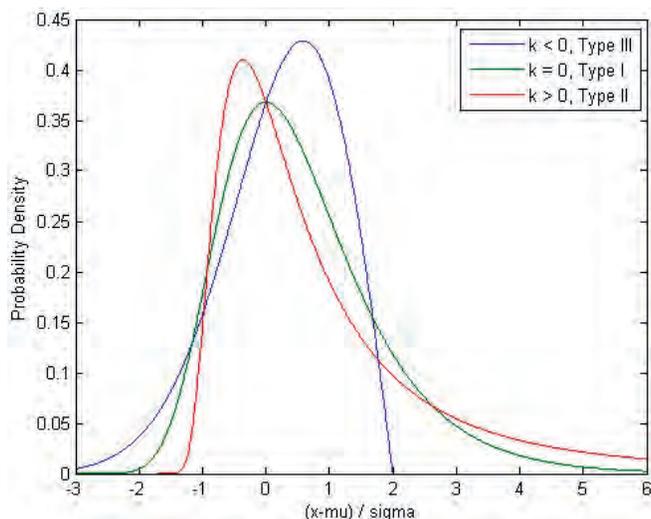


Figura 4. Probabilidad de función de densidad de la GEV en función del parámetro ξ . La abscisa $(x-\mu) / \sigma$ representa los datos a ser fitados. (Fuente: Coles, 2001).

de la estimación de los parámetros descritos anteriormente. Su uso a menudo desempeña un papel clave en el análisis de los datos extremos [12].

El software utilizado "R" evalúa de forma automática que distribución se ajusta mejor, que para el caso de la precipitación extrema, como se ha comentado anteriormente, es la del tipo II.

Otra característica importante de la distribución generalizada de extremos, es la estimación del periodo de retorno. Este es un concepto estadístico que intenta proporcionar una idea de hasta qué punto un suceso puede considerarse raro, en términos de una determinada horquilla temporal habitualmente expresada en años. Suele utilizarse con distribuciones de variables extremas referidas a un periodo de referencia de un año; por ejemplo, la cantidad de lluvia caída en el día más lluvioso del año. Por ejemplo en hidrología es frecuente considerar zona inundable a aquella que es cubierta por las aguas en tormentas de hasta quinientos años de periodo de retorno. Esto significa que la cantidad de lluvia caída en un sólo día para ese periodo de retorno solamente se iguala o supera, estadísticamente, una vez en el periodo de 500 años. En términos numéricos se expresa que la probabilidad de que se presente una precipitación superior en un determinado año es $p = 1/500 = 0.002 = 0.2\%$; o bien, la probabilidad de que no se presente es la complementaria, $1 - p = 0.998 = 99,8\%$. Sin embargo eso no implica que no puedan producirse dos tormentas de tal o superior intensidad en dos años consecutivos, o incluso en un mismo año [29]. Es importante remarcar que el concepto del periodo de retorno se basa en el supuesto de que no hay una tendencia en las observaciones utilizadas en su cálculo. En momentos en que el clima está cambiando, esto hace que el uso de periodos de retorno asociados a las variables del clima sea desafiante y poco fiable [12]. Periodos de retorno teóricos para las variables climáticas se

pueden estimar para cualquier periodo de tiempo futuro, pero sin embargo, se requieren grandes muestras de las variables analizadas para una estimación fiable de los periodos de retorno.

En este trabajo los parámetros de la GEV en ajuste a los datos (μ , s y ξ) se obtienen, teniendo en cuenta todos los registros de precipitación diaria para todos los años (desde enero de 1950 hasta diciembre de 2010). El análisis se repitió para los eventos intensos que ocurrieron en las regiones seleccionadas durante el mes de agosto, porque la mayoría de los eventos extremos de precipitación en el área mediterránea durante la última década han tenido lugar durante este mes del año. Utilizando los parámetros μ , s y ξ , el periodo de retorno se estima para la distribución GEV de los acontecimientos ocurridos durante agosto de 2005, cuando sucedieron algunas de las inundaciones más intensas sobre el centro de Europa. La precipitación máxima diaria para cada punto de la cuadrícula se toma como umbral para definir un evento como extremo, y con este valor, el periodo de retorno es calculado (según metodología de [12])⁵.

Métodos de verificación de los pronósticos

La predicción de las condiciones extremas generalmente se considera una tarea difícil. Por lo tanto es importante cuantificar la fiabilidad de dichas predicciones. Aquí es donde juega un papel importante la verificación de pronósticos, que se define como la exploración y evaluación de la calidad de un sistema de pronósticos basado en una muestra de pronósticos previos y en las observaciones correspondientes [29]. Aquí la calidad tiene que ver con la capacidad de los pronósticos para reducir la incertidumbre sobre el estado futuro (desconocido) de un sistema.

Un pronóstico tiene calidad alta si pronostica bien las condiciones observadas de acuerdo con algunos criterios establecidos, y tiene valor si ayuda al usuario a tomar una decisión mejor que si la previsión no estuviera disponible. En este caso el valor de la previsión (aunque la calidad podría ser mala) es muy importante porque un buen pronóstico de un evento extremo podría ayudar a los encargados de adoptar decisiones a tomar algunas medidas para evitar las graves consecuencias que puedan producirse debido a eventos extremos como inundaciones a causa de las precipitaciones extremas, así como también a la reducción de su impacto socio-económico.

La calidad de un pronóstico tiene muchos atributos diferentes que no pueden ser resumidos con un solo indicador o medida ("score"). En general, son necesarios varios scores para poder medir la calidad de un pronóstico. Además los métodos de verificación pueden ser cualitativos (basados en el "eyeball method", es decir en un criterio subjetivo del analizador, y por lo tanto poco fiables), o cuantitativos, como los que se describen.

⁵ Estos resultados no son fiables por el momento y no se han añadido a la memoria.

Por lo que al predictando se refiere (es decir, aquello que se quiere predecir, en este trabajo la precipitación y los ciclones), puede ser:

- **Continuo:** Temperatura, presión, precipitación, etc.
- **Discreto** (categórico): Ocurrencia o no ocurrencia, valor por encima o debajo de una referencia, o en un rango, cobertura de nubes (ordinal), tipo de nubes (nominal), etc.
- **Univariado.**
- **Multivariado:** viento, varias variables, campos espaciales en puntos de rejilla
- **Una probabilidad:** la probabilidad de que mañana haya niebla es un 40%.
- **Ensembles** de pronósticos de modelos

Según el tipo de predictando se aplican unos u otros métodos para obtener unos resultados más fiables.

Para el caso de la precipitación, al tratarse de una variable continua se han aplicado métodos simples de verificación estándar típicamente usados para variables continuas como es el cálculo del coeficiente de correlación anómala (AC) [30]. Este mide la correspondencia o la diferencia de fase entre las predicciones y observaciones, restando la media climatológica en cada punto (C). Sin embargo este coeficiente no es sensible al sesgo de las previsiones, por lo que una correlación alta no garantiza pronósticos buenos. El valor tiene dos propiedades especiales. En primer lugar, está delimitado por -1 y 1. Si la correlación es exactamente -1, es una asociación perfectamente lineal negativa entre las dos variables y la recta de regresión entre las dos variables tiene pendiente negativa. A la inversa, si la correlación es exactamente 1, existe una correlación perfecta, lineal positiva. En segundo lugar, el cuadrado de la correlación describe la proporción de la variabilidad en una variable que es descrito por la otra variable. Hay que señalar, sin embargo, que el coeficiente de correlación no proporciona ninguna explicación acerca de la relación física entre las variables [30,31].

Para obtener el AC primero se han calculado las anomalías para cada miembro y también para las observaciones, calculados con la climatología propia. Seguidamente el AC se ha obtenido utilizando el método de correlación de Pearson con un intervalo de confianza del 95%, para distintas combinaciones entre los resultados de salida del modelo y las observaciones.

Métodos para los análisis estadísticos de los ciclones tropicales

Predicciones estacionales de la frecuencia de ciclones tropicales (CTs) con una calidad suficiente para ser utilizadas se realizan actualmente para las distintas cuencas en diversos centros de predicción climática operativa. Las primeras predicciones estacionales de ciclones tropicales se basaban en la relación estadística entre la actividad de huracanes del pasado y los diferentes indicadores climáticos, sobre todo la temperatura de la superficie del mar, evaluados al inicio o unas pocas semanas antes del inicio oficial de la temporada de huracanes [32].

El aumento de la potencia de los ordenadores ha permitido el desarrollo un nuevo tipo de predicción estacional basado en la simulación de los procesos físicos responsables de la creación y la variabilidad de los ciclones. En este caso, las estadísticas de la temporada de CTs futura se obtienen a partir de simulaciones de varios GCMs que simulan la evolución de las depresiones individuales para la próxima temporada de huracanes. Aunque los ciclones individuales simulados no se corresponden exactamente con los que realmente ocurren, la actividad total simulada sobre todo la temporada permite realizar una predicción sobre el nivel esperado de actividad. Esta predicción incluya información tan útil como el número de tormentas, número de categoría (3-5) de tormentas y la cantidad de energía disipada por estas tormentas en toda la temporada.

Este tipo de pronóstico requiere una potencia de cálculo muy elevada debido a la alta resolución del modelo utilizado, una resolución horizontal y vertical que permita resolver los ciclones tropicales. Además, se utiliza la técnica de predicción por conjuntos para poder formular predicciones probabilistas. Los sistemas de predicción han demostrado que pueden capturar las variaciones de la frecuencia de CTs usando fundamentalmente su capacidad para predecir El Niño\ Oscilación del Sur (ENSO), que es la principal influencia en, la variabilidad del CT en el Atlántico a escala anual, para unos meses en el futuro.

En contraste con la predicción estacional, a escala decadal, la principal influencia en los ciclones tropicales del Atlántico no es ENSO, sino una oscilación en las TSM del Atlántico Norte conocido como la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO). Un estudio previo ha demostrado que la AMO puede ser relativamente predecible a escala plurianual [33], lo que sugiere la posibilidad de poder predecir los parámetros que determinan la actividad de los CTs. A continuación, describimos los primeros pasos en nuestro intento de ir más allá de la predicción estacional para realizar predicciones plurianuales de los CTs en el Atlántico de suficiente calidad usando métodos dinámicos. Este ejemplo de predicción climática a una escala más larga que la estacional permite ilustrar el tremendo potencial que la predicción a escalas estacional a decadal ofrece.

Para investigar la actividad de ciclones tropicales se han utilizado dos técnicas. La primera consiste en su localización y seguimiento directamente. En este caso, se utiliza un procedimiento automatizado para buscar los tracks en la salida del modelo y detectar las características físicas típicas de los ciclones tropicales reales. Además de ser más intuitiva, esta técnica permite una comparación directa con el número real de las tormentas detectadas durante el período correspondiente. Este enfoque es, sin embargo, limitado por la resolución de los GCM, que es generalmente demasiado bajo para simular algunos ciclones tropicales, pero en cambio si que reproduce algunos de sus sistemas remanentes, aunque, significativamente más débiles y más grandes. Debido a que estos sistemas tropicales comparten muchas características con las tormentas observadas (por ejemplo, la ubicación de la ciclogénesis, o la trayectoria), se considera una buena opción

para estudiar dichas tormentas. Por más simplicidad, en adelante, ambos sistemas observados y simulados serán referidos como ciclones tropicales (CTs).

El seguimiento de CTs con los datos de EC-Earth se realiza mediante un algoritmo de seguimiento desarrollado durante una serie de estudios previos [34, 35], donde se demostró una buena capacidad para detectar CTs presentes en las simulaciones de los modelos. El programa de seguimiento busca en cada paso de tiempo de cada simulación, condiciones atmosféricas similares a las de los CTs reales, tales como un centro de baja presión y vientos en superficie muy altos. Una vez que se ha detectado un lugar que cumpla todos los criterios para la formación de un huracán, el algoritmo busca conectar este lugar con una ubicación cercana detectada durante el paso de tiempo anterior, lo que permite construir una trayectoria de la tormenta para toda su vida. Los criterios de detección del algoritmo se basan en [34] e incluyen:

- Un mínimo en la presión en superficie (considerado como el centro de la tormenta).
- Vientos fuertes en superficie (a 10m del suelo) en las proximidades del centro de la tormenta.
- Un núcleo caliente en la media y alta troposfera (este criterio se utiliza para discriminar entre los ciclones en latitudes medias y ciclones tropicales).
- El número de centros consecutivos que se detectó debe cubrir al menos un período de 24 h.

La segunda técnica actualmente usada para investigar la actividad de los CTs mediante modelos climáticos consiste en el análisis los campos a gran escala conocidos por afectar la actividad de los CTs y de los que se deduce el impacto más probable de sus variaciones en la actividad ciclónica tropical en sí. Ya que las condiciones del océano y de la atmósfera necesarias para la ciclogénesis están bastante bien documentadas [36,37,38] y que los GCM de baja resolución podrían simular con mayor precisión los aspectos climáticos que controlan a escalas de tiempo más larga la actividad de ciclones tropicales en lugar de los propios ciclones, este segundo enfoque podría ser más adecuado para su análisis con las previsiones obtenidas con EC-Earth.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Predicción estacional de precipitación extrema

4.1.1 Resultados de las observaciones

En esta sección se presentan los análisis estadísticos obtenidos con las observaciones con el fin de estudiar, en primer lugar las tendencias climatológicas de la zona de estudio y segundo para evaluar la incertidumbre de la base de datos de referencia utilizados (EObs) para comparar con las predicciones del modelo.

Resultados del conjunto de datos EObs

La figura 5 muestra el P90 y la media de la precipitación diaria acumulada para cada estación durante el período

1950-2010, calculado para caracterizar el ciclo estacional de la precipitación y tener una referencia para evaluar la pérdida de información al interpolar los datos observados a la rejilla del modelo con una resolución mucho más baja.

En invierno (diciembre-enero-febrero, DJF) los valores altos de precipitación extrema (figura 6b) tienden a ser mayores en las latitudes al norte de 40 °, especialmente al noroeste de España y sobre de la región de los Alpes., al igual que los valores más altos de precipitación media, sugiriendo entonces que las áreas con valores extremos más elevados son también las zonas con más precipitación media estacional acumulada. Para la primavera (marzo-abril-mayo, MAM) los valores son inferiores que los invernales en todas las regiones, pero siguiendo el mismo patrón, con valores medios y extremos más altos sobre el centro de Europa y el noroeste de la Península Ibérica. Verano (junio-julio-agosto, JJA) es la estación seca en la región del Mediterránea, como se puede ver en los mapas con valores muy bajos, tanto para la precipitación media como para el P90. En muchas áreas al sur de 40 ° N, con períodos típicamente largos de sequía, vemos que la precipitación fue insignificante. Sin embargo, para esta estación, el centro de Europa presenta valores altos para ambos índices. La razón principal podría ser debido al clima húmedo típico de estas regiones, especialmente en la región de los Alpes (en la sección 4.1.3. los resultados para esta región serán analizados con más detalle). Finalmente, en otoño (septiembre-octubre-noviembre, SON) se puede observar un aumento de la precipitación media, así como de los valores extremos, en relación con el verano. Los valores muy altos se encuentran en Europa central y en la zona alpina de nuevo, donde por lo general se producen en mayor frecuencia precipitaciones intensas [11]. Esto se debe a que las fuertes precipitaciones en otoño se asocian frecuentemente con las corrientes de aire húmedo y estratificado provenientes del sur, que debido a la topografía y patrones climáticos de la zona pueden llegar a producir importantes eventos de precipitación e inundaciones. Esto se discutirá más adelante con más resultados.

La figura 6 muestra los parámetros de la GEV (μ , s y ξ), calculado como otro índice importante para estudiar los casos extremos de lluvia.

Los tres paneles deben ser analizados de manera conjunta ya que están relacionados entre ellos. El parámetro de localización (μ) se relaciona con el valor medio de precipitación en un momento dado, mientras que el parámetro de escala (σ) muestra el grado de variación o dispersión que hay respecto la media. Un valor bajo indica que los puntos de datos tienden a estar muy cerca de la media, mientras que un valor alto indica que los datos están muy dispersos. Finalmente, el parámetro de forma (ξ) es una medida de la rapidez de decaimiento de la cola de la distribución.

Un área con altos valores de localización y de escala altos se encuentra sobre la zona de los Alpes, los Balcanes y la Península Ibérica, cosa que quiere decir que en

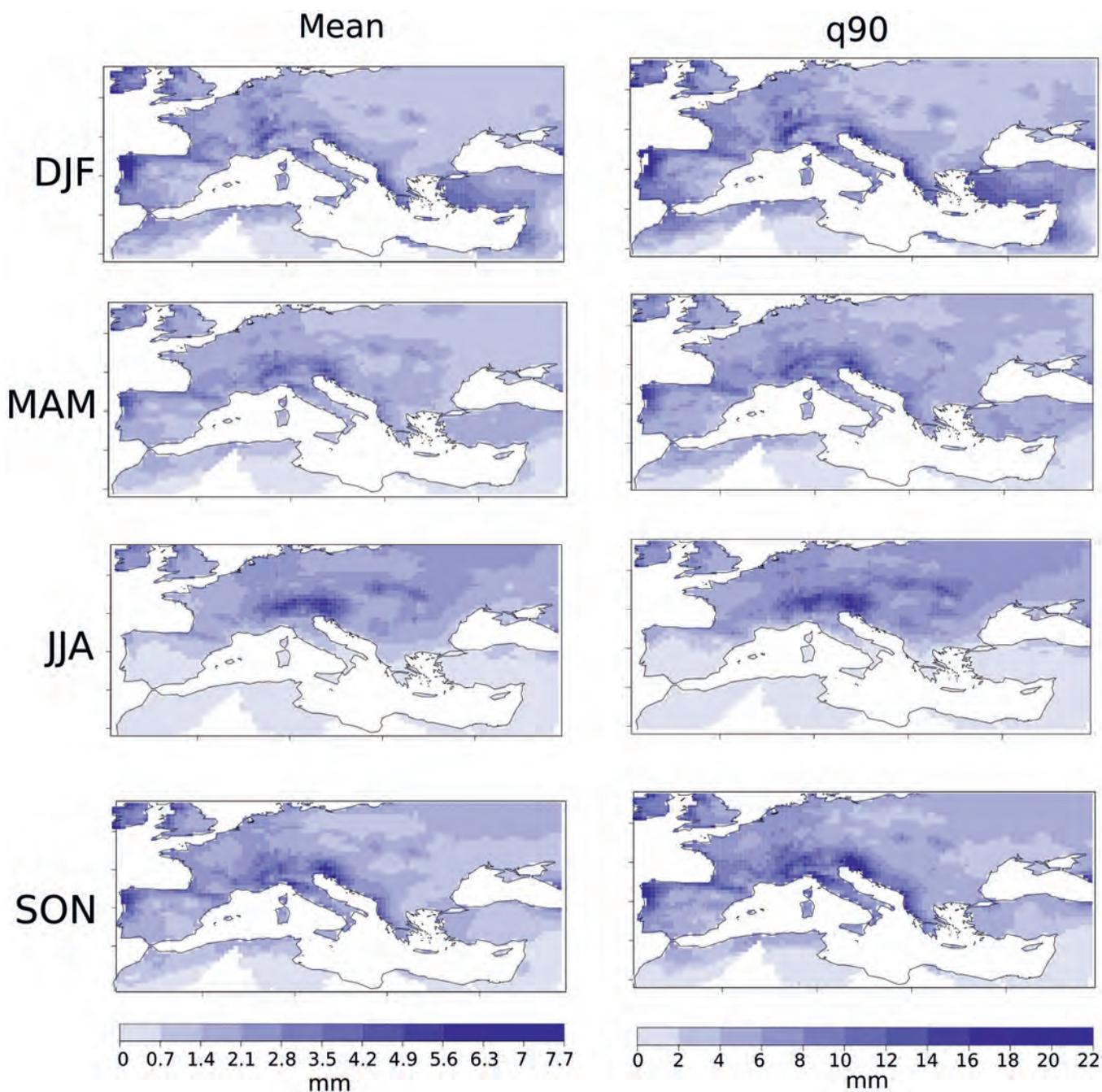


Figura 5. Precipitación media y P90 para las observaciones (EObs, 1950-2010) para cada estación. Los resultados se muestran en su resolución original (0.5°x 0.5°).

Figura Los paneles a, b y c muestran los parámetros de la GEV (μ , s y ξ) para la precipitación total diaria en el periodo 1950-2010.

esas zonas se pueden encontrar valores más extremos, como ya se había visto en la figura 5. Esto ocurre por la orografía característica de estas zonas, que sobre todo en los meses de verano son la causa de fuertes lluvias convectivas que pueden provocar grandes acumulaciones de precipitación totales poco tiempo, y en consecuencia aumentar el riesgo de inundaciones.

En la figura 7 los mismos parámetros se han calculado para los meses de agosto (mes en el cual se centra el estudio presentado). Observando la región de centro Europa, los parámetros de localización y escala tienen valo-

res más altos respecto al resto de regiones ya que es donde acostumbran a darse las precipitaciones más extremas en verano. La distribución tiene una “cola pesada” que se corresponde con el tipo Fréchet (parámetro de forma $\xi > 0$) que se utiliza normalmente para fijar las distribuciones de precipitación [12].

Por el contrario las regiones con valores de escala y localización más bajos se encuentran en el sur de España y en el norte de África, donde las precipitaciones en verano y especialmente durante el mes de agosto son mínimas, o en algunos casos nulas.

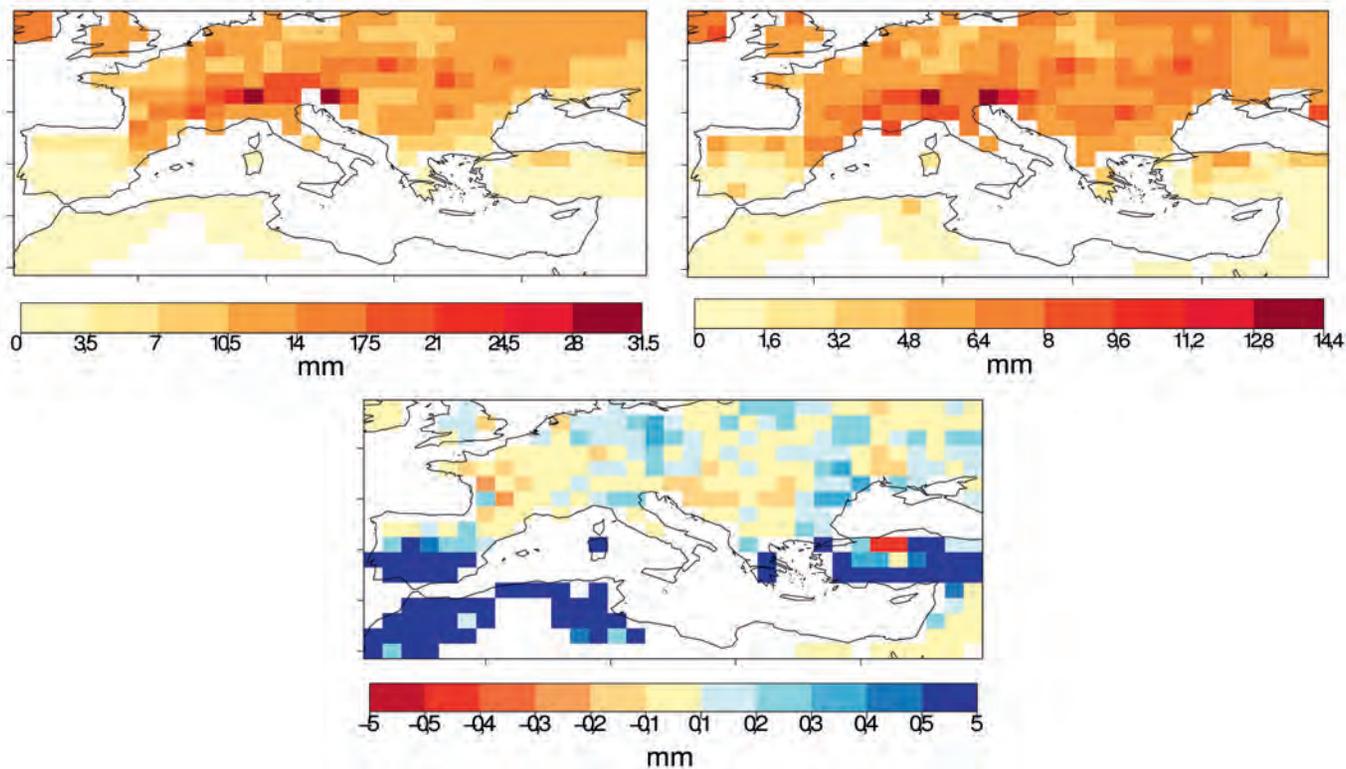


Figura 6. Los paneles a, b y c muestran los parámetros de la GEV (μ , σ y ξ) para la precipitación diaria total para los agostos en el período 1950-2010.

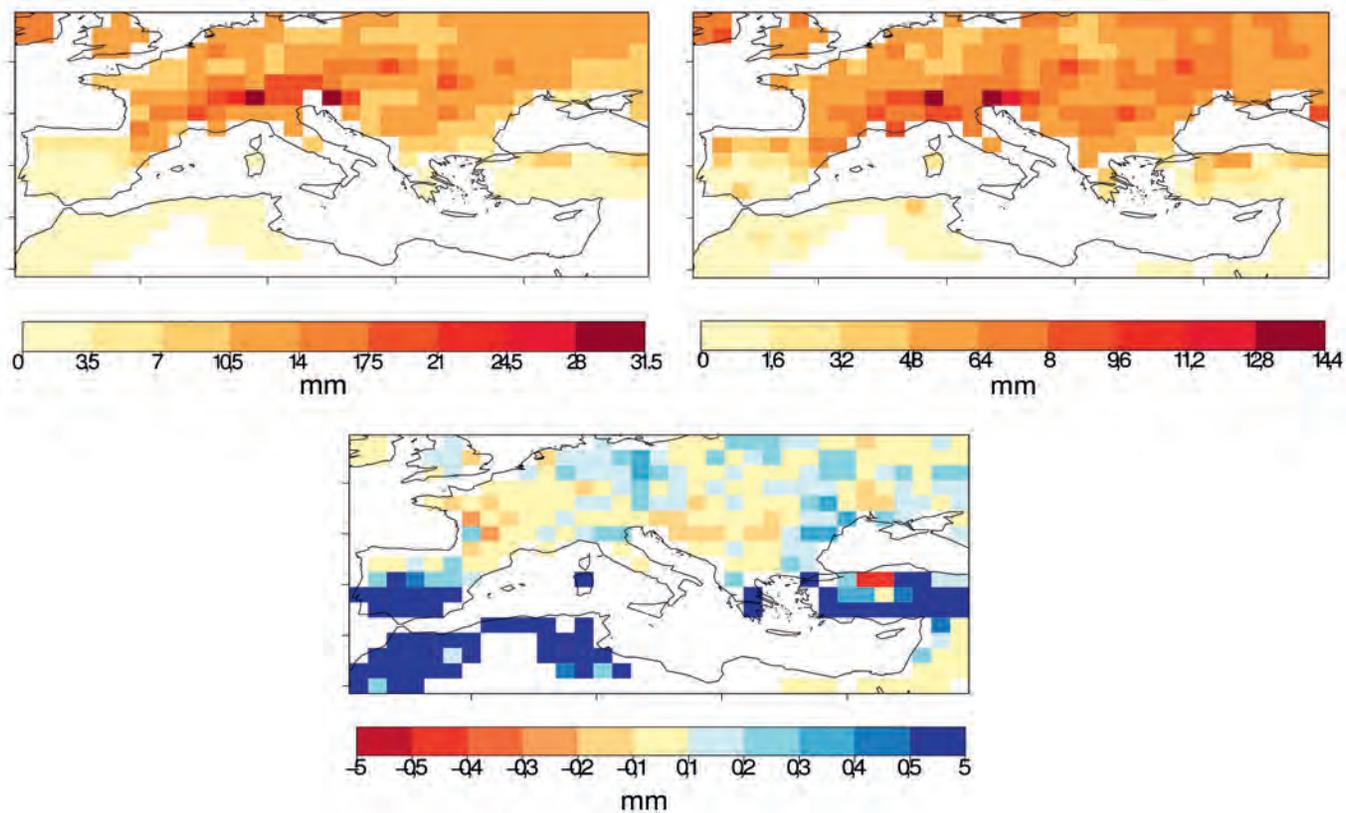


Figura 7. P90, la precipitación media y la desviación estándar de EObs (1950-2010) para cada temporada. Los resultados se interpola en DePreSys la red (2,5 ° x 2,5 °).

Fuentes de incertidumbre

En esta sección se presentan los análisis que se han llevado a cabo para evaluar los errores asociados a la fuente de datos que se usa como referencia, con el objetivo de evaluar las diferentes fuentes de incertidumbre que pueden limitar la interpretación de los resultados al comparar los datos de las observaciones con los resultados del modelo. Se han considerado dos posibles fuentes de incertidumbre: el impacto de la interpolación a una rejilla más grande (y de menor resolución) y el error intrínseco de los datos de referencia elegido.

El primero, es el impacto de la resolución horizontal de datos al interpolar a una rejilla más grande y de menor resolución: Para poder comparar las observaciones con los datos de salida del modelo ambas rejillas deben estar en la misma resolución. Esto es un problema ya que la resolución inicial de los datos observados es de mucha más calidad que la del modelo, de manera que dichos datos deben ser interpolados a la rejilla del modelo para que ambos datos sean comparativos. Y es cuando se in-

terpolan que se pierde información, que en algunos casos puede ser de importante relevancia, sobre todo al estudiar eventos de ámbito más local; ya que al disminuir la resolución, es decir aumentar el paso de malla; la capacidad de análisis en el plano horizontal difícilmente será menor a unos 150 Km., lo que en conclusión limita mucho el pronóstico de eventos de escala más pequeña.

En la figura 8 se han estimado los mismo índices calculados anteriormente para las observaciones pero con la misma resolución que el modelo (2.5°x 2.5° en el plano horizontal) para poder estimar de forma cualitativa dicha pérdida de información.

La interpolación de los datos de referencia en las redes utilizadas por los modelos como se puede apreciar, implica una pérdida de precisión de cauro espacial, que impide tomar en cuenta los pequeños acontecimientos, especialmente aquellos derivados de las tormentas convectivas, que pueden ser muy interesantes para la predicción de algunas inundaciones intensas. Es difícil caracterizar a pequeñas áreas debido a la resolución más baja y

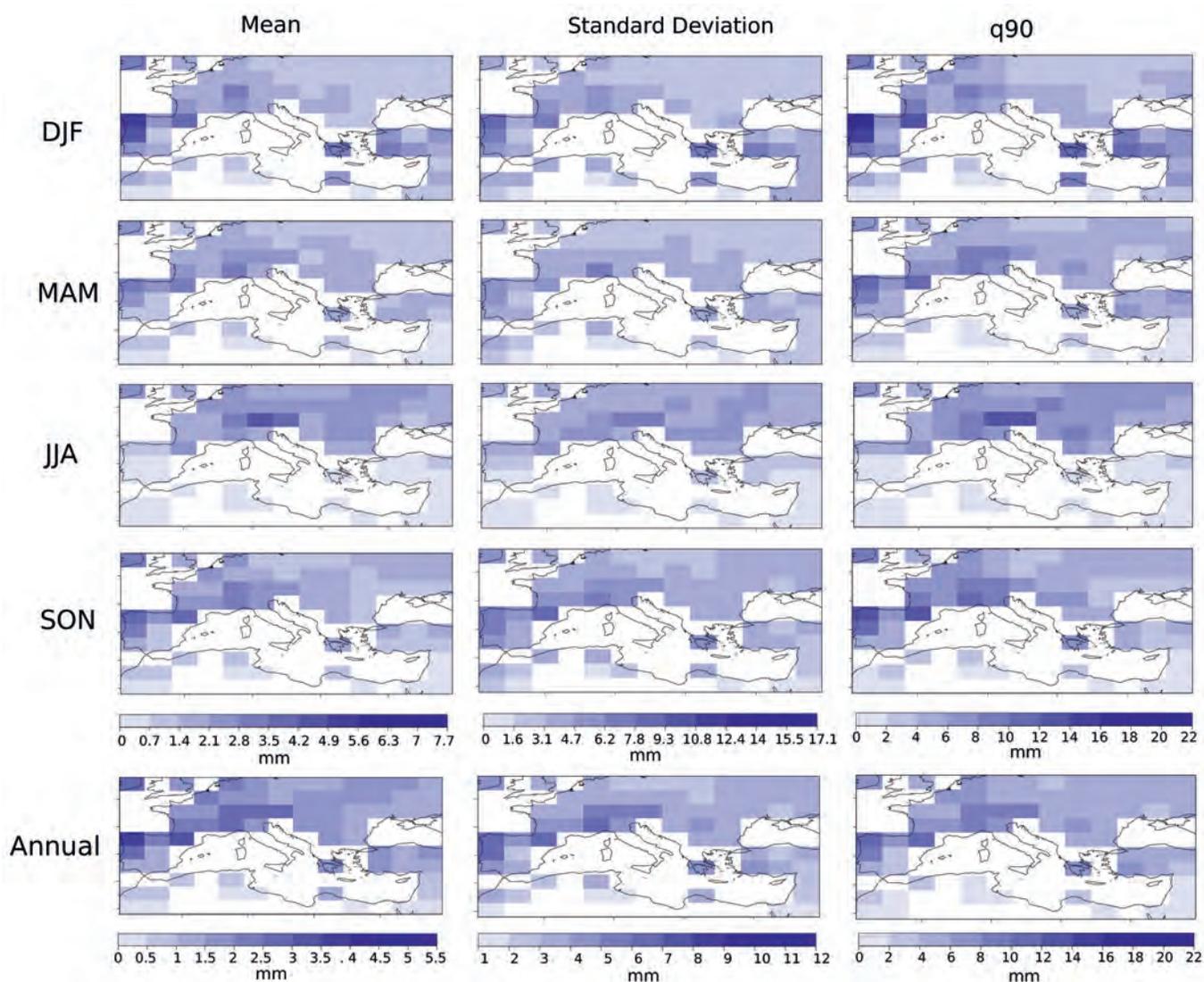


Figura 8. P90 de la precipitación diaria total para agostos de 1950-2010 para a) EObs versión interpolada y b) EObs versión original.

sólo se pueden observar las tendencias generales de las áreas más extensas. Especialmente en zonas pequeñas como las islas, pequeñas regiones del Reino Unido y en Europa central, el procedimiento de interpolación reduce la sensibilidad del análisis.

Los resultados interpolados también muestran valores altos de los índices para el norte de España, especialmente para la desviación estándar y el P90. Sin embargo, para los resultados sobre el centro de Europa obtenemos valores más bajos que con la resolución original que se muestran en la figura 5. Mirando la diferencia entre estaciones vemos que los valores más altos se encuentran durante el invierno, en contraste con la figura 5, donde los valores más altos fueron durante el otoño.

La figura 9 es una una ilustración más específica de los efectos de la interpolación a resoluciones más bajas. Se ha calculado el P90 para agosto de todo el período para las dos versiones (resolución original y datos interpolados a la red del modelo). Se ha elegido el mes de agosto ya que algunos de los episodios de precipitaciones más extremas que ocurrieron en la última década tuvieron lugar durante este período y será el mes analizado en la mayor parte de este trabajo.

Vemos que la pérdida de resolución es clara. Es difícil distinguir en la versión interpolada algunas zonas pequeñas con valores muy altos que podían distinguirse en los datos originales, como en la zona de los Alpes o en las islas británicas. Es interesante ver que a lo largo de las fronteras del océano, donde en la versión original se disponía de datos, al interpolarlos, estos se pierden y las zonas costeras pierden información, especialmente en lugares donde se encontraban los valores más bajos (por ejemplo, en la cuenca del Mediterráneo, en especial en

algunas áreas más grandes, como Italia, donde se tienen periodos normalmente secos durante agosto vemos que al interpolar los datos, se pierde la información en esa zona). Esto puede ser un problema importante cuando se trata de predecir las sequías durante las estaciones secas, ya que la información se perderá en las zonas donde la lluvia es inapreciable.

En conclusión la actual resolución de los modelos climáticos no es suficientemente buena como para suministrar datos climáticos en alta resolución espacial o en puntos geográficos localizados, que en realidad son los que interesan en un análisis de impactos de extremos. Se hace, pues, necesario emplear técnicas o procedimientos que permitan inferir, en base a los datos de baja resolución mejor simulados por los modelos climáticos, información localizada de parámetros de interés. Esto se puede conseguir, y es un objetivo futuro del presente estudio, mediante las técnicas de mejora de resolución o regionalización (downscaling según la nomenclatura inglesa).

Otra fuente de incertidumbre es el error intrínseco del conjunto de datos utilizado como referencia. El objetivo de los datos EObs es representar la media de la zona de la precipitación diaria acumulada en cada celda de la rejilla, que se espera que sea cerca de la media de un número suficientemente grande de estaciones dentro de la celda. La red de estaciones utilizada para desarrollar EObs es variable en el espacio y el tiempo [25]. Además, la red de estaciones es relativamente escasa, comprende sólo 2.316 estaciones en Europa. Aunque es un incremento de magnitud importante en comparación con la disponibilidad de los datos antes de que el proyecto ENSEMBLES fuera iniciado [39], hay muchos puntos de la red que apenas tienen ni una sola estación. Por lo tanto, hay dos aspectos

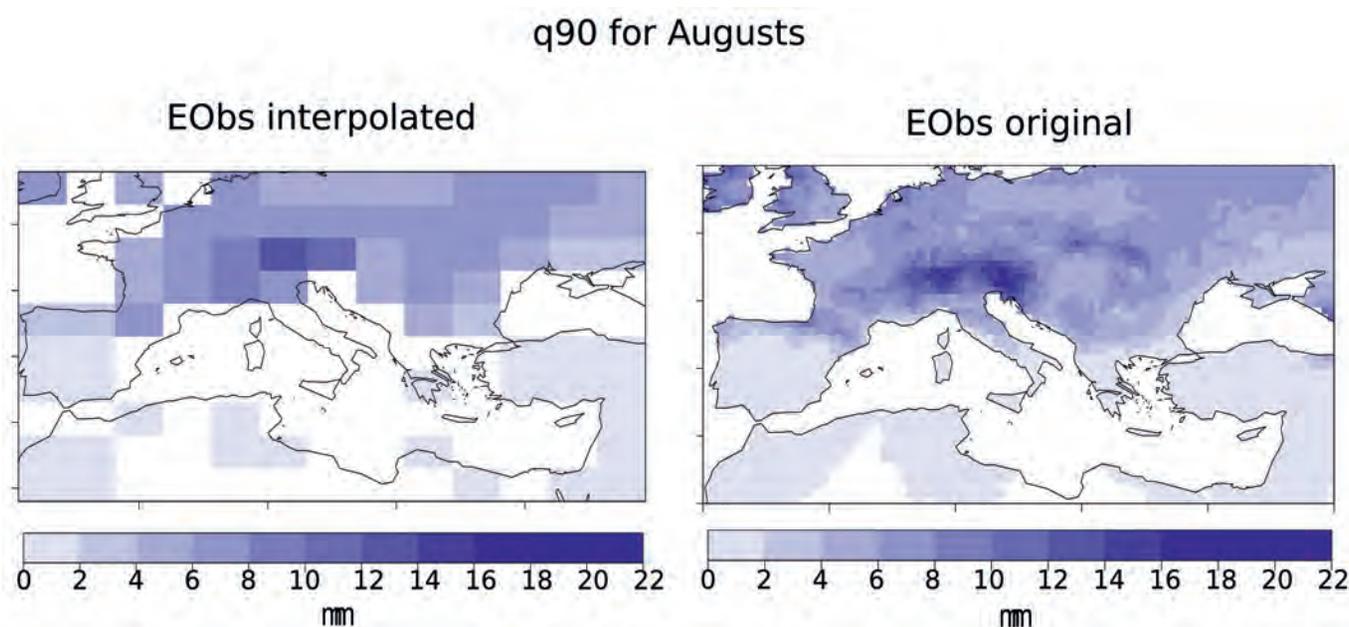


Figura 9. Porcentaje de diferencia entre ERA-Interim/EObs para el P90 de la precipitación diaria total para todos los agostos de 1989 a 2010. Los resultados se calculan en mm/día.

que deben tenerse en cuenta, que podrían afectar a las estimaciones de diferentes maneras:

- La variabilidad en la densidad de estaciones.
- La distribución de la red de estaciones.

Como se describe en [40], los efectos de dichos problemas pueden ser tres:

Las estaciones como puede observarse en el mapa de red de estaciones (figura 4) no están uniformemente distribuidas de manera que hay zonas con más densidad de estaciones y zonas con menor número de ellas. Según la Organización Meteorológica Mundial⁶ (OMM), para el reporte de datos mensuales y diarios de variables meteorológicas de superficie, cada 250.000 kilómetros cuadrados tiene que haber por al menos una estación meteorológica. Sin embargo, la densidad idónea de la red de estaciones dependerá del tipo de terreno y de la cobertura superficial del área de estudio, de manera que cada tipo de cobertura (bosques, zonas urbanas, zonas agrícolas, etc.) esté representada por un número adecuado de estaciones. Además no todas las estaciones tienen datos para el mismo periodo de tiempo, algunas disponen solo de datos recientes, y de días no consecutivos. De manera que no hay una homogeneidad de datos en toda la región a analizar y esto puede derivar en problemas de representatividad de la realidad a la hora de realizar los análisis. Según [37], esto puede afectar sobre todo para evaluar los extremos, que se verán mucho más influenciados. Esto se debe tener en cuenta a la hora de comparar con los resultados de salida del modelo para valorar la capacidad de estos en simular el clima extremo; sobretodo para la precipitación ya que es una variable discontinua en el espacio y tiempo, y por consiguiente su representatividad se puede ver más afectada que otras variables. En este trabajo estos aspectos no van a ser evaluados en detalle (más información se puede encontrar en [39]), pero si que se ha realizado una comparación con una base de datos de reanálisis (otra alternativa posible para usar como datos de referencia para comparar con la salida del modelo) con el fin de cuantificar aproximadamente los posibles efectos.

La ventaja del uso de datos de reanálisis, es que son cuadrículados, homogéneos y fácilmente disponibles, pero para la variable precipitación, presentan grandes errores y sesgos sistemáticos y subestimaban los extremos de precipitación de forma significativa [40].

La figura 10 muestra en forma de porcentaje las anomalías entre los datos de reanálisis ERA-Interim (disponible para el periodo 1989-2010) y EObs para el mismo periodo de tiempo, e interpolados a la red ERA-Interim (para evitar problemas con las diferencias de escala y obtener resultados comparables), en cada punto de la rejilla para el P90 de todos los agostos de 1989 a 2010. El método utilizado ha sido:

$$\% = \frac{ERAInterim - EObs}{ERAInterim} \cdot 100$$

⁶ <http://www.wmo.int>

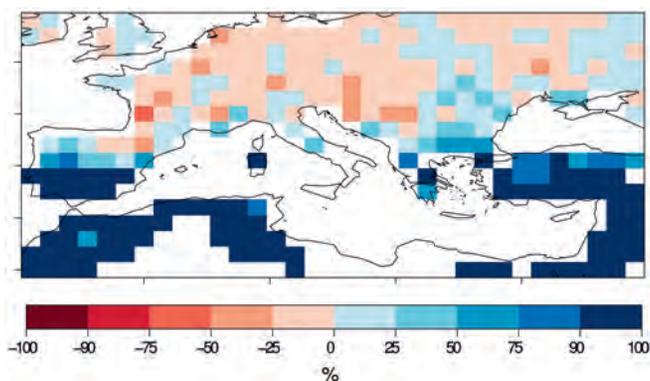


Figura 10.

ERA-Interim dispone de datos para todos los puntos de la rejilla sobre la tierra y sobre el océano de manera que los datos oceánicos han sido enmascarados ya que EObs sólo dispone de datos terrestres. También se han omitido los puntos donde no se dispone de datos para EObs con el fin de facilitar el cálculo.

Se puede apreciar la pérdida de información en las zonas costeras, a causa de la interpolación de los datos de las observaciones a una rejilla más grande que la original para poder comparar con los datos de reanálisis. Este problema fue comentado en la sección anterior (problema de interpolación). Más notable es el hecho de que donde normalmente llueve más (de acuerdo con los resultados de las observaciones de EObs vistos antes), como es en Europa central y normalmente al norte de 45° de latitud, EObs tiende a tener valores más altos, que podría significar una sobreestimación de la precipitación en estas áreas. Sin embargo, sobre el sur de Europa y para toda la cuenca mediterránea los resultados son positivos lo que significa que ERA-Interim tiene los valores más altos que EObs para cada punto de la rejilla, de manera que EObs estaría subestimando los extremos de precipitación en estas zonas. La razón de estas diferencias podría ser uno de los problemas comentados, derivados de la no homogeneidad en la distribución espacio-tiempo de las estaciones usadas para crear la serie climática de EObs. Se sabe que la mayor densidad de estaciones se encuentra sobre el centro y norte de Europa, mientras que los países del sur y del este tienen un menor número de estaciones y además con menos registros a lo largo del tiempo; y encontramos entonces una subestimación de los valores extremos [40].

4.1.2. Resultados del modelo

En esta sección se evalúa la fiabilidad de las predicciones producidas por DePreSys. Los datos evaluados son los resultados de la salida del modelo por el primer mes de predicción, comenzando en cada mes de mayo para cada año entre 1960 y 2005 para todos los 9 miembros de DePreSys. De los resultados obtenidos sólo la fracción de los datos relativos al mes de agosto se han utilizado con el fin de simplificar el análisis.

El propósito de este primer análisis es estudiar el comportamiento de los diferentes miembros, teniendo en cuenta sus distintas condiciones iniciales. Primero se han calculado las climatologías (calculadas a partir de la media) y la desviación estándar de cada miembro, tomándose solo en consideración los valores de pronóstico para el cual existe una observación correspondiente. Por eso los datos posteriores a 2005 no se han utilizado. En segundo lugar se ha obtenido el P90 y los parámetros de la GEV, como índices de precipitación extrema, también para todos los miembros del modelo y para los datos de referencia, siguiendo los mismos métodos estadísticos utilizados en el análisis de datos de observación explicados en la sección 3.2. En las figura 11 y 12 se representan los resultados obtenidos para todos los meses de agosto del período 1960-2005.

Se puede ver en los diferentes miembros, que algunos subestiman la precipitación, especialmente en áreas con precipitación menor a 1mm/día (en comparación con las observaciones siempre) Asimismo, los miembros más fríos (debido a las distintas condiciones iniciales algunos miembros son más calidos y otros más fríos) no predicen ninguna precipitación en esas áreas. Sin embargo en áreas con valores medios más altos, el modelo sobreestima la precipitación, especialmente para los miembros más cálidos. La desviación estándar presenta los mismos patrones.

Para el P90 los resultados son ligeramente diferentes. Todos los miembros tienden a subestimar la precipitación extrema observada. Esto sugiere que para los valores extremos, el modelo tiene una tendencia a subestimar la realidad durante los meses secos como el mes de agosto. Otros trabajos también han analizado otras estaciones del año, como las estaciones especialmente húmedas como [41], que hizo un análisis estacional de la capacidad de algunos modelos GCM y RCM en la predicción de extremos. Encontró que para las estaciones húmedas con patrones de precipitación más claros a gran escala, el modelo tenía una mejor capacidad en la predicción de los extremos, mientras que en las estaciones secas, como se ha visto en este trabajo los modelos disponen de una mala capacidad en la reproducción de los valores más extremos.

La figura 12 muestra los parámetros de la GEV para el mismo período. Esta debe ser comparada con la figura 11 para valorar la fiabilidad de los resultados. El parámetro de localización μ se relaciona con el valor medio de precipitación en un momento dado, mientras que el parámetro de escala σ muestra el grado de variación o dispersión que hay de la media y se relaciona con la desviación estándar. Un valor bajo indica que los puntos de datos tienden a estar muy cerca de la media, mientras que valor alto indica que los datos se distribuyen a lo largo de una amplia gama de valores. Finalmente, el parámetro de forma ξ es una medida de la rapidez con la que la cola superior decae.

Se ve que los resultados del modelo derivan de los de las observaciones. Los valores de μ y σ son menores para

casi todos los miembros, en comparación con las observaciones. Sin embargo, para los más cálidos (los miembros 2 y 4) tienen mejores resultados para los lugares con mayores cantidades de precipitación (el centro de Europa y el Reino Unido), en comparación con las observaciones. Para los más fríos, especialmente los miembros 3, 8 y 9 los resultados muestran una muy mala capacidad para reproducir las observaciones (posiblemente debido a un mal ajuste de la función). En cuanto a los valores de escala, todos los miembros muestran valores más bajos en comparación con las observaciones, cosa que significa que los valores obtenidos tienen una desviación estándar pequeña y por lo tanto no podrían ser considerados como extremos. Sólo para algunas zonas aisladas sobre las regiones con precipitaciones medias más altas muestran mayores parámetros de escala, lo que podría significar tendencia a precipitaciones más extremas en esos lugares.

Por último, el parámetro de forma muestra un patrón muy diferente entre el modelo y las observaciones. Mientras que con las observaciones se obtienen valores cercanos a cero en toda Europa (excepto para el sur de España y el Norte de África) los resultados del modelo muestran valores positivos, especialmente para los miembros más fríos. Debe decirse también, que los resultados obtenidos dependen en gran medida de la bondad del ajuste de la función GEV y que para valorar su fiabilidad estos deben ser sometidos a procesos de verificación.

4.1.3. Casos de estudio: Eventos extremos de precipitación

Las inundaciones ocurridas en el centro de Europa en 2005 y en 2002 se analizan como un ejemplo para evaluar la capacidad del modelo para la predicción de eventos extremos.

Ambos hechos ocurrieron en agosto, por eso todos los análisis realizados durante el estudio se focalizan en ese mes. Los hechos se explican por separado, pero son analizados a la vez con el fin de comparar los resultados para la predicción de ambos eventos, y facilitar la discusión.

En primer lugar se hace un análisis de los acontecimientos con las observaciones, para verificar que las observaciones obtenidas a partir de datos EObs reproducen lo sucedido. En segundo lugar el modelo se utiliza para repetir el mismo análisis estadístico, con el fin de evaluar su capacidad de predicción de eventos extremos.

Los métodos utilizados son los mismos seguidos durante todo el estudio. Todos los análisis se han obtenido previamente para los datos observados y después se repiten para todos los miembros del modelo siguiendo el mismo procedimiento. En primer lugar se calculan las climatologías para los datos de referencia tanto interpolados y como para la versión original. En segundo lugar se ha calculado el P90 para cada mes (agosto de 2002 y agosto de 2005). Otro índice importante calculado para los dos eventos son el número de días en que se ha superado el P90 climatológico en cada punto de la rejilla. También se ha tomado como referencia un punto concreto (el mismo

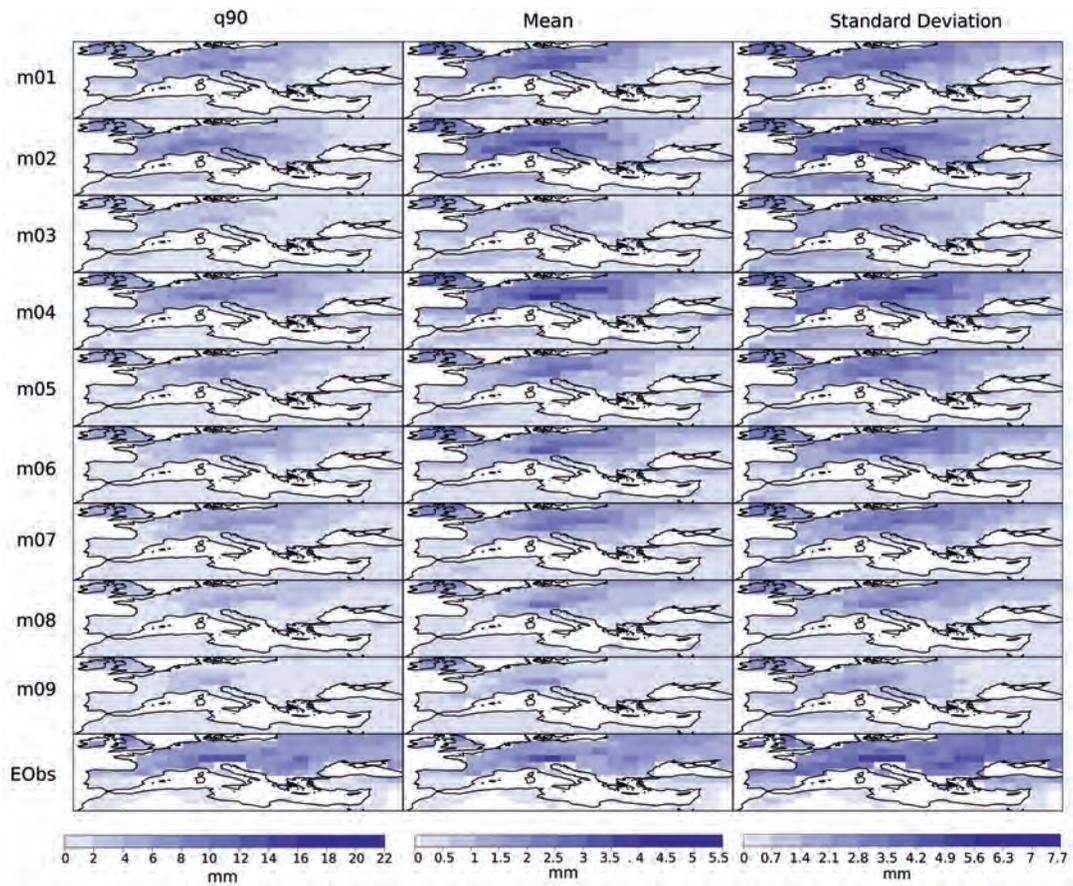


Figura 11. P90, media y desviación estándar de los 9 miembros y de EObs interpolado para todos los agostos desde 1960 hasta 2005.

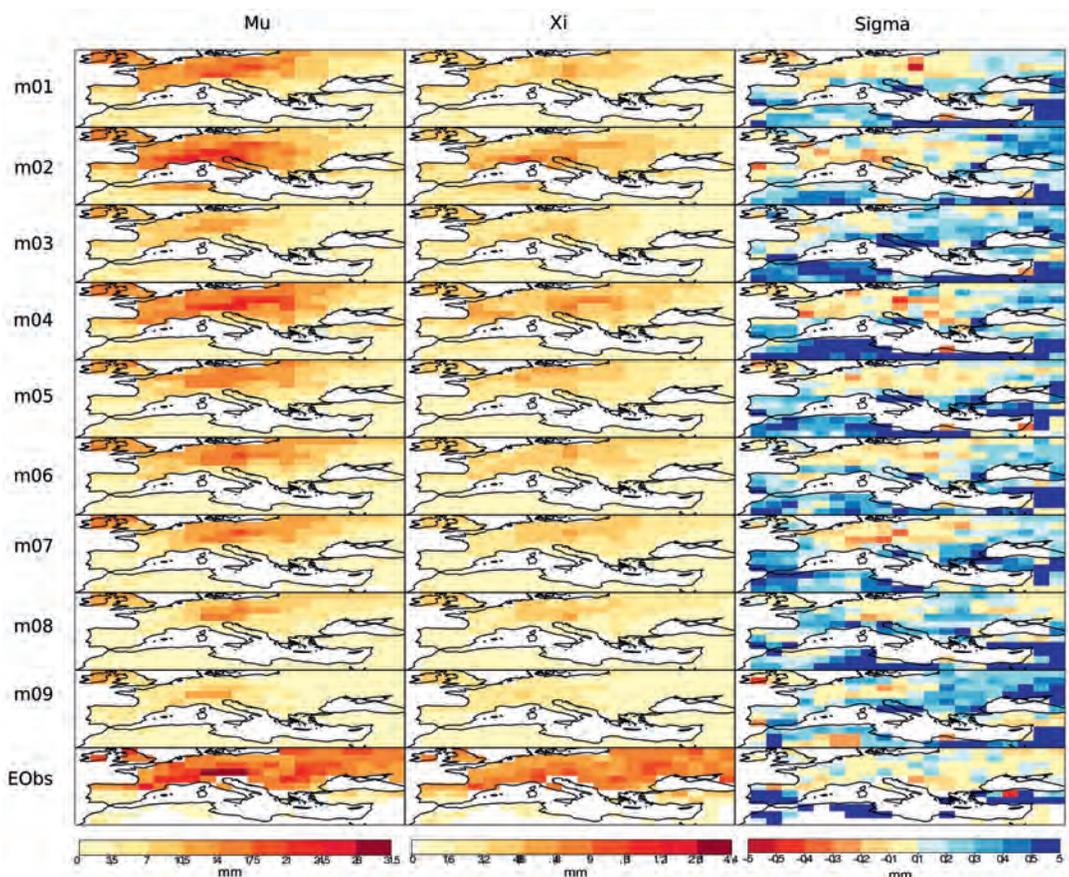


Figura 12. Parámetros de la GEV (μ , σ y ξ) para los 9 miembros y para EObs interpolados para todos los agostos de 1960 a 2005.

utilizado en todo el estudio) cerca de una estación en Suiza, donde según las observaciones se encuentran los valores más altos de precipitación, con la finalidad de evaluar la capacidad del modelo para predecir las precipitaciones extremas en un punto concreto y en un intervalo de tiempo determinado. Asimismo, se han obtenido las funciones de densidad de probabilidad (PDF) que describen el comportamiento probable de la precipitación para un punto concreto del espacio. Se han calculado las PDF para todos los agostos tanto para el modelo como para las observaciones con el fin de evaluar el distinto comportamiento entre ambos.

Inundaciones en Europa Central en agosto de 2005

En agosto de 2005 los países de la región de los Alpes Suizos, Austria y el sur de Alemania fueron testigos de inundaciones, debido a fuertes precipitaciones que superaron la intensidad y el impacto de otros fenómenos extremos ocurridos en la década anterior. Dichas inundaciones fueron descritas por algunos medios de comunicación como “*la inundación del siglo*”. Debido a la situación meteorológica específica no sólo en los Alpes, sino también en Rumania, Bulgaria, Hungría y Polonia, tuvieron lugar inundaciones después de episodios de lluvia torrencial. El sistema de tiempo estable típico de esta zona (llamada Vb) causó que nubes provenientes del Mediterráneo que llevaban grandes cantidades de humedad avanzaran hacia el este de los Alpes y luego hacia el norte en dirección a la Europa Central. De manera que los países de Europa del Este y las laderas del norte de los Alpes fueron cubiertos por constantes lluvias debido al efecto orográfico causado por la cordillera de los Alpes. También otros factores que no son estudiados en este proyecto hicieron aumentar la magnitud de la catástrofe como el desbordamiento de los ríos, la pérdida de cuencas de retención, el uso intensivo de la tierra y los daños forestales en las zonas montañosas.

El mapa de las regiones afectadas se muestra en la figura 13.

Inundaciones en Europa Central en agosto de 2002

En este caso un sistema de gran altura y baja presión provocó lluvias torrenciales cerca de Salzburgo y Austria del 6 al 8 de agosto. Esto fue seguido por una lluvia intensa sobre Rumania, Bohemia del Sur y las regiones costeras del este del Mar Negro provocando un gran número de víctimas mortales (40). Austria sufrió la mayor pérdida económica. Tras una pequeña tregua la situación cambió rápidamente con el desarrollo de una segunda depresión. Esta se movió hacia el nordeste, provocando fuertes lluvias en el norte y centro de Italia y generó también lluvias torrenciales en la Alta Baviera y Baja Sajonia, el 10-11 de agosto. Al mismo tiempo, en el noreste de España experimentaron lluvias extraordinarias. El 12 de agosto, la lluvia llegó a las áreas ya devastadas de la Región de Salzburgo, Austria, Baviera, Alemania y Bohemia, continuando



Figura 13. Mapa de los países afectados durante las inundaciones extremas en agosto de 2005. Fuente: Wikipedia.

sin cesar hasta el 14 de agosto. El servicio meteorológico austriaco anunció que los niveles de precipitación en varios lugares eran los más altos registrados desde 1900. Al cabo de 12 días, la precipitación observada fue de cuatro veces más alta que las tasas normales de precipitación mensual registradas en varias estaciones de medición. Numerosos ríos pequeños y medianas empresas en Austria, Alemania y la República Checa inundado de inmediato. Muchos de ellos ya se había inundado en Austria tan sólo unos días antes. En respuesta a esta segunda fase de mal tiempo, los niveles de agua de grandes ríos, como el Moldava, Mulde, Elba y el Danubio también comenzaron a crecer rápidamente. Las inundaciones afectaron extensas áreas en su confluencia con el río Elba, y los niveles de agua del Moldava superaron a las de la gran inundación de 1890 en Praga. Alimentado por el río Moldava y otros ríos, el Elba superó el nivel de la inundación 1845 (8,77m) en Dresden, llegando a un récord de 9,40m el 17 de agosto. Las ciudades de Meissen, Torgau, Wittenberg y Dessau fueron inundadas parcialmente. El Danubio afectó a Ratisbona, alcanzó un nivel de agua récord en Passau y ocasionado numerosos problemas aguas abajo en Austria. Durante la inundación, unos 60.000 residentes fueron evacuados en Austria, con un total de 200.000 en la República Checa y unos 100.000 en la región de Nueva Alemania. Alrededor de 4 millones de residentes en Alemania fueron afectados, y 100 muertes se han reportaron en todo el continente.

Análisis y discusión de los eventos

Primero se han reproducido los acontecimientos con las observaciones obtenidas a partir de EObs. En la figura 15

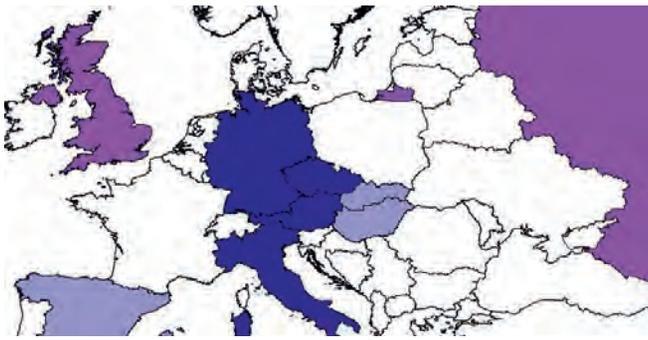


Figura 14. Mapa de los países afectados por las inundaciones durante el paso de las depresiones que causaron las lluvias extremas. En otros países púrpura inundó durante el paso de la depresión en primer lugar, los países en brillantes azules con grandes inundaciones. Fuente: Wikipedia.

se muestra el número de días en los que la precipitación fue superior al P90 climatológico en cada punto de la rejilla para EObs interpolado y EObs original (con el fin de ver las posibles pérdidas de información con la interpolación en el análisis de los acontecimientos particulares).

Para 2002, los eventos de precipitación extrema ocurrieron al inicio del mes de agosto, para los países de centro Europa; como puede verse en la figura 14, que muestra las zonas afectadas por las inundaciones durante este mes. Comparando la figura 14 con la figura 15, que muestra el número de días que se superó el P90 de la precipitación climatológica en cada punto de malla, se puede ver que los resultados son consistentes para el Norte de España y de Italia, con un gran número de días que exceden ese valor. Sin embargo para algunos países

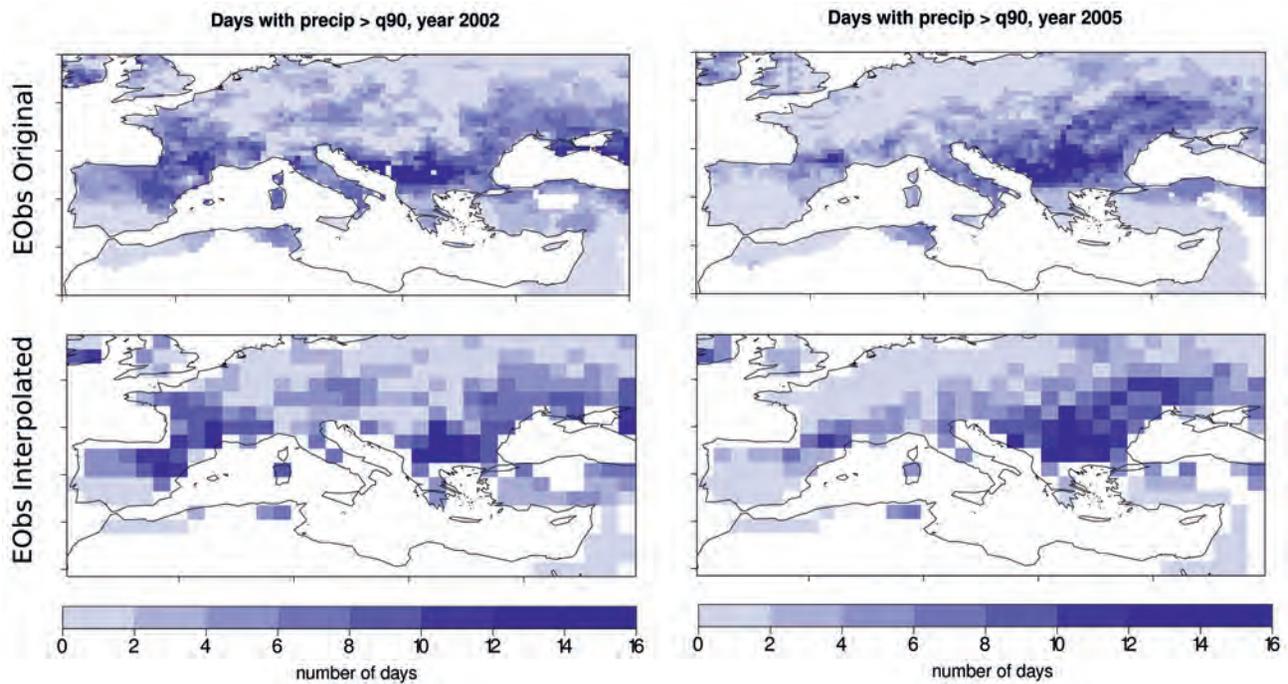


Figura 15. Numero de días con precipitación superior al P90 climatológico para a) Agosto de 2002 y b) Agosto de 2005 para EObs versión original (mapas superiores) y EObs versión interpolada (mapas inferiores).

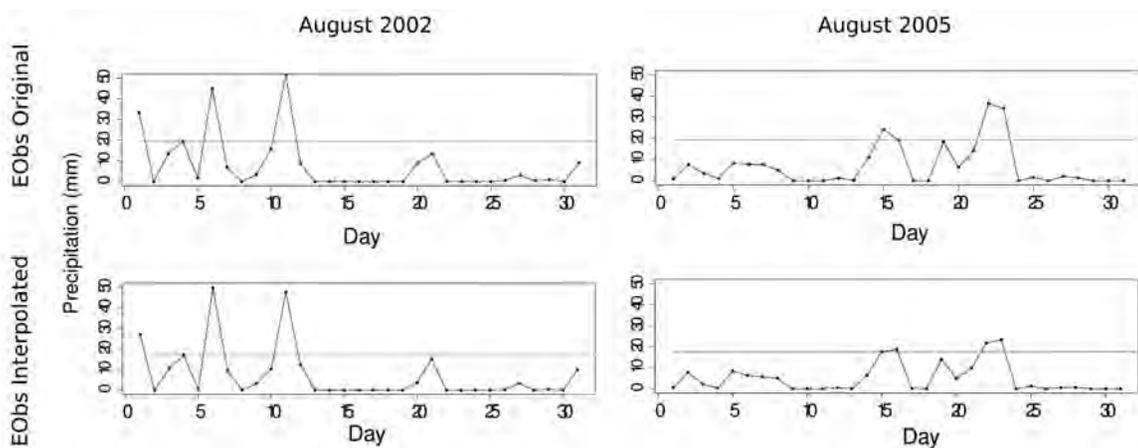


Figura 16. Serie temporal del P90 de precipitación para Agosto de 2002 y Agosto de 2005 para EObs versión original (figuras superiores) y EObs versión interpolada (figuras inferiores), para un punto sobre la zona alpina Suiza (12.5°-47.5° longitud-latitud). La línea verde representa el P90 climatológico para toda la serie temporal disponible (1960-2005) en este punto concreto.

de Europa central el número de días que exceden el P90 es menor. La figura 16 muestra un análisis en forma de serie temporal a lo largo del mes de agosto de 2002 y de 2005 para un punto de la rejilla en la zona alpina (donde tuvieron lugar varias inundaciones en agosto de 2002 y agosto de 2005). Como se puede ver el número total de días que exceden el P90 climatológico son solo tres para ambos casos pero las cantidades son muy altas y durante días seguidos, esto explicaría la rápida subida del nivel de los ríos provocando así su desbordamiento y la inundación de las áreas cercanas; tal y como se explico en la información del evento en concreto, y verificando de esta manera que los resultados obtenidos por las observaciones son fiables. En la figura 15 también se puede apreciar un gran número de días en los que se excede el P90 en el este de Europa y países del Mediterráneo oriental, pero al no disponer de información concreta sobre posibles inundaciones en esas regiones se ha omitido dichos resultados de la discusión.

Para agosto de 2005 se ha repetido el mismo proceso de análisis. La figura 13 muestra las zonas inundadas durante las lluvias extremas ocurridas. Comparándola con la figura 15 (con los resultados de las observaciones) se puede apreciar un numero elevado de días de precipitación extremas en países de Europa del Este como Rumania consistente también con la información histórica del evento. Sin embargo, para las áreas con niveles más elevados de precipitación según los datos históricos, los resultados obtenidos con las observaciones no son consistentes.

Analizando la figura 16 se puede ver que para la región de los Alpes, donde tuvieron lugar las mayores inundaciones en agosto de 2005, los días con lluvias extremas tuvieron lugar durante las últimas semanas de agosto (de acuerdo con la información del evento en la parte I) y la lluvia fue también extrema durante los dos días consiguientes, causando una gran acumulación de agua en el cauce de los ríos y en las zonas más fácilmente inundables, que provocaron en gran parte las inundaciones ocurridas. En conclusión la acumulación de agua debida a las fuertes precipitaciones causadas por las tormentas convectivas en días concretos podría ser la razón de las inundaciones ocurridas; y es un aspecto que se ha intentado simular con los datos de salida del modelo; para poder evaluar la capacidad de este al reproducir eventos meteorológicos concretos.

En la figura 17 se puede ver la incapacidad de todos los miembros para reproducir la precipitación ocurrida en el mes de Agosto de 2002. Sólo las zonas con valores medios más altos de precipitación (en Europa Central) son reproducidas de manera aproximada por los miembros más calidos. En zonas con pocas precipitaciones o casi nulas (por ejemplo, el sur de España y en general la cuenca del Mediterráneo), ningún miembro es capaz de reproducir las pequeñas cantidades de precipitaciones se produjeron en esas zonas. Los miembros 3 y 9, en este caso son los que tienen peores resultados. En la desviación estándar se observan los mismos patrones que para

los valores medios en todos los miembros. Peor aun es la capacidad del modelo para reproducir los extremos en un mes concreto como vemos en los mapas del P90 donde todos los miembros dan menos precipitación que la observada. Es importante tener en cuenta el diferente comportamiento de cada miembro en el análisis de los extremos. Sólo los más cálidos tienen una similitud más grande con las observaciones, pero ninguno es capaz reproducir las cantidades más altas que se encuentran con las observaciones.

De acuerdo a la información de la documentación (ver la parte superior de la sección para más detalles) las peores inundaciones sucedieron en Europa Central y países del este de Europa, como también se puede apreciar en los resultados de las observaciones en la figura 16, panel inferior. En la figura 15, con el número de días con más precipitación que el P90 en cada punto de la red, para los datos de referencia, se ve que las zonas más afectadas son la zona alpina (con los valores más altos del P90) y los países de Europa del Este (con un número elevado de días con $P > P90$). Sin embargo, el modelo no es capaz de reproducir bien dichos índices y sólo obtiene precipitación extrema en el Reino Unido y el norte de Europa (que es incoherente con la realidad).

El caso de agosto de 2005 se ha analizado con más detalle porque es el caso más reciente y tuvo como consecuencia más pérdidas económicas, lo cual es muy interesante para las compañías de seguros. El P90 para las regiones afectadas por las inundaciones fue mayor a 18mm/día y con un máximo diario de 71,1mm en el mayor día de lluvia. Esto significa que para cada punto de malla de las regiones afectadas el 10% de los días de lluvia tenía una cantidad superior a 18mm, que es mucho más que los valores medios para esa región durante agosto (aproximadamente 10mm/día) y se puede definir como un evento extremo. También en las observaciones se puede apreciar que en los países del sur de Europa las cantidades de lluvia en ese año fueron insignificantes, especialmente si se compara con el resto de Europa. Tal vez este tiempo seco (por el anticiclón típico de verano) sobre el sur de Europa fue un factor que condujo el agua del Mediterráneo, que al ser más cálida y con más humedad provoco que sistemas de tormentas convectivas se movieran hacia el norte de la región afectada y provocando las fuertes lluvias registradas. Para un estudio más específico, se requeriría el análisis de más variables como las temperaturas superficiales del mar y las temperaturas superficiales terrestres, así como los regimenes de vientos, pero dichos análisis se alejan del alcance de este trabajo por manca de tiempo. Mirando las climatologías del modelo en la figura 18, una vez más los miembros más fríos son incapaces de reproducir la precipitación en las zonas secas, el 6º miembro sobretodo tiene unos resultados muy malos con valores muy cercanos a cero. Otra vez los miembros más similares a las observaciones son los más cálidos. Las razones por las cuales el modelo presenta una mala habilidad en la reproducción de la precipitación en las zonas más secas son las mismas que se discutieron antes.

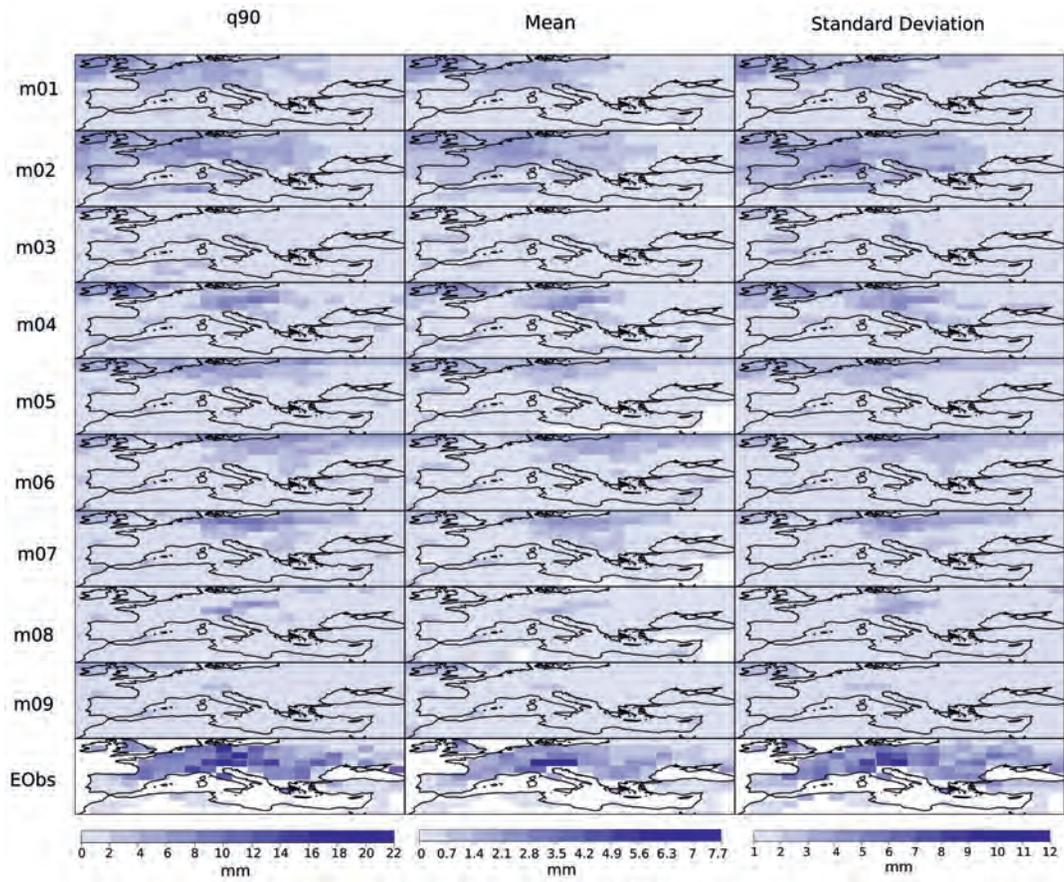


Figura 17. P90, media y desviación estándar para los 9 miembros de DePreSys y para EObs interpolado para agosto de 2002.

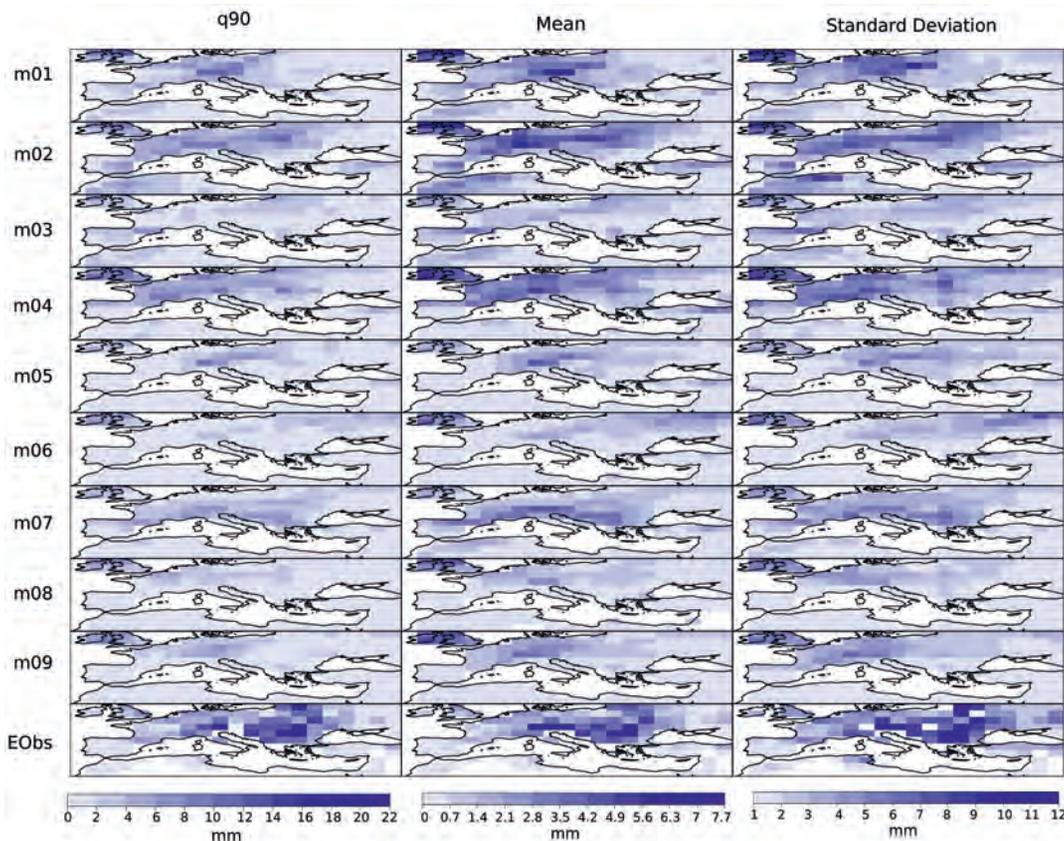


Figura 18. P90, media y desviación estándar para los 9 miembros de DePreSys y para EObs interpolado para agosto de 2005.

Así pues el modelo tiene una mala capacidad en la predicción de la precipitación en las áreas con una media inferior a 1mm por día, mientras esta capacidad mejora cuando se trata de zonas húmedas con mayores cantidades de precipitación diaria. Con los extremos, en este caso particular, el modelo predice una mayor cantidad de precipitación en el norte de Europa, especialmente el 4º miembro, mientras que las cantidades reales más grandes de precipitación se produjeron en Europa del Este y Europa Central (según los datos históricos); de manera que los resultados observados derivan de los calculados por el modelo.

La figura 19 muestra las funciones de probabilidad de densidad (PDF) para todos los agostos del periodo analizado (1960-2005) para el modelo y las observaciones en el punto ya estudiado anteriormente en la región alpina, con la finalidad de evaluar las diferencias entre el modelo y los datos de referencia en la reproducción del número de días llovió. Para calcular las PDFs en primer lugar se han descartado los días con precipitación inferior a 0,1mm / día ha y contando estos como días sin precipitación a fin de tener PDFs más interpretables. Este filtro se ha aplicado porque en el mes analizado; agosto, el número de días sin precipitación o con cantidades muy bajas de precipitación, a veces inapreciable, hacía que los resultados fueran difíciles de interpretar al analizar la densidad de probabilidad para los extremos de precipitación (la densidad de días sin precipitación era muy alta en comparación con los días de alta precipitación y dificultaba la identificación de los extremos en los gráficos). También se ha calculado la proporción entre días de precipitación y días de no precipitación, referido como P en cada gráfico:

$$P = \frac{\text{days with } p > 0.1 \text{ mm}}{\text{days with } p < 0.1 \text{ mm}} \quad (4)$$

Cabe destacar la gran diferencia entre las proporciones de días de lluvia y días de no lluvia de los distintos miembros con respecto a las observaciones. Estas muestran en todo el periodo analizado la mitad de los días llovió y la otra mitad las cantidades fueron inapreciables. En cambio para todos los miembros la proporción P es muy alta lo que significa que llovió (aunque sean en cantidades muy bajas) casi todos los días. Sólo los miembros más fríos muestran algunos días sin lluvia (3 y 9). Sin embargo al mirar la frecuencia de las cantidades más altas (considerando alta como precipitación superior a 30mm/día) el modelo presenta menor frecuencia de días con precipitación alta, mientras que las observaciones tienen una mayor frecuencia. Los resultados una vez más, corroboran la hipótesis de que el modelo no tiene una buena habilidad para la reproducción de los extremos de precipitación.

4.1.4. Verificación de los resultados

En esta sección se presentan los resultados de la verificación de los pronósticos obtenidos con el modelo con la

finalidad de evaluar de manera cuantitativa con índices sencillos y fáciles de interpretar, la bondad de los datos obtenidos.

En la figura 20 se presentan las correlaciones espaciales para los meses de agosto de todo el periodo entre las observaciones y la media de todos los miembros del modelo. Este cálculo se ha repetido para las anomalías y para dos índices de extremos como son el P90 (q90 en la figura) y los días con precipitación superior al P90 climatológico de todo el periodo (ndays>q90). También en este apartado se ha usado una segunda salida de datos del modelo, correspondientes a los datos con start date de agosto, para poder ver el posible efecto de la distinta fase de inicio de las predicciones en la bondad de los resultados.

Los colores rojos indican que la correlación entre las observaciones y el modelo es positiva y por tanto buena; y los azules que esta es negativa. Las regiones en color gris indican que no hay correlación entre los resultados del modelo y los de las observaciones.

Para las anomalías se puede ver que para los datos con start date en agosto, la correlación espacial es mucho mejor que para los datos con start date de mayo. Especialmente en las zonas de interés con lluvias más intensas como sería Centro Europa, hay una mayor habilidad del modelo en estimar la precipitación para agosto en cuanto más cercana sea la start date de inicialización de las predicciones al mes pronosticado. El mismo patrón presenta los mapas del P90 y de los días con precipitación superior al percentil 90 climatológico. Aún tratándose de índices extremos, la capacidad del modelo mejora (más puntos con correlación positiva) al estar más cercano el start date con el mes pronosticado. Pero estos mapas solo presentan la correlación entre la media de los 9 miembros del modelo y las observaciones; y debería ser analizado cada miembro por separado para ver la distinta capacidad de cada uno según los diferentes parámetros de inicialización para estimar la lluvia observada.

Este análisis se ha llevado a cabo para dos puntos en concreto; uno en España, concretamente sobre Madrid (40°N-4°O) y el otro para la zona alpina suiza (46.5°N-9°E) como se muestra en las figuras 21, 22 y 23. El primer punto es en un lugar seco y caluroso en verano y el segundo punto (ya analizado a lo largo de este estudio) es una zona húmeda y con abundantes precipitaciones en verano.

En las figuras 21, 22 y 23 se presenta la serie temporal de los distintos índices estudiados (las anomalías, el P90 y los días con precipitación superior al P90) para los dos puntos en concreto como se ha explicado más arriba. La línea negra son los valores observados, la línea roja la media de los 9 miembros con la inicialización de mayo y la azul los 9 miembros del modelo con la inicialización de agosto. Los puntos rojos son los valores de cada uno de los 9 miembros del modelo inicializado en mayo para cada año. La finalidad de estas figuras es ver de forma cualitativa observando las graficas la correspondencia entre los resultados observados con los resultados estimados por

Probability density functions for Augusts

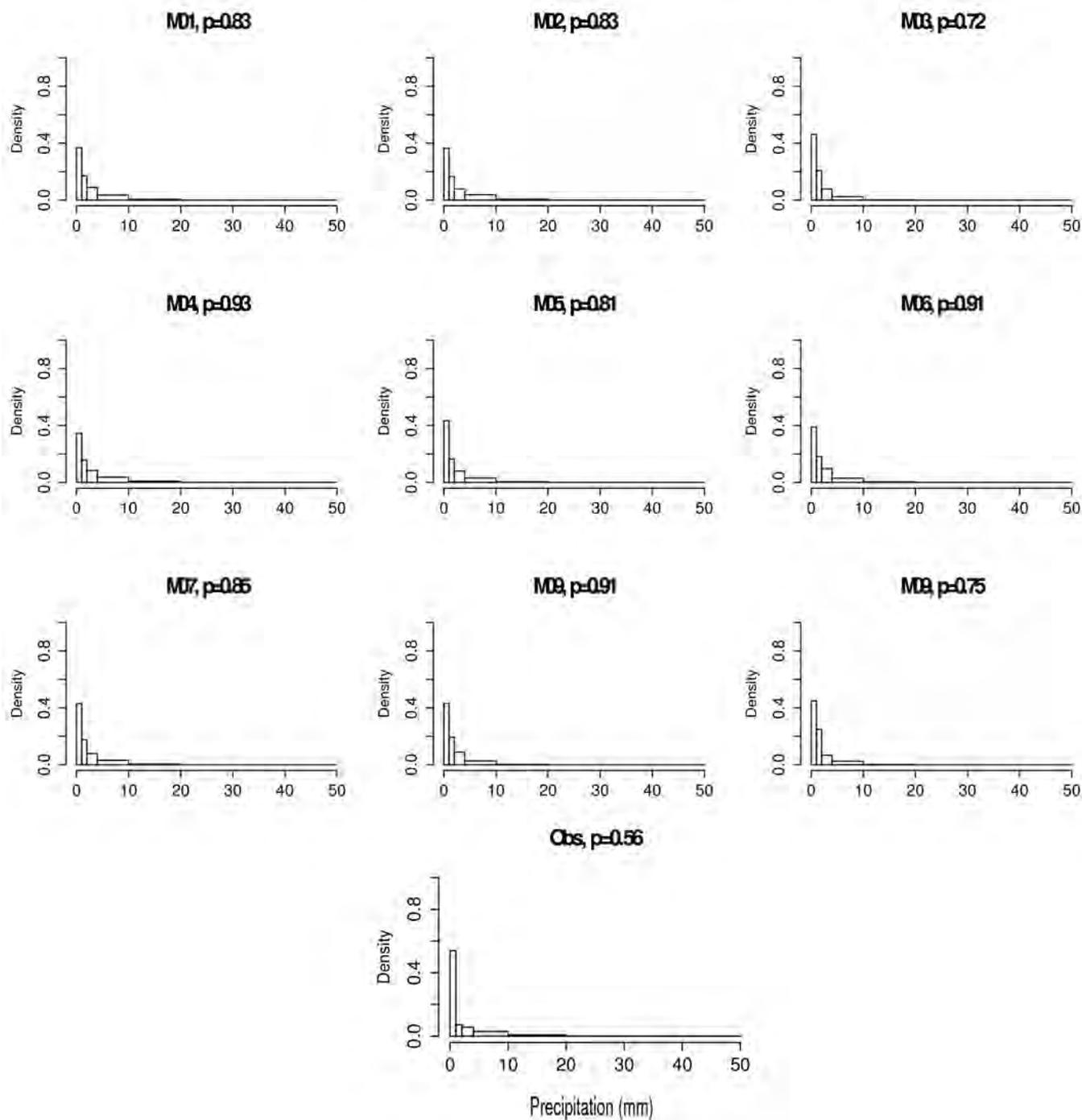


Figura 19. Funciones de probabilidad de densidad (PDF) para cada método y para las observaciones para la precipitación total diaria para todos los agostos de 1960 a 2005.

el modelo para las dos fechas de inicialización; y ver también cuando esta correspondencia es mejor, según el punto de estudio y el índice calculado (en general para extremos se espera que esta sea peor).

La figura 21 presenta las anomalías de la precipitación a lo largo de todo el período para ambos puntos estudiados. Valores positivos indican que la precipitación ha sido superior a la media climatológica y valores nega-

tivos que esta ha sido inferior. Se puede ver que la variabilidad interanual para las observaciones es mucho mas grande que para la media del modelo (para ambas fechas de inicialización); que es normal dado que como la media del modelo integra los distintos miembros cada uno de estos tiene un resultado distinto en función de los parámetros perturbados iniciales de manera que resultados positivos se cancelan con resultados negativos

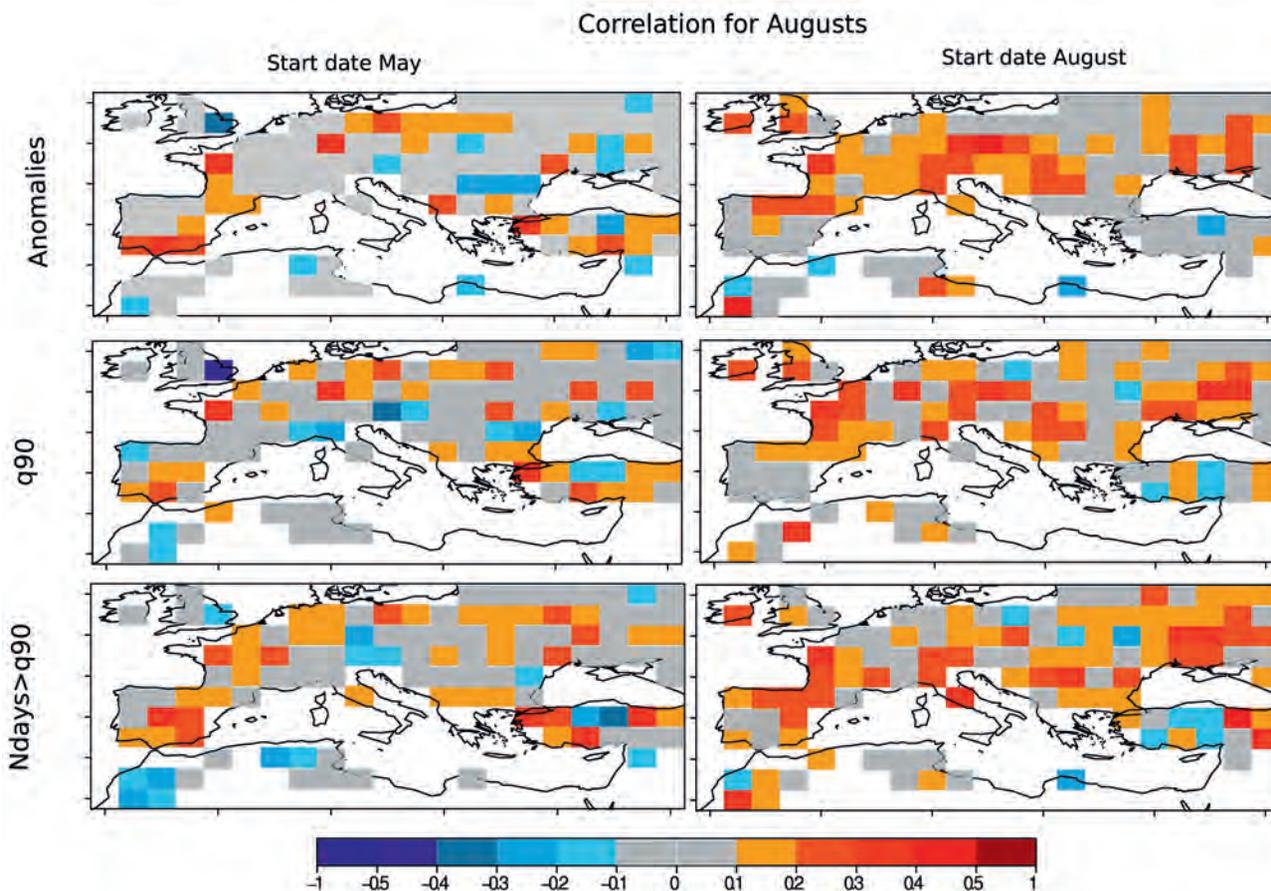


Figura 20. Correlación entre las observaciones y la media del conjunto para las anomalías, el P90 y el número de días mayor que el P90 climatológico en cada punto de la cuadrícula para agostos para las fechas de inicio del modelo de mayo y de agosto.

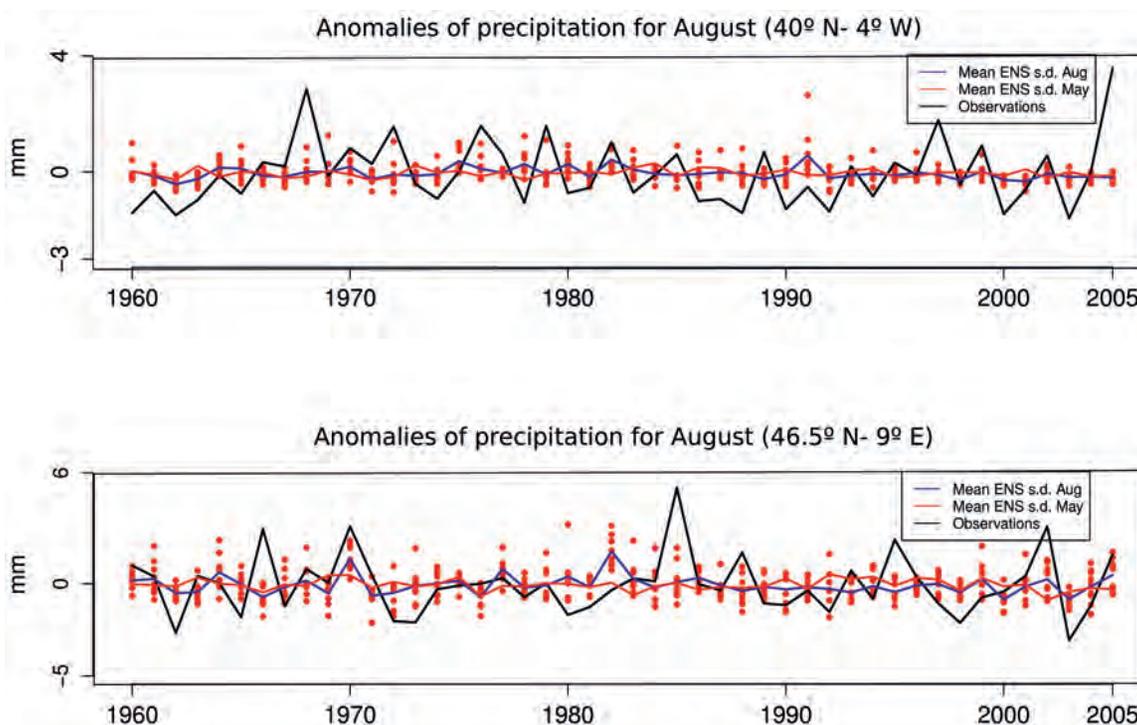


Figura 21. Serie temporal de las anomalías de precipitación para un punto sobre Madrid (figura superior) y para un punto sobre la zona alpina suiza (figura inferior). La línea negra son los valores observados, la línea azul la media para la inicialización del modelo en agosto y la roja para mayo. Los puntos rojos son los valores de cada miembro del modelo inicializado en mayo.

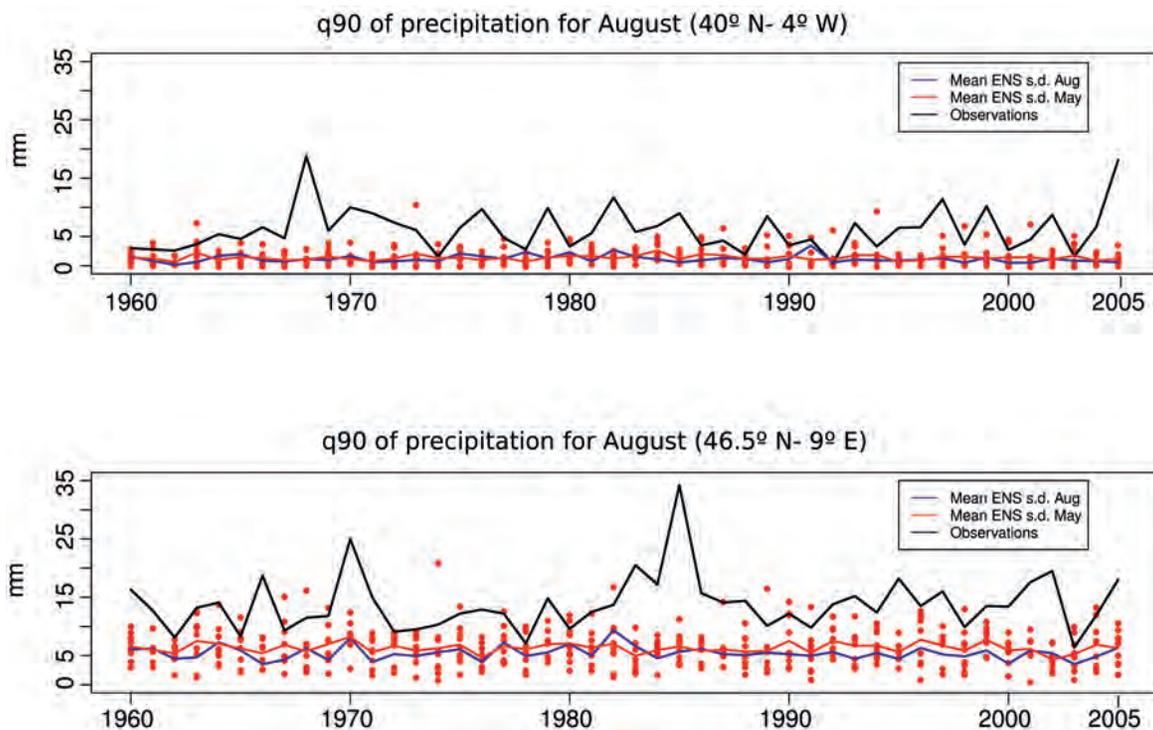


Figura 22. Serie temporal del P90 de precipitación para un punto sobre Madrid (figura superior) y para un punto sobre la zona alpina suiza (figura inferior). La línea negra son los valores observados, la línea azul la media para la inicialización del modelo en agosto y la roja para mayo. Los puntos rojos son los valores de cada miembro del modelo inicializado en mayo.

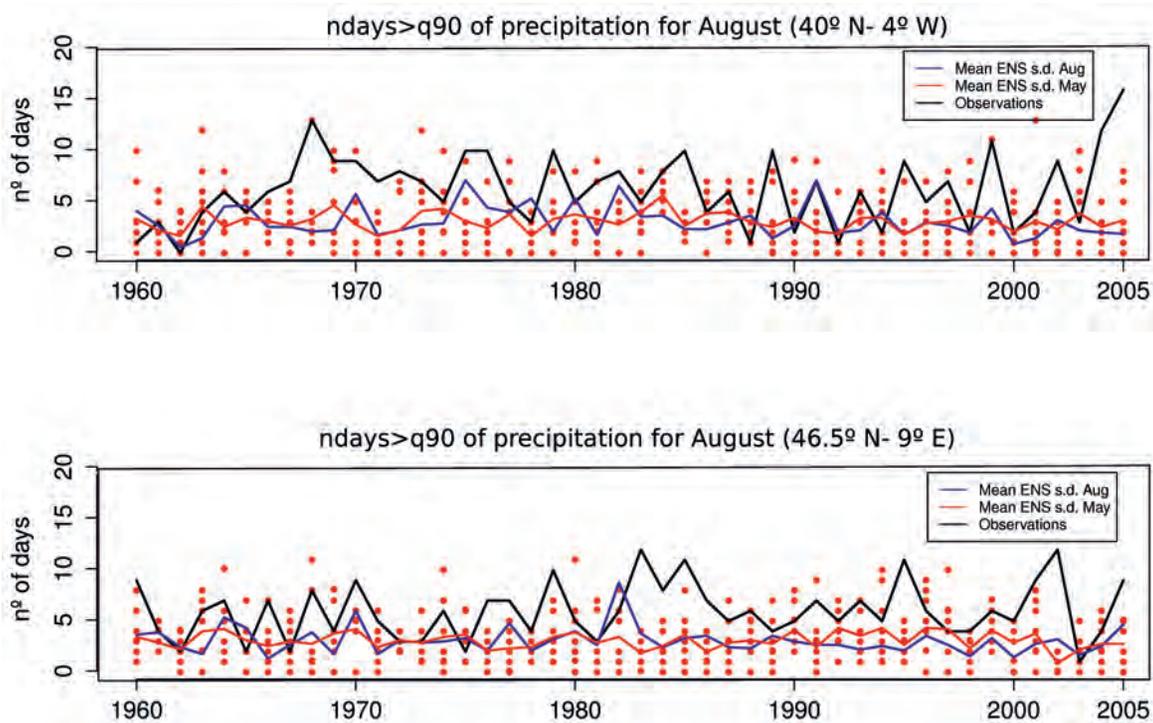


Figura 23. Serie temporal de los días con precipitación superior al P90 para un punto sobre Madrid (figura superior) y para un punto sobre la zona alpina suiza (figura inferior). La línea negra son los valores observados, la línea azul la media para la inicialización del modelo en agosto y la roja para mayo. Los puntos rojos son los valores de cada miembro del modelo inicializado en mayo.

dando una variabilidad interanual muy poco marcada y con valores cercanos a 0 para la mayoría de los años. Por esa razón es interesante ver el comportamiento de los distintos miembros con relación a las observaciones. Para el punto sobre Madrid vemos que las observaciones tienen picos tanto positivos como negativos mucho más marcados que el modelo; aunque algún miembro de manera puntual puede tener valores más elevados se concluye de forma general que la precipitación estimada por el modelo por lo que a las anomalías de precipitación se refiere es inferior a la real, así que se está subestimando la lluvia observada.

Para el punto sobre la zona alpina donde llueve más y por lo tanto encontramos desviaciones más grandes de la climatología; el comportamiento de la media del modelo para ambas fechas de inicialización respecto al de las observaciones es el mismo que antes. Pero lo interesante en esta figura es que los picos de precipitación son más marcados y algunos miembros del modelo tienen una mayor correspondencia con la precipitación observada, cosa que podría sugerir una mejor capacidad del modelo para estimar la precipitación en zonas más lluviosas que en zonas más secas.

Con la figura 22 y 23 se analiza la misma discusión anterior pero para los extremos de precipitación, que es el tema de interés de este estudio. Tanto para el P90 como para los días muy lluviosos (días con precipitación superior al P90 climatológico) los valores observados son mayores que los dados por el modelo. Pero es interesante ver como otra vez algunos miembros son capaces de estimar mejor los valores extremos, e incluso en algún año sobreestimar dicha precipitación. También se ve como para las zonas secas (como Madrid) la correspondencia entre los resulta-

dos del modelo y el de las observaciones es mucho peor que para las zonas húmedas (como sobre la zona alpina).

En conclusión estos resultados nos sugieren que aunque el modelo subestima la precipitación extrema real, tiene una mayor capacidad para simularla en zonas húmedas y con lluvias más abundantes (y donde hay más tasa de inundaciones catastróficas en verano) que para zonas secas. Y esto es interesante desde el punto de vista de predicción de catástrofes naturales debido a inundaciones, ya que aunque el modelo sigue teniendo una capacidad baja para predecirlas, si encontramos indicios de que para las zonas con mayor probabilidad de que estas ocurran, los resultados serán más aproximados a la realidad, es decir más fiables.

4.2. Predicción decadal de ciclones tropicales

En las simulaciones obtenidas con EC-Earth, los CTs se forman sobre la cuenca del Atlántico Norte, incluyendo el área que se conoce como la región principal de desarrollo (MDR) y que está limitada por 8° N-20°N, 80° O- 20° O. En la figura 24 se representa la presión superficial del mar y el viento en superficie con el modelo durante el mes de septiembre, para apreciar un ejemplo de cómo este simula los huracanes.

Se puede ver un ciclón tropical formado en el Golfo de México y otro aproximándose a la costa de Estados Unidos.

Sin embargo, el número medio anual de las tormentas (~2) detectada es muy inferior al promedio climatológico 1960-2010 (~8). Teniendo en cuenta los resultados previos obtenidos por otros GCM, integrados con resoluciones similares [42], una tendencia a la baja en el conteo total de tormentas sobre el Atlántico no es un resultado extraño. En

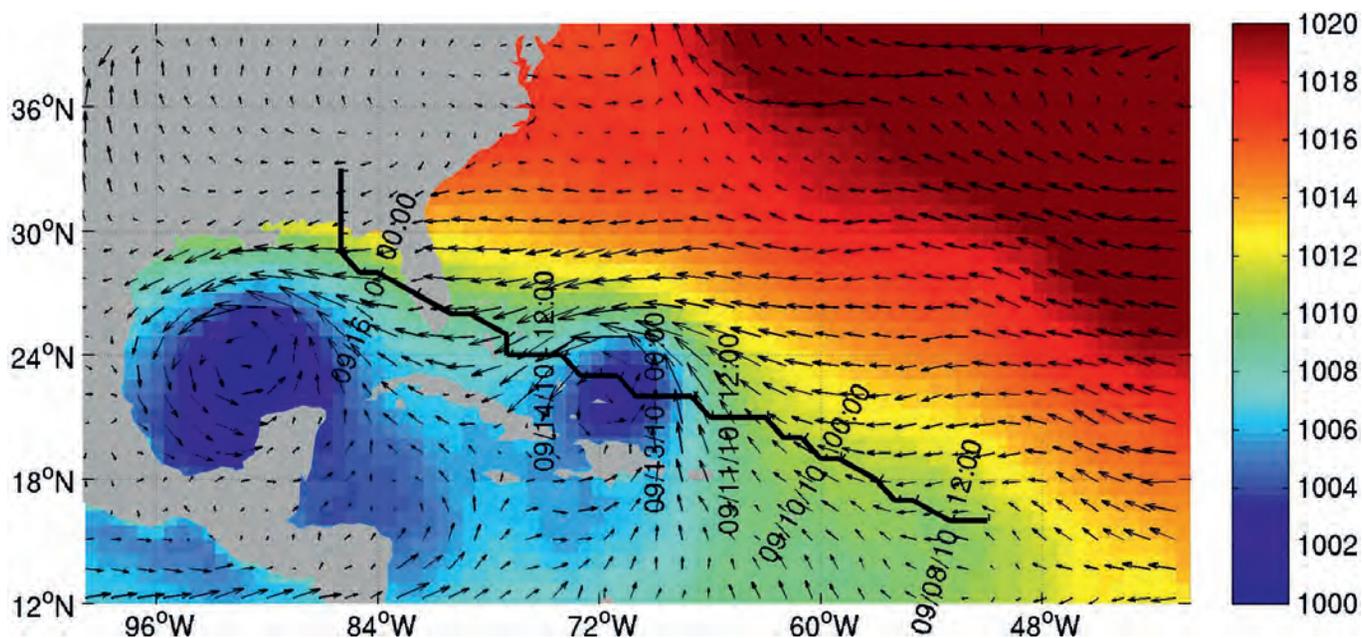


Figura 24. Presión superficial media del océano simulada con EC-Earth para el mes de septiembre. Las flechas representan el viento en superficie. Un ciclón tropical se aprecia en el Golfo de México mientras otro se aproxima a la costa estadounidense.

este caso, sin embargo, la tendencia parece estar reforzada por una deriva (hacia valores más bajos) en las temperaturas superficiales del océano tropical Atlántico (referidas como TSM). Esto parece estar respaldado por una tendencia a la baja en los números de CTs en función de los años de pronóstico en los primeros cinco años de las simulaciones, como se puede ver en la figura 25.

El bajo número de CTs en las simulaciones en comparación con las observaciones hace difícil sacar buenas conclusiones con respecto a la capacidad de las simulaciones del modelo para reproducir la actividad de CTs. Esta tendencia observada es inherente a la predicción decadal con la metodología de la inicialización completa (ver sección datos para su descripción). Existen procedimientos estándar para corregir campos continuos tales como la temperatura, pero sin embargo, esta desviación en las TSM tiene un impacto especialmente profundo en la simulación de los ciclones tropicales, ya que estas tor-

mentas requieren que la temperatura del océano este por encima de cierto umbral (~ 26°C) para su formación. Cualquier desviación en las TSM por debajo de ese valor, tendrá como consecuencia una reducción significativa o incluso una anulación de la formación de TCs en las simulaciones del modelo.

La figura 26 compara la media climatológica de la TSM en el Atlántico para el período Agosto-Octubre entre las observaciones y las distintas series de simulaciones.

Se ve claramente como las TSM simuladas por el modelo están por debajo del umbral requerido, sobre una área significativa de la cuenca, y probablemente obstaculizando la ciclogénesis. Esta deficiencia se discute en la siguiente sección, pero antes se presentan algunos resultados preliminares obtenidos a través de la segunda técnica usada actualmente y descrita en la metodología, para investigar la actividad de ciclones tropicales en los modelos climáticos.

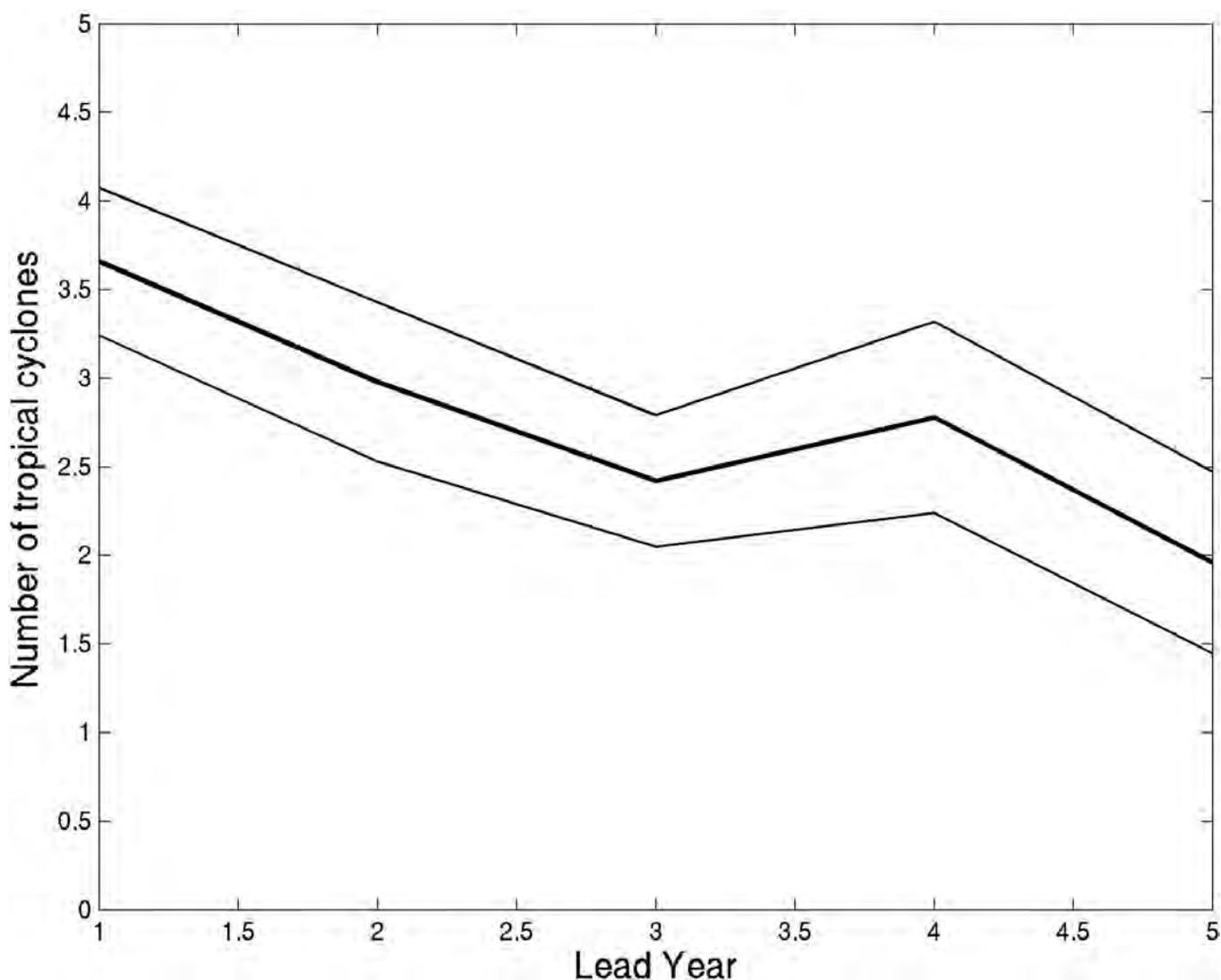


Figura 25. Tendencia a la baja en el número de ciclones tropicales presentes en los primeros años de las previsiones. La línea de negra gruesa representa la media del conjunto, mientras que las líneas negras finas representan la desviación estándar por encima y por debajo de la media del conjunto.

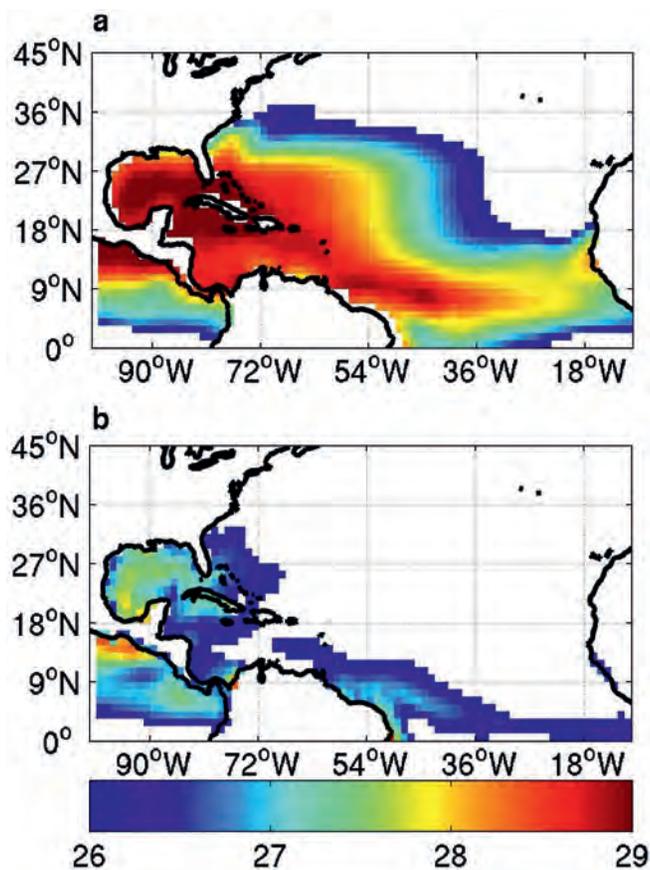


Figura 26. Media a) observada y b) temperatura superficial del mar predicha durante el período Agosto-Octubre (ASO) en el Atlántico Norte para los años 1 a 5.

La estabilidad termodinámica del sistema océano-atmósfera se puede evaluar a través de la variable llamada intensidad potencial [43]. La IP es la intensidad máxima teórica que un huracán podría alcanzar en un entorno determinado (teniendo en cuenta las TSM más las condiciones atmosféricas). La comparativa de la IP con las observaciones muestra una buena correlación con las intensidades máximas observadas de las tormentas más severas [44]. Conservando las mismas condiciones, los valores altos de la IP significan mayor inestabilidad y un ambiente más propicio para la formación de los CTs. Así, en primer lugar, se ha calculado la correlación punto a punto entre la media del conjunto agosto-septiembre-octubre (ASO, período que ha sido elegido ya que contiene los meses más activos en términos de actividad de huracanes) y la IP de los primeros cinco años de la serie completa de 1960-2005 de simulaciones con las correspondientes observaciones de la media de la IP en un período de cinco años en la región del Atlántico Norte.

Las IP observadas se calculan utilizando los reanálisis de ERA40 [45] y ERA-Interim [46]. El resultado se muestra en la figura 27.

Correlaciones significativas, con valores de $p < 0,05$, basado en una prueba t de Student, se pueden apreciar en gran parte de la MDR, lo que sugiere que las predic-

ciones de EC-Earth muestran una cierta capacidad en simular las variaciones en la IP sobre dicha región.

A continuación, se ha calculado la media del conjunto de los valores de la IP para el período ASO de los primeros cinco años de las predicciones para 1960-2005 y las IP de los cinco años correspondientes en el reanálisis, sobre el área de la MDR, donde se encuentra la correlación más grande en las IP (área limitada por 8°N , 18°N , 60°O , 30°O , caja en la figura 27). Los resultados se muestran en la figura 28.

Las fluctuaciones de las simulaciones son un poco reducidas en comparación con las de las observaciones (probablemente debido a que el efecto de hacer el promedio reduce la varianza en la IP), sin embargo, dichas simulaciones si que pueden captar las variaciones observadas relativamente bien, con un índice de correlación de 0,72. De gran importancia es la capacidad del modelo para reproducir los valores de IP bajos en la década de 1970 y 1980, así como el pico que se produjo a mediados de la década de 1990.

El gráfico también muestra las anomalías en los huracanes por períodos de 5 años (línea azul). La correlación entre la IP observada en la MDR y las anomalías en los huracanes es muy significativa (0,89), lo que sugiere que la simulación de las variaciones observadas en la IP de esa región podría proporcionar información sobre la actividad real de los CT en un horizonte de 5 años. En comparación, el índice de correlación entre la IP de las simulaciones en la MDR y las anomalías en los huracanes ocurridos en los períodos de 5 años es de 0,74. Realizando un análisis similar con predicciones retrospectivas individuales de 6 a 10 años en lugar de 1 a 5 años se obtienen resultados similares, como se puede ver en la figura 29.

Esto significa que las anomalías son muy significativas. De hecho, estos dos índices de correlación son superiores cuando se utiliza la serie de 6-10 años que cuando se utiliza la de 1 a 5 años. Este resultado no es fácil de explicar, pero sugiere que los forzamientos externos (gases de efecto invernadero, aerosoles) juegan un papel importante en la modulación de los cambios recientes en la IP de la MDR, así como la actividad reciente de los ciclones tropicales.

5. CONCLUSIONES

Para el ejemplo de predicción estacional el objetivo principal fue evaluar la capacidad del modelo DePreSys en la predicción de precipitaciones sobre el área del Mediterráneo occidental. El trabajo se ha centrado en el estudio de dichas precipitaciones en el período estival, concretamente en los meses de agosto; donde por definición climática, es un mes más seco y caluroso en el Mediterráneo, pero que también es un mes donde se han producido las inundaciones más importantes de las últimas décadas.

Los resultados del análisis obtenido sugieren que el conjunto de datos de EObs son una buena base de datos

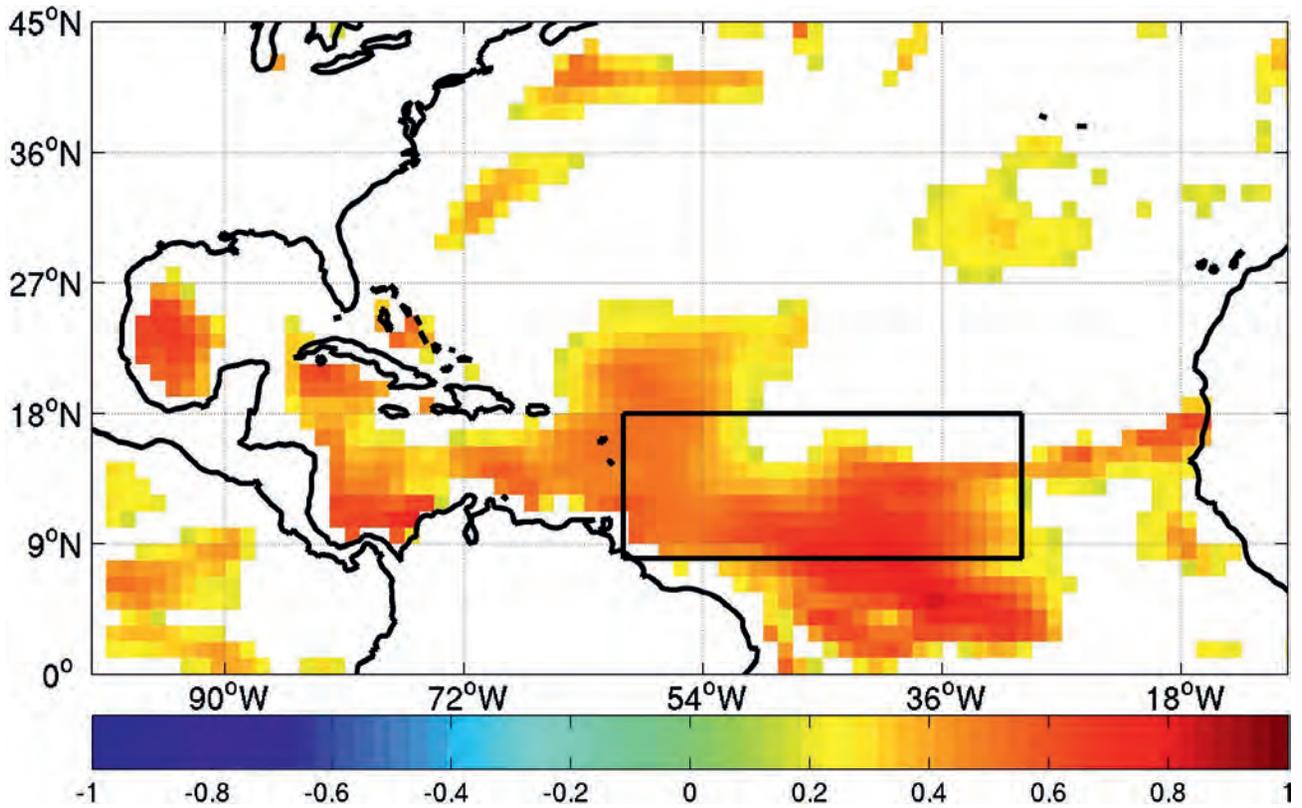


Figura 27. Correlaciones punto a punto entre la intensidad potencial media predicha para el período Agosto-October (ASO) del año 1 al 5 de las predicciones decadales efectuadas con EC-Earth y la intensidad potencial media del mismo período en las observaciones para el período 1960-2010.

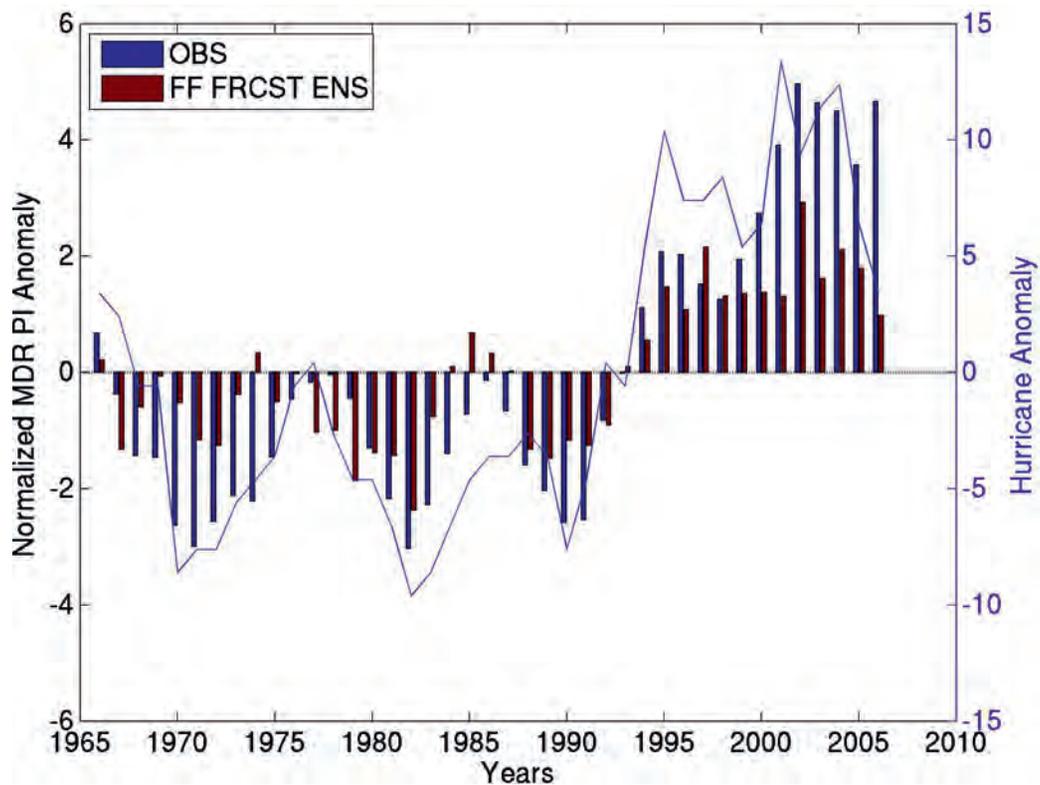


Figura 28. Barras rojas: Anomalías en la IP media simulada para el período Agosto-October (ASO) del año 1 al 5 de las predicciones decadales efectuadas con EC-Earth en el período 1960-2005. Barras azules: Anomalías observadas en la IP media para los 5 años correspondientes al período de predicción. Las barras están alineadas (eje x) con respecto al primer año de pronóstico (rojo) o el primer año observado (azul). Línea azul: Media sobre cinco años de las anomalías observadas en el número de huracanes. Las anomalías han sido calculadas con respecto a la climatología del período 1960-2010.

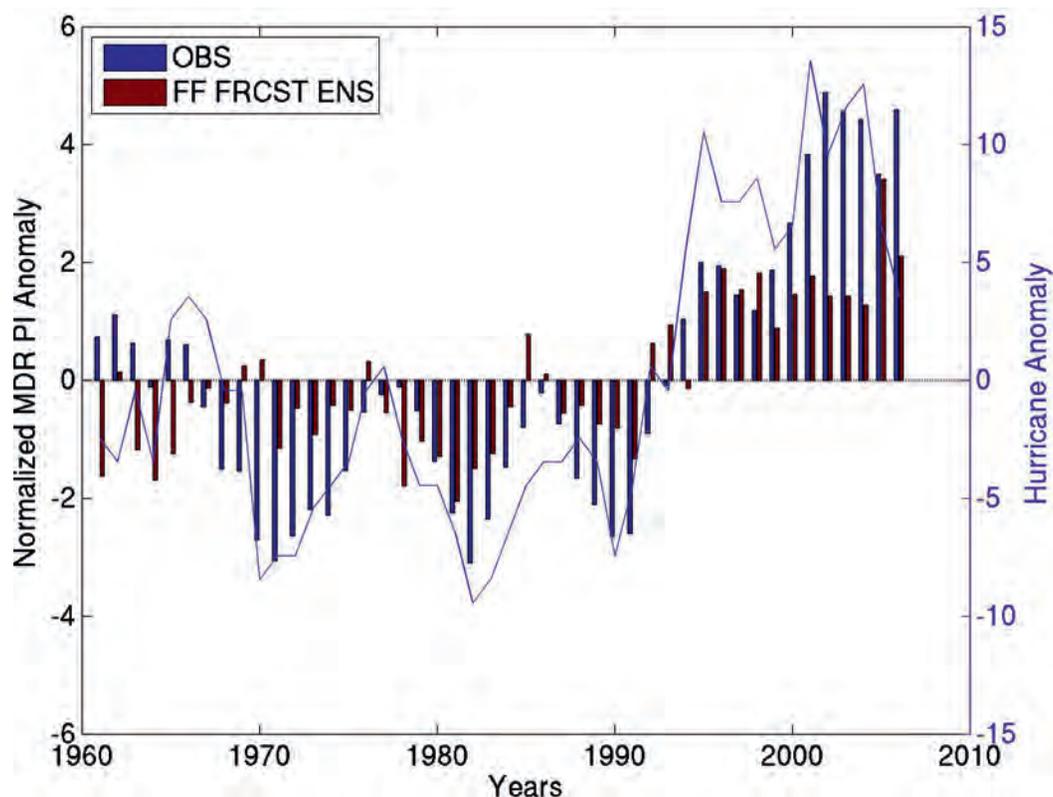


Figura 29. Barras rojas: Anomalías en la IP media simulada para el período Agosto-Octubre (ASO) del año 6 al 10 de las predicciones decadales efectuadas con EC-Earth en el período 1960-2005. Barras azules: Anomalías observadas en la IP media para los 5 años correspondientes al período de predicción.

de referencia, primero porque están disponibles en resoluciones muy altas y la calidad es buena permitiendo apreciar fenómenos más locales. Segundo porque incorpora los datos más recientes y es actualizada constantemente, además de una constante mejora en la cobertura de la red de estaciones. Todo esto hace que se una buena base de datos para comparar los resultados estimados por el modelo. Aún así debe tenerse en cuenta el error asociado a su uso y que pueden modificar en parte a los resultados del estudio. Las principales fuentes de errores encontradas han sido la pérdida de información al interpolar EObs a la resolución del modelo; sobre todo en áreas costeras y en zonas con cantidades de precipitación muy pequeñas, que pueden dificultar el estudio de eventos más locales; y el error intrínseco de la base de datos debido a la distinta distribución espacial-temporal de las estaciones en toda la región estudiada; de manera que se obtiene una sobreestimación de la precipitación en zonas donde llueve más y una subestimación de esta en zonas más secas. Aún así en comparación con otras posibles bases de datos de referencia, ya sean observaciones o de reanálisis (como ERA-Interim), EObs es una buena opción a elegir para el estudio de la precipitación.

Sobre los resultados obtenidos con las predicciones estacionales del modelo; de forma resumida se puede concluir que DePreSys reproduce bien los patrones climáticos de la precipitación en Europa; sobretodo en

áreas más húmedas como son el centro del continente o las islas británicas. Pero con los índices de extremos estudiados se ha podido ver que no es bueno en estimar los valores extremos de precipitación. Esta capacidad empeora como más localizado en el espacio-tiempo es el evento a estudiar. Así se ha visto que para el estudio de casos concretos ocurridos en la última década como son las inundaciones en agosto de 2002 y agosto de 2005, el comportamiento de todos los miembros difiere mucho del de las observaciones. También cave destacar que la precipitación es una variable de muy difícil estudio, con distintos orígenes posibles que dificultan su predicción (de cairo convectivo, frontal, orográfico, etc.), además que el factor estacional también juega un papel importante en la capacidad del modelo para dicha predicción (debería verse si el modelo tiene mejor habilidad en la predicción de esta en estaciones húmedas como otoño, o frías como invierno donde los patrones climatológicos son distintos). Por último los distintos parámetros de inicialización de cada miembro, como se ha visto, son importantes a la hora de obtener unos resultados más parecidos a la realidad, de manera que miembros más cálidos obtienen unos mejores y más fiables resultados que miembros más fríos para el objetivo de este estudio.

Con los resultados de las verificaciones de pronósticos se ha querido ver de manera cuantitativa la fiabilidad del estudio realizado, así como cuantificar la bondad del

modelo con parámetros simples y de fácil obtención, para estimar las precipitaciones. Se ha encontrado que aunque pequeña hay una correlación espacial positiva para las anomalías de precipitación, pero otra vez más la correlación entre el modelo y las observaciones disminuye al estudiar los extremos. También se ha visto el importante papel que juega la diferente inicialización del modelo, con miembros que se ajustan mucho mejor a los extremos observados según si el área estudiada es de tendencia climática seca (como la cuenca sur del Mediterráneo) o de tendencia húmeda (como los valles de grandes cordilleras montañosas y Europa Central).

En conclusión, este estudio es solo preliminar y solo es una pequeña parte de un trabajo que requiere un coste temporal y computacional muy elevado, con lo cual no se puede decir con seguridad si el uso de DePreSys para la predicción de eventos extremos de precipitación es viable o no. Hay muchos aspectos que aún deben ser estudiados y es uno de los objetivos futuros de estudio. También deben repetirse los análisis realizados para otras estaciones del año con la finalidad de ver la distinta capacidad del modelo según la estación. Y más allá de la predicción estacional el principal objetivo es obtener resultados fiables de predicción decadal de dichos eventos. Por el momento y como se ha visto solo puede concluirse que el modelo no es lo suficientemente bueno como para predecir inundaciones concretas; corroborando así otros estudios publicados anteriormente. Pero si se puede afirmar que con distintas mejoras, tan técnicas como de análisis estadístico, se pueden obtener resultados más cercanos a la realidad.

Sobre los resultados presentados sobre la predicción a escala decadal de CTs, estos parecen indicar que las simulaciones inicializadas con los datos de EC-Earth son capaces de predecir la variabilidad decadal observada en la estabilidad vertical sobre la MDR, que es un importante motor de actividad de los huracanes en el Atlántico. Estos resultados preliminares son muy alentadores, aunque todavía queda trabajo por hacer para responder a preguntas como:

¿Cuál es el beneficio exacto causado por la inicialización del modelo con las observaciones?

¿Puede cada uno de los miembros individuales del conjunto también capturar la variabilidad en la IP? ¿Cuál es la diferencia entre cada uno de estos miembros del conjunto? ¿Los resultados son lo suficientemente consistentes para establecer una relación estadística entre la IP en la MDR y las estadísticas de huracanes, de la que se pueda inferir la actividad de los CTs para un horizonte temporal de 5-10 años?

Por último, no existe ningún sustituto para compensar la ausencia de CTs causada por las bajas TSM del modelo. Sin embargo, dada la capacidad del modelo para capturar variaciones en las TSM en la mayor parte de la MDR, es posible que si las TSM previstas estuviesen por encima del umbral de 26 °C, la actividad de los CTs aumentaría suficientemente para ser viable para su comparación con las observaciones. Cabe mencionar por eso que las desviaciones del modelo respecto las observacio-

nes, son en parte responsables de la tendencia a la baja en el número de CTs que se produce durante los primeros meses de las retrospectivas, que están inicializadas el 1 de noviembre. (Recordar que el inicio oficial de la temporada de huracanes es el 1 de agosto). Esto sugiere que: i) el impacto de las desviaciones en la formación de los CTs es probablemente más fuerte que la que se muestra en la figura 28, ya que la mayoría de las desviaciones en las TSM se dan en el inicio de la primera temporada de huracanes y ii) si no hubieran desviaciones presentes en la simulación, el número promedio de ciclones tropicales durante una temporada sería mucho más cercano al del promedio climatológico observado.

De esta manera se va a correr de nuevo la componente atmosférica del modelo usando las anomalías en las TSM de las simulaciones superimpuestas a las climatologías de las TSM observadas. Así se espera que las TSM estén por encima del umbral requerido para la formación de los huracanes, conservando también las anomalías de las TSM derivadas de cada simulación individual. Además, como el coste computacional de correr el modelo es bastante reducido con esta configuración, permite aumentar la resolución a 0.7°, cosa que basado en previos estudios [47] puede contribuir también a incrementar la ciclogénesis en la MDR y por lo tanto a unos mejores resultados. Este experimento requiere la simulación de más de 2000 temporadas de huracanes con una resolución relativamente alta, algo que requeriría alrededor de 1.000.000 horas de computación en un ordenador personal estándar. En cambio, este experimento se está realizando en un superordenador Cray ubicado en Suecia y los resultados estarán disponibles en los próximos meses.

6. AGRADECIMIENTOS

Los resultados han sido obtenidos a partir de la información cedida por el The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Los autores agradecen al ECMWF los datos proporcionados para este trabajo tanto por las predicciones como por las observaciones que forman parte del proyecto EU-FP6 ENSEMBLES (<http://ensembles-u.metoffice.com>) y a los proveedores de datos del proyecto ECAD (<http://eca.knmi.nl>). Parte de los resultados han sido obtenidos también gracias al proyecto financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España a través del proyecto RUCSS.

Otorgamos también especial agradecimiento a FUNDACIÓN MAPFRE, que ha esponsorizado este trabajo, y ha dado la posibilidad a la autora principal de publicar los resultados del estudio como parte de la tesis de master. En especial a Juan Satrústegui, el tutor de Mapfre que ha dado toda su ayuda y ha proporcionado información importante para el desarrollo de este trabajo.

Agradecer por último al Institut Català de les Ciències del Clima (IC3) por su apoyo durante todo el trabajo y por haber facilitado los recursos técnicos necesarios para desarrollar todos los experimentos y estudios que aquí se

presentan. Sobre todo dar gracias al Dr. Francisco Javier Doblás-Reyes, quien ha co-tutorizado este trabajo y ha ayudado día a día en todo el desarrollo del mismo. También mencionar al Dr. Renato Vitolo de la Universidad de Exeter, que ha colaborado en este trabajo y ha prestado su ayuda con todo el análisis estadístico. También agradecer a Louis Philippe Caron por toda su colaboración en la sección de predicción decadal de ciclones tropicales.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, D.L.T.; Doblás-Reyes, F.J.; Balmaseda, M.; y Weisheimer, A. Decadal variability: Processes, predictability and prediction. ECMWF Technical Memorandum, 2009, (591), 47.
- Smith, D. M.; and Murphy, J. M. An objective ocean temperature and salinity analysis using covariances from a global climate model. *J. Geophys. Res.*, (112), C02022, doi: 10.1029/2005JC003172.
- Cane, M.A. Decadal predictions in demand. *Nature Geoscience*, 2010, (3), 231-232.
- Lean, J.L.; and Rind, D.H. How will Earth's surface temperature change in future decades? *Geophys. Res. Lett.*, (36), L15708, doi: 10.1029/2009GL038932.
- Van der Linden, P.; and Mitchell, J.F.B. ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project, (eds.) 2009. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160pp.
- Hawkins and Sutton. Decadal predictability of the Atlantic Ocean in a coupled GCM: forecast skill and optimal perturbations using Linear Inverse Modelling', *Journal of Climate*, 2009. 22, 3960, doi: 10.1175/2009JCLI2720.1
- Fowler, H.J.; Ekstrom, M.; Blenkinsop, S.; and Smith, A.P. Estimating change in extreme European precipitation using a multimodel ensemble. *J. Geophys. Res.*, (112), D18104.
- Cislaghi, M.; De Michele, C.; Ghezzi, A.; Rosso, R. Statistical assessment of trends and oscillations in rainfall dynamics: Analysis of long daily Italian .Atmospheric Research, September–October 2005. (77), Issues 1-4, 2005, Pages 188-202.
- Osborn, T.J.; Hulme, M.; Jones, P.D.; and Basnett T.A. Observed trends in the daily intensity of United Kingdom precipitation. *International Journal of Climatology*, 2000. (20), 347-364.
- Semenov, V.; and Bengtsson, L. Secular Trends in Daily Precipitation Characteristics: Greenhouse Gas Simulation with a Coupled AOGCM. *Clim. Dyn.*, 2002.19, 123-140.
- Frei, C.; Schöll, R.; Fukutome, S.; Schmidli, J.; and Vidale, P.L. Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. *J. Geophys. Res.* (111), D06105.1-D06105.22
- Coles, S. An Introduction to Statistical Modelling of Extreme Values. Springer Series in Statistics. Springer-Verlag, London, 2001. 208.
- Benestad, R.E. A Simple Test for Changes in Statistical Distributions. 2008. *Eos*, 89 (41), 389-390.
- Friederichs, P.; and Hense, A. Statistical downscaling of extreme precipitation events using censored quantile regression, 2007. *Mon. Wea. Rev.* 135, 2365-2378.
- Schmidli, J.; Goodess C. M.; Frei, C.; Haylock, M. R.; Hündecha, Y.; Ribalaygua, J.; and Schmith, T. Statistical and dynamical downscaling of precipitation: An evaluation and comparison of scenarios for the European Alps, *J. Geophys. Res.*, 112, D04105, doi:10.1029/2005JD007026.
- Wallace, J.M. Weather- and climate-related extreme events: teachable moments, *Eos Trans.*, 2012: . AGU, 93 (11), 120, doi: 10.1029/2012EO110004.
- Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z., Marquis, M.; Averyt, K.B.; Tignor M.; y Miller, H.L. (eds.) Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2007.
- Van Aalst, M. K. The impacts of climate change on the risk of natural disasters, *Disasters*. 2006. 30, 5-18, doi:10.1111/j.1467-9523.2006.00303.x
- Pielke, Jr.; R.A.; Gratz, J.; Landsea, C.W.; Collins, D.; Saunders, M.; and Musulin, R. Normalized Hurricane Damages in the United States: 1900-2005. *Natural Hazards Review*, 2008. 9 (1) 29-42, doi: 10.1061/(ASCE) 1527-6988 (2008) 9: 1 (29).
- Doblás-Reyes, F.J., Weisheimer A.; Palmer, T.N.; Murphy, J.M.; Smith, D. Forecast quality assessment of the ENSEMBLES seasonal-to-decadal Stream 2 hindcasts. ECMWF Technical Memorandum, 2010. 621, 45 pp. <<http://www.ecmwf.int/publications/library/do/references/show?id=89771>>.
- Hawkins, E.; Sutton, R. Decadal predictability of the Atlantic Ocean in a coupled GCM: forecast skill and optimal perturbations using linear inverse modeling, *Journal of Climate Amer. Meteor.*, 2009. Soc., (22), 3960-3978.
- Gordon, C.; Cooper, C.; Senior C.A.; Banks H.; Gregory, J.M.; Johns, T.C.; Mithell, J.F.B.; Wood, R.A. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments, *Clim. Dyn.*, 2000. (16), 147-168.
- Doblás-Reyes, F.J.; Weisheimer, A.; Déqué, M.; Keenlyside, N.; McVean, M.; Murphy, J. M.; Rogel P.; Smith, D.; and Palmer, T. N. Addressing model uncertainty in seasonal and annual dynamical seasonal forecasts, *Quart. J. Roy. Meteor.Soc.*, 2009. (135), doi:10.1002/qj.464.
- Hazeleger, W. et al. EC-Earth: A Seamless Earth System Prediction Approach in Action. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2010. (88) 1383–1394, doi:10.1175/BAMS-88-9-1383.
- Haylock, M.R.; Hofstra, N.; Klein Tank, A.M.G.; Klok, E.J.; Jones, P.D.; and New, M. A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.*, (113), D20119, doi: 10.1029/2008JD10201.
- Houghton, J.T.; Ding, Y.; Griggs, D.Y.; Noguer, M.; Van der Linden, P.J.; Dai, X.; Maskell, K.; Johnson, C.A. (Eds.) IPCC Climate change 2001. The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the IPCC. Cambridge Univ, 2001. Press, 881.
- Field, C.B.; Barros, V.; Stocker, T.F.; Qin, D.; Dokken, D.J.; Ebi, K.L.; Mastrandrea, M.D.; Mach, K.J.; Plattner, G.-K.; Allen, S.K.; Tignor, M.; and Midgley, P.M. (eds.). IPCC, Summary for Policymakers. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance. Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, 2012, NY, USA. pp. 1-19.
- Katz, R.W. Short Course on Statistics of Extremes in Climate Change, lecture notes, University of Buenos Aires, 2009. <<http://www.isse.ucar.edu/staff/katz/lecture.php>>.
- Mays, W. Water Resources Engineering, Wiley, Arizona State Univ., Tempe Reiss, R.-D. and M. Thomas, 2001: Statistical Analysis of Extreme Values with applications to insurance, finance, hydrology and other fields. Springer Series in Statistics, Birkhauser, Boston, 2005. 316 p.
- Jolliffe, I.T.; and Stephenson, D.B. Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science. John Wiley & Sons, Ltd, University of Exeter, UK, 2012.

31. Wilks, D.S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Segunda edición. Elsevier, USA, 2006.
32. Gray, W.M.; Landsea, C.W.; Mielke Jr., P.W.; and Berry, K.J. Predicting Atlantic Basin Seasonal Tropical Cyclone Activity by 1 August, 1993, *Wea. Forecasting*, 8, 73-85.
33. Garcia-Serrano, J.; and Doblas-Reyes, F.J. On the assessment of near-surface global temperature and North Atlantic multi-decadal variability in the ENSEMBLES decadal hindcast, 2012. *Clim. Dyn.*
34. Caron, L.P.; Jones, C.G.; and Winger, K. Impact of resolution and downscaling technique in simulating recent Atlantic tropical cyclone activity. *Clim. Dyn.*, 2011. (5), 869-892. doi 10.1007/s00382-010-0846-7.
35. Caron, L.P.; and Jones, C.G. Understanding and simulating the link between African Easterly Waves and Atlantic Tropical Cyclones using a Regional Climate Model: The role of domain size and lateral boundary conditions. *Clim. Dyn.*, 2011. doi: 10.1007/s00382-011-1160-8.
36. Walsh K.J.E.; Fiorino, M.; Landsea, C. W.; and McInnes, K.L. Objectively determined resolution-dependent threshold criteria for the detection of tropical cyclones in climate models and reanalysis. *J. Clim.*, 2007. (20), 2307-2314.
37. Emanuel, K.A.; and Nolan, D. Tropical cyclone activity and global climate. In: 26th conference on hurricanes and tropical meteorology. American Meteorological Society, Miami, 2004. pp 240-241.
38. Gray, W.M. Tropical cyclone genesis. Department of Atmospheric Science Paper, No. 234, Colorado State University, Fort Collins, 1975.
39. Klok, E.J.; and Klein Tank, A.M.G. Updated and extended European dataset of daily climate observations. *Int. J. Climatol*, 2008. doi:10.1002/joc.1779.
40. Hofstra, N.; New, M.; McSweeney, C. The influence of interpolation and station network density on the distribution and extreme trends of climate variables in gridded data. Submitted to *Clim. Dyn.*, 2009.
41. Frei, C.; Scholl, R.; Fukutome, S.; Schmidli J.; and Luigi Vidale, P. Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. *J. Geop. Research*, (111), D06105, doi:10.1029/2005JD005965.
42. Camargo, S. J.; Barnston, A. G.; and Zebiak, S.E.A. Statistical assessment of tropical cyclone activity in atmospheric general circulation models. *Tellus*, 2005. 57A, 589-604.
43. Bister, M.; and Emanuel, K.A. Dissipative heating and hurricane intensity. *Meteor. Atmos. Phys.*, 1998. (52), 233-240.
44. Tonkin, H.; Holland, G.J.; Holbrook, N.; and Henderson-Sellers, A. An evaluation of thermodynamic estimates of climatological maximum potential tropical cyclone intensity. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 746-762.
45. Uppala, S. M.; Kaallberg, P. W. K.; Simmons, A. J.; Andrae, U.; and Bechtold, V.D.C. The ERA-40 re-analysis. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 131, 2961-3012. doi: 10.1256/qj.04.176.
46. Dee, D.P.; Uppala, S.M.; Simmons, A.J.; Berrisford, P.; Poli, P. and co-authors. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2011(137), 553-597. doi: 10.1002/qj.828.
47. Caron, L.P.; Jones, C.G.; Vaillancourt, P.A.; and Winger, K. On the relationship between cloud-radiation, atmospheric stability and Atlantic tropical cyclone activity in a variable-resolution climate model. *Clim. Dyn.*, 2012. doi: 10.1007/s00382-012-1311-6.
48. Anon. Major natural catastrophes, 1950-2001. *Population and Development Review*, 2002. (28) (1), 171-174.
49. Booij, M.J. Extreme daily precipitation in Western Europe with climate change at appropriate spatial scales. *Int. J. Climatol*, 2002. (22), 69-85.
50. Collins, M.B.; Booth, B.B.; Harris, G.R.; Murphy J.M.; Sexton, D.M.H.; and Webb, M.J. Towards quantifying uncertainty in transient climate change, *Clim. Dyn.*, 2005., (27), 127-147, doi:10.1007/s00382-006-0121-0.
51. Collier, B.; Skees, J.; and Barnett, B. Weather index insurance and climate change: Opportunities and challenges in lower income countries. *The Geneva Papers on Risk and Insurance - Issues and Practice*, 2009. (34), 401-424, doi:10.1057/gpp.2009.11.
52. Compo, G.P.; Whitaker J.S.; Sardeshmukh, P.D.; Matsui N.; Allan R.J.; Yin, X.; Gleason B.E.; Vose, R.S.; Rutledge, G.; Bessemoulin, P.; Brönnimann, S.; Brunet, M.; Crouthamel, R.I.; Grant, A.N.; Groisman, P.Y.; Jones, P.D.; Kruk, M.C.; Kruger, A.C.; Marshall, G.J.; Maugeri, M.; Mok, H.Y.; Nordli, O.; Ross, T.F.; Trigo, R.M.; Wang, X.L.; Woodruff, S.D.; and Worley, S.J. The Twentieth Century Reanalysis Project, *Quart. J.Roy. Meteor. Soc.*, submitted, 2009.
53. Kalnay, E. *Atmospheric modeling, data assimilation and predictability*, Cambridge University Press. 2003. 341 pp.
54. Elsner, J.B.; King Burch, R. and Jagger, T.H. Catastrophe finance: An emerging discipline. *EOS Transactions*, 2009. 90.
55. Hofstra, N.; and New, M. Spatial variability in correlation decay distance and influence on angular-distance weighting interpolation of daily precipitation over Europe. *Int. J. Climatol*, 2008. (29), doi: 10.1002/joc.1819.
56. Kharin, V.V.; Zwiers, F.W.; Zhang, X.; and Hegerel, G.C. Changes in Temperature and Precipitation Extremes in the IPCC Ensemble of Global Coupled Model Simulations. *J. Clim.*, 2007. (20), 1419-1444.
57. Mays, W. *Water Resources Engineering*, Wiley, Arizona State Univ., Tempe Reiss, R.-D. and M. Thomas, 2001: *Statistical Analysis of Extreme Values with applications to insurance, finance, hydrology and other fields*. Springer Series in Statistics, Birkhauser, Boston, 2005. 316 p.
58. Semmler, T.; and Jacob, D. Modeling extreme precipitation events – a climate change simulation for Europe. *Global and Planetary Change*, 2004. (44), 119-127.
59. Van den Hurk, B.J.J.M.; Doblas-Reyes, F.J.; Balsamo, G.; Koster, R.; Seneviratne S.; and Camargo Jr, H. Soil moisture effects on seasonal temperature and precipitation forecast scores in Europe. *Climate Dynamics*, in press, 2010. doi: 10.1007/s00382-010-0956-2.
60. Katz, R.W. Statistics of extremes in climate change. *Climatic Change*, 2010. 100, p.71-76.
61. Dee, D.P.; Uppala, S.M.; Simmons, A.J.; Berrisford, P.; Poli, P.; and co-authors. 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.
62. Zhang, R.; and Delworth, T.L. Impact of Atlantic multidecadal oscillations on India/Sahel rainfall and Atlantic hurricanes. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L17712. doi:10.1029/2006GL026267.
63. Van den Besselaar, E.J.M.; Haylock, M.R.; Van der Schrier G. and Klein Tank, A.M.G. A European daily high-resolution observational gridded data set of sea level pressure. *J. Geophys. Res.*, 2011. Res., doi: 10.1029/2010JD015468.

Otras referencias consultadas pero no citadas en el texto:

48. Anon. Major natural catastrophes, 1950-2001. *Population and Development Review*, 2002. (28) (1), 171-174.

Conflicto de intereses

Los autores hemos recibido ayuda económica de FUNDACIÓN MAPFRE para la realización de este proyecto. No hemos firmado ningún acuerdo por el que vayamos a recibir beneficios u honorarios por parte de alguna entidad comercial o de FUNDACIÓN MAPFRE.

8. ANEXO

ACRONIMOS

ENSO: El Niño- Southern Oscillation

P90: Percentil 90

EObs: European Observation dataset

AC: Índice de correlación anómalo

GEV: Generalized extreme values

EVT: Teoría de los valores extremos

ENSEMBLES: Proyecto de predicción por conjuntos

GCM: General circulation model – Modelo de circulación general global

RCM: Regional circulation model – Modelo de circulación general regional

PDF: Probability density function – Función de densidad de probabilidad

MDR: Main development region – Region principal de desarrollo

CT: Ciclones tropicales

IP: Intensidad potencial

TSM: Temperatura superficial del mar