

# Cuadernos de I+D+i

27

**Canal**   
**de Isabel II**

Escenarios de cambio  
climático para eventos  
pluviométricos severos en  
la Comunidad de Madrid

© Canal de Isabel II 2018

### **Autores**

*Antonio Lastra de la Rubia*

*Paula González Laynez*

*Beniamino Russo*

*Raúl Rodríguez-Solá*

*Jaime Ribalaygua*

### **Dirección del estudio**

*Antonio Lastra de la Rubia*

### **Agradecimientos**

Este trabajo contó con la colaboración de la Dirección de Drenaje Urbano de Aqualogy;  
el Departamento de Astronomía y Meteorología de la (UB);  
el Departamento de Física e Ingeniería Nuclear de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería (UPC); la  
Fundación para la Investigación del Clima y  
Mónica Ortega Castro

ISSN de la edición impresa: 2254-8955  
ISSN de la edición en soporte electrónico: 2340-1818  
Depósito Legal: M-28823-2018



# 27

Escenarios de cambio climático  
para eventos pluviométricos severos en la  
Comunidad de Madrid



## Exclusión de Responsabilidad

Las afirmaciones recogidas en el presente documento reflejan la opinión de los autores y no necesariamente la de Canal de Isabel II.

Tanto Canal de Isabel II como los autores de este documento declinan todo tipo de responsabilidad sobrevenida por cualquier perjuicio que pueda derivarse a cualesquiera instituciones o personas que actúen confiadas en el contenido de este documento, o en las opiniones vertidas por sus autores.

## Presentación

Los cuadernos de I+D+i de Canal de Isabel II forman parte de la visión sobre gestión del conocimiento de la empresa, del desarrollo de su Estrategia de I+D+i 2017-2020 y de su Plan de Empresa 2018-2030.

Son elemento de difusión de proyectos e iniciativas desarrollados y auspiciados desde la Empresa para la innovación en las áreas relacionadas con el servicio de agua en el entorno urbano.

Exponen las diferentes problemáticas abordadas en cada proyecto junto con los resultados obtenidos. La intención al difundirlos mediante estas publicaciones es compartir las experiencias y conocimientos adquiridos con todo el sector de servicios de agua, con la comunidad científica y con cuantos desarrollan labores de investigación e innovación. La publicación de estos cuadernos pretende contribuir a la mejora y eficiencia de la gestión del agua y, en consecuencia, a la calidad del servicio prestado a los ciudadanos.

Los títulos aparecidos en la colección de Cuadernos de I+D+i son los que figuran en la tabla siguiente.

## TÍTULOS EN LA COLECCIÓN DE CUADERNOS DE I+D+I

Nº colección	Año	Cuadernos Investigación, Desarrollo e Innovación publicados
1	2007	Transferencias de derechos de agua entre demandas urbanas y agrarias. El caso de la Comunidad de Madrid
2	2008	Identificación de rachas y tendencias hidrometeorológicas en el ámbito del sistema de Canal de Isabel II
3	2009	Participación de Canal de Isabel II en el Proyecto Internacional de Eficiencia en la Gestión (IDMF)
4	2008	Microcomponentes y factores explicativos del consumo doméstico de agua en la Comunidad de Madrid
5	2008	El agua virtual y la huella hidrológica en la Comunidad de Madrid
6	2008	Estudio de potenciales de ahorro de agua en usos residenciales de interior
7	2008	Investigación sobre potenciales de eficiencia con el empleo de lavavajillas
8	2010	Precisión de la medida de los consumos individuales de agua en la Comunidad de Madrid
9	2010	Proyecto de investigación para la definición y evaluación de la aplicabilidad de un bioensayo para la determinación de la toxicidad del agua utilizando embriones de pez Cebra
10	2010	Eficiencia en el uso del agua en jardinería en la Comunidad de Madrid
11	2010	Técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica para la evaluación de la demanda de agua para usos de exterior en la Comunidad de Madrid
12	2010	Estudio sobre la dinámica de cianotoxinas en dos embalses de abastecimiento de Canal de Isabel II
13	2011	Desarrollo de un sistema de validación, estimación y predicción de consumos horarios por sectores para la red de distribución de Canal de Isabel II
14	2011	Seguimiento de la consolidación del desarrollo urbano en la Comunidad de Madrid mediante técnicas de teledetección
15	2012	Experiencias para la recuperación del fósforo de las aguas residuales en forma de estruvita en Canal de Isabel II
16	2012	Integración de la predicción meteorológica en los módulos de gestión del sistema de abastecimiento de Canal de Isabel II, mediante modelos de aportación diaria
17	2012	Mejora de la capacidad de pronóstico de aportaciones mensuales y estacionales en el ámbito de Canal de Isabel II
18	2013	Aportación de nutrientes desde la cuenca al embalse de Pinilla. Incidencia en el proceso de eutrofización
19	2013	Un nuevo criterio para el cálculo del caudal de agua residual urbana
20	2014	Gestión de Ideas en Canal de Isabel II de Isabel II: la experiencia <i>GENYAL</i>

<b>Nº colección</b>	<b>Año</b>	<b>Cuadernos Investigación, Desarrollo e Innovación publicados</b>
21	2014	Investigación sobre técnicas para la medición de subsidencias relacionadas con la explotación de acuíferos
22	2015	Régimen de precipitaciones en la Cuenca del Lozoya y adyacentes
23	2016	Estudio de observabilidad para la estimación del estado hidráulico de la red sectorizada de abastecimiento
24	2016	Estudio de casuística y modos de fallo en tuberías, acometidas y conjuntos de medida de la Comunidad de Madrid
25	2017	Sistema de reconocimiento de patrones para identificación de usos finales del agua en consumos domésticos
26	2018	Análisis de la influencia de variables explicativas en los modelos de rotura de tuberías

## Estructura del documento

El presente cuaderno tiene como objetivo el estudio y determinación de los coeficientes de **cambio climático** que pueden afectar a las precipitaciones futuras en la Comunidad de Madrid, tanto a las precipitaciones extremas que pueden provocar inundaciones y un funcionamiento incorrecto de la red de drenaje urbano, como a las más habituales, que suponen la fuente del recurso hídrico primario del sistema de abastecimiento de agua urbano. Así mismo, y como trabajo complementario a éste, se han recalculado las curvas IDF aplicables a la Comunidad de Madrid.

Al principio del documento se desarrolla un **resumen ejecutivo** que pretende, de manera abreviada, pasar revista a la metodología, condiciones de contorno, fuentes de datos y, sobre todo, resultados del estudio realizado.

Para una mejor comprensión de los trabajos llevados a cabo se desarrolla el capítulo primero donde se pasa revista a la metodología que se va a emplear, se explica el concepto de **radiatividad**, se exponen los diversos escenarios de cambio climático sobre los que se va a trabajar y se analiza cómo se ha llevado a cabo la corrección de los posibles errores en la metodología.

En un segundo capítulo se aplica la metodología desarrollada anteriormente en la Comunidad de Madrid, realizando un estudio pormenorizado de las fuentes de datos disponibles, para terminar con el desarrollo de los coeficientes de cambio climático para la Comunidad de Madrid. Estos coeficientes también se exponen en el resumen ejecutivo.

Finalmente se complementa el estudio con diversos anejos para un mejor seguimiento del documento, incluyendo un resumen de las tablas y figuras utilizadas, un listado de los acrónimos empleados y un extracto de la bibliografía empleada.

## Palabras Clave

Cambio climático - Lluvias extremas – Inundaciones - Curvas IDF - Resiliencia

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Página
<b>EXCLUSIÓN DE RESPONSABILIDAD</b>	4
<b>PRESENTACIÓN</b>	5
<b>TÍTULOS EN LA COLECCIÓN DE CUADERNOS DE I+D+I</b>	6
<b>ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO</b>	8
<b>Palabras clave</b>	8
<b>RESUMEN EJECUTIVO</b>	11
Ficha Técnica	12
INTRODUCCIÓN	14
METODOLOGÍA	16
FUENTES DE DATOS	17
ESCENARIOS FUTUROS “RCP”	19
COEFICIENTES DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA COMUNIDAD DE MADRID	21
CONCLUSIONES	23
<b>1. GENERACIÓN Y ESTUDIO DE ESCENARIOS LOCALES DE CAMBIO CLIMÁTICO DE PRECIPITACIÓN, SOBRE OBSERVATORIOS METEOROLÓGICOS DE LA COMUNIDAD DE MADRID</b>	24
1.1. INTRODUCCIÓN A LA GENERACIÓN Y ESTUDIO DE ESCENARIOS LOCALES	25
1.2. OBJETIVOS EN LA GENERACIÓN Y ESTUDIO DE ESCENARIOS LOCALES	26
1.3. LA METODOLOGÍA DE REGIONALIZACIÓN FICLIMA	26
1.3.1. La regionalización o “Downscaling”	26
1.3.2. Estrategias de regionalización	28
1.3.3. La metodología FICLIMA de regionalización	30
1.3.4. Ventajas de la metodología FICLIMA	32
1.4. ANÁLISIS DE DATOS HISTÓRICOS	33
1.4.1. Datos suministrados	33
1.4.2. Control de calidad	35
1.4.3. Homogeneización	37
1.5. VERIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS	40
1.6. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS CLIMÁTICOS	46
1.7. GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE CLIMA FUTURO A ESCALA LOCAL	50
1.8. SOBRE EL USO DE LOS DATOS DE LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS	65

1.9.	LA CORRECCIÓN DEL ERROR SISTEMÁTICO	66
1.9.1.	Fundamento teórico	67
1.9.2.	Escenarios futuros corregidos	69
1.10.	CONCLUSIONES	81
1.10.1.	Sobre la metodología de “Downscaling”	81
1.10.2.	Sobre los Escenarios Futuros	81
<b>2.</b>	<b>CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE CAMBIO CLIMÁTICO, PARA DIFERENTES HORIZONTES Y ESCENARIOS, A PARTIR DE LAS PROYECCIONES DE PRECIPITACIÓN DIARIA</b>	<b>82</b>
2.1.	INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PRECIPITACIÓN DE LA PENÍNSULA IBÉRICA	83
2.2.	ANÁLISIS DE LAS SERIES DE PRECIPITACIÓN DIARIA 2006-2100	84
2.3.	CÁLCULO DE LA INTENSIDAD MÁXIMA HORARIA, PARA DIFERENTES ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO, Y OBTENCIÓN DEL FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO (FC)	88
2.4.	ELEMENTOS CLIMÁTICOS ANUALES PROMEDIO DE LAS TRES ESTACIONES TERMO - PLUVIOMÉTRICAS (TP)	90
2.5.	FACTORES CLIMÁTICOS PARA CADA ESTACIÓN TERMO-PLUVIOMÉTRICA (TP)	95
2.6.	FACTORES CLIMÁTICOS EN FUNCIÓN DE LA ESTACIÓN DEL AÑO	109
<b>3.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>126</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>129</b>
ANEXO 1.	ÍNDICE DE FIGURAS	130
ANEXO 2.	ÍNDICE DE TABLAS	134
ANEXO 3.	ACRÓNIMOS Y TÉRMINOS	136
ANEXO 4.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137

# Resumen Ejecutivo



## Ficha Técnica

Título del proyecto	Escenarios de cambio climático para eventos pluviométricos severos en la Comunidad de Madrid
Línea de investigación	Integración ambiental y sostenibilidad
Unidades de Canal de Isabel II implicadas	Subdirección Investigación, Desarrollo e Innovación
Participación externa	Departamento de Astronomía y Meteorología de la Universidad de Barcelona, Dirección de Drenaje Urbano de Aqualogy, Departamento de Física e Ingeniería Nuclear de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería (UPC), Fundación para la Investigación del Clima.
Objeto y justificación del proyecto	<p>El último informe del organismo internacional IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático) alerta sobre los cambios que a escala global se están produciendo en el ciclo del agua, con un aumento de los fenómenos meteorológicos extremos (entre otros), provocados por el calentamiento de la atmósfera, los océanos y el incremento de la concentración de GEI (gases efecto invernadero).</p> <p>Para una adecuada planificación de los recursos hídricos y de las infraestructuras estratégicas, (especialmente las de drenaje, puesto que su dimensionamiento y comportamiento depende especialmente de la distribución temporal y espacial de los eventos de lluvia), se hace necesario llevar a cabo este proyecto de investigación para aplicar los escenarios globales propuestos por el IPCC a la Comunidad de Madrid y, de esa manera, poder anticipar la influencia que dicho cambio climático tendrá sobre las lluvias de diseño de infraestructuras.</p>
Contribución al estado del arte	Este proyecto ha sido uno de los primeros ejemplos a nivel internacional de aplicación, en el campo del drenaje urbano, de los nuevos escenarios RCP propuestos en el último informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático.
Resumen del desarrollo del proyecto e hitos relevantes	<p>La comunidad científica internacional ha definido una serie de escenarios futuros de cambio climático bajo los cuales se han generado simulaciones con alcance mundial de los diferentes modelos climáticos existentes. Para poder aplicar estos escenarios globales a la Comunidad de Madrid, se ha realizado un proceso de "regionalización", que permite la aplicación local de los resultados de las simulaciones futuras. La Fundación para Investigación del Clima (FIC) ha desarrollado un método propio de regionalización, seleccionado para este proyecto, y se ha aplicado sobre tres observatorios meteorológicos de Madrid (Retiro, Getafe y Torrejón), para generar, a partir de modelos climáticos globales, escenarios futuros de cambio climático locales sobre la precipitación en tales observatorios.</p> <p>El estudio pluviométrico avanzado de estimación de precipitaciones extremas en la Comunidad de Madrid se ha basado en diferentes Modelos de Circulación General (MCG), una técnica específica de <b>Downscaling</b> espacial llamada FICLIMA, elaborada y validada en España, y cuatro escenarios de forzamiento radiativos (<i>Representative Concentration Pathways</i>, o RCP). La combinación de los modelos utilizados y los escenarios disponibles para cada uno de ellos han proporcionado un abanico de treinta y una posibles evoluciones de clima futuro, que alcanzan hasta el año 2100.</p> <p>Los posibles efectos de estos escenarios han sido cuantificados a través del cálculo de coeficientes de cambio climático que expresan el cociente entre la intensidad de lluvia para un periodo de retorno asignado y una duración determinada, correspondiente a un escenario de clima futuro, y la intensidad de lluvia equivalente en el clima presente para el mismo periodo de retorno y la misma duración.</p>

<b>Resumen de resultados obtenidos</b>	<p>Se han obtenido coeficientes de cambio climático para las tres estaciones pluviométricas analizadas, cada horizonte temporal y cada escenario RCP, para lluvias con duración diaria y horaria.</p> <p>Debido a la alta incertidumbre de los resultados generados por los MCG y de las otras hipótesis implícitas en la metodología empleada (ajustes estadísticos, uso de la técnica fractal, ...) y en ausencia de aspectos orográficos que justifiquen cambios climáticos significativos en las tres estaciones meteorológicas estudiadas en Madrid, se ha considerado oportuno promediar los resultados de los MCG y los valores de los coeficientes de cambio climático, para las tres estaciones analizadas.</p>
<b>Líneas de Investigación abiertas para la continuación de los trabajos</b>	<p>Es necesaria la vigilancia activa de los fenómenos de precipitación extrema en la Comunidad de Madrid para poder realizar un correcto seguimiento de los resultados. Por otro lado, las proyecciones futuras están basadas en modelos de evolución que son periódicamente actualizados por el IPCC. Los resultados de este trabajo han de ser, por tanto, actualizados en el mismo modo para una mejor aproximación a los cambios que se produzcan.</p>

# Resumen Ejecutivo

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años la comunidad científica internacional ha puesto de manifiesto su inquietud por lo que se ha denominado “Cambio Climático” cuyos efectos se han hecho evidentes en las últimas décadas. Según el último informe del **IPCC** (Panel Intergubernamental del Cambio Climático, 2013), es extremadamente probable que el cambio climático tenga origen antropogénico. Así mismo, se constata que el calentamiento es inequívoco y desde la década de 1950 muchos de los cambios observados no tienen precedentes. El mencionado informe deja clara la influencia humana en los efectos climáticos debido a que el incremento de la concentración de gases de efecto invernadero (**GEI**) en la atmósfera ha supuesto un calentamiento de la propia atmósfera y los océanos, cambios en el ciclo del agua, reducciones de las capas de nieve y hielo, incremento global del nivel del mar y cambios en los fenómenos extremos.

Como parte del quinto informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), la comunidad científica ha definido una serie de escenarios futuros de cambio climático bajo los cuales se han generado simulaciones mundiales de los diferentes modelos climáticos existentes, creados y desarrollados por instituciones científicas de todo el mundo. Tales simulaciones, de carácter global, deben someterse a un proceso de “regionalización” para así poder utilizar sus resultados a una escala local; ése es precisamente el objetivo de una técnica de **Downscaling**, que permite la aplicación local de los resultados de las simulaciones futuras, ilustrado en la Figura 1. La Fundación para Investigación del Clima (**FIC**<sup>1</sup>) ha desarrollado un método propio de regionalización, denominado **FICLIMA**, que se ha seleccionado para este proyecto de investigación y se ha aplicado sobre un grupo de observatorios meteorológicos de la Comunidad de Madrid, para generar, a partir de modelos climáticos globales, escenarios futuros de cambio climático sobre la precipitación en tales observatorios.

---

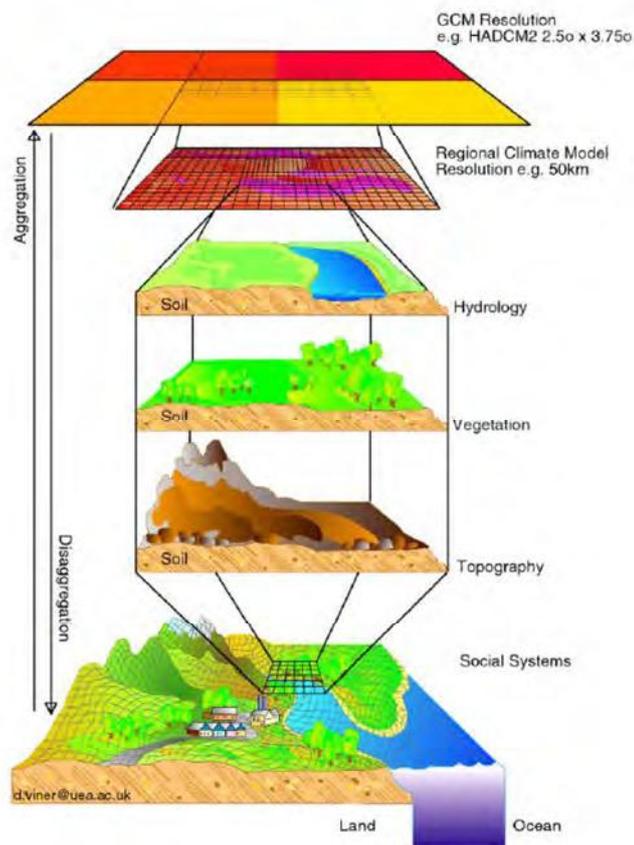
<sup>1</sup> FIC, Fundación para la Investigación del Clima es una entidad sin ánimo de lucro, privada y totalmente independiente, cuyos objetivos fundacionales se centran en la investigación en el ámbito del cambio climático, así como en las áreas de climatología, meteorología, medio ambiente y cooperación al desarrollo. Posee una larga experiencia en la generación de escenarios locales de cambio climático y una metodología propia de predicción estadística de las más robustas a nivel internacional (Metodología FICLIMA).

Para llevar a cabo una adecuada gestión de los recursos hídricos es necesario conocer cómo el cambio climático afectará a tales recursos, para así desarrollar una planificación que minimice sus efectos y contribuya a adaptar la gestión frente a las posibles alteraciones. Éstas afectan, con especial importancia, a las redes de drenaje urbano, por cuanto su dimensionamiento y comportamiento depende especialmente de la distribución temporal y espacial de los eventos de lluvia. Por ello, se ha llevado a cabo la generación de diferentes, e hipotéticos escenarios futuros de cambio climático, sobre un grupo de observatorios meteorológicos seleccionados de la Comunidad de Madrid, para así contribuir a un mayor conocimiento de las posibles variaciones en los regímenes de precipitación.

Canal de Isabel II ha elaborado un **Estudio Pluviométrico Avanzado** con el fin de predecir y estimar el posible efecto del cambio climático en las precipitaciones extremas, basado en diferentes Modelos de Circulación General (**MCG**) y la técnica de regionalización (**Downscaling** espacial). La combinación de los modelos utilizados y los escenarios disponibles para cada uno de ellos han proporcionado un abanico de treinta y una posibles evoluciones del clima futuro, que alcanzan hasta el horizonte temporal del 2100. En este cuaderno se exponen las conclusiones más importantes de dicho trabajo.

Para la realización del presente trabajo se contó con la colaboración de la Dirección de Drenaje Urbano de Aqualogy, el Departamento de Astronomía y Meteorología de la Universidad de Barcelona (UB), el Departamento de Física e Ingeniería Nuclear (Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Vilanova i la Geltrú, UPC) y la Fundación para la Investigación del Clima (FIC).

**FIGURA 1. MECANISMO “DOWNSCALING” DE REGIONALIZACIÓN O REDUCCIÓN DE ESCALA**



*Representación gráfica del mecanismo de regionalización o reducción de escala (Downscaling), adaptando las salidas de los modelos climáticos globales a las características fisiográficas de la región.*

*Fuente: David Viner, Climatic Research Unit, University of East Anglia, UK.*

## METODOLOGÍA

El **Estudio Pluviométrico Avanzado de Estimación de Precipitaciones Extremas** en la Comunidad de Madrid que ha servido como base para este documento, se ha fundamentado en diferentes Modelos de Circulación General (MCG), una técnica específica de “regionalización” (*Downscaling* espacial) llamada **FICLIMA**<sup>2</sup>, elaborada y validada en España, y cuatro escenarios de forzamiento radiativos<sup>3</sup> (*Representative Concentration Pathways* o RCP<sup>4</sup>). La combinación de los modelos utilizados y los escenarios disponibles para cada uno de ellos han proporcionado un abanico de treinta y una posibles evoluciones de clima futuro que alcanzan hasta el año 2100.

Debido a las elevadas incertidumbres asociadas a los MCG y las técnicas de *Downscaling* espacial y temporal, y de acuerdo con las indicaciones de la comunidad científica internacional, las posibles influencias del cambio climático han sido estimadas en términos de valores tendenciales (promediando los resultados de los diferentes MCG y de los diferentes observatorios, para cada uno de los escenarios).

Los posibles efectos potenciales del cambio climático en la Comunidad de Madrid han sido cuantificados a través del cálculo de coeficientes de cambio climático que expresan el cociente entre la intensidad de lluvia para un periodo de retorno asignado y una duración determinada, correspondiente a un escenario de clima futuro, y la intensidad de lluvia equivalente en el clima presente para el mismo periodo de retorno y la misma duración.

Se ha realizado una cuidada selección de observatorios meteorológicos de la Comunidad de Madrid para poder garantizar la obtención de los escenarios locales de clima futuro, de la mejor manera posible en cada punto, con los requisitos que a continuación se especifican:

- **Análisis de los datos observados disponibles.** Antes de utilizarlos, los datos meteorológicos observados disponibles han sido estudiados para determinar su validez y, por lo tanto, si pueden ser utilizados en su totalidad, si necesitan de acciones de corrección, o incluso ser descartados.
- **Verificación de la metodología FICLIMA.** Se han comprobado los resultados obtenidos por esta metodología al simular el clima de cada observatorio para determinar la capacidad de ésta para reflejar el clima de cada punto local a estudiar.
- **Validación de los modelos climáticos.** Es de gran importancia contar con el mayor número posible de modelos climáticos y de escenarios futuros para que así se pueda considerar un abanico suficientemente amplio de evoluciones futuras del clima; en este proyecto se ha trabajado con nueve modelos climáticos. Cada modelo simula el clima de una manera diferente (más frío/cálido, o más seco/húmedo) por lo que antes de generar escenarios de clima futuro se evalúa el comportamiento de cada modelo en cada punto a estudiar.

---

<sup>2</sup> FICLIMA. Metodología de predicción estadística del clima propia de la Fundación para la investigación del Clima.

<sup>3</sup> Forzamiento radiativo. Es el cambio en el flujo neto de energía radiativa hacia la superficie de la Tierra, medido en el borde superior de la troposfera (a unos 12.000 m sobre el nivel del mar), como resultado de cambios internos en la composición de la atmósfera, o cambios en el aporte externo de energía solar. Se expresa en W/m<sup>2</sup>, unidades de vatios por metro cuadrado de la superficie de la tierra. Un forzamiento radiativo positivo contribuye a calentar la superficie de la Tierra, mientras que uno negativo favorece su enfriamiento. En el informe del IPCC, los cambios en el forzamiento radiativo se comparan con el año 1750. Fuente: [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/es/faq-2-1.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/faq-2-1.html).

<sup>4</sup> RCP. Siglas de *Representative Concentration Pathways*, RCP, son los nuevos escenarios propuestos por el IPCC en su quinto informe. A lo largo de este Cuaderno de I+D+i, los escenarios serán nombrados empleando la nomenclatura inglesa por ser de uso internacional y conocimiento común. Así, los escenarios usados son RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5 (ocasionalmente se pueden encontrar gráficas donde no aparezca el punto). El origen de estos códigos procede del cálculo de los umbrales de forzamiento radiativo medidos en W/m<sup>2</sup>, según esos umbrales límites se establecieron grupos de trabajo.

- **Generación de escenarios de clima futuro a escala local.** A partir de los datos proporcionados por los modelos globales para los nuevos escenarios disponibles (RCP) se han aplicado técnicas de regionalización (*Downscaling*) para obtener resultados en los puntos de interés.

## FUENTES DE DATOS

En todo proceso de regionalización, por el cual se pretenden generar escenarios de clima futuro, es necesario disponer de varias fuentes de datos. En el caso de este proyecto se ha dispuesto de los siguientes datos:

- Series de datos meteorológicos diarios observados, con al menos 2000 datos diarios disponibles (un número mínimo de datos del observatorio que permita categorizar su clima), en el mayor número posible de observatorios localizados dentro de la región de estudio.
- Un banco de datos compuesto por campos de baja resolución (campos atmosféricos) de un reanálisis. En este estudio se utilizará el reanálisis ERA40<sup>5</sup>.
- Un banco de datos compuesto por campos de baja resolución (campos atmosféricos) de un conjunto de modelos climáticos de circulación general (MCG). En este estudio se utilizaron nueve modelos climáticos desarrollados por diferentes centros internacionales de investigación de Europa, Asia y América.

Los datos de reanálisis son los datos meteorológicos que describen el estado de la atmósfera en una malla regular de diferentes puntos, a diferentes alturas y que cubre toda la Tierra, en un período histórico pasado. Dado que el uso de los modelos climáticos globales requiere un grupo de datos de referencia, la utilización de los datos de reanálisis es absolutamente necesaria, tanto para que se puedan contrastar sus resultados, como para establecer las condiciones iniciales de funcionamiento de los modelos. Entre los datos de reanálisis existentes para este proyecto se ha elegido el “reanálisis europeo ERA40”.

Tanto el reanálisis, como los modelos climáticos, pueden presentar ciertos problemas a la hora de trabajar con ellos (como falta de información, campos incompletos, etc.) éstos son problemas relativamente conocidos y, por tanto, corregibles. Por otro lado, los datos observados provenientes de observatorios meteorológicos también pueden presentar inconvenientes (como periodos de tiempo sin ningún tipo de datos, *outliers*<sup>6</sup>, datos falsos, longitud de datos escasa, entre otros). Por lo tanto, antes de comenzar a aplicar la metodología de regionalización, es necesario realizar un estudio exhaustivo de la calidad de los datos disponibles y descartar todos aquellos observatorios que no cumplan unos requisitos mínimos que garanticen el óptimo funcionamiento de la metodología de *Downscaling*.

Con respecto a los modelos climáticos de circulación general, es deseable contar con el mayor número de ellos para eliminar posibles errores tendenciales de cada uno. En este estudio se ha contado con nueve modelos cuyas características se resumen en la Tabla 1.

---

<sup>5</sup> ERA40, Es un reanálisis de observaciones meteorológicas (septiembre-1957 a agosto-2002) realizado por el ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), en colaboración con muchas instituciones.

<sup>6</sup> *Outlier*: en estadística, un valor atípico (*outlier*) es una observación que es numéricamente distante del resto de los datos.

TABLA 1. MODELOS CLIMÁTICOS EMPLEADOS EN EL PROYECTO

<i>Modelo Climático</i>	<i>Resolución espacial grados</i>	<i>Resolución temporal</i>	<i>Calendario días/año</i>	<i>Centro de Investigación</i>
MPI-ESM-MR	1,8 x 1,8	diaria	Gregoriano	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M), Germany
GFDL-ESM2M	2 x 2,5	diaria	365	National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), EE.UU.
CanESM2	2,8 x 2,8	diaria	365	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CC-CMA), Canada
CNRM-CM5	1,4 x 1,4	diaria	Gregoriano	CNRM (Centre National de Recherches Meteorologiques), Meteo-France, France
BCC-CSM1-1	2,8 x 2,8	diaria	365	Beijing Climate Center (BCC), China Meteorological Administration, China
HADGEM2-CC	1,25 x 1,8	diaria	360	Met Office Hadley Centre, UK
MIROC-ESM-CHEM	2,8 x 2,8	diaria	Gregoriano	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies, Japan
NorESM1-M	1,8 x 2,5	diaria	365	Norwegian Climate Centre, Norway
MRI-CGCM3	1,2 x 1,2	diaria	Gregoriano	MRI - Meteorological Research Institute, Tsukuba, Japan

Es preciso mencionar que la disponibilidad de los datos de los modelos climáticos debe agradecerse al **WCRP** (*World Climate Research Programme*), un programa de la Organización Meteorológica Mundial (*World Meteorological Organization*, en adelante **WMO**) que es el responsable de la iniciativa *Coupled Model Intercomparison Project 5* (CMIP5), y el desarrollo de la infraestructura necesaria para su almacenamiento y descarga (hardware y software) se debe al Departamento de Energía de EEUU.

## ESCENARIOS FUTUROS “RCP”

Los escenarios de emisiones se utilizan en Cambio Climático como descripciones plausibles de cómo serán los cambios futuros dentro de un amplio rango de variables: socioeconómicas, tecnológicas, energéticas, uso del suelo, emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), y contaminantes del aire. Para cumplir esta función, se desarrollaron conjuntos de escenarios de emisiones como los IS92<sup>7</sup>, o más recientemente, los SRES<sup>8</sup>.

En la comunidad científica internacional surgió la necesidad de contar con escenarios provistos de una información más detallada. Atendiendo a esta necesidad, el IPCC propuso, para la elaboración de su quinto informe, la definición de nuevos escenarios que han recibido el nombre de *Representative Concentration Pathways* (RCP). Su definición se soporta en los siguientes criterios:

- Los RCP se deben basar en escenarios de emisiones ya existentes, elaborados por distintos centros y recogidos en la literatura. Al mismo tiempo, cada RCP debe, por sí mismo, ser una descripción plausible e internamente coherente con el futuro.
- Deben proporcionar información de todos los forzamientos radiativos necesarios para la modelización climática (uso del suelo, emisiones de GEI y contaminantes del aire).
- Deben estar “armonizados”, es decir, la transición continua entre el periodo histórico (el experimento *Historical*) y los periodos futuros debe garantizarse.
- Deben proporcionar información hasta el año 2100 y estar disponibles para simular aún más allá.

El nombre “RCP” contiene dos de sus principales características:

**Representative:** alude a la idea de que un RCP representa un conjunto de escenarios de emisiones ya existentes. Es decir, el RCP debe ser compatible tanto con los escenarios extremos como con los medios.

**Concentration Pathway:** este término hace hincapié en que los RCP no son productos finales, sino que son la herramienta (*input*) hacia la generación de escenarios de emisiones, de ahí el uso del término “concentraciones” en vez de “emisiones”. Los RCP se entienden como un conjunto suficientemente consistente de las componentes de forzamiento radiativo, pero no son un conjunto completo de proyecciones climáticas, socioeconómicas y de emisión.

En la Figura 2 se observa cómo los nuevos RCP se relacionan con los escenarios ya existentes en los informes anteriores del IPCC.

La revisión de la literatura existente (formada por el estudio de 324 escenarios procedentes de diversos centros de investigación) constató que el rango de valores de forzamiento radiativo esperado en el año 2100 oscilaba entre 2,6 W/m<sup>2</sup>, como nivel más bajo y entre 8-9 W/m<sup>2</sup> en el nivel más alto.

---

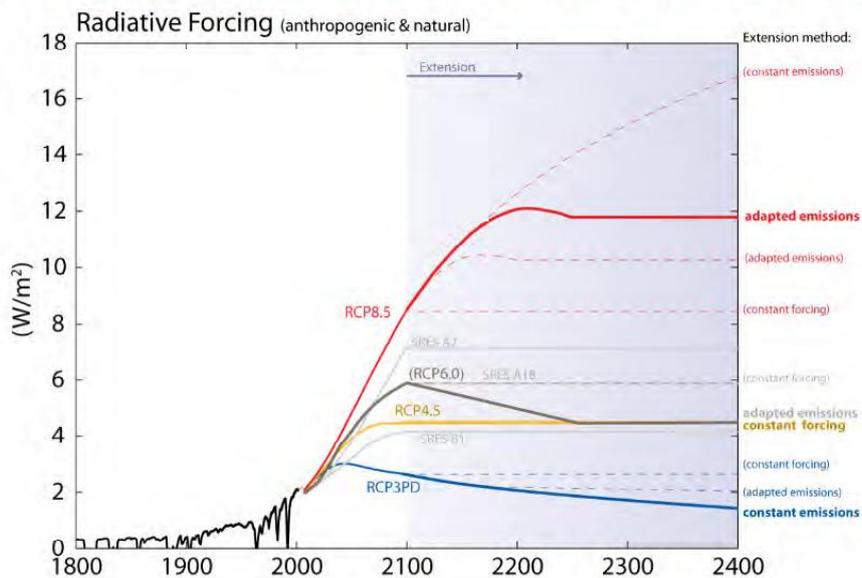
<sup>7</sup> IS92, En 1992, el IPCC publicaron unos escenarios de emisiones que servían de base para los modelos de la circulación mundial, con el fin de desarrollar un contexto sobre cambio climático. Los denominados “escenarios IS92” (*International Scenarios 1992*), que constituyeron un gran paso adelante. <https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-sp.pdf>.

<sup>8</sup> SRES, En 2000, el IPCC publicó una nueva serie de escenarios, que llamó SRES (*Special Report on Emissions Scenarios*), para su utilización en el tercer informe de evaluación. Éstos responden a varias fuerzas motivadoras sobre el cambio climático, incluyendo el crecimiento de la población y el desarrollo socioeconómico. Estas fuerzas motivadoras generan varios escenarios futuros que pueden tener una influencia en las fuentes y sumideros de gases invernadero, como los sistemas de energía y el cambio en el uso de la tierra. La evolución de estas fuerzas motivadoras, en relación al cambio climático, es incierta generando un amplio rango de posibles vías de emisiones de gases invernadero. Fuente: [www.lenntech.es/efecto-invernadero/escenarios-causas-ipcc-sres.htm#ixzz3LTxExXws](http://www.lenntech.es/efecto-invernadero/escenarios-causas-ipcc-sres.htm#ixzz3LTxExXws)

Como los RCP deben cubrir todo el rango existente y además proporcionar información intermedia, se escogieron un conjunto de cuatro RCP que abarcaran tanto los valores extremos como dos valores intermedios, separados éstos lo suficiente, como para que los resultados obtenidos a partir de ellos también dieran lugar a resultados diferentes (separados unos  $2\text{W/m}^2$  entre sí). La comunidad científica (formada por más de 20 grupos de trabajo de todo el mundo) determinó en Septiembre de 2008 en París, que los nuevos escenarios serían los **RCP 2.6**, **RCP 4.5**, **RCP 6.0** y **RCP 8.5** (el nombre hace referencia al forzamiento radiativo alcanzado en el año 2100) y se designaron los cuatro grupos de trabajo que se encargarían de elaborar dichos escenarios. La Tabla 2 informa de las características de estos cuatro RCP.

**FIGURA 2. FORZAMIENTO RADIATIVO A LO LARGO DEL SIGLO XXI, ASOCIADO A LOS DIFERENTES RCP**

### CMIP5 New scenarios: Representative Concentration Pathways



Forzamiento radiativo a lo largo del siglo XXI asociado a los diferentes RCP y su relación con los escenarios del informe nº 4 del IPCC (SRES). El escenario RCP 2.6 aparece con su nombre originario, RCP3PD.

Fuente: Meinshausen, Smith, et al. (2011)

**TABLA 2. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS DIFERENTES RCP EMPLEADOS**

RCP	Características
2.6	Se alcanza un pico de $3\text{ W/m}^2$ antes del año 2100 para luego descender hasta los $2.6\text{ W/m}^2$
4.5	Se estabiliza sin sobrepasar el nivel de $4.5\text{ W/m}^2$ (equivalente a unas 650 ppm) en el año 2100
6.0	Se estabiliza sin sobrepasar el nivel de $6.0\text{ W/m}^2$ (equivalente a unas 850 ppm) en el año 2100
8.5	Alcanza $8.5\text{ W/m}^2$ (equivalente a unas 1370 ppm de $\text{CO}_2$ equivalente) en el año 2100, y no se estabilizan los niveles hasta el año 2050

Los efectos de cambio climático sobre las lluvias se expresan a través de los coeficientes o factores de cambio climático (Arnbjerg-Nielsen, 2008).

El coeficiente de cambio climático,  $C_f$ , es el cociente entre la intensidad de lluvia de periodo de retorno  $T$  y duración  $t$ , correspondiente a un escenario de clima futuro,  $I(T,t)_{Futuro}$  y la intensidad de lluvia equivalente en el clima presente  $I(T,t)_{Presente}$ :

$$C_f = \frac{I(T, t)_{Futuro}}{I(T, t)_{Presente}} \quad (1)$$

Estos coeficientes se pueden calcular para cada periodo de retorno a partir de las series de precipitación diaria simuladas y las correspondientes al periodo histórico de control (clima presente).

## COEFICIENTES DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA COMUNIDAD DE MADRID

En el curso de este proyecto, con el fin de obtener coeficientes de cambio climático para intensidades con duraciones subdiarias (hasta una hora), como primer paso se analizaron las proyecciones de las series de lluvia diaria, para cada una de las tres estaciones de la AEMET<sup>9</sup> con mayor calidad de datos en la Comunidad de Madrid (Madrid-Retiro, Madrid-Getafe y Madrid-Torrejón), correspondientes a tres periodos climáticos futuros (2006-2036, 2037-2068, 2069-2100), además del periodo histórico de control (1951-2005), analizando los resultados para las cuatro estaciones del año (primavera, verano, otoño e invierno). De este modo, se han analizado un total de 1.530 series.

Posteriormente, se aplicaron a estas series temporales técnicas de regionalización espacial (*Downscaling* estadístico **FICLIMA**) y *Downscaling* temporal (utilizando las propiedades fractales de la lluvia) y se calcularon los factores de cambio climático para cada periodo de retorno, como ratio entre las intensidades subdiarias para series futuras y las correspondientes al periodo histórico de control (clima presente).

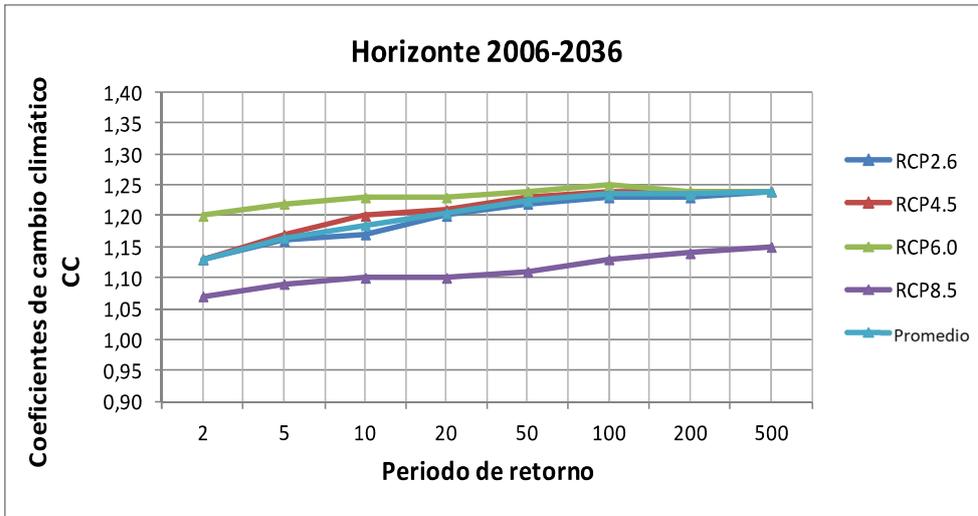
En particular, a partir de la técnica de regionalización espacial empleada y un análisis de extremos de las proyecciones de las series de lluvia, se obtuvieron los valores de la intensidad máxima de lluvia diaria para los diferentes escenarios climáticos en función del periodo de retorno.

Debido a la alta incertidumbre de los resultados generados por los MCG y de las otras hipótesis implícitas en la metodología empleada (ajustes estadísticos, uso de la técnica fractal, etc.) y, considerando la ausencia de aspectos orográficos que justifiquen significativos cambios climáticos en las tres estaciones, se consideró oportuno promediar los valores de coeficientes horarios de cambio climático para las tres estaciones analizadas, tal y como se muestra en las figuras (3, 4 y 5). Los resultados se presentaron para tres periodos de tiempo (2006-2036; 2037-2068 y 2068-2100), diferentes periodos de retorno y cada uno de los RCP (*Representative Concentration Pathways*) 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5, en función de los valores de forzamiento radiativo esperados.

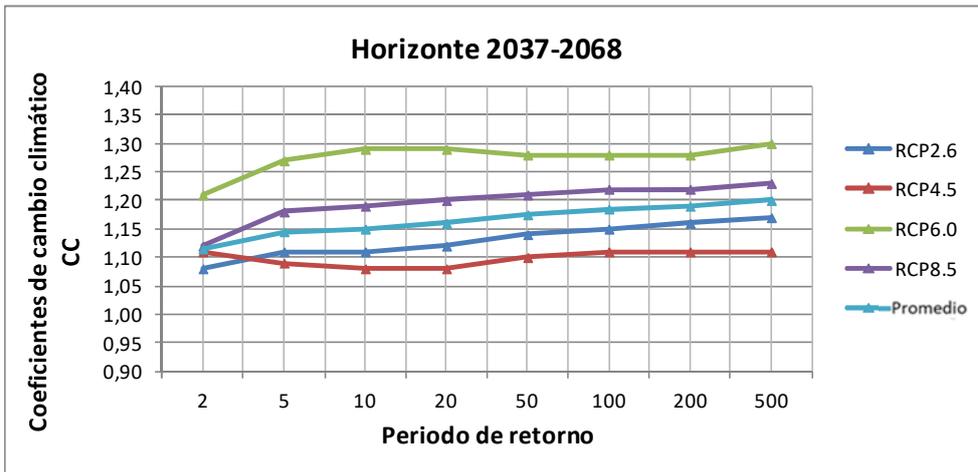
---

<sup>9</sup> AEMET, La Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) tiene por objeto el desarrollo, implantación, y prestación de los servicios meteorológicos de competencia del Estado. Ostenta la condición de autoridad meteorológica del Estado, así como la condición de autoridad meteorológica aeronáutica.

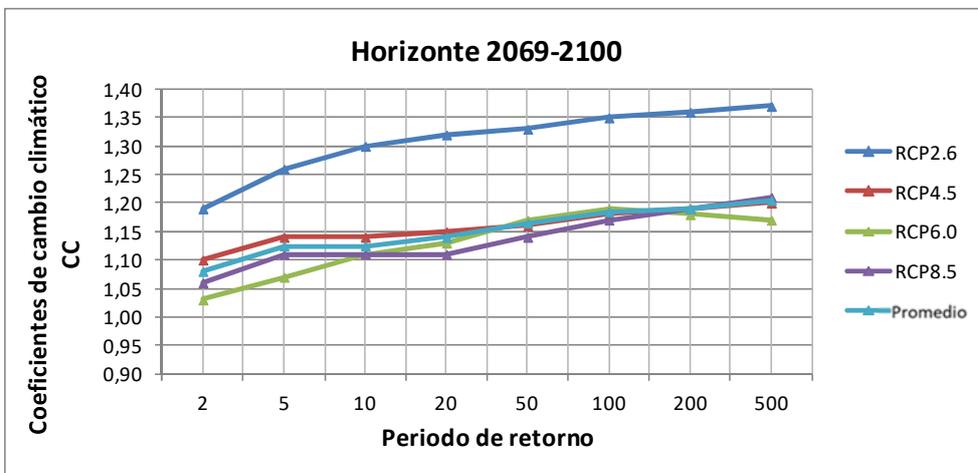
**FIGURA 3. COEFICIENTES DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA HORIZONTE 2006-2036**



**FIGURA 4. COEFICIENTES DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA HORIZONTE 2037-2068 (VALORES NO ACUMULADOS)**



**FIGURA 5. COEFICIENTES DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA HORIZONTE 2069-2100 (VALORES NO ACUMULADOS)**



## CONCLUSIONES

Se han obtenido coeficientes de cambio climático para cada estación, cada horizonte temporal y cada escenario RCP, para lluvias con duración diaria y horaria.

Debido a la alta incertidumbre de los resultados generados por los MCG y de las otras hipótesis implícitas en la metodología empleada (ajustes estadísticos, uso de la técnica fractal, etc.) y en ausencia de aspectos orográficos que justifiquen cambios climáticos significativos en las tres estaciones, se ha considerado oportuno promediar los resultados de los MCG y los valores de los coeficientes de cambio climático, para las tres estaciones analizadas.

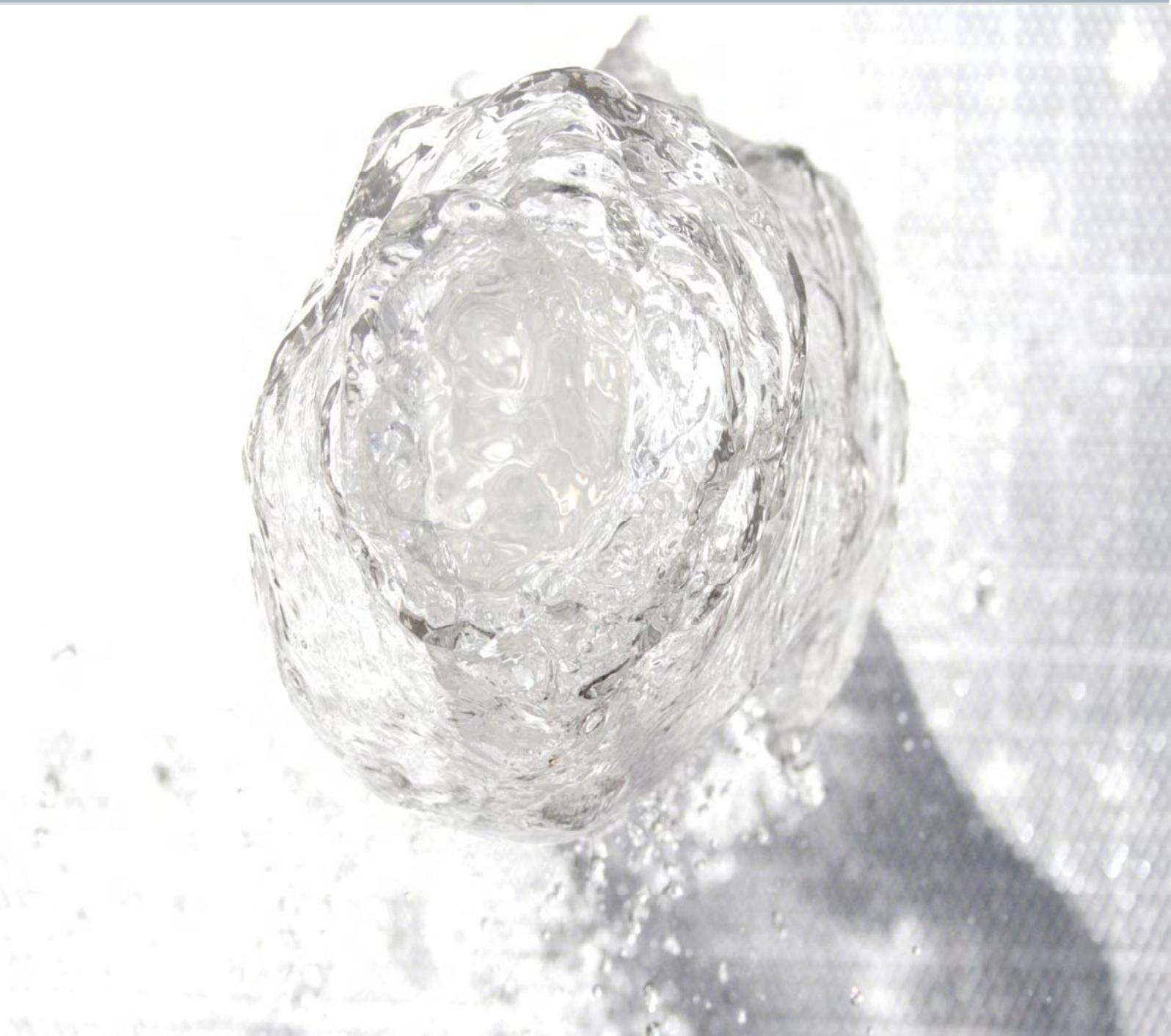
Con respecto a los valores resultantes, se observa lo siguiente:

- El escenario RCP 8.5 representa el escenario más crítico, en términos de forzamiento radiativo.
- Aunque generalmente, el escenario RCP 6.0 proporciona valores de coeficientes de cambio climático más altos, el mismo se basa en un menor número de simulaciones, siendo estadísticamente menos significativos con respecto a los demás.
- Debido a las significativas incertidumbres asociadas a los modelos, las técnicas estadísticas utilizadas, y los modelos de circulación general, se recomienda emplear, en los cálculos hidrológicos e hidráulicos asociados a los planes directores de la Comunidad de Madrid, el valor intermedio de todos los escenarios RCP para el horizonte temporal intermedio y el correspondiente periodo de retorno de diseño.

Como se observa en las figuras anteriores (Figura 3, 4 y 5), los coeficientes de cambio climático (CC) son siempre superiores a la unidad en todos los horizontes y escenarios de estudio, por lo que en el futuro son de esperar eventos pluviométricos con un mayor pico de intensidad en el hietograma.

Finalmente, cabe destacar que este trabajo es uno de los primeros ejemplos a nivel nacional, e internacional, de aplicación en el campo del drenaje urbano de los nuevos escenarios RCP propuestos en el último informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC).

**1. Generación y estudio de escenarios locales de cambio climático de precipitación, sobre observatorios meteorológicos de la Comunidad de Madrid**



## 1.1. INTRODUCCIÓN A LA GENERACIÓN Y ESTUDIO DE ESCENARIOS LOCALES

Este capítulo, dedicado a la Generación y estudio de escenarios locales, es la base para el establecimiento de los coeficientes de cambio climático y, por tanto, la herramienta para la construcción de unas curvas IDF<sup>10</sup> que contemplen la influencia del cambio climático.

Como parte del quinto informe del *Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC)*, la Comunidad Científica ha definido una serie de escenarios futuros de cambio climático bajo los cuales se han generado simulaciones mundiales de los diferentes modelos climáticos existentes, creados y desarrollados por instituciones de todo el mundo. Tales simulaciones de carácter mundial deben someterse a un proceso de regionalización para así poder utilizar sus resultados a una escala local: éste es precisamente el objetivo de una técnica de “*Downscaling*”, que permite aplicar, a escala local, los resultados de las simulaciones futuras. En la Fundación para la Investigación del Clima (*FIC*) se ha desarrollado un método propio de regionalización, llamado “Metodología *FICLIMA*”, que se ha aplicado en este cuaderno, sobre un grupo de observatorios meteorológicos seleccionados para así producir, a partir de modelos climáticos globales, escenarios futuros de cambio climático sobre la precipitación en tales observatorios.

Para poder garantizar la obtención de los escenarios locales de clima futuro, de la mejor manera posible en cada punto, se ha llevado a cabo un conjunto de pasos sucesivos:

1. **Análisis de los datos observados disponibles.** Antes de usarlos, los datos meteorológicos observados disponibles deben ser estudiados para determinar su validez y, por lo tanto, si pueden ser utilizados en su totalidad o si necesitan acciones de corrección, o incluso ser descartados.
2. **Verificación de la metodología *FICLIMA*.** Se verificarán los resultados obtenidos por la metodología al simular el clima de cada observatorio para determinar la capacidad de ésta para reflejar el clima de cada punto local a estudiar.
3. **Validación de los modelos climáticos.** Es de gran importancia contar con el mayor número posible de modelos climáticos y de escenarios futuros para que así se pueda considerar un abanico, lo suficientemente amplio, de evoluciones futuras del clima; en este proyecto se ha trabajado con nueve modelos climáticos. Cada modelo simula el clima de una manera diferente (más frío/cálido o más seco/húmedo) por lo que antes de generar escenarios de clima futuro se evalúa el comportamiento de cada modelo en cada punto a estudiar.
4. **Generación de escenarios de clima futuro a escala local.** A partir de los escenarios disponibles para cada modelo, se regionalizan los resultados en los puntos de interés.
5. **Corrección del error sistemático asociado a las simulaciones futuras.** Los escenarios futuros como tales muestran incrementos en la variable a estudiar, pero si lo que queremos son los valores inicial y final que determinan esos incrementos, tal y como es parte del objetivo de este proyecto, debemos corregir los valores simulados para determinar sus valores.

Estas actividades se desarrollan a continuación.

---

<sup>10</sup> IDF. Una curva IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) es una relación matemática, generalmente empírica, entre la intensidad de una precipitación, su duración y la frecuencia con la que se observa; resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno.

## 1.2. OBJETIVOS EN LA GENERACIÓN Y ESTUDIO DE ESCENARIOS LOCALES

Para conseguir los objetivos marcados, en este trabajo se ha llevado a cabo el análisis de los posibles cambios futuros en los regímenes de precipitación de tres observatorios meteorológicos de la Comunidad de Madrid (Getafe, Torrejón y Madrid Retiro).

De cara a estudiar esos cambios futuros se han empleado nueve modelos climáticos globales, generados por otros tantos organismos internacionales de investigación, que proporcionan posibles escenarios futuros del clima a escala global. Esos posibles escenarios futuros han sido fijados como parte del quinto informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático y son comunes a las distintas simulaciones de cada modelo climático.

Esas representaciones globales del clima – esos modelos climáticos – dado su carácter global, deben someterse a un proceso de regionalización, para así poder utilizar sus resultados sobre los puntos locales objeto de estudio, como son los observatorios meteorológicos elegidos: ése es precisamente el objetivo de la técnica de *Downscaling*, la aplicación, a escala local, de los resultados de las simulaciones futuras.

Esta metodología permite obtener, en los puntos de estudio, un grupo amplio de simulaciones sobre las futuras condiciones de precipitación. Pero los resultados obtenidos al emplear un modelo climático son siempre de carácter incremental y no absoluto (existe una diferencia entre lo que un modelo considera el pasado y el verdadero pasado), sin embargo, sus escenarios futuros son proyecciones consistentes y continuas de ese pasado que el propio modelo climático ha simulado, por lo que los posibles incrementos entre su pasado y un cierto futuro sí deben interpretarse como correctas, pero no así los valores exactos y absolutos proporcionados por los escenarios futuros.

Por tanto, si se necesita que los datos “regionalizados” en un punto, de un cierto modelo climático se puedan interpretar en sus valores absolutos y no sólo en términos de incrementos relativos, se deben corregir los posibles errores susceptibles de introducir sesgos en la regionalización, para así poder obtener valores que se puedan estudiar en su magnitud absoluta. Esta corrección es lo que se denomina **corrección del error sistemático**.

No siempre es necesario realizar este último paso; llevarlo a cabo o no, dependerá del tipo de estudio que se esté realizando. En este trabajo, dado que se están estudiando valores extremos de una cierta variable meteorológica como la precipitación, sí es necesaria tal corrección ya que los valores absolutos concretos de la precipitación condicionan las conclusiones sobre sus valores y su evolución o cambio (como el periodo de retorno de valores concretos, extremos o no, de precipitación).

## 1.3. LA METODOLOGÍA DE REGIONALIZACIÓN FICLIMA

### 1.3.1. La regionalización o “Downscaling”

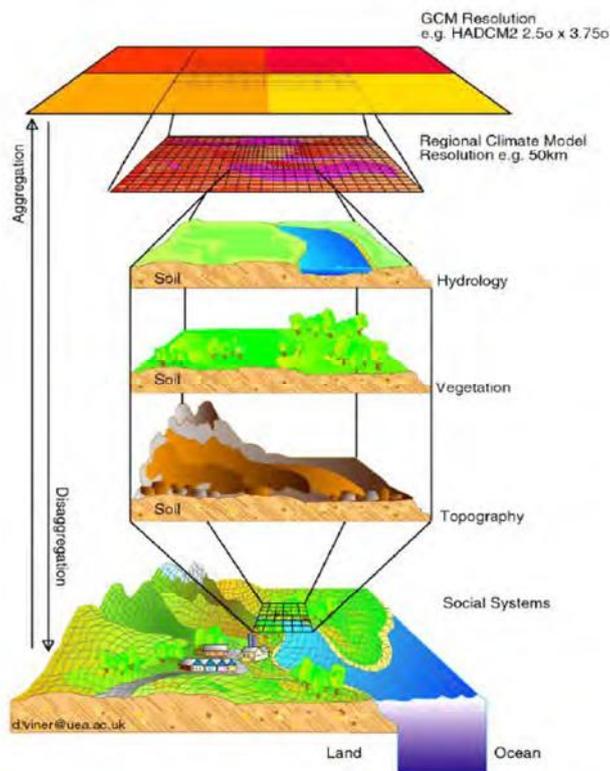
Los modelos climáticos globales muestran una capacidad notable para reproducir las principales características de la circulación atmosférica general; el problema surge cuando se evalúan los resultados a una escala más pequeña (es decir, se seleccionan unos pocos puntos de la rejilla de trabajo) donde las variables, especialmente en superficie, no se aproximan a los valores observados en la realidad.

Estas limitaciones se pueden explicar por varias razones, en general relacionadas con la insuficiente resolución espacial de los modelos que, hoy en día, es de unos 2 a 3 grados de latitud/longitud:

- La topografía (cordilleras, líneas de costa, etc.) es descrita con poco detalle, lo que hace que algunos forzamientos relacionados con la misma, y de extraordinaria importancia a nivel local, sean omitidos, y por lo tanto no tenidos en cuenta por el modelo.
- Algunos de los procesos atmosféricos que se presentan a una escala inferior a la de la rejilla de trabajo de los modelos (que por lo tanto tienden a no ser reflejados por éstos) se recogen mediante parametrizaciones directas, es decir, son representados por un ajuste directo de los parámetros en el modelo. Esas parametrizaciones son ajustadas de manera estadística en todo el planeta, pudiendo ser ineficientes en regiones concretas.
- La parametrización del flujo de energía, desde las escalas sinópticas ( $10^6 \text{ km}^2$ ), hasta las de una escala inferior a la rejilla de trabajo, afecta a la fiabilidad de las menores escalas resueltas.

Dado que en la mayor parte de los estudios de evaluación de impactos es necesaria la presencia de escenarios climáticos con resolución local de variables cercanas a la superficie terrestre (temperatura a 2 m, precipitación, etc.), surge la necesidad de adaptar la información proporcionada por los modelos climáticos globales (de baja resolución espacial) a la información requerida por los modelos de impacto (de mayor resolución espacial-local en superficie). Este proceso de regionalización es conocido como “*Downscaling*”. El proceso aparece ilustrado en la Figura 6.

**FIGURA 6. MECANISMO DE REGIONALIZACIÓN O REDUCCIÓN DE ESCALA (*Downscaling*)**



*Representación gráfica del mecanismo de regionalización o reducción de escala (Downscaling), adaptándose las salidas de los modelos climáticos globales, a las características fisiográficas de la región.*

*Fuente: David Viner, Climatic Research Unit, University of East Anglia, UK*

### 1.3.2. Estrategias de regionalización

Existen dos maneras principales de afrontar el problema de la regionalización, las características de ambas se resumen en la Tabla 3 y se describen a continuación:

- a) Aproximaciones estadísticas ("**Downscaling estadístico**"). Con ellas se obtienen relaciones empíricas entre variables a gran escala procedentes de los modelos climáticos globales y variables de alta resolución (en superficie).
- b) Aproximaciones por modelización dinámica ("**Downscaling dinámico**"). Estos modelos incrementan su resolución sobre la región de interés. Puede realizarse de dos maneras, bien con una técnica de "zoom" de la propia rejilla del modelo, bien mediante el anidamiento de un modelo de área limitada (**LAM**<sup>11</sup>) en las condiciones de contorno suministradas por el modelo climático. Son los denominados **Modelos Regionales del Clima (RCM**<sup>12</sup>).

Las aproximaciones estadísticas tienen mucho menor coste computacional (lo que permite aplicarlas a multitud de modelos climáticos y escenarios de emisiones), pero sufren de una incertidumbre implícita consecuencia de aceptar la hipótesis de que los campos de efectos en superficie de alta resolución son función exclusiva de las condiciones dinámicas y termodinámicas a gran escala en la atmósfera, considerando las características de la topografía fijas. Es dudoso que en un marco de cambio climático no varíe ningún forzamiento mesoescalar (albedo, humedad del suelo, campos atmosféricos a baja resolución, etc.). Adicionalmente, las relaciones estadísticas entre campos atmosféricos de baja resolución, y las variables en superficie a escala local son siempre imperfectas, pudiendo resultar **no estacionarias**, lo que significa que, aunque estas relaciones se verifiquen en el clima actual, no tienen por qué hacerlo en un clima futuro (el conocido como problema de la estacionariedad).

Las aproximaciones dinámicas cuentan con una base física más fuerte (aunque también utilizan relaciones estadísticas en las parametrizaciones). Actualmente, la resolución de los **RCM** es aproximadamente de 25 kilómetros, lo que resulta insuficiente para simular correctamente variables en superficie a escala local, especialmente en zonas de topografía compleja. Por otro lado, tienen el inconveniente de un coste computacional elevadísimo que no siempre es posible asumir.

Debe mencionarse que existe una tercera aproximación, mucho menos utilizada, que integra las dos anteriores y que se denomina **aproximación estadístico-dinámica**.

---

<sup>11</sup> LAM, siglas en inglés de **Limited Area Model**

<sup>12</sup> RCM, siglas en inglés de **Regional Climate Model**

**TABLA 3. DIFERENCIAS ENTRE *DOWNSCALING* ESTADÍSTICO Y DINÁMICO**

	<i>A favor</i>	<i>En contra</i>	<i>Aplicaciones</i>
<b>Downscaling Dinámico</b>	Simula mecanismos climáticos	Muy costoso, tanto en términos de necesidades informáticas como de formación del personal	Áreas geográficas con pocos datos iniciales de partida
	No realiza asunciones <i>a priori</i> sobre cómo están relacionados el clima presente y el futuro	Los resultados son sensibles a las parametrizaciones iniciales	Estudios asociados con extremos climáticos y variabilidad no-lineal, como los sanitarios
	Herramientas científicas permanentemente actualizadas	El posible sesgo existente en los MCG se puede propagar a escala local	Relaciona los resultados con procesos climáticos
	Los continuos avances en ordenadores hacen que cada vez se generen más rápidamente y sean más baratos de ejecutar	El formato de salida de los modelos puede no ser útil a otras disciplinas de análisis científico, y es necesario un tratamiento de datos posterior	Permite incluir impactos sobre el uso del suelo sobre los resultados
	Estimula la colaboración entre científicos del clima y de otras disciplinas de estudio		
	<i>A favor</i>	<i>En contra</i>	<i>Aplicaciones</i>
<b>Downscaling Estadístico</b>	Muy barato (funciona con mucha velocidad en ordenadores personales con software libre)	Asume que las relaciones entre el clima local y el de gran escala permanecen constantes	Medias climáticas, y ciertos rangos de variabilidad
	Aprovecha la experiencia estadística entre investigadores	No incorpora mecanismos climáticos	Regiones ricas en datos meteorológicos, como las latitudes medias del hemisferio norte
	Puede corregir los sesgos propios de los MCG	No está ajustado para capturar varianzas o eventos extremos	Permite comparar el clima presente y el futuro de forma consistente
	Permite evaluar los resultados climáticos sobre un grupo de MCG y sobre diversos escenarios		Permite realizar test sobre diversos predictores
	Permite medir las escalas variables hasta lugares concretos		

Fuente: J. A. Patz, D. Campbell-Lendrum, T. Holloway & J. A. Foley, *Impact of regional climate change on human health, Nature, 2005. Traducción propia de la FIC (las referencias específicas a las ciencias de la salud se han generalizado a "otras disciplinas")*.

### 1.3.3. La metodología *FICLIMA* de regionalización

La metodología *FICLIMA* de regionalización es una metodología de “*Downscaling estadístico*”. Necesita, por lo tanto, de una selección previa de campos a utilizar como predictores, y una vez seleccionados éstos, realiza un tratamiento basado en la metodología de análogos. En los párrafos siguientes se describe con un cierto grado de detalle, los fundamentos de la metodología *FICLIMA*. Si se desea profundizar en el contenido de la misma se puede consultar en Ribalaygua et al. (2013).

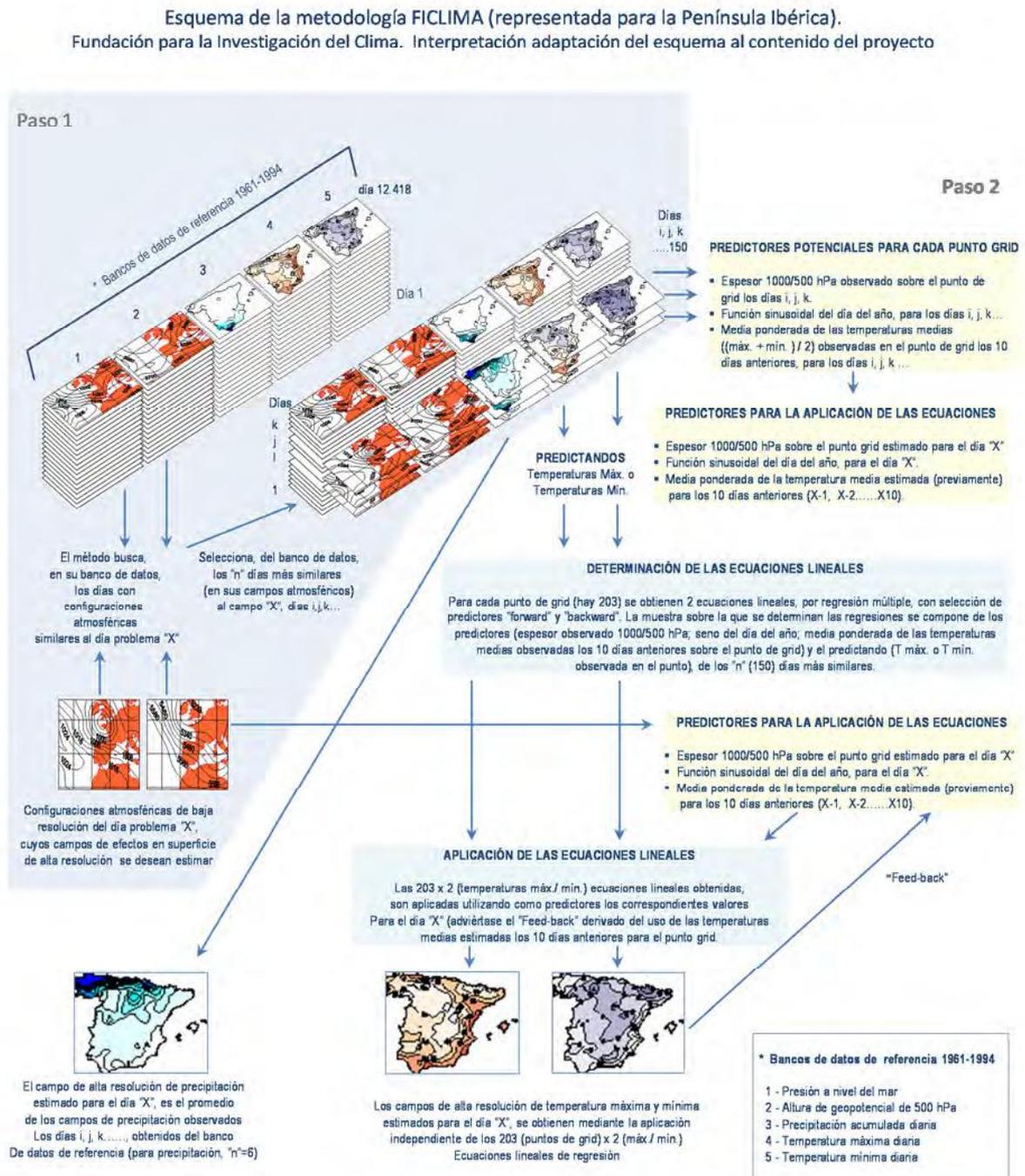
En términos generales, la metodología se rige por el siguiente esquema: se selecciona un día problema “*X*”, cuyos campos atmosféricos (geopotenciales, temperaturas a distintos niveles de presión...) de baja resolución son conocidos (mediante las salidas de los modelos climáticos globales para el día *X*). A partir de esos campos conocidos, se pretende estimar el valor de las variables meteorológicas en superficie (temperaturas máxima y mínima, precipitación...) para el día *X* en un punto concreto del territorio (observatorio).

El método trabaja en dos pasos, esquematizados en la Figura 7.

1. **El primer paso**, denominado “**estratificación analógica**”, consiste en seleccionar de un banco de datos aquellos *n* días con configuraciones atmosféricas más similares a las del día problema *X*. La medida de similitud utilizada compara el parecido entre las variables empleadas para caracterizar las situaciones sinópticas atmosféricas; esas variables determinan el forzamiento sinóptico causante de los descensos y ascensos de aire, generadores de nubosidad y precipitación. Se busca, además, aportar información sobre la dirección del viento en superficie, lo que permite estudiar los efectos que la topografía ejerce en la distribución espacial de la nubosidad y de la precipitación.
2. **El segundo paso** aplica métodos diferentes en función de la variable que se quiera calcular.
  - Para estimar las temperaturas mínimas y máximas diarias, se realiza, por cada variable, una regresión lineal múltiple con selección automática de predictores. La población de trabajo va a estar compuesta por los *n* días seleccionados en el paso previo. Como predictores se tienen, por un lado, los valores de las variables atmosféricas en la vertical del punto para el que se quiere estimar la temperatura en superficie y por otro, predictores potenciales. Dichos predictores potenciales son un indicador de la duración de la noche en el día en cuestión (proporciona información sobre el potencial de calentamiento/enfriamiento radiativo) y un promedio ponderado de las temperaturas de los días anteriores (se considera el efecto de la inercia térmica del suelo). Una vez establecida la relación lineal existente entre los predictores seleccionados y el predictando (temperatura mínima, máxima o precipitación), se aplica dicha relación a los valores de los predictores del día *X* para estimar el valor del predictando en dicho día.

La influencia, fuertemente no-lineal, que la nubosidad y la precipitación ejercen sobre la temperatura en superficie ha sido corregida en la estratificación analógica. Al seleccionar los días con configuraciones atmosféricas más similares, se garantiza que las condiciones de precipitación y nubosidad también lo sean y, por tanto, también, su influencia sobre el predictando. Obtenemos, de esta manera, relaciones lineales más robustas. Un ejemplo de esto es la relación entre el espesor de la baja troposfera y la temperatura a 2 m, que es de carácter no-lineal. Cuando se trata de días con cielos cubiertos, la temperatura máxima va a depender fuertemente del espesor, entre ambas variables se tendrá una relación bastante lineal. Sin embargo, en días con cielos despejados, la dependencia de la temperatura máxima con el espesor es menor, dependiendo, principalmente, de la insolación y esta a su vez de la época del año.

**FIGURA 7. ESQUEMA GENERAL DE LA METODOLOGÍA FICLIMA (PARA LA PENÍNSULA IBÉRICA)**



- Para el caso de la precipitación se han probado varias aproximaciones. La más simple de todas ellas, representada en el esquema de la Figura 7, contempla la estimación por simple promediado de los k días análogos más parecidos a X. Además de estimar la cantidad de lluvia, este método permite obtener la probabilidad de lluvia o tiempo seco. En el estudio de las series obtenidas se detectó que, aunque el comportamiento de la predicción de precipitación media en un periodo era aceptable, el número de días de lluvia se sobreestimaba claramente. Ello se debe a que se estaba asociando lluvia a todos los días con probabilidad no nula, aunque ésta fuese muy baja. Para corregir este error, se introdujo una corrección estadística que permite obtener el número de días de lluvia en un mes a partir de las probabilidades de lluvia de cada uno de los días del mes. Conocido el número de días de lluvia y la cantidad de lluvia, se distribuye ésta entre los días con mayor probabilidad y cantidad esperada de precipitación. De esta forma se obtienen mejoras no sólo para el número de días de lluvia, sino también para lluvias extremas y periodos de sequía.

#### 1.3.4. Ventajas de la metodología FICLIMA

Aunque algunas de las debilidades intrínsecas del método de “*Downscaling estadístico*” son insalvables debido a la propia naturaleza de tal método (dependencia de un conjunto de observatorios meteorológicos con datos fiables y que cubran un periodo temporal extenso; necesidad de sucesivas pruebas de adaptación de la metodología hasta determinar los campos que mejor recogen la variabilidad climática en la zona de estudio), la metodología **FICLIMA** presenta algunas ventajas con respecto a otras metodologías estadísticas:

1. El problema de la estacionariedad va a ser minimizado gracias al criterio de selección de predictores, basado en consideraciones teóricas que reflejen las relaciones físicas entre predictores y predictandos, relaciones físicas que no deben cambiar a lo largo del tiempo.
2. Cuando se utiliza el método de *selección de análogos*, y dado que la simulación final estará basada en los días más análogos, el valor asignado a la variable meteorológica estudiada estará limitado por el valor observado que tenga en esos días análogos, es decir, su margen de variabilidad vendrá dado por la propia variabilidad del pasado (nunca calcularíamos valores superiores o inferiores). Sin embargo, el segundo paso introducido en la metodología **FICLIMA** permite superar esa limitación: las relaciones lineales diarias establecidas para temperatura y la redistribución de la precipitación con base en la función de distribución permiten simular valores que pueden exceder la limitación de los valores iniciales observados.
3. Considera absolutamente todos los datos disponibles: como no hay reducción de la dimensionalidad de los datos suministrados (mediante técnicas estadísticas como las componentes principales), todos los datos son considerados y, por lo tanto, no hay pérdida de la información suministrada (las observaciones y los campos atmosféricos) ni de su variabilidad.

## 1.4. ANÁLISIS DE DATOS HISTÓRICOS

En todo proceso de regionalización, mediante el cual se pretenda generar escenarios de clima futuro, es necesario disponer de varias fuentes de datos:

1. Series de datos meteorológicos diarios observados, con al menos 2.000 datos diarios disponibles (un número mínimo de datos del observatorio que permita categorizar su clima), en el mayor número posible de observatorios localizados dentro de la región de estudio.
2. Un banco de datos compuesto por campos de baja resolución (campos atmosféricos) de un reanálisis. En este estudio se utilizará el reanálisis ERA40.
3. Un banco de datos compuesto por campos de baja resolución (campos atmosféricos) de un conjunto de modelos climáticos. En este estudio se utilizaron nueve modelos climáticos que se explican más adelante.

Los datos de reanálisis son los datos meteorológicos que describen el estado de la atmósfera en una malla regular, de diferentes puntos a diferentes alturas, y que cubre toda la tierra en un período histórico pasado. Dado que el uso de los modelos climáticos globales requiere un grupo de datos de referencia, la utilización de los datos de reanálisis es absolutamente necesaria, tanto para que se puedan contrastar sus resultados, como para establecer las condiciones iniciales de funcionamiento de los modelos. Entre los datos de reanálisis existentes, se ha elegido el reanálisis europeo **ERA40** para este proyecto.

Tanto el reanálisis como los modelos climáticos pueden presentar ciertos problemas a la hora de trabajar con ellos (como falta de información, campos incompletos, etc.), pero son problemas conocidos si se ha trabajado antes con ellos. Pero los datos observados provenientes de observatorios meteorológicos también pueden presentar problemas (como periodos de tiempo sin ningún tipo de datos, *outliers*<sup>13</sup>, datos falsos, longitud de datos escasa, etc.). Por lo tanto, antes de comenzar a aplicar la metodología de regionalización, es necesario realizar un estudio exhaustivo de la calidad de los datos disponibles y descartar todos aquellos observatorios que no cumplan unos requisitos mínimos que garanticen el óptimo funcionamiento de la metodología de **Downscaling**.

En este apartado se reseñan los resultados obtenidos tras estudiar los datos, recibidos de observaciones meteorológicas diarias, necesarios para realizar el estudio de cambio climático en los puntos definidos de la Comunidad de Madrid.

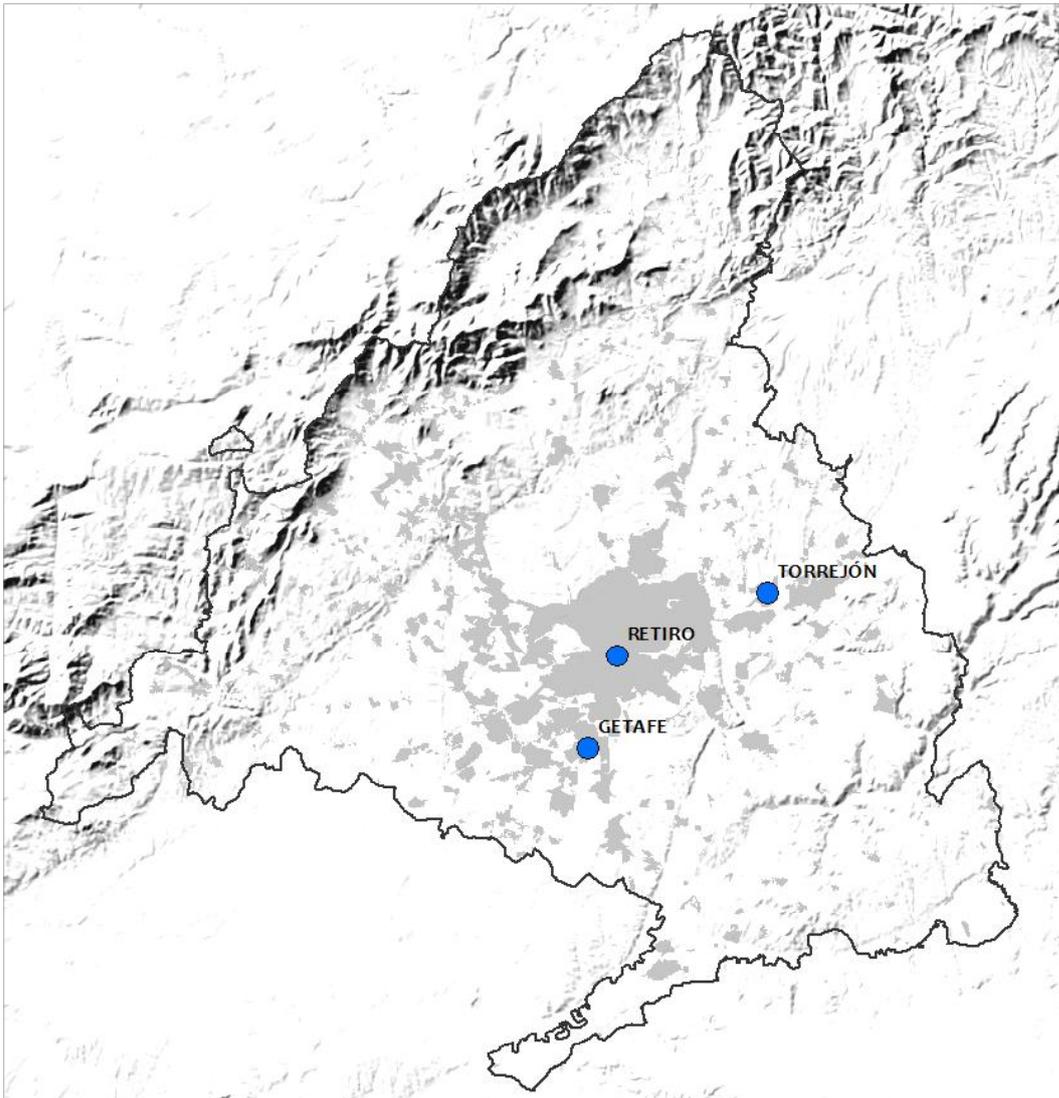
### 1.4.1. Datos suministrados

Los datos observados suministrados pertenecen a tres observatorios de la Agencia Estatal de Meteorología (**AEMET**) situados en la Comunidad de Madrid (ver Figura 8). Para cada uno de ellos se ha suministrado la precipitación diaria de un número suficiente de años como para poder ser empleados en este estudio.

---

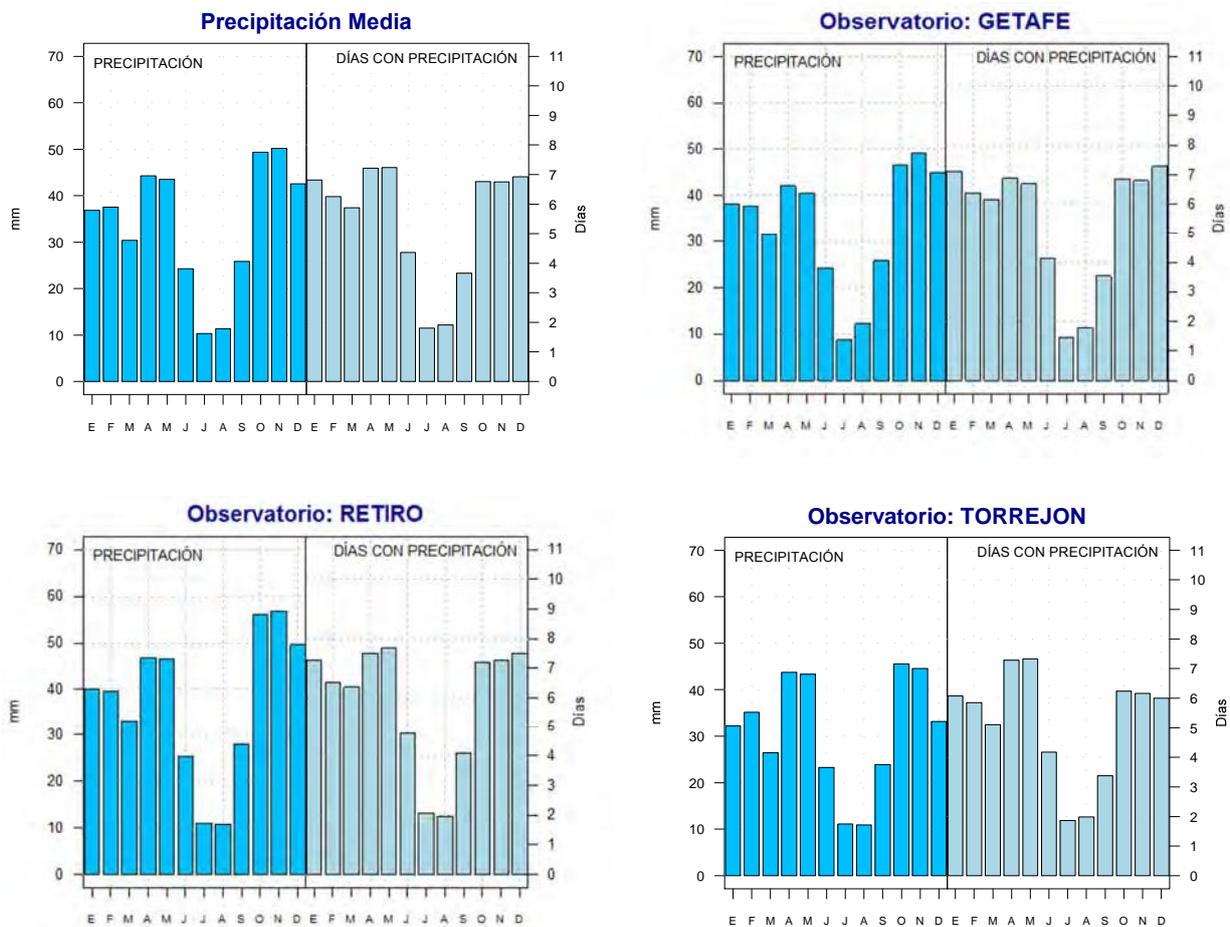
<sup>13</sup> Outlier: En estadística, un valor atípico (outlier) es una observación que es numéricamente distante del resto de los datos.

**FIGURA 8. SITUACIÓN DE LOS TRES OBSERVATORIOS METEOROLÓGICOS SUMINISTRADOS**



En la Figura 9 se representan cuatro climogramas; el primero de ellos es relativo a la precipitación acumulada media mensual y el número mensual medio de días con precipitación del promedio de los tres observatorios. Se puede observar que los observatorios se caracterizan por tener veranos secos (junio, julio, agosto) y por distribuir la mayoría de la precipitación en el resto de las estaciones del año, siendo octubre y noviembre los meses con mayor precipitación. Los tres climogramas son referidos a cada uno de los observatorios estudiados por separado. Como se puede observar, y dado que los tres pertenecen a la misma área geográfica y orográfica, sus climogramas son similares entre sí, y similares al climograma medio (veranos secos y por otro lado octubre y noviembre como meses con la mayor precipitación).

**FIGURA 9. CLIMOGRAMAS DE PRECIPITACIÓN MEDIA, DE TRES OBSERVATORIOS METEOROLÓGICOS**



### 1.4.2. Control de Calidad

El control de calidad de una serie meteorológica de datos observados consiste en desarrollar un conjunto de pruebas sobre la misma que garantice que los datos son coherentes dentro de la propia serie de estudio.

Es importante recalcar que tales pruebas deben ser diseñadas de manera que sean capaces de presentar diferentes resultados para diferentes series, ya que cada serie recoge la climatología local del lugar observado y, por lo tanto, aunque los criterios teóricos de las pruebas deban ser los mismos para todos los observatorios, los rangos de validez deberán ser dependientes de los observatorios. Si por ejemplo se basara en el estudio de la media de una serie (un posible criterio teórico), que una temperatura máxima diaria fuera de 40°C provocaría decisiones diferentes, si tal dato perteneciese a una serie de media de 35°C (en la que sería un valor más que aceptable), o si tal dato perteneciese a una serie de media de 20°C (en la que sería un valor a señalar). Nótese, además, y gracias al anterior ejemplo, que señalar un posible valor no implica necesariamente su rechazo, sólo la necesidad de estudiar con más detenimiento tal valor para determinar su sentido.

Los dos controles automáticos, principales a emplear en un control de calidad son los siguientes:

1. **Coherencia básica.** Rechazo directo de valores manifiestamente erróneos, como las precipitaciones negativas.

En el caso de la precipitación, la coherencia básica ha atendido a la búsqueda de valores diarios negativos. En el caso concreto de los observatorios suministrados para este proyecto no se ha detectado ningún caso de este tipo.

2. **Puntos atípicos u *outliers*.** Valores desacomodadamente atípicos dentro de un conjunto dado de datos; es decir, valores que parecen provenir de fuentes de datos diferentes, o haber sido generados de una forma distinta al resto de los datos. En este caso, la dificultad teórica de su detección provendrá de la definición que hagamos de “atípicos”. En la práctica, la detección se refiere generalmente a valores de magnitud absoluta desacomodadamente alta.

Tal y como se dijo antes, el problema de la detección de un dato atípico radica precisamente en la definición teórica de “atípico”. Desde un punto de vista teórico, la manera de discriminar si un dato es atípico es evaluar cuánto se aleja de los valores típicos de nuestra serie: la manera formal de realizar tal prueba consiste en determinar cuántas veces se aleja un cierto dato de la desviación típica de la serie total observada en cuestión.

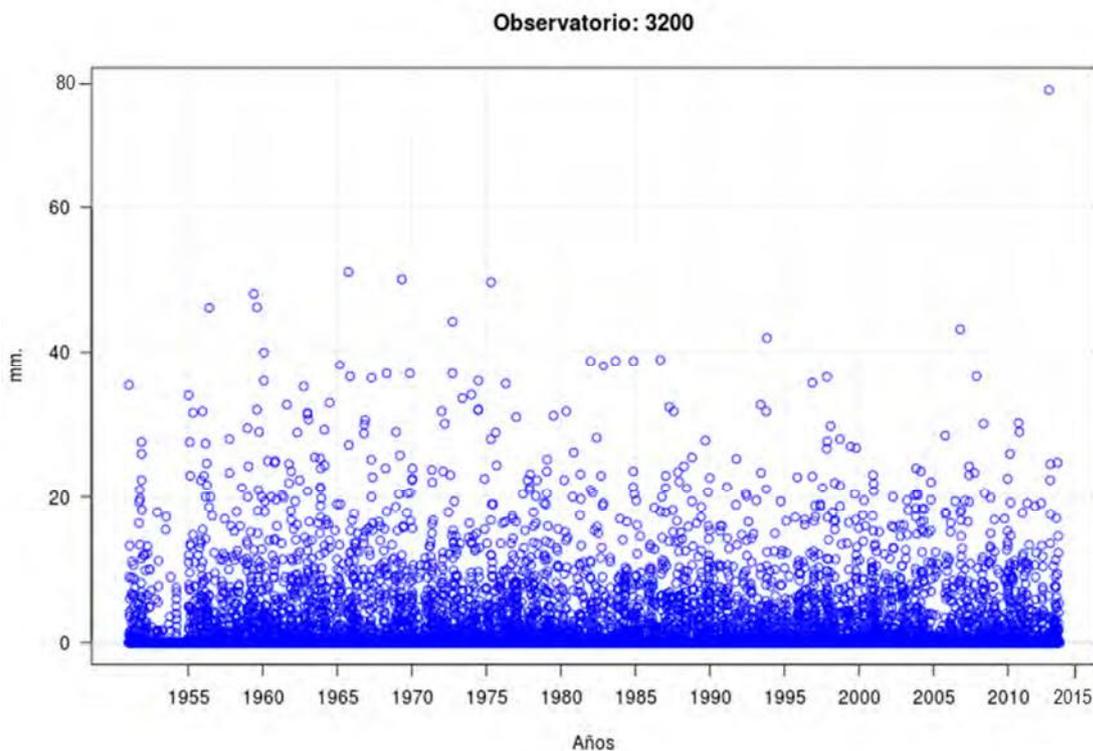
Por lo tanto, lo que los test tendrán que determinar será:

- La desviación típica de cada observatorio.
- Un valor umbral del número unidades de desviación típica, por encima del cual un cierto valor diario puede ser señalado como atípico.
- Un estudio directo de los datos señalados como ***outliers*** por el paso anterior, para determinar si son verdaderos, y por lo tanto deben ser desechados, o si debe reasignarse un nuevo valor umbral y repetirse el estudio.

En el caso de la precipitación, un dato anómalo se detecta mediante la superación de tal dato, de un número prefijado de veces, de la desviación típica de toda la serie. Sin embargo, y dada la naturaleza de esta variable meteorológica, su detección no implica su eliminación, de una manera tan definida como en la temperatura, ya que una precipitación extrema es un fenómeno que, aunque inusual, no tiene por qué ser imposible, y necesita por lo tanto de un examen cuidadoso que la contraste con los valores climatológicos de la zona. Un ejemplo evidente sería el registro de precipitación diaria en el paso de un huracán (en zonas donde éstos se presenten), que hará que tales valores extremos, aun siendo ciertos, puedan parecer anómalos.

La única situación que ha presentado un valor sospechoso de ser anómalo puede verse en la Figura 10 y corresponde a un único valor del observatorio de Getafe (identificador de observatorio número 3200), el perteneciente al 28/09/2012. A pesar de ser un valor desusadamente alto no podemos marcarlo como erróneo, ya que puede entrar dentro de los márgenes de variabilidad de este observatorio, con lo que tal valor no ha sido marcado como erróneo.

**FIGURA 10. PRECIPITACIÓN DIARIA OBSERVADA DEL OBSERVATORIO 3200 (GETAFE AÑO 2012)**



### 1.4.3. Homogeneización

La homogeneización de los datos de una serie temporal hace referencia al control de calidad de los datos, en tanto que elementos de una serie temporal, es decir, estudia la posible coherencia de los datos exactamente en el orden en el que son presentados. Nótese que los controles anteriores podrían realizarse sobre las mismas series de manera desordenada, sin embargo, no informan sobre la posible variabilidad temporal de los datos. Algo que casi siempre viene ligado, cuanto menos, a ciclos anuales.

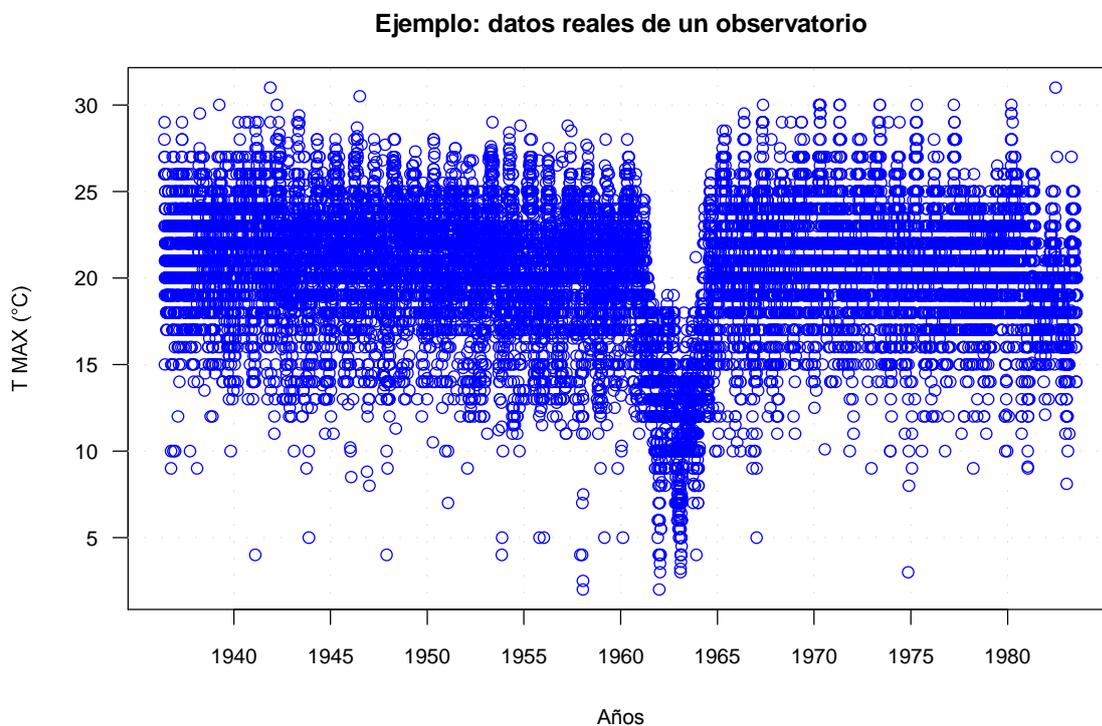
Debe hacerse notar que el proceso de homogeneización de una serie puede presentarse también como parte del proceso general del control de la calidad de los datos de una serie; si se presenta aquí como un punto separado es para subrayar la importancia de tal proceso y de sus resultados.

#### Homogeneización, fundamento teórico

A continuación, se describe de forma resumida el fundamento teórico del test de homogeneización empleado en este estudio.

En la Figura 11 se reflejan los datos reales de temperatura máxima diaria de un observatorio meteorológico que, aunque real, no se ha utilizado en este proyecto. Únicamente se tomará como un ejemplo del tipo de problema a ser detectado por las pruebas de homogeneidad.

**FIGURA 11. SERIE OBSERVADA DIARIA DE TEMPERATURA MÁXIMA, CORRESPONDIENTE A UN OBSERVATORIO REAL UTILIZADO COMO EJEMPLO**



Se puede ver claramente que entre los años 1961 y 1964 este observatorio presenta un comportamiento irregular, entendiéndolo por “irregular”, si se compara con su comportamiento anterior y posterior en el tiempo, pero no por sí mismo, ya que los valores que presenta no parecen irracionales aisladamente. Por eso este ejemplo real es ilustrativo de lo que los test de detección de no homogeneidad pueden revelar, en forma de fragmentos temporales de la serie que parecen no encajar con el resto de la serie y, de hecho, la serie suministrada como ejemplo ha sido encontrada precisamente gracias a estos test. La dificultad de implementación formal de un test de no homogeneidad vendrá dada por la definición que hagamos del parecido entre un tramo de nuestra serie y el resto de ésta.

La manera de operar del test de homogeneidad empleado se describe seguidamente:

1. Para observar cuánto se parece un año a otro, se ha empleado un test de **comparación de distribuciones de Kolmogorov-Smirnov**, un test estadístico no-paramétrico (que no presupone distribuciones de la variable a estudiar), por tanto, proporciona un **p**-valor que se puede emplear como medida del parecido entre dos años. Estudiando el logaritmo de tal **p**-valor se determina que valores cercanos a 0 indican que dos años tienen una distribución de valores similar entre sí, por lo que se puede concluir la inexistencia de no homogeneidad entre ellos y, a menor valor, más probabilidad de no homogeneidad entre dos valores consecutivos. Nótese que esta primera parte sólo señala parecidos entre años consecutivos y no es más que una marca previa sobre la posibilidad de existencia de inhomogeneidad.

2. Si un cierto año ha sido marcado como posible indicador de inhomogeneidad, entonces será sometido a una prueba más genérica. Una vez marcados el año de corte y el siguiente que se sabe con diferente distribución, y suponiendo que marcan periodos diferentes, se averigua el p- valor de cada uno de los años de toda la serie con respecto a esos dos años. Si se presenta un salto, o una ruptura, entre todos esos p- valores, en los años considerados, entonces sí se considera que se tiene una no homogeneidad **verdadera** para toda la serie.

Esta manera de trabajar permite señalar en qué años aparece una cierta no homogeneidad en una serie. Dado que establecer lo pequeño que es un p- valor para así señalar posible inhomogeneidad es una cuestión de criterio, se ha lanzado varias veces el mismo test, con diferentes p- valores de corte (desde muy negativos, hasta más cercanos a 0) para así eliminar la subjetividad del criterio, ya que una inhomogeneidad, de ser cierta, debería aparecer en la mayoría de las ejecuciones de los test.

### Situación final

Una vez establecidos los criterios de homogeneidad sobre los posibles valores meteorológicos de nuestras series, se realiza un trabajo consistente en los siguientes pasos:

- a) Ejecutar los test de homogeneidad varias veces, con diferentes criterios (variando la rigurosidad con la que se declara que un periodo presenta no homogeneidad) hasta llegar a tener una lista de posibles observatorios con posibles años de corte que señalan no homogeneidad en la mayoría de las ejecuciones.
- b) Se inspeccionan manualmente las series así marcadas y se decide cuál es la acción a tomar: eliminación de toda la serie, corrección (marcando ciertos tramos como erróneos), o marca de la serie como de fiabilidad media (pero sin intervención sobre ésta).
- c) Si la serie ha sido corregida, se vuelven a lanzar los test de no homogeneidad para comprobar que ésta ha desaparecido, una vez realizada la corrección.

En la Tabla 4 se muestran los observatorios que han presentado no homogeneidad, según los test automáticos y las acciones ejecutadas.

**TABLA 4. ACCIONES TOMADAS PARA CADA OBSERVATORIO METEOROLÓGICO. LAS ACCIONES SE TOMARON DESPUÉS DE EJECUTAR LOS TEST DE HOMOGENEIDAD**

<i>Precipitación</i>	
<i>ID</i>	<i>Acción</i>
3200 (GETAFE)	Borrados todos los datos anteriores a 1955

En la Figura 10 anterior puede observarse la representación gráfica de los datos diarios de precipitación del único observatorio sobre el que se ha llevado a cabo una acción, el observatorio 3200 (Getafe). El test de homogeneidad marcó una no homogeneidad en el año 1955 (incluso la mera inspección visual de la figura parece sugerir que los datos anteriores a tal año muestran un comportamiento anómalo) por lo que han sido eliminados de la serie antes de emplearla en el estudio.

## 1.5. VERIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS

Antes de comenzar la generación de escenarios futuros climáticos se hace necesario comprobar la precisión de la metodología a la hora de simular el clima presente en los observatorios a estudiar, el proceso se denomina **verificación**. Para ello se utilizan como predictores campos suministrados por un reanálisis, y como predictandos la propia precipitación a simular en los observatorios.

El proceso de verificación consiste en la comparación de los datos observados (de las diferentes estaciones meteorológicas), con los datos simulados obtenidos mediante la aplicación de la metodología de *Downscaling* (FICLIMA) sobre el reanálisis (en este estudio, ERA40). Comparando los dos conjuntos de datos, observados y simulados, se puede evaluar si la metodología es capaz de simular correctamente el clima actual (y del pasado reciente), o de otra manera tiende a simular un clima más frío/más cálido y húmedo/seco. La información resultante es muy importante y tiene que ser tomada en cuenta cuando se trabaje con escenarios climáticos futuros.

Así, la metodología se aplicará al reanálisis europeo ERA40 del *ECMWF* (*European Centre for Medium - Range Weather Forecasts*) para el periodo 1958-2000.

El reanálisis ERA40 proporciona "observaciones" de los predictores, y cubre con una rejilla de 1.125 x 1.125 toda la superficie terrestre, con resolución seis-horaria (4 datos al día). No obstante, esa información de *relativa alta resolución* (espacial y temporal), debe relajarse a la de los *Modelos de Circulación General* (*GCM*) que se vayan a utilizar posteriormente (rejillas de 2 a 3 grados de resolución, y en general, con un único dato al día), ya que en esta verificación se pretende evaluar el error de la metodología de *Downscaling* aplicada en las mismas condiciones que se vayan a aplicar luego a los *GCM*. Esto es importante, ya que algunas metodologías de *Downscaling*, y la de *FIC* entre ellas, mejoran su capacidad de regionalización cuanto mayor resolución espacial y temporal tenga la información de entrada (los predictores). Por ello, si no se relajase la resolución espacial y temporal del ERA40 a la de los *GCM* que se va a regionalizar, se obtendrían errores de verificación menores de lo que en realidad se debería considerar (y corregir).

Lo primero que se debe hacer es obtener los valores de los predictores, a partir de la información proporcionada por el ERA40. El siguiente paso es el de obtener las situaciones sinópticamente análogas a las que se presentaron durante el periodo común entre observaciones y reanálisis, en este caso 1958 - 2000. Esta parte del proceso tiene un elevado coste computacional, ya que para cada día del periodo de verificación (1958-2000), se determinan las situaciones más similares del periodo de referencia (1958-2000), exceptuando los 5 días anteriores, los 5 posteriores y el mismo día problema para evitar el fenómeno denominado "*overfitting*" o sobreajuste.

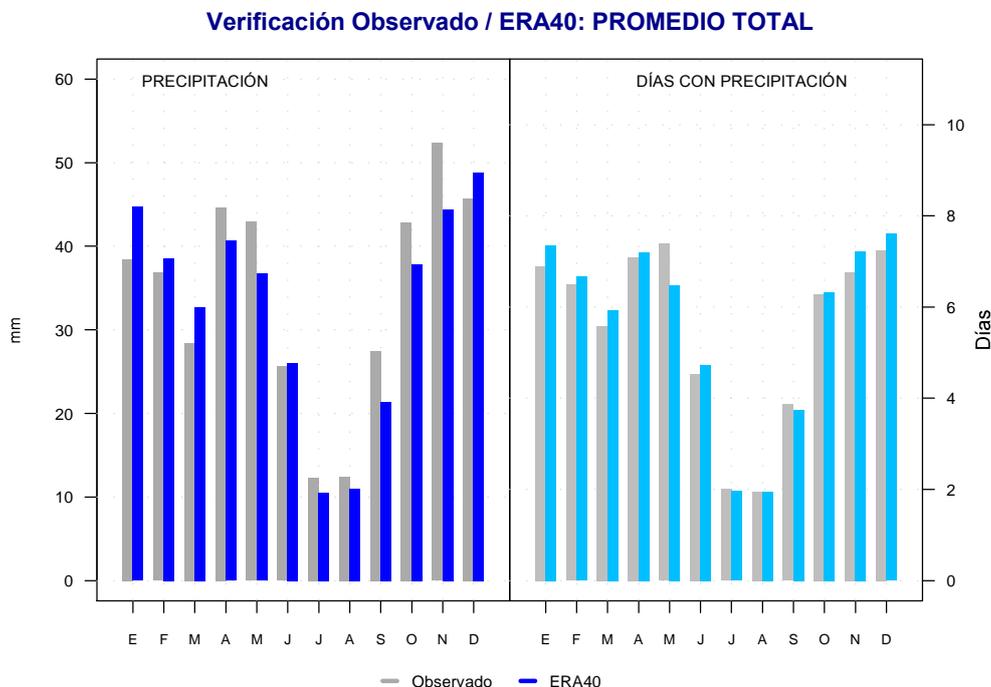
Una vez determinadas las situaciones análogas a cierto día problema X, se obtiene el valor simulado de precipitación y temperatura para ese día X. Realizando este proceso para cada uno de los días del periodo de verificación se obtiene una serie simulada por regionalización de ERA40 para cada uno de los observatorios.

Es importante resaltar que no es necesario que existan observaciones de los predictandos de todos los días del periodo de verificación (cosa que muy raramente sucede), ya que en la serie simulada por regionalización del ERA40 cada día se corresponde con una fecha real. Por tanto, las comparaciones entre las observaciones y la serie simulada por regionalización del ERA40 se realizan día a día (con los días de los que haya observación). Este aspecto es esencial ya que, si una metodología de regionalización es capaz de reproducir las observaciones día a día, eso sugiere que se están captando las relaciones físicas entre predictores y predictandos, y por tanto el problema de la estacionariedad, la principal desventaja de las metodologías estadísticas se reduce.

En la Figura 12 se ha representado la precipitación acumulada media mensual, y el número mensual medio de días con precipitación, tanto de las observaciones suministradas como de las simulaciones realizadas con el proceso de **Downscaling** sobre el reanálisis ERA40, para el periodo común de datos 1958 – 2000, y donde lo representado es el promedio de los tres observatorios (recordemos que los tres observatorios presentan un clima similar).

La Figura 12 refleja que la metodología empleada recoge muy bien la variación anual de la precipitación (su ciclo anual): bajas precipitaciones en los meses de verano, fuerte incremento en los meses de otoño (otoño: septiembre, octubre, y noviembre), precipitaciones elevadas en invierno (invierno: diciembre, enero, y febrero), y repunte en primavera (primavera: marzo, abril, y mayo). Que la metodología recoja el ciclo anual es de extrema importancia porque garantiza que las relaciones de **predictores/predictandos** establecidas por la metodología recogen la variabilidad climática de los puntos a estudiar. En el lado negativo, no se recogen adecuadamente los extremos de los meses de octubre y noviembre, una situación causada por el hecho de que las lluvias de esos meses vienen especialmente determinadas por fenómenos convectivos (tipos de tiempo relacionados con el movimiento vertical de las masas de aire, como las tormentas), unos fenómenos de pequeño, o medio tamaño, que no son capaces de ser recogidos completamente por los modelos ya que sus grandes tamaños de rejilla no permiten especificar correctamente esos fenómenos. Nótese también el elevado grado de precisión mostrado en la gráfica de días con precipitación, que dice que la metodología es muy buena a la hora de determinar si en un cierto punto, y para un cierto día, va a llover o no.

**FIGURA 12. RESULTADOS DE LA VERIFICACIÓN PARA EL PROMEDIO DE TODOS LOS OBSERVATORIOS**

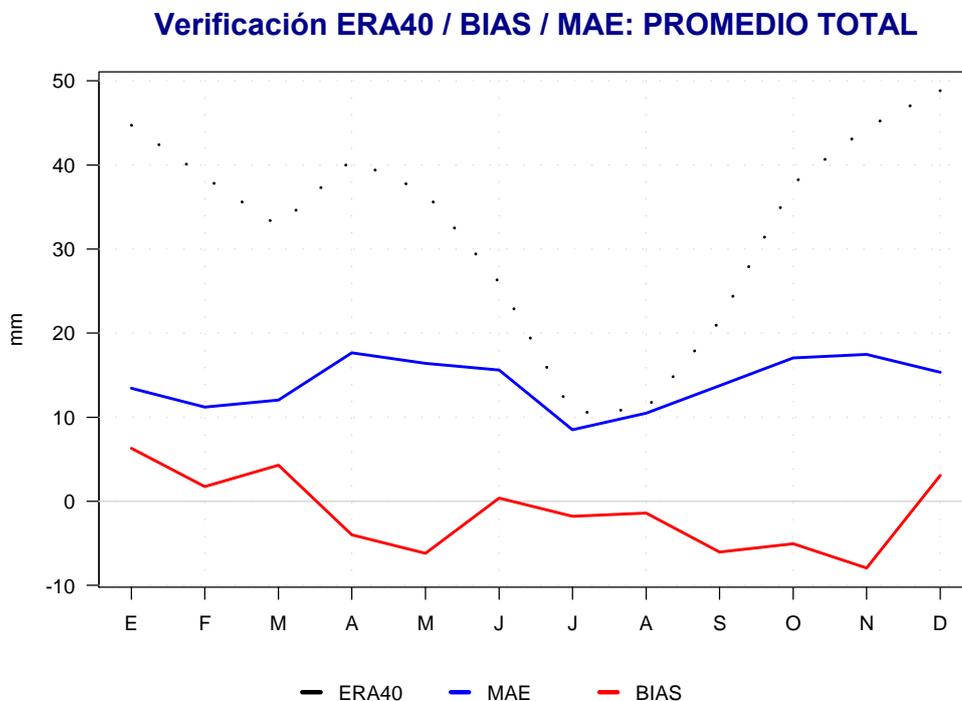


Media mensual de la precipitación acumulada (izquierda) y de los días con precipitación (derecha), para los datos observados (gris) y los datos regionalizados del reanálisis ERA40 (azul). Periodo común 1958 – 2000

La Figura 13 muestra en detalle dos estadísticos obtenidos al comparar las series, observada y simulada. Que el *BIAS* (el promedio de las diferencias) oscile en torno a 0 expresa que, en general, la metodología no introduce ningún sesgo en las simulaciones realizadas (al menos no en términos climáticos). Nótese que el mayor sesgo introducido se corresponde con los meses de octubre y noviembre, como se podía esperar, según lo que refleja la figura anterior y debido al carácter predominantemente convectivo de las lluvias.

Nótese que el *MAE* (el promedio del valor absoluto de las diferencias) muestra que el rango de variabilidad de la simulación no es capaz de ajustarse exactamente al rango de variabilidad de la observación, un fenómeno común a los procesos de *Downscaling* estadístico. En el caso concreto de estos observatorios de estudio, el elevado *MAE* correspondiente al verano indica que los resultados que se vayan a obtener para esa estación del año deben ser tratados con extrema cautela.

**FIGURA 13. RESULTADOS DEL PROCESO DE VERIFICACIÓN PARA EL PROMEDIO DE TODOS LOS OBSERVATORIOS**

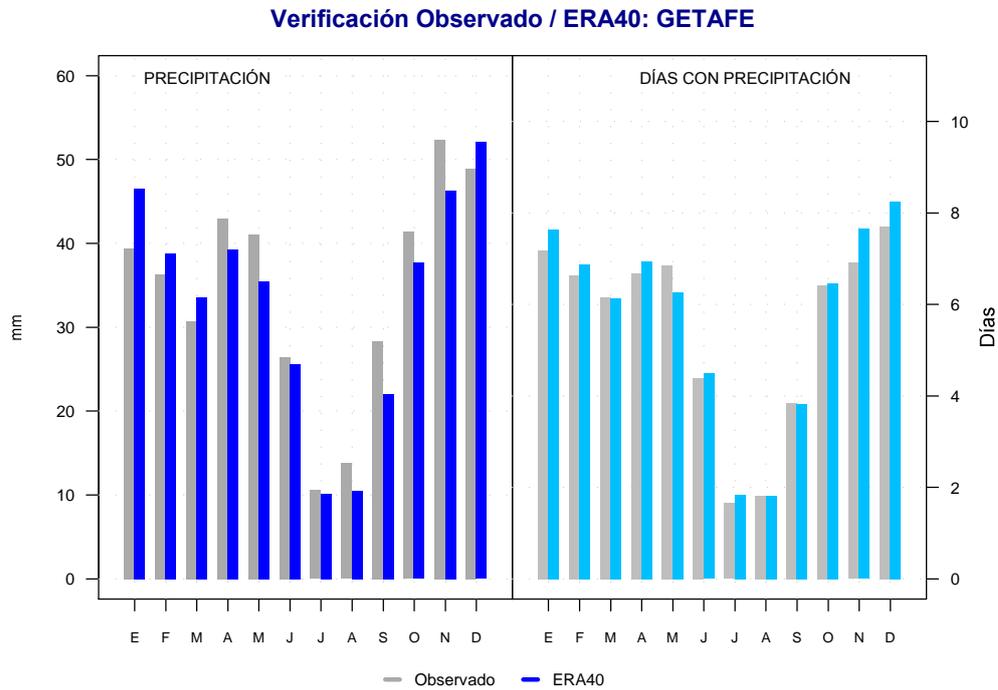


Media mensual de la precipitación acumulada simulada por el ERA40 (línea negra discontinua), BIAS (línea roja) y MAE (azul), media mensual de los datos simulados, contra los datos observados. Periodo común 1958 – 2000

Las siguientes figuras (14 a 19) muestran los resultados de la verificación, para cada uno de los observatorios estudiados.

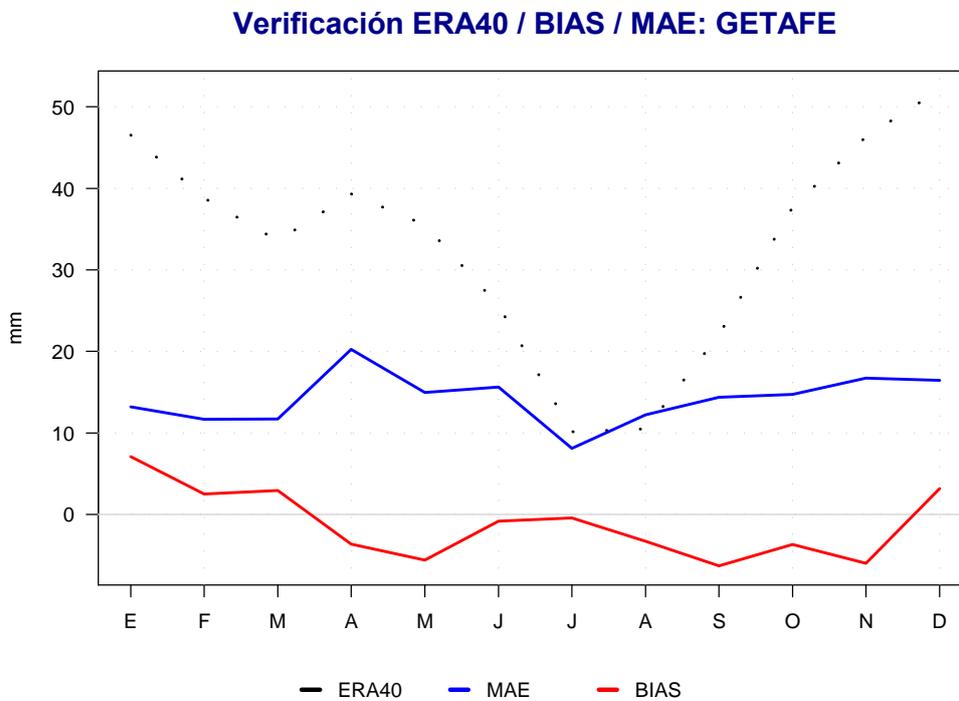
Las conclusiones para cada uno de éstos son similares a las expuestas para el promedio de todos ellos: la metodología empleada recoge muy bien la variación anual de la precipitación (bajas precipitaciones en los meses de verano, fuerte incremento en los meses de otoño, precipitaciones elevadas en invierno, y repunte en primavera), no se recogen adecuadamente los extremos de los meses de octubre y noviembre (debidos a fenómenos convectivos), precisión en la gráfica de días con precipitación, BIAS oscilando en torno a 0, y MAE elevado en verano.

**FIGURA 14. RESULTADOS DEL PROCESO DE VERIFICACIÓN PARA EL OBSERVATORIO DE GETAFE. DATOS OBSERVADOS / DATOS CALCULADOS**



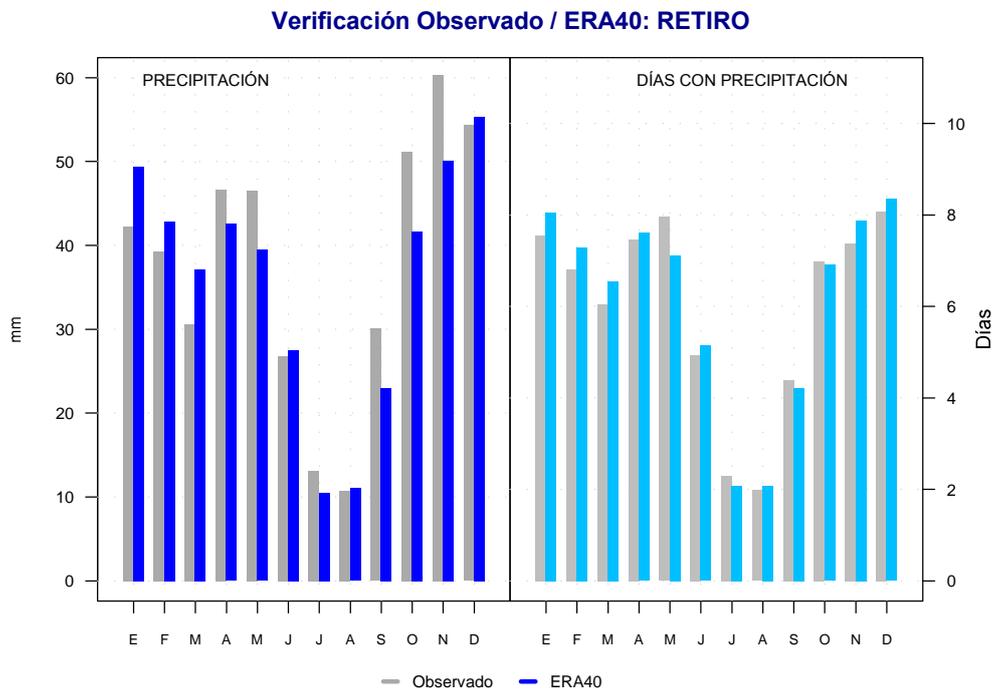
Media mensual de la precipitación acumulada (izquierda), y de los días con precipitación (derecha), para los datos observados (gris) y los datos regionalizados del reanálisis ERA40 (azul). Periodo común 1958 – 2000

**FIGURA 15. RESULTADOS DEL PROCESO DE VERIFICACIÓN PARA EL OBSERVATORIO DE GETAFE**



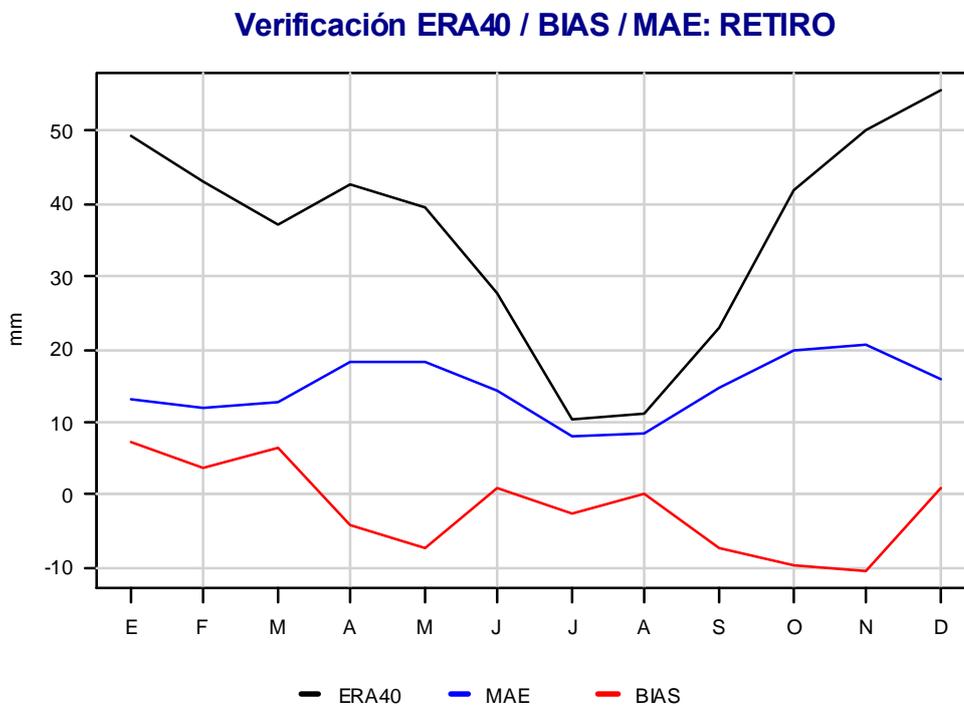
Media mensual de la precipitación acumulada simulada por el ERA40 (línea negra discontinua), BIAS (línea roja) y MAE (azul), media mensual de los datos simulados, contra los observados. Periodo común 1958 – 2000

**FIGURA 16. RESULTADOS DEL PROCESO DE VERIFICACIÓN PARA EL OBSERVATORIO DE RETIRO. DATOS OBSERVADOS / DATOS CALCULADOS**



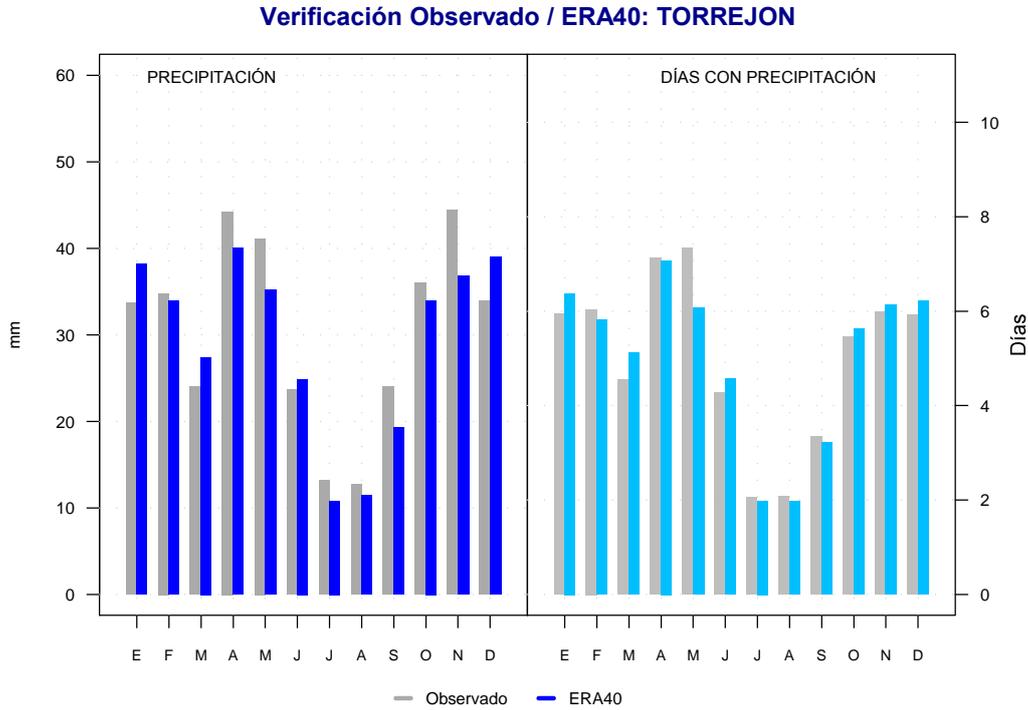
Media mensual de la precipitación acumulada (izquierda), y de los días con precipitación (derecha), para los datos observados (gris) y los datos regionalizados del reanálisis ERA40 (azul). Periodo común 1958 – 2000

**FIGURA 17. RESULTADOS DEL PROCESO DE VERIFICACIÓN PARA EL OBSERVATORIO DE RETIRO**



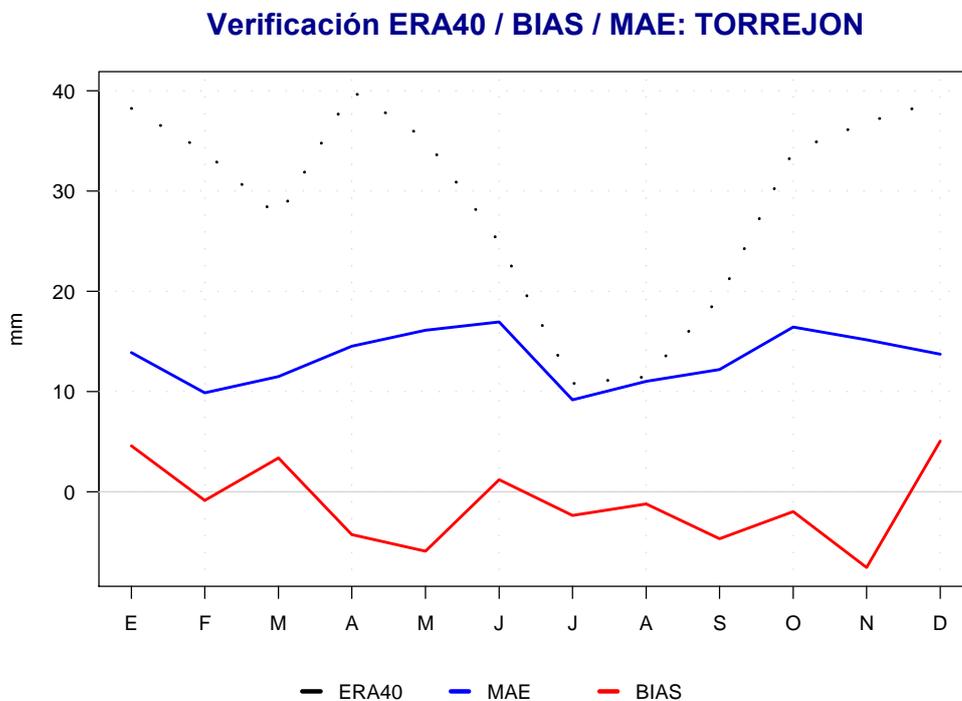
Media mensual de la precipitación acumulada simulada por el ERA40 (línea negra discontinua), BIAS (línea roja) y MAE (azul), media mensual de los datos simulados, contra los observados. Periodo común 1958 – 2000.

**FIGURA 18. RESULTADOS DEL PROCESO DE VERIFICACIÓN PARA EL OBSERVATORIO DE TORREJÓN. DATOS OBSERVADOS / DATOS CALCULADOS**



Media mensual de la precipitación acumulada (izquierda), y de los días con precipitación (derecha), para los datos observados (gris) y los datos regionalizados del reanálisis ERA40 (azul). Periodo común 1958 – 2000

**FIGURA 19. RESULTADOS DEL PROCESO DE VERIFICACIÓN PARA EL OBSERVATORIO DE TORREJÓN**



Media mensual de la precipitación acumulada simulada por el ERA40 (línea negra discontinua), BIAS (línea roja) y MAE (azul), media mensual de los datos simulados, contra los observados. Periodo común 1958 – 2000

## 1.6. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS CLIMÁTICOS

Las metodologías de regionalización estadística generan escenarios de clima futuro a escala local, a partir de las salidas proporcionadas por los distintos modelos climáticos y escenarios de emisiones disponibles, de manera que los datos de campos atmosféricos proporcionados por los modelos (campos predictores) serán los *inputs* en los procesos de este estudio, mientras que las series de la variable a simular a escala local (en este caso temperatura y precipitación) serán los *outputs* de las metodologías de regionalización estadística.

Cada modelo climático presenta unas características, tanto espaciales como temporales, propias, así como un funcionamiento interno propio de cada modelo (parametrizaciones, resolución de las ecuaciones atmosféricas, etc.) que determinarán la manera en la que cada modelo simula el clima de una región determinada. En la Tabla 5 se resumen las características espaciales y temporales de cada uno de los modelos climáticos usados en este estudio.

**TABLA 5. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MODELOS CLIMÁTICOS EMPLEADOS**

<i>Modelo Climático</i>	<i>Resolución espacial grados</i>	<i>Resolución temporal</i>	<i>Calendario días/año</i>	<i>Centro de Investigación</i>
MPI-ESM-MR	1,8 x 1,8	diaria	Gregoriano	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M), Germany
GFDL-ESM2M	2 x 2,5	diaria	365	National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), E.E.U.U.
CanESM2	2,8 x 2,8	diaria	365	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CC-CMA), Canada
CNRM-CM5	1,4 x 1,4	diaria	Gregoriano	CNRM (Centre National de Recherches Meteorologiques), Meteo-France, France
BCC-CSM1-1	2,8 x 2,8	diaria	365	Beijing Climate Center (BCC), China Meteorological Administration, China
HADGEM2-CC	1,25 x 1,8	diaria	360	Met Office Hadley Centre, UK
MIROC-ESM-CHEM	2,8 x 2,8	diaria	Gregoriano	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies, Japan
NorESM1-M	1,8 x 2,5	diaria	365	Norwegian Climate Centre, Norway
MRI-CGCM3	1,2 x 1,2	diaria	Gregoriano	MRI - Meteorological Research Institute, Tsukuba, Japan

Es importante señalar que la disponibilidad de los datos de los modelos climáticos debe agradecerse al WCRP (*World Climate Research Programme*), un programa de la Organización Meteorológica Mundial WMO (*World Meteorological Organization*) que es responsable de la iniciativa CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project 5*) y, al Departamento de Energía de los Estados Unidos de América por el desarrollo de la infraestructura necesaria para su almacenamiento y descarga (tanto de hardware como de software). A cada uno de los grupos de trabajo de los modelos empleados debe agradecerse también el trabajo realizado en su modelización y en su ejecución.

En general, los modelos climáticos tienden a simular un clima presente más cálido/frío o húmedo/seco de lo que éste es en realidad y, la magnitud con la que se alejan de la realidad varía en función de la región concreta en la que se esté trabajando ya que la simulación de los modelos se realiza a escala global. Dado que cada modelo trabaja de forma diferente en la simulación del clima, surge la necesidad de evaluar el comportamiento de todos los modelos en la zona específica de estudio, de manera que se permita determinar la precisión del modelo simulando el clima presente de la región, y si su uso es adecuado o, por el contrario, no se debería trabajar con él.

El proceso mediante el cual se evalúa el comportamiento de un modelo climático es lo que se conoce como **validación**. Este proceso consiste en comparar las series simuladas obtenidas mediante regionalización del reanálisis (ERA40 en este caso), con las series simuladas obtenidas mediante regionalización del escenario **Historical** de cada modelo (su simulación de control) para un periodo común, en este caso 1958-2000.

*Historical* corresponde a la ejecución de un experimento concreto relativo a datos del pasado y no es, por lo tanto, un escenario futuro de cambio climático. Su misión es la de permitir disponer de un experimento que muestre si el modelo climático a emplear es capaz de reflejar la variabilidad climática natural, y por eso abarca un periodo del pasado, el comprendido entre 1951 y 2005, (aunque algunos modelos hacen comenzar tal periodo más atrás). En la Figura 20 se muestra la precipitación acumulada media mensual del periodo *Historical*, de cada uno de los nueve modelos empleados, a la vez que la determinada por el reanálisis ERA40; los estadísticos se han calculado para el periodo 1958–2000 (el periodo común de los datos mostrados) y muestran el promedio de los tres observatorios empleados en este proyecto (recordemos que los tres observatorios presentan un clima similar).

Nótese que los modelos empleados sí recogen la variabilidad climática en el ciclo anual de la precipitación, lo que indica que están bien contruidos, en el sentido de que son capaces de establecer las características específicas de la región. Lo que no consiguen es reproducir correctamente las cantidades de precipitación asociadas al ciclo (en general, tienden a sobrestimarlas). Que reproduzcan bien el ciclo de precipitaciones es precisamente la característica que nos hace confiar en su capacidad de reproducir correctamente el clima de los puntos locales a estudiar; que no lo hagan con las cantidades es lo que hace que al hablar de los datos obtenidos para escenarios futuros de un cierto modelo siempre recalquemos que los incrementos con respecto al pasado (a *Historical*) deban analizarse en forma relativa y no absoluta, y que el estudio de los incrementos absolutos precise de una corrección del error sistemático (de la diferencia absoluta entre simulado por el reanálisis y simulado por el modelo).

**FIGURA 20. MODELOS CLIMÁTICOS. PROMEDIO MENSUAL DE PRECIPITACIÓN, ESCENARIO HISTORICAL CONTRA VALOR DEL REANÁLISIS ERA40**

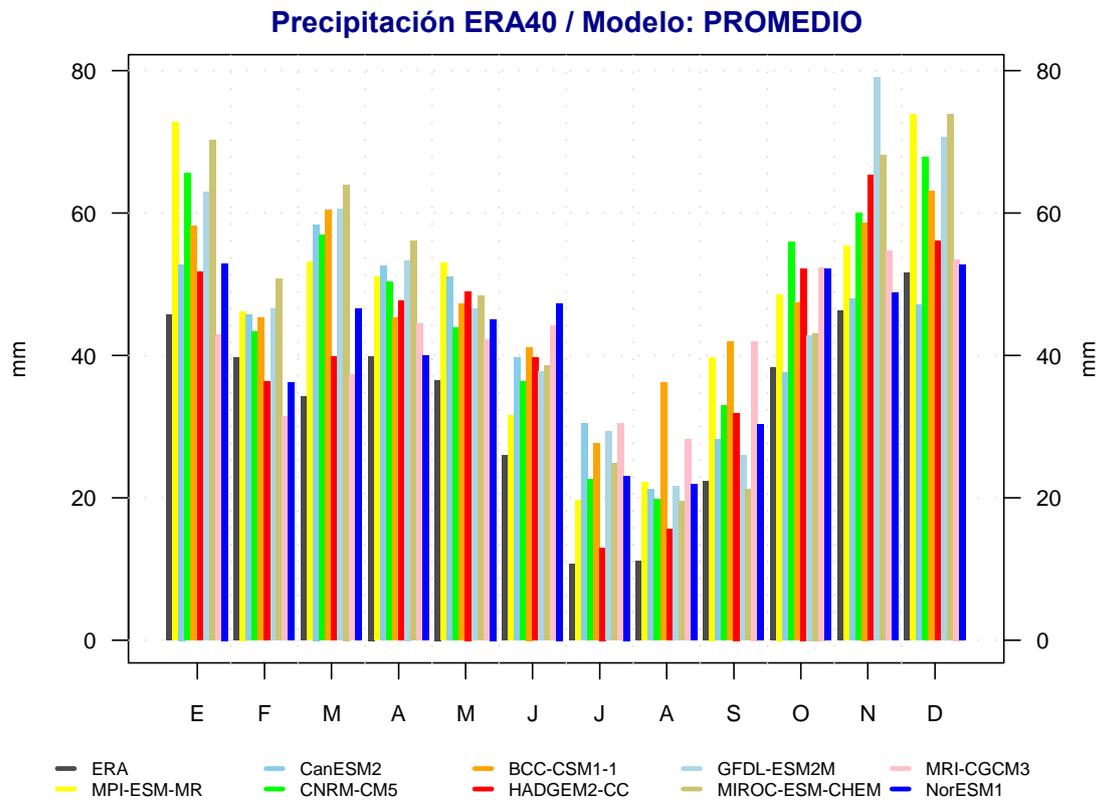


Gráfico comparativo de distintos modelos climáticos. Promedio mensual de precipitación del escenario Historical contra el valor del reanálisis ERA40. Periodo común de comparación: 1958 – 2000. Promedio de los tres observatorios empleados en este estudio.

Las siguientes figuras (21 a 23) muestran los resultados de validación desglosados para cada uno de los observatorios estudiados en la región de Madrid (Getafe, Retiro y Torrejón).

Como se puede observar, los resultados son similares al antes descrito para el promedio de los observatorios: los modelos empleados sí recogen la variabilidad climática, en el ciclo anual de la precipitación, y son capaces de establecer las características climáticas de la región. Lo que no consiguen es reproducir correctamente las cantidades de precipitación asociadas al ciclo (tienden a sobrestimarlas). Que reproduzcan bien el ciclo es precisamente la característica que lleva a confiar en su capacidad de representar correctamente el clima de los observatorios; que no lo hagan con las cantidades es lo que hace recalcar que los incrementos con respecto al pasado (a *Historical*) deban analizarse en forma relativa y no absoluta, y que el estudio de los incrementos absolutos precise de una corrección del error sistemático.

**FIGURA 21. MODELOS CLIMÁTICOS. PROMEDIO MENSUAL DE PRECIPITACIÓN, ESCENARIO HISTORICAL CONTRA VALOR DEL REANÁLISIS ERA40. OBSERVATORIO GETAFE**

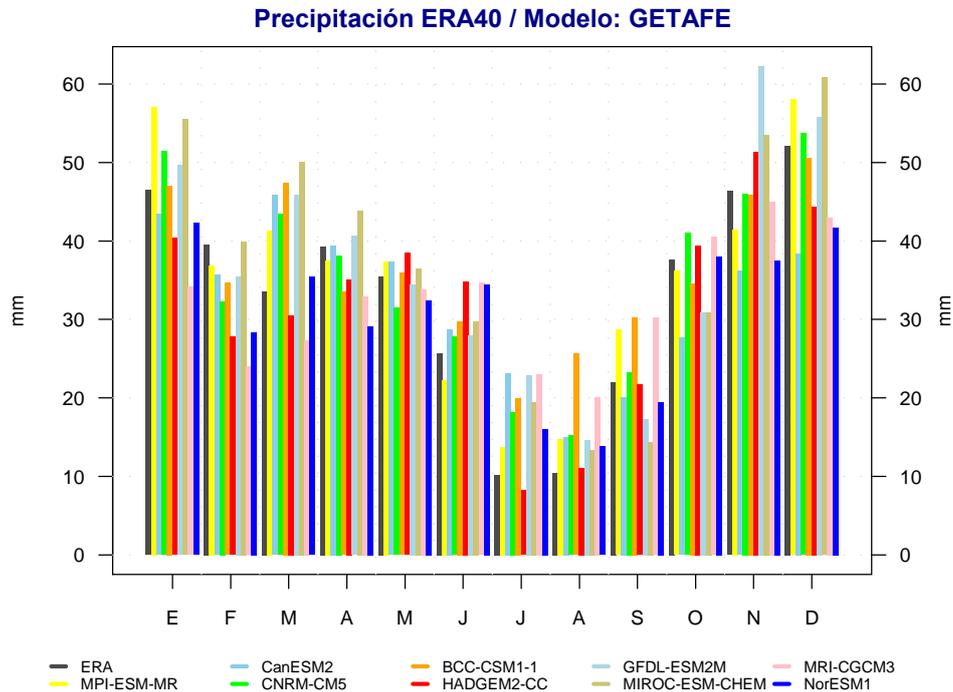


Gráfico comparativo de distintos modelos climáticos. Promedio mensual de precipitación del escenario Historical contra el valor del reanálisis ERA40. Periodo común de comparación 1958 – 2000. Observatorio de Getafe

**FIGURA 22. MODELOS CLIMÁTICOS. PROMEDIO MENSUAL DE PRECIPITACIÓN, ESCENARIO HISTORICAL CONTRA VALOR DEL REANÁLISIS ERA40. OBSERVATORIO RETIRO**

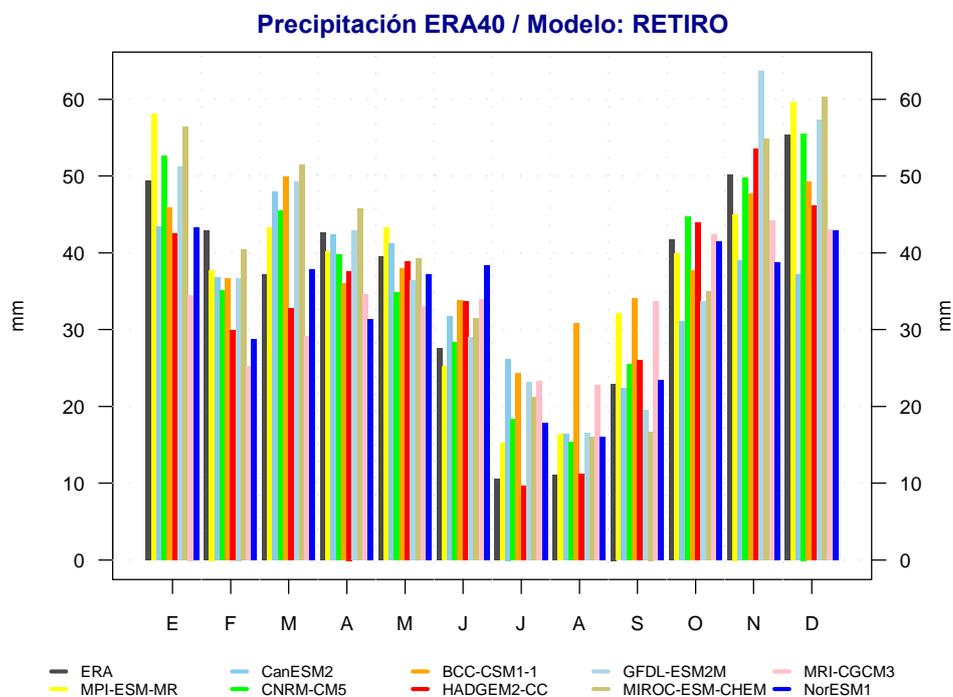


Gráfico comparativo de distintos modelos climáticos. Promedio mensual de precipitación del escenario Historical contra el valor del reanálisis ERA40. Periodo común de comparación 1958 – 2000. Observatorio de Retiro

**FIGURA 23. MODELOS CLIMÁTICOS. PROMEDIO MENSUAL DE PRECIPITACIÓN, ESCENARIO HISTORICAL CONTRA VALOR DEL REANÁLISIS ERA40. OBSERVATORIO TORREJÓN**

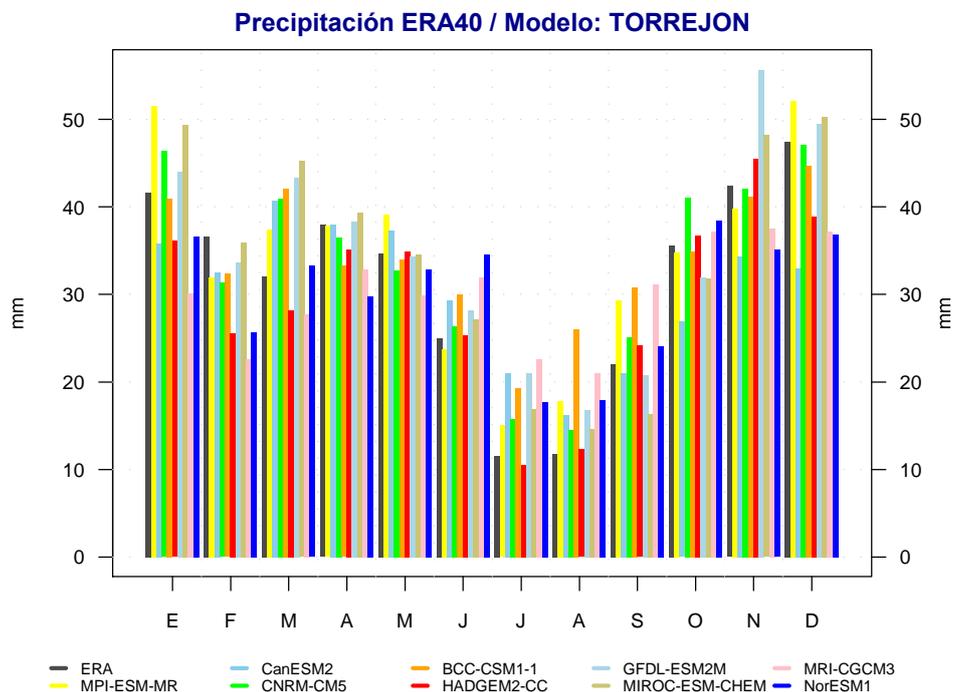


Gráfico comparativo de distintos modelos climáticos. Promedio mensual de precipitación del escenario Historical contra el valor del reanálisis ERA40. Periodo común de comparación 1958 – 2000. Observatorio de Torrejón

### 1.7. GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE CLIMA FUTURO A ESCALA LOCAL

Los escenarios de emisiones se utilizan en cambio climático como descripciones plausibles de cómo serán los cambios futuros en un amplio rango de variables: socioeconómicas, tecnológicas, energéticas, uso del suelo, emisiones de gases de efecto invernadero (en adelante, *GEI*), y contaminantes del aire. Para cumplir esta función, se desarrollaron conjuntos de escenarios de emisiones como los *IS92*<sup>14</sup>, o más recientemente, los *SRES*<sup>15</sup>. Pero en la comunidad científica surgió la necesidad de escenarios provistos de una información más detallada.

<sup>14</sup> IS92, En 1992, el IPCC publicó unos escenarios de emisiones que servían de base para los modelos de la circulación mundial, con el fin de desarrollar un contexto sobre cambio climático. Los denominados “escenarios IS92” (*International Scenarios 1992*) constituyeron un gran paso adelante. Fuente: <https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-sp.pdf>.

<sup>15</sup> SRES, En 2000, el IPCC publicó una nueva serie de escenarios, que llamó SRES (*Special Report on Emissions Scenarios*), para su utilización en el tercer informe de evaluación. Estos responden a varias fuerzas motivadores sobre el cambio climático, incluyendo el crecimiento de la población y el desarrollo socioeconómico. Estas fuerzas motivadoras generan varios escenarios futuros que pueden tener una influencia en las fuentes y sumideros de gases invernadero (GHG), como los sistemas de energía y el cambio en el uso de la tierra. La evolución de estas fuerzas motivadoras en relación al cambio climático es incierta, generando un amplio rango de posibles vías de emisiones de gases invernadero. Fuente: [www.lenntech.es/efecto-invernadero/escenarios-causas-ipcc-sres.htm#ixzz3LTxExXws](http://www.lenntech.es/efecto-invernadero/escenarios-causas-ipcc-sres.htm#ixzz3LTxExXws)

Atendiendo a esta necesidad, el IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático - *Intergovernmental Panel on Climate Change*) propone la definición de nuevos escenarios. En este caso, la propuesta consiste en que sea la comunidad científica quien defina dichos escenarios mediante la colaboración conjunta de los responsables de los distintos centros que generan **modelos climáticos** y de los responsables de los centros de **modelos de evaluación integrada**. La idea de aunarlos reside en que estos últimos proporcionan una información adicional sobre aspectos socioeconómicos que completan la información generada por los modelos.

Los nuevos escenarios futuros a usar, asociados al quinto informe del IPCC, han recibido el nombre de *Representative Concentration Pathways* (en adelante, **RCP**) y su definición se basa en los criterios:

1. Los RCP se deben basar en escenarios de emisiones ya existentes, elaborados por distintos centros y recogidos en la literatura. Al mismo tiempo cada RCP debe, por sí mismo, ser una descripción plausible e internamente coherente con el futuro.
2. Deben proporcionar información de todos los forzamientos radiativos necesarios para la modelización climática (uso del suelo, emisiones de GEI y contaminantes del aire).
3. Deben estar “armonizados”, es decir, la transición continua entre el periodo histórico (el experimento *Historical*) y los periodos futuros debe garantizarse.
4. Deben ofrecer información hasta el año 2100 y estar disponibles para simular aún más allá.

El nombre “RCP” refleja dos de sus principales características:

- *Representative*: hace referencia a la idea de que un RCP representa un conjunto de escenarios de emisiones ya existentes. Es decir, el RCP, debe ser compatible tanto con los escenarios extremos, como con los medios.
- *Concentration Pathway*: este término hace hincapié en que los RCP no son productos finales, sino que son la herramienta (el input) hacia la generación de escenarios de emisiones, de ahí el uso de concentraciones en vez de emisiones. Los RCP se entienden como un conjunto suficientemente consistente de las componentes de forzamiento radiativo, pero no son un conjunto completo de proyecciones climáticas, socioeconómicas y de emisión.

En la Figura 24 se puede observar cómo los nuevos RCP se relacionan con los escenarios ya existentes en informes anteriores del IPCC. Revisando la literatura existente (formada por el estudio de 324 escenarios procedentes de diversos centros de investigación) se constató que el rango de valores de forzamiento radiativo<sup>16</sup> esperado en 2100 oscilaba entre 2,6 W/m<sup>2</sup> como nivel más bajo; y entre 8 y 9 W/m<sup>2</sup> en el nivel más alto.

---

<sup>16</sup> Forzamiento radiativo, es el cambio en el flujo neto de energía radiativa hacia la superficie de la Tierra medido en el borde superior de la troposfera (a unos 12.000 m sobre el nivel del mar) como resultado de cambios internos en la composición de la atmósfera, o cambios en el aporte externo de energía solar. Se expresa en Wm<sup>-2</sup>, unidades de vatios por metro cuadrado de la superficie de la tierra. Un forzamiento radiativo positivo contribuye a calentar la superficie de la Tierra, mientras que uno negativo favorece su enfriamiento. En el informe del IPCC, los cambios en el forzamiento radiativo se comparan con el año 1750. Fuente: [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/es/faq-2-1.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/faq-2-1.html).

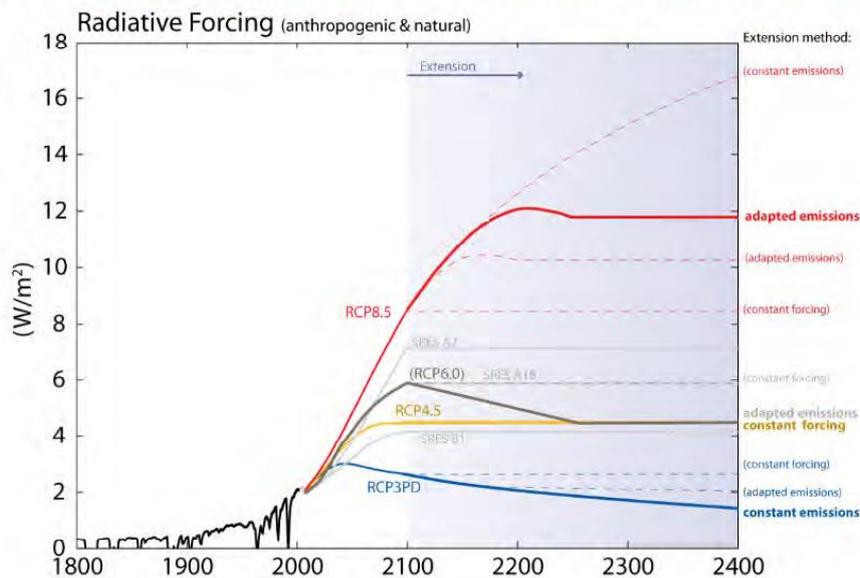
El Forzamiento Radiativo fue definido por V. Ramaswamy (2001) como “el cambio en la irradiancia neta en la Tropopausa después de permitir que las temperaturas estratosféricas se reajusten al equilibrio radiativo, pero permaneciendo fijas, en sus valores no perturbados, las temperaturas de superficie y troposférica”.

Como los RCP deben cubrir todo el rango existente y además proporcionar información intermedia, se escogieron un conjunto de cuatro RCP que abarcaran tanto los valores extremos, como dos valores intermedios separados lo suficiente como para que los resultados obtenidos a partir de ellos también dieran lugar a resultados diferentes (separados unos  $2\text{W/m}^2$ , entre sí).

La comunidad científica (formada por más de 20 grupos de trabajo de todo el mundo) determinó, en septiembre de 2008 en París, que los nuevos escenarios serían los **RCP 2.6**, **RCP 4.5**, **RCP 6.0** y **RCP 8.5** (el nombre hace referencia al forzamiento radiativo alcanzado en el año 2100), y se designaron los cuatro grupos que se encargarían de elaborar dichos escenarios (ver Tabla 6).

**FIGURA 24. FORZAMIENTO RADIATIVO, PREVISIÓN ESCENARIOS SIGLO XXI ASOCIADOS A RCP**

**CMIP5 New scenarios: Representative Concentration Pathways**



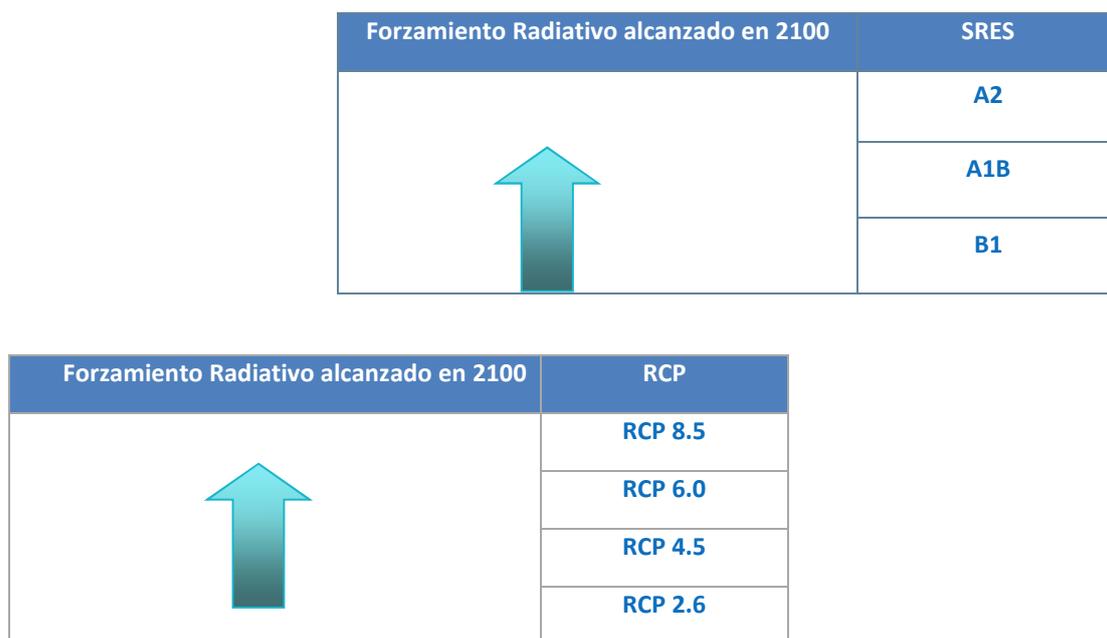
Forzamiento radiativo a lo largo del siglo XXI, asociado a los diferentes RCP y su relación con los escenarios del informe nº 4 del IPCC (SRES). El escenario RCP2.6 aparece con su nombre originario, RCP3PD.  
 Fuente: Meinshausen, Smith, et al. (2011).

**TABLA 6. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS DIFERENTES RCP**

RCP	Características	Referencia
2.6	Se alcanza un pico de $3\text{ W/m}^2$ antes de 2100 para luego descender hasta los $2,6\text{ W/m}^2$	Van Vuuren et al. (2011)
4.5	Se estabiliza sin sobrepasar el nivel de $4,5\text{ W/m}^2$ (equivalente a unas 650 ppm) en 2100	Thomson et al. (2011)
6.0	Se estabiliza sin sobrepasar el nivel de $6,0\text{ W/m}^2$ (equivalente a unas 850 ppm) en 2100	Fujino et al. (2006)
8.5	Alcanza $8,5\text{ W/m}^2$ (equivalente a unas 1370 ppm de $\text{CO}_2$ equivalente) en 2100 y no se estabilizan los niveles hasta el año 2050	Riahi et al. (2011)

Dada la diferente forma en que han sido definidos, no existe una relación directa entre los escenarios futuros asociados al 4º informe del IPCC (*SRES*) y los asociados al 5º informe del IPCC (*RCP*), ni una relación explícita entre sus distintas características. Sin embargo, según se observa en la Figura 25, se puede establecer una categoría dentro de cada una de las dos familias de escenarios, según el impacto que cada uno de ellos implica sobre las condiciones de clima actuales. Así, de la misma manera que para la familia de *SRES* los escenarios de mayor impacto eran los asociados al “grupo A”, y los de menor impacto al “grupo B” (de mayor a menor impacto eran: A2, A1B y B1), para la familia de *RCP* se asocia mayor impacto sobre el clima a los de mayor forzamiento radiativo (de mayor a menor, serían RCP 8.5, RCP 6.0, RCP 4.5, y RCP 2.6) alcanzado en 2100.

**FIGURA 25. FORZAMIENTO RADIATIVO ALCANZADO EN 2100, SEGÚN ESCENARIOS SRES Y RCP**



*Forzamiento Radiativo para la familia de escenarios futuros RCP (asociada al 5º informe del IPCC) y para la familia de SRES (asociada al 4º informe del IPCC), orden de los distintos escenarios definidos (los más comúnmente usados, en el caso de los SRES) según el forzamiento radiativo alcanzado en 2100 (derivado de sus definiciones), de menor a mayor, como sugerencia del posible impacto sobre el clima de cada escenario posible.*

Junto con los nuevos RCP se formó el CMIP5 (*Climate Model Intercomparison Project 5*) con el objetivo de crear una base de trabajo donde poner a disposición de la comunidad científica toda la información, de cara a ser utilizada en el próximo informe del IPCC.

Debido a la enorme información generada por los diferentes centros de investigación, el CMIP5 ha dividido la información en diferentes niveles, con el objetivo de que todos los centros aporten un mínimo de información común que permita la comparación entre ellos. Así, el primer nivel denominado “*Core*” que debe ser proporcionado por todos los miembros, lo forman los RCP 4.5 y RCP 8.5.

En un segundo nivel denominado “*Tier 1*” se encuentran los RCP 2.6 y 6.0, y experimentos más detallados.

El último nivel, denominado “*Tier 2*”, recoge escenarios de emisiones más complejos como, por ejemplo, los *Extended Concentration Pathways*, extensiones de los RCP hasta el año 2300.

En este proyecto se ha trabajado con 9 modelos climáticos que disponían de entre 2 y 4 RCP cada uno. Debe decirse que su elección no ha sido determinada por ningún criterio científico específico ya que, dado lo reciente de los modelos asociados al CMIP5, todavía no existe la suficiente literatura científica relativa al comportamiento de todos los modelos existentes con lo que, por ahora, es completamente imposible establecer una clasificación (mejor /peor) de los modelos existentes.

Para la selección de los nueve modelos elegidos (un número suficiente para mostrar la variabilidad entre los existentes) se escogieron los que respondían a los criterios siguientes:

- Mostrar un buen comportamiento en el pasado informe del IPCC, o al menos, haber sido generados por los mismos organismos científicos, buscando un cierto grado de confianza en la capacidad de los equipos involucrados a la hora de generar un modelo y,
- Dar preferencia a modelos del tipo “**Modelos de Sistema Terrestre**” (*ESM, Earth System Model*), por considerarlos más avanzados.

Estos modelos son un conjunto de ecuaciones que describen los procesos que tienen lugar dentro y entre la atmósfera, el océano, la criosfera y la biosfera marina y terrestre. Estas ecuaciones recogen los mecanismos físicos, químicos y biológicos que gobiernan a los elementos del sistema terrestre y también incluyen erupciones volcánicas y variaciones de la radiación solar entrante. Su principal avance frente a los **Modelos de Circulación General** tradicionales es que permiten la interacción del sistema con el ciclo del carbono, y tienen en cuenta la bioquímica y la biogeología marina.

Los modelos finalmente utilizados y los escenarios disponibles para cada uno de ellos aparecen listados en la Tabla 7.

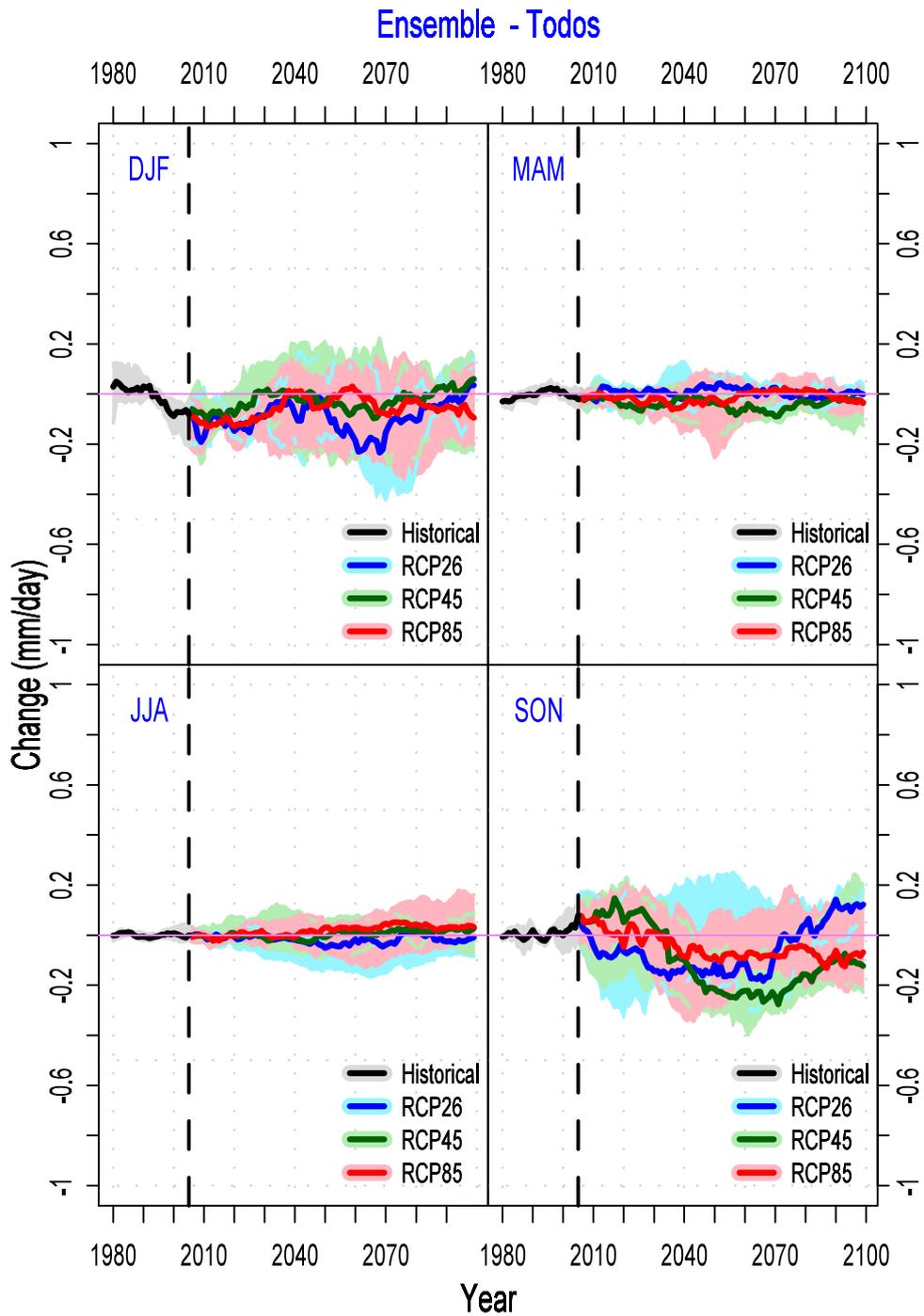
La combinación de modelos utilizados y escenarios disponibles para cada uno de ellos muestra que para este proyecto se dispuso de un abanico de posibilidades compuesto por 31 posibles evoluciones de clima futuro. El periodo en el que trabajan los distintos escenarios es, para el escenario *Historical* (el periodo de control de cada modelo), 1951-2005; y para cada uno de los **RCP** considerados, 2006-2100.

**TABLA 7. ESCENARIOS PROPORCIONADOS POR CADA UNO DE LOS MODELOS CLIMÁTICOS USADOS**

<i>Modelo Climático</i>	<i>Escenarios Disponibles</i>	<i>Centro de Investigación</i>
MPI-ESM-MR	<i>Historical</i> RCP 2.6 RCP 4.5 RCP 8.5	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M), <b>Germany</b>
GFDL-ESM2M	<i>Historical</i> RCP 2.6 RCP 4.5 RCP 8.5 RCP 6.0	National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), <b>E.E.U.U.</b>
CanESM2	<i>Historical</i> RCP 2.6 RCP 4.5 RCP 8.5	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CC-CMA), <b>Canada</b>
CNRM-CM5	<i>Historical</i> RCP 2.6 RCP 4.5 RCP 8.5	CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques), Meteo-France, <b>France</b>
BCC-CSM1-1	<i>Historical</i> RCP 2.6 RCP 4.5 RCP 8.5 RCP 6.0	Beijing Climate Center (BCC), China Meteorological Administration, <b>China</b>
HADGEM2-CC	<i>Historical</i> RCP 4.5 RCP 8.5	Met Office Hadley Centre, <b>UK</b>
MIROC-ESM-CHEM	<i>Historical</i> RCP 2.6 RCP 4.5 RCP 8.5 RCP 6.0	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies, <b>Japan</b>
NorESM1-M	<i>Historical</i> RCP 2.6 RCP 4.5 RCP 8.5 RCP 6.0	Norwegian Climate Centre, <b>Norway</b>
MRI-CGCM3	<i>Historical</i> RCP 2.6 RCP 4.5 RCP 8.5 RCP 6.0	MRI (Meteorological Research Institute, Tsukuba), <b>Japan</b>

En la Figura 26 se resume estadísticamente el cambio futuro de la precipitación que proporcionan las simulaciones de los modelos para el promedio de todos los observatorios, separado por estaciones del año.

FIGURA 26. INCREMENTOS ESTACIONALES ABSOLUTOS ESPERADOS DE PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI. RCP 2.6; RCP 4.5; RCP 8.5



Incrementos estacionales absolutos esperados de la precipitación para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCP representados (2.6, 4.5, y 8.5) con respecto al promedio del periodo 1971 – 2000 (tomado como referencia). La línea discontinua marca el fin del experimento Historical y el comienzo de los RCP. Simulaciones de todos los modelos sobre todos los observatorios. Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.

Antes de estudiar las implicaciones representadas en la Figura 26 se debe describir con detalle cómo se ha construido para comprender qué significa. Lo que se muestra es la evolución estacional de la variable para cada **RCP** como la mediana de todos los resultados obtenidos para cada Modelo Climático (por ejemplo, la correspondiente a **RCP 8.5** se construye con todos los escenarios **RCP 8.5** disponibles, uno por cada modelo que proporcione tal escenario) y para cada observatorio; tales medianas son las líneas gruesas pintadas. Las áreas sombreadas representan, para cada **RCP**, la dispersión de los datos para todos los modelos y todos los observatorios, donde el límite superior es el percentil 90 y el inferior el percentil 10 de todos los datos. Cada valor concreto se calcula como la media móvil de 30 años: un valor concreto asociado al año 2050 se corresponde con la media móvil del periodo 2020 – 2050, es decir, los 30 años anteriores al año referenciado. Los cálculos se muestran contra el promedio obtenido frente al periodo 1971 – 2000, es decir que el valor 0 de las gráficas se corresponde con la media de ese promedio, con lo que cualquier cambio se referencia contra ese valor. La línea discontinua vertical representa el año en que acaba el experimento **Historical** (el año 2005) y comienzan los escenarios RCP.

Cada estación del año aparece identificada por las iniciales en inglés de los meses que la forman (**DJF** - *December, January, February*-; **MAM** -*March, April, May*-; **JJA** -*June, July, August*-; **SON** -*September, October, November*-). Aunque se podría trabajar sobre estadísticas anuales (es decir, se podría representar una única gráfica con datos anuales), en el caso de variables tan fuertemente dependientes de la estación del año, como la precipitación, es mucho más adecuado estudiar conclusiones estacionales que anuales – adviértase que una única gráfica anual enmascararía el diferente comportamiento en la gráfica de, por ejemplo, el verano y el invierno.

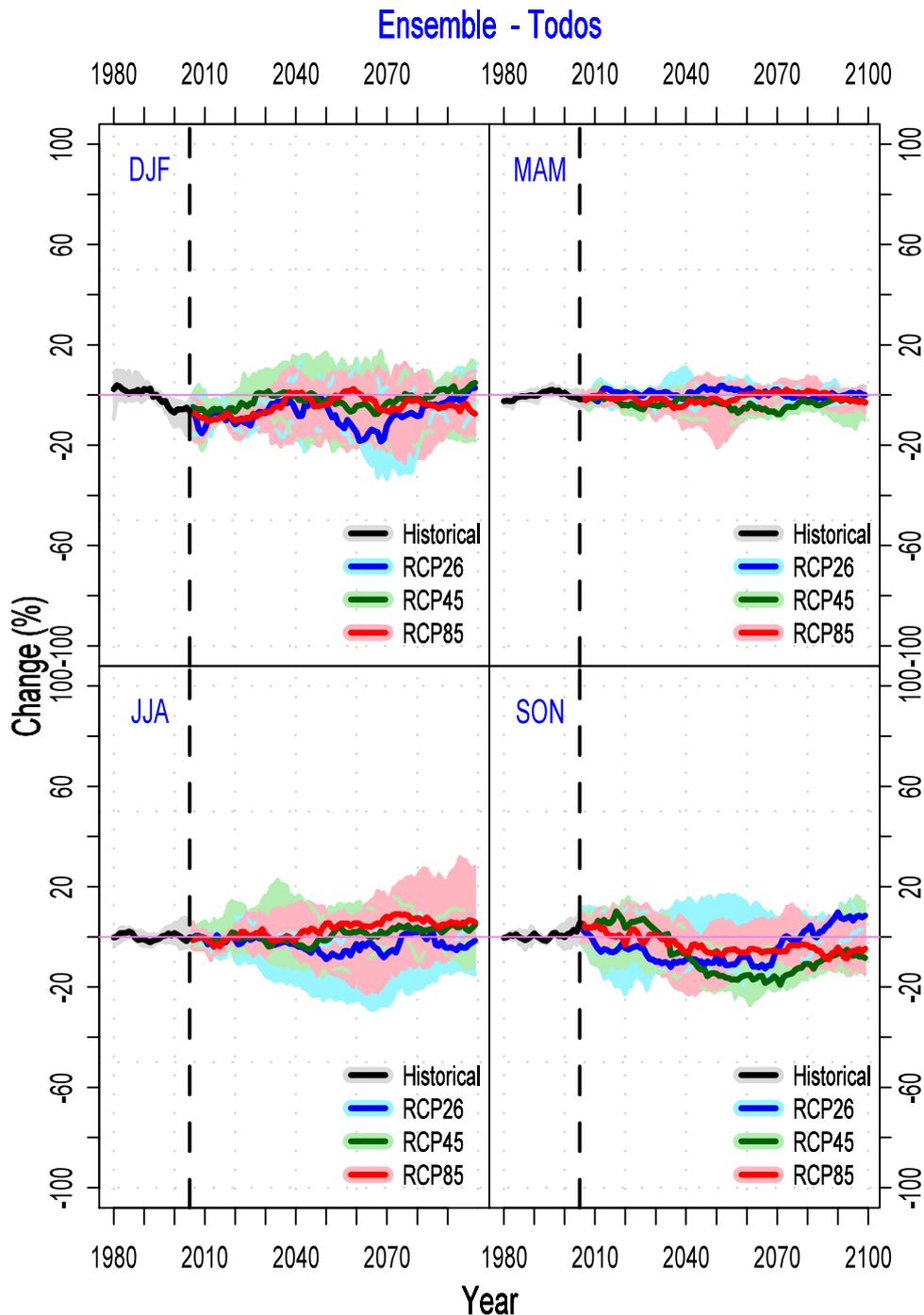
La inclusión de las zonas sombreadas se debe a la necesidad de incluir algún criterio de variabilidad que informe del margen de variación que cabe esperar de las simulaciones, aun cuando la mediana (una medida estadística de centralización robusta) nos informa de aquello que se considera el valor central de entre los más probables. Nótese que las gráficas no muestran el escenario RCP 6.0, debido a que sólo cinco de los modelos empleados lo suministran, y sus valores estadísticos no son, por lo tanto, comparables a los estadísticos obtenidos para el resto de los RCP (lo que no significa que los datos en sí mismos sean descartables frente a los otros RCP). Lo que muestra la anterior figura es que los incrementos absolutos de la precipitación en las estaciones de primavera y verano son prácticamente nulos, y no cabe esperar un cambio climático que varíe especialmente el régimen de precipitación con respecto al del pasado.

El invierno, tras una primera etapa de descenso, muestra una evolución continuista, excepto para el caso del escenario RCP 2.6 que muestra un cierto descenso: una sucesión de cambios como éste (la oscilación aquí recogida) parece sugerir que los cambios son más debidos a la propia variabilidad climática de la precipitación que a la respuesta climática al forzamiento radiativo de los RCP.

El otoño, y tras un comienzo de órdenes diferentes según el RCP considerado (incremento positivo, negativo, o sin incremento), es la única estación que muestra un descenso continuado para el restante periodo de siglo, con un leve repunte a finales de éste (especialmente para el RCP 2.6), aunque debe decirse que no todos los modelos muestran igual comportamiento (las zonas de sombra no se sitúan en un único signo positivo o negativo).

La Figura 27 muestra los mismos resultados vistos en la Figura 26 (con los mismos criterios utilizados en la representación gráfica de los estadísticos), pero reflejando los incrementos en cantidades relativas. Nótese que lo expuesto en esta figura coincide con lo manifestado en la figura anterior para los incrementos absolutos; la diferencia principal estriba en que los incrementos esperados en verano muestran una mayor variación, un efecto provocado por el hecho de que, siendo el verano una estación con una precipitación tan baja, pequeños incrementos absolutos reflejan incrementos relativos mayores.

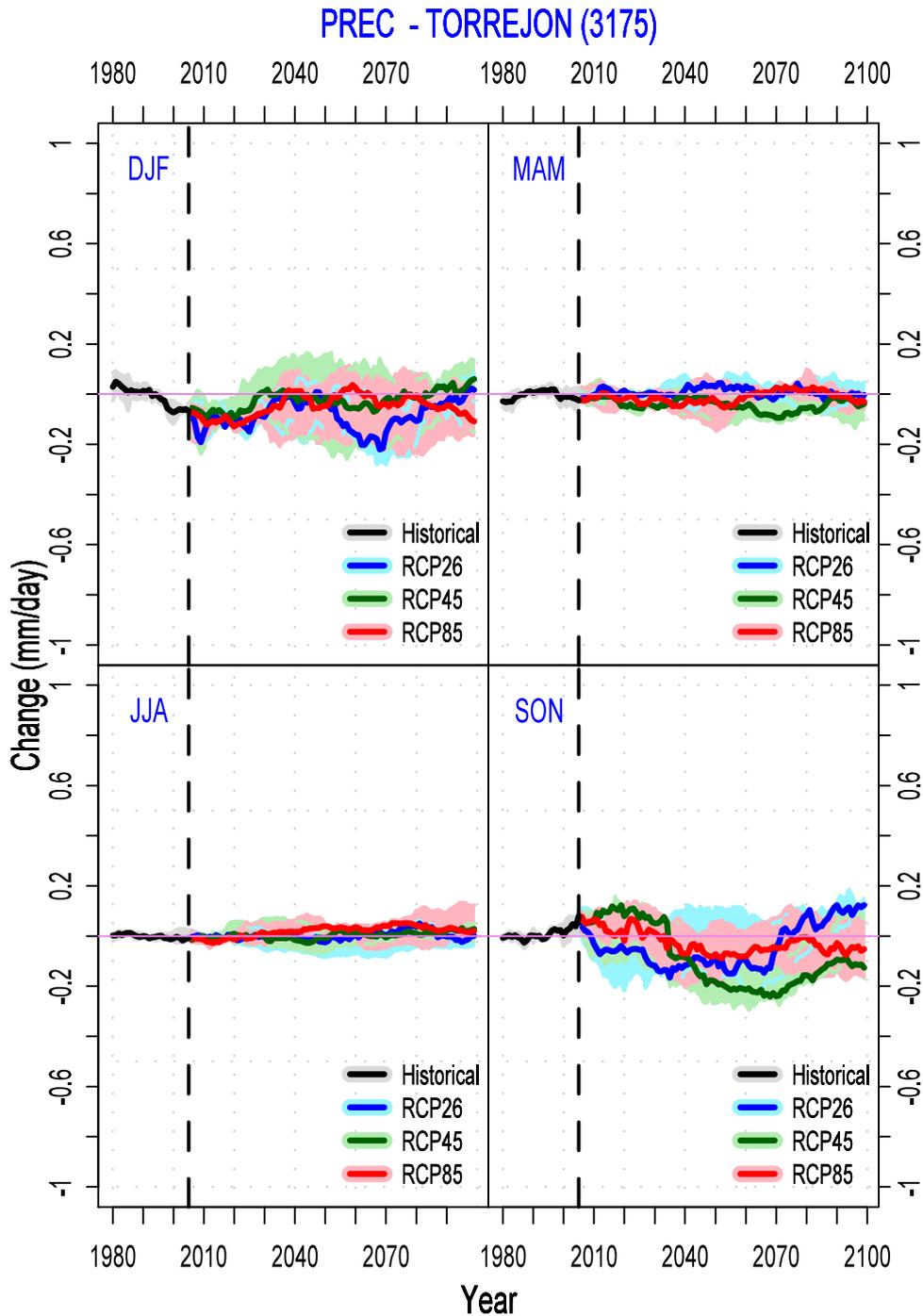
**FIGURA 27. INCREMENTOS ESTACIONALES RELATIVOS ESPERADOS DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI, REPRESENTADOS COMO MEDIAS MÓVILES DE 30 AÑOS**



*Incrementos estacionales relativos esperados de la precipitación para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCP representados (2.6, 4.5, y 8.5) con respecto al promedio del periodo tomado como referencia (1971 – 2000). La línea discontinua marca el fin del experimento Historical y el comienzo de los RCP. Simulaciones de todos los modelos sobre todos los observatorios. Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.*

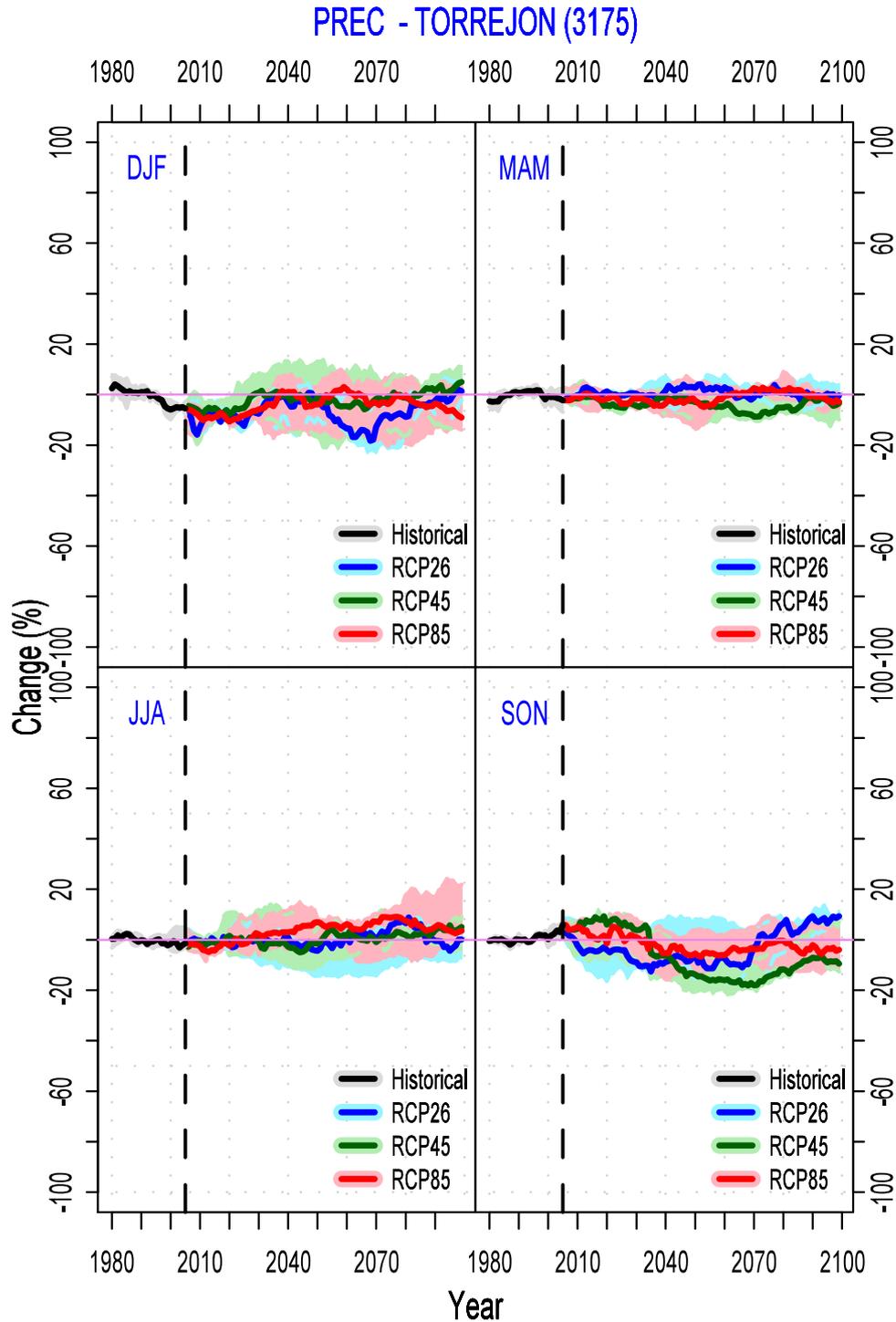
Las figuras 28 a 33 muestran los mismos resultados de incrementos esperados, tanto absolutos, como relativos, pero desglosados para cada uno de los observatorios estudiados; como se puede observar, las conclusiones son similares a las obtenidas para el promedio de todos los observatorios.

FIGURA 28. INCREMENTOS ESTACIONALES ABSOLUTOS ESPERADOS DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI, REPRESENTADOS COMO MEDIAS MÓVILES DE 30 AÑOS. OBSERVATORIO DE TORREJÓN



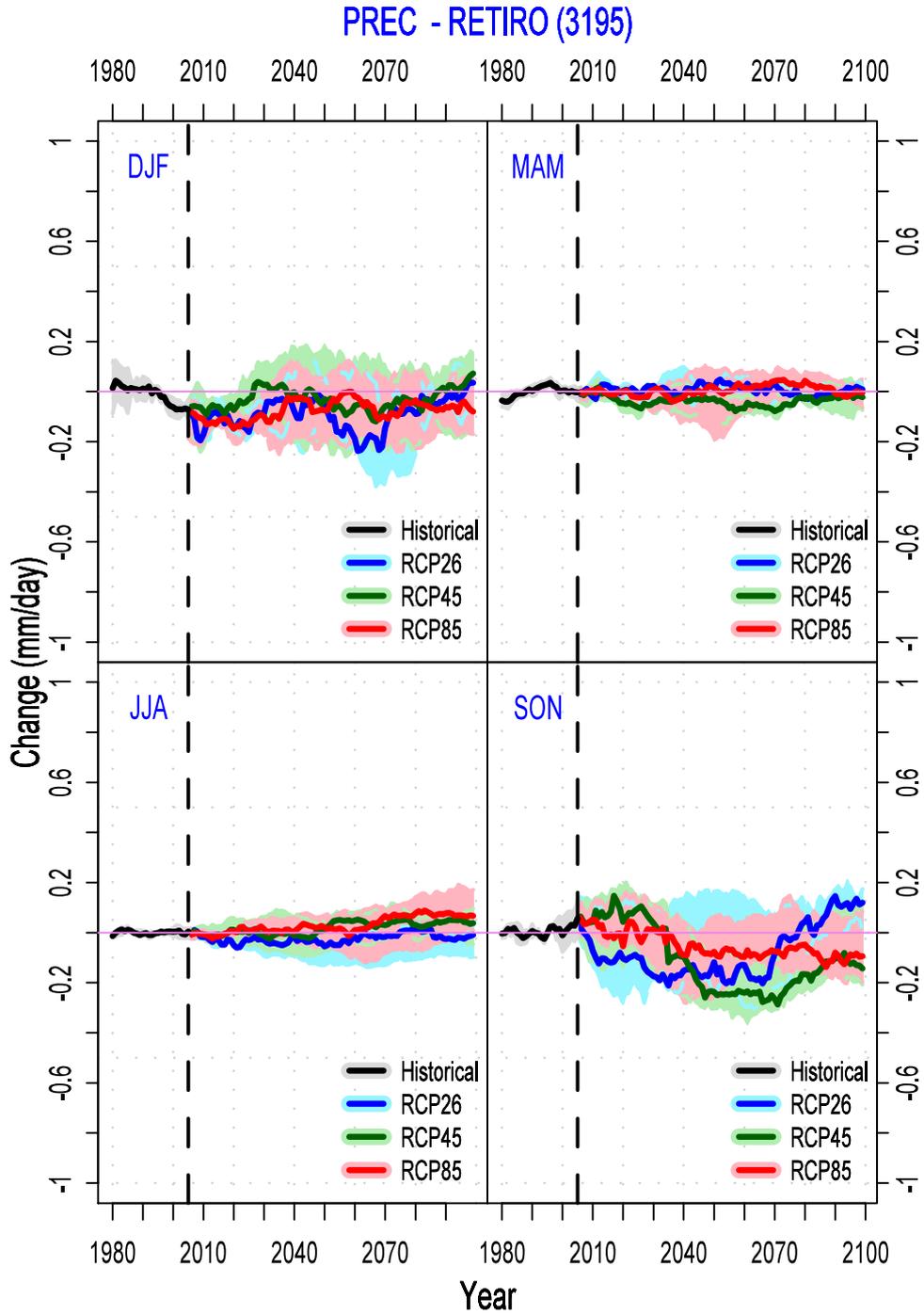
Incrementos estacionales absolutos esperados de la precipitación para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCP representados (2.6, 4.5, y 8.5), con respecto al promedio del periodo tomado como referencia (1971 – 2000). La línea discontinua marca el fin del experimento Historical y el comienzo de los RCP. Simulaciones de todos los modelos sobre el observatorio de Torrejón (identificador meteorológico 3175). Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.

FIGURA 29. INCREMENTOS ESTACIONALES RELATIVOS ESPERADOS DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI, REPRESENTADOS COMO MEDIAS MÓVILES DE 30 AÑOS. OBSERVATORIO DE TORREJÓN



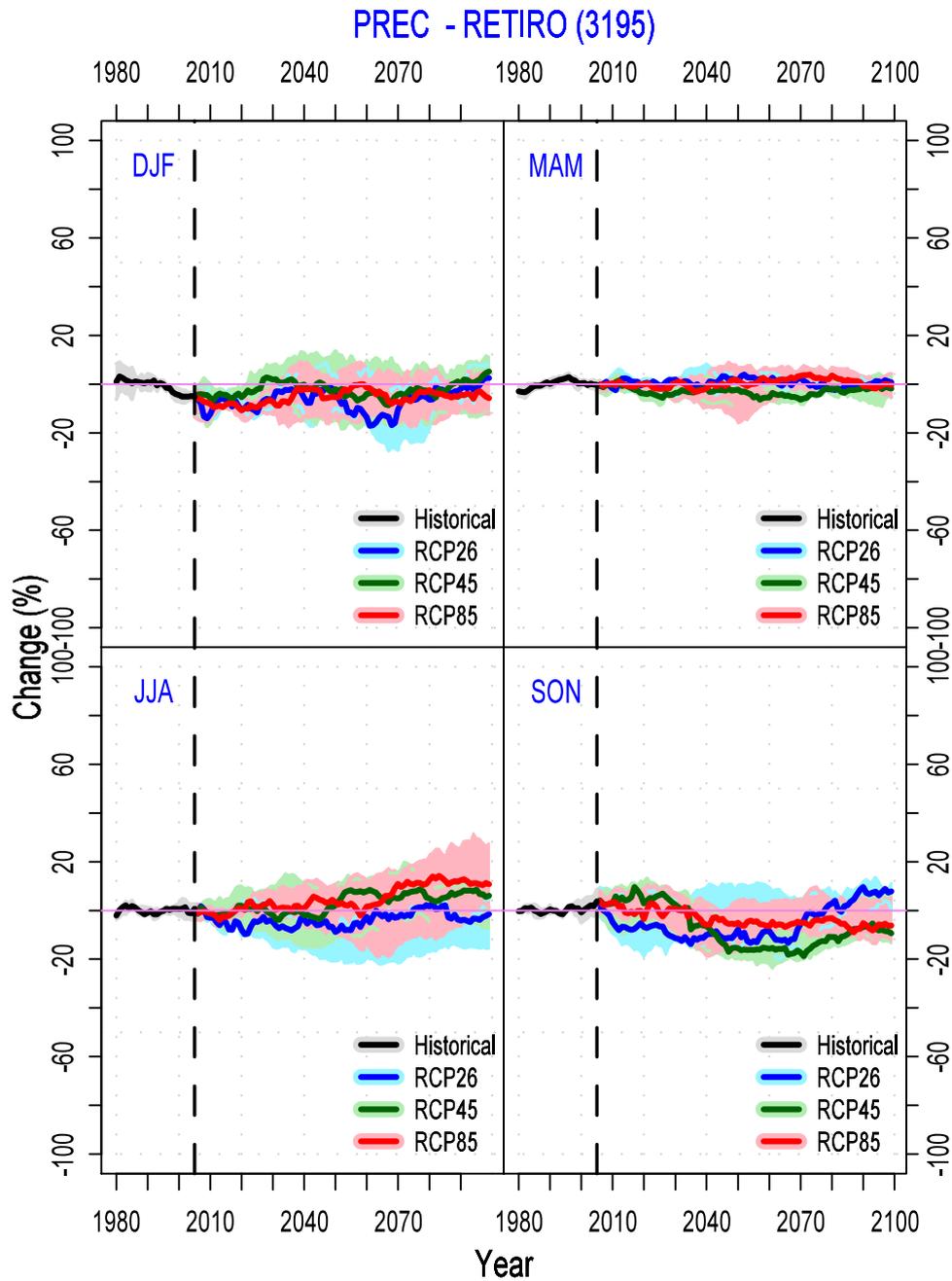
Incrementos estacionales relativos esperados de la precipitación para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCP representados (2.6, 4.5, y 8.5) con respecto al promedio del periodo 1971–2000 (tomado como referencia). La línea discontinua marca el fin del experimento Historical y el comienzo de los RCP. Simulaciones de todos los modelos sobre el observatorio de Torrejón (identificador meteorológico 3175). Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.

**FIGURA 30. INCREMENTOS ESTACIONALES ABSOLUTOS ESPERADOS DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI. OBSERVATORIO DE MADRID RETIRO**



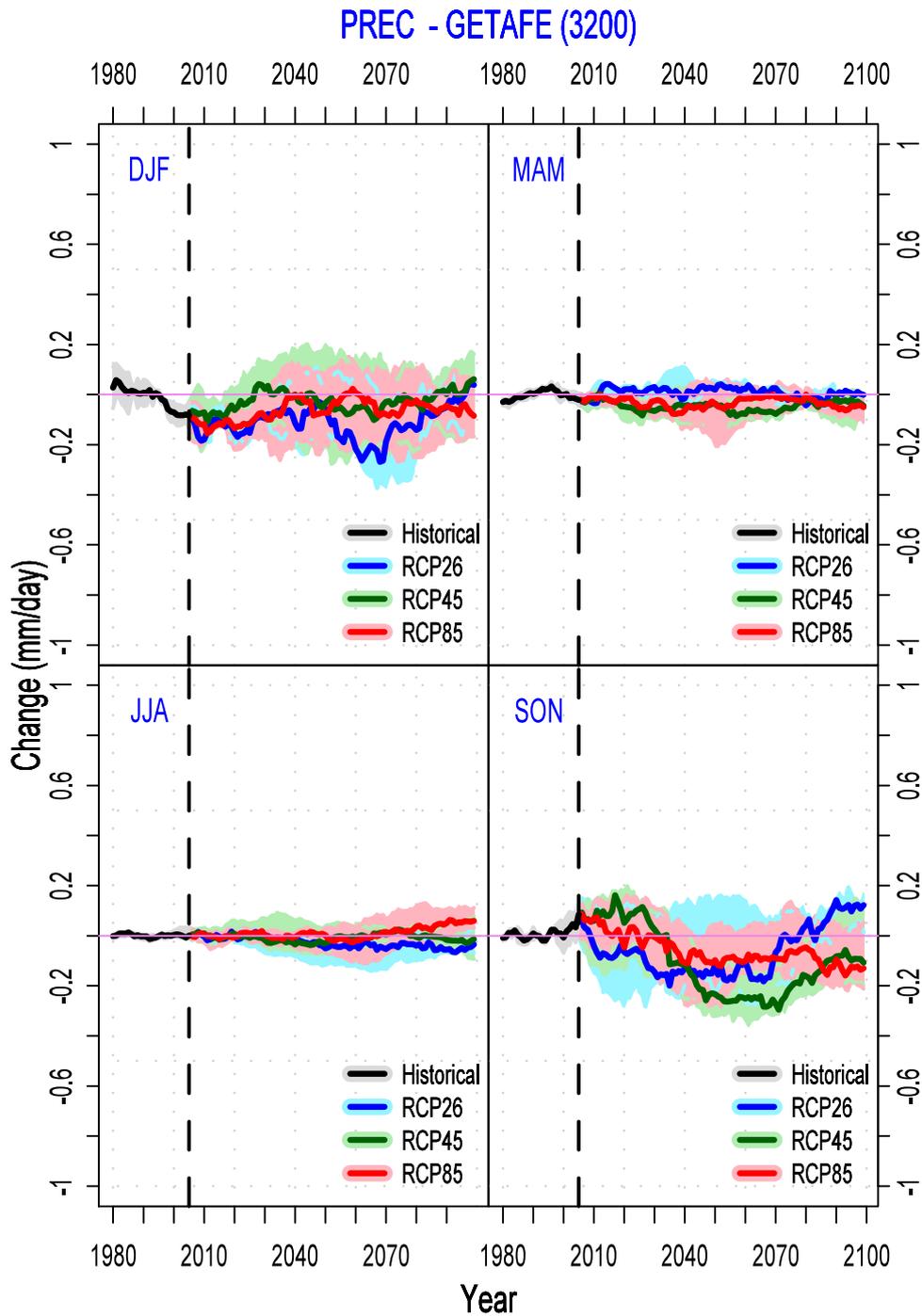
Incrementos estacionales absolutos esperados de la precipitación para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCP representados (2.6, 4.5, y 8.5) con respecto al promedio del periodo tomado como referencia (1971–2000). La línea discontinua marca el fin del experimento Historical y el comienzo de los RCP. Simulaciones de todos los modelos sobre el observatorio de Madrid Retiro (identificador meteorológico 3195). Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.

**FIGURA 31. INCREMENTOS ESTACIONALES RELATIVOS ESPERADOS DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI. OBSERVATORIO DE MADRID RETIRO**



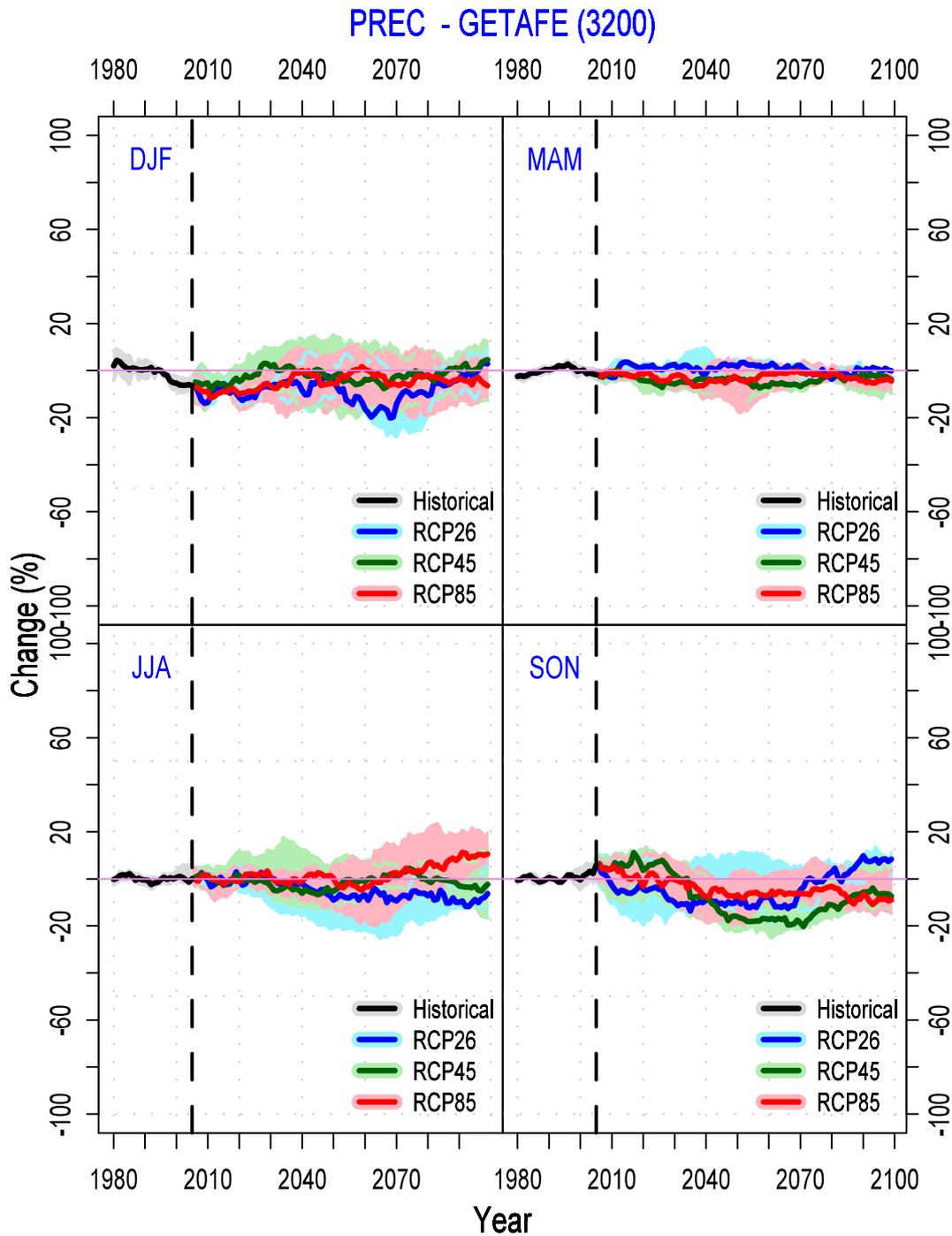
Incrementos estacionales relativos esperados de la precipitación para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCP representados (2.6, 4.5, y 8.5) con respecto al promedio del periodo tomado como referencia (1971–2000). La línea discontinua marca el fin del experimento Historical y el comienzo de los RCP. Simulaciones de todos los modelos sobre el observatorio de Madrid Retiro (identificador meteorológico 3195). Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.

**FIGURA 32. INCREMENTOS ESTACIONALES ABSOLUTOS ESPERADOS DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI. OBSERVATORIO DE GETAFE**



*Incrementos estacionales absolutos esperados de la precipitación para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCP representados (2.6, 4.5, y 8.5) con respecto al promedio del periodo tomado como referencia (1971–2000). La línea discontinua marca el fin del experimento Historical y el comienzo de los RCP. Simulaciones de todos los modelos sobre el observatorio de Getafe (identificador meteorológico 3200). Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.*

**FIGURA 33. INCREMENTOS ESTACIONALES RELATIVOS ESPERADOS DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI. OBSERVATORIO DE GETAFE**



Incrementos estacionales relativos esperados de la precipitación para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCP representados (2.6, 4.5, y 8.5) con respecto al promedio del periodo tomado como referencia (1971–2000). La línea discontinua marca el fin del experimento Histórico y el comienzo de los RCP. Simulaciones de todos los modelos sobre el observatorio de Getafe (identificador meteorológico 3200). Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.

## 1.8. SOBRE EL USO DE LOS DATOS DE LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS

Cuando se dispone de datos simulados de escenarios futuros de cambio climático, antes de trabajar con ellos debe considerarse su tratamiento con extrema precaución y debe comprenderse, con claridad, cuál es exactamente la naturaleza de los datos, especialmente si, como es éste el caso, los datos se han producido a escala diaria. Dos son las consideraciones principales que se deben tener en cuenta:

1. Los datos son climáticos y **no** meteorológicos. Aunque la simulación se realice a escala diaria, nunca debe interpretarse que un cierto modelo climático afirme que el tiempo meteorológico será, en el día de la simulación exactamente el dado por la simulación, precisamente debido al carácter climático del modelo y no meteorológico. Las variables tratadas por el modelo y las simulaciones realizadas están referidas, desde luego, a variables atmosféricas, pero las conclusiones deben referirse al clima del punto sobre el que se ha realizado una regionalización. De la misma manera que un día no permite describir el clima de un punto (ni, por ejemplo, un mes, o un año de datos), un día simulado no describe los cambios de clima.

Así, para que las conclusiones sean **climáticas** se debe estudiar **el clima en el punto**, es decir, series muy largas que, agregadas según el estadístico de interés, describan el clima en el punto. Describir, por ejemplo, la temperatura media de un punto necesita de más datos que los que un año de datos pueda tener. Se debería tomar un conjunto lo suficientemente amplio de datos cuya media permita concluir cuál es su temperatura media. Este hecho es aún más visible en estudios relativos a precipitación: si sólo se consideran unos pocos años de datos, se pueden incluir datos de un periodo de sequía (o de lluvias) que lleven a concluir que la precipitación en tal punto obedece a regímenes de sequía, cuando en realidad no sea así.

La elección del estadístico a emplear pasa a ser, por tanto, de suma importancia a la hora de abordar un estudio climático. Si se quiere hablar del **clima medio** en un punto, la elección de la media de un conjunto de valores parece la opción más clara, sin embargo, la mediana puede ser una opción mejor, ya que es una medida mucho más robusta. Además, se debe estudiar algún otro estadístico que informe de la variabilidad de la variable, no simplemente de su promedio, como puede ser la desviación de los valores considerados para calcular el promedio o dos percentiles (por ejemplo, los percentiles 10 y 90), de entre todos los datos considerados. En todo caso, sea cual sea el estadístico a emplear (periodos de retorno de precipitación, índices de sequía, frecuencia de golpes de calor, etc.) su elección debe realizarse atendiendo siempre al carácter climático de los datos.

Atender al carácter climático de los datos implica definir periodos largos de tiempo que permitan extraer conclusiones estadísticas (y que no aparezcan deformadas con los datos de ciertos posibles años anómalos). Un periodo largo de tiempo debe incluir, al menos 30 años de datos, para poder extraer conclusiones climáticas (de ahí que en estos estudios de medianas corridas se incluyan 30 años de datos), y en el caso de la precipitación (sea cual sea el estadístico derivado, y no sólo la cantidad, tales como días con precipitación, periodos de retorno, etc.) puede llegar a ser aconsejable el empleo de hasta 50 años de datos, si lo que se desea es comparar dos periodos diferentes, entre sí.

No se debe olvidar que las conclusiones estadísticas pueden referirse a periodos anuales (algo que parece natural ya que los ciclos de las variables suelen ser anuales), o incluso estacionales (si se puede asociar claramente un cierto periodo del año con una estación), pero manejar estadísticos relativos a periodos muy pequeños puede ser peligroso: una quincena es un periodo muy corto como para obtener conclusiones, y aún más una semana.

2. Los datos deben interpretarse de manera incremental y no absoluta. Como se ha visto a lo largo del trabajo desarrollado, existe una diferencia entre lo que un modelo considera el pasado (su escenario **Historical**) y el verdadero pasado; sin embargo, sus escenarios futuros son proyecciones consistentes y continuas de ese pasado que el propio modelo climático ha simulado, por lo que los posibles incrementos, entre su pasado y un cierto futuro, **sí** deben interpretarse como correctas, no así los valores exactos y absolutos proporcionados por los escenarios futuros.

Una vez más, y como se recordó en el punto anterior, la noción de incremento debe ser realizada cuidadosamente, y debe referirse a la elección de un cierto estadístico que permita medir, de una manera rigurosa, la variable meteorológica a estudiar (o una cierta propiedad de esa variable); de igual manera, el incremento entre dos estadísticos también debe definirse con un criterio que diferencie entre incrementos absolutos y relativos (si es que los relativos tienen sentido, como por ejemplo no ocurre en el caso de la temperatura).

Estudiar esos posibles incrementos implicará ser capaz de comparar el **clima base** de un cierto punto con el escenario futuro a estudiar y así obtener conclusiones. El trabajo a realizar dependerá de la definición de "**clima base**" que hagamos; dado que una estación meteorológica puede tener pocos datos observados, el clima base puede ser tomado como la regionalización del reanálisis en tal punto, y tomar entonces el posible incremento como la diferencia entre la regionalización del reanálisis y la regionalización del escenario – lo cual, además, permite reducir los problemas derivados de la diferencia entre el pasado del modelo y del punto (lo que en este trabajo se ha denominado como **validación del modelo**).

Si el observatorio dispone de suficientes datos, entonces el trabajo puede extenderse como el incremento entre los datos observados y los datos regionalizados del reanálisis, pero determinando previamente si los datos observados permiten tal trabajo (por ejemplo, se pueden tener datos asociados a muchos años, pero si para cada uno de esos años no existen datos de un cierto mes, entonces las conclusiones serán defectuosas); la existencia de algunas lagunas en los datos observados no tiene por qué ser determinante ya que la regionalización del reanálisis sí proporciona datos continuos en el periodo a considerar. Así, si se es capaz de determinar incrementos entre *observados/reanálisis* y entre *reanálisis/modelo*, trabajar con ambos incrementos (relacionarlos, en función del estadístico elegido) proporcionará la estimación más rigurosa del cambio a esperar en un punto dado.

## 1.9. LA CORRECCIÓN DEL ERROR SISTEMÁTICO

Tal y como se comentó anteriormente, es necesario que los datos regionalizados en un punto de un cierto modelo climático se puedan interpretar en sus valores absolutos y no sólo en términos de incrementos relativos, en consecuencia, se deben corregir los posibles errores que han conducido a la introducción de sesgos en la regionalización para así poder obtener valores que se puedan estudiar en su magnitud absoluta. Esta corrección es lo que se denomina **corrección del error sistemático**.

### 1.9.1. Fundamento teórico

En toda simulación del clima futuro existe una incertidumbre que es el resultado conjunto de varias incertidumbres de diferente origen y naturaleza, que constituyen lo que se denomina **cascada de incertidumbres**. En una primera aproximación, estas incertidumbres podrían agruparse en dos conjuntos:

1. Incertidumbres **previas al Downscaling**: ¿cuál será la situación atmosférica de baja resolución en el futuro (no para un día específico del futuro, sino la frecuencia de aparición de cada configuración)? Estas incertidumbres se ponen de manifiesto a través de las diferentes simulaciones de configuraciones atmosféricas de baja resolución que puede haber disponibles, obtenidas con diferentes "**Modelos de Circulación General**" (**MCG**), diferentes ejecuciones de un mismo **MCG**, diferentes escenarios futuros de emisiones de gases de efecto invernadero, etc.
2. Incertidumbres **relativas al Downscaling**: dada una configuración atmosférica de baja resolución, para cierto día, en una determinada área ¿cuáles serán sus efectos en superficie con alta resolución? Estas incertidumbres se ponen de manifiesto a través de las diferentes regionalizaciones de una misma situación atmosférica de baja resolución, realizadas con diferentes metodologías de **Downscaling** (estadísticas y dinámicas), y a través de su comparación con las observaciones reales de los efectos en superficie asociados a esa configuración atmosférica, si se dispone de ellas.

Cuando se lleva a cabo la regionalización de un cierto **Modelo de Circulación General**, tres son los tipos de errores que deben ser considerados:

- **Error 1**, o Error de **Verificación** (corresponde al grupo B anterior). Es un error asociado al método de **Downscaling** que se esté utilizando (sea cual fuere), es decir, el que se produce aplicando dicho método a las "observaciones" de los predictores (en este caso se utilizan análisis atmosféricos). Se estima comparando lo simulado por **Downscaling** de un reanálisis atmosférico, con las observaciones de los predictandos.
- **Error 2**, o Error de **Validación** (corresponde al grupo A anterior). Es un error propio del **MCG** que se esté utilizando. Se estima comparando lo simulado por **Downscaling** de la salida del **MCG** para el clima presente, con lo simulado por **Downscaling** de un reanálisis atmosférico ("observaciones" de los predictores).
- **Error 3**, o Error de **Impredecibilidad**. Al margen de los errores anteriores, al realizar simulaciones a futuro regionalizando **MCG**, siempre quedarán incertidumbres que resulten imposibles de determinar con exactitud. Por ejemplo, establecer si el hecho de que un cierto **MCG** refleje bien el pasado significa, o no, que vaya a reflejar bien el futuro, queda fuera de alcance. Este tipo de error, que no es cuantificable (y en todo caso, sólo es estimable), no será tratado en este estudio.

Por tanto, la cuantificación y corrección del error sistemático que se pretenda analizar aquí buscará:

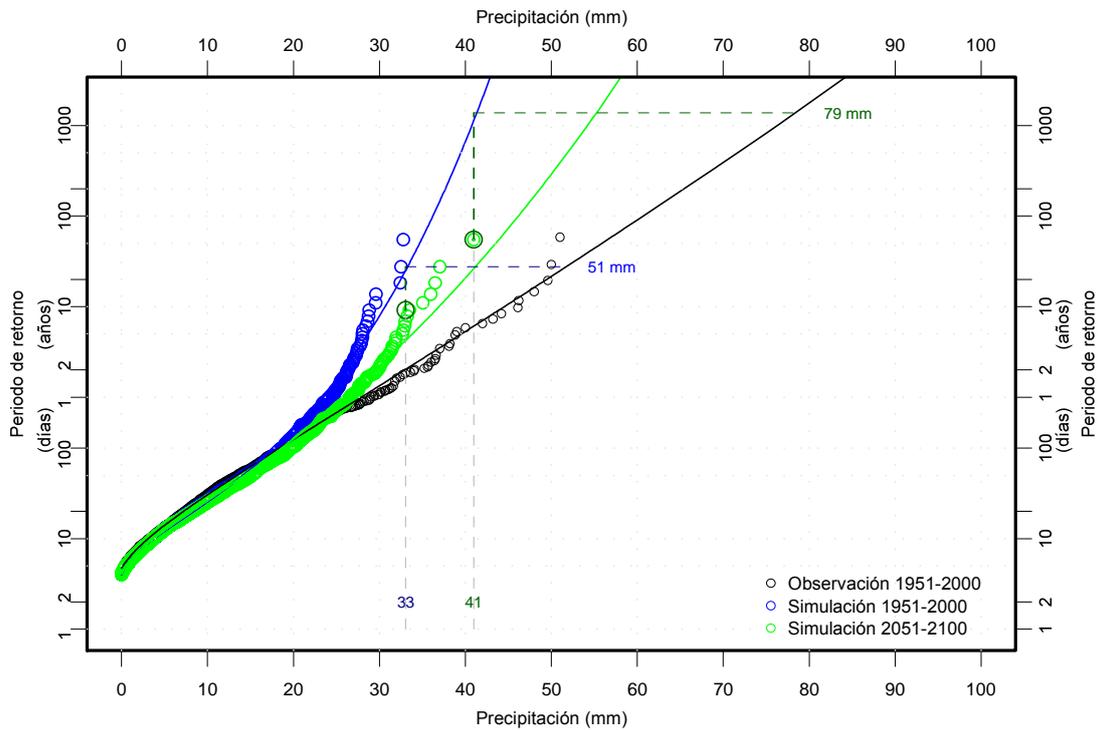
- a. Cuantificar el error 1, es decir, cuantificar la magnitud del sesgo introducido por el propio método de **Downscaling** empleado, utilizando para ello la comparación entre el reanálisis **ERA40** regionalizado y los propios datos observados.
- b. Cuantificar el error 2, es decir, cuantificar la magnitud del sesgo introducido por cada modelo climático empleado, utilizando para ello la comparación entre el periodo de control del modelo a estudiar regionalizado y el reanálisis **ERA40** regionalizado.
- c. Finalmente, aplicar factores correctores de esos errores proporcionalmente a los errores encontrados y las magnitudes a corregir.

Sea cual sea el método de corrección empleado, se tratará de no corregir todos los datos de la misma forma (no sumar o multiplicar dichos datos por la misma cantidad), sino de forma proporcional, de manera que a los valores que contengan mayor error se les apliquen mayores correcciones, y a los valores que incorporen menor error se les apliquen menores correcciones.

Para determinar qué valores tienen mayor o menor error se comparará la función de distribución de los valores observados frente a los de **ERA40** regionalizados; y la de los valores de **ERA40** regionalizados, frente a la de los modelos regionalizados. En concreto, se usará la función de distribución acumulada empírica o **ECDF** (*Empirical Cumulative Distribution Function*) que permite, al comparar dos valores entre sí, contrastar la diferencia entre las mismas magnitudes (en rigor, entre los mismos cuantiles, ya que se trabaja con funciones de distribución) y establecer relaciones de proporcionalidad entre las magnitudes, que dependerán de las propias magnitudes en sí. Este método proporciona una forma no-lineal (como se buscaba) de establecer las diferencias entre dos grupos de datos diferentes; la medida de esas diferencias será lo que permita corregir el error entre ambos grupos de datos.

La forma de aplicar este método se ilustra en la Figura 34. Aunque el método está basado en el uso de la **ECDF**, aquí se ha representado el periodo de retorno de cada cantidad de precipitación, entendido como la inversa de su probabilidad, dado que visualmente es mucho más ilustrativo, y también, es una manera de representar su función de distribución. Lo que se va a ver es un ejemplo de la forma en que funciona la corrección, donde los círculos negros representan valores observados; los azules, valores simulados del periodo de control (se correspondería con el experimento *Historical* de un modelo climático); y los verdes, los valores simulados de un escenario futuro. Un ejemplo explica, a continuación, en qué consiste el método:

1. Partiendo de los propios datos se calcula la distribución teórica de cada uno de los grupos de datos; tales distribuciones teóricas se corresponden con las líneas continuas representadas (cada una con el color del grupo al que se corresponde).
2. Una precipitación diaria de 33 milímetros en el grupo de control se corresponde con una de 51 milímetros en los observados; esto es así, porque el orden impuesto, basado en periodos de retorno (en probabilidad, o en ECDF) asocia que el mismo periodo de retorno de la precipitación de 33 milímetros se corresponde con la de 51 milímetros, en el grupo de los observados.
3. La corrección del escenario futuro debe pasar obligatoriamente por la comparación previa con su propio grupo de control, ya que sólo el grupo de control puede compararse con el grupo de valores observados. De esta manera, suponiendo una precipitación de 41 milímetros en el grupo del escenario futuro, esa misma precipitación tiene un periodo de retorno (una probabilidad) diferente en el grupo de control, y es ésta la que se debe tomar y llevarla hacia el grupo de observación, asignando el valor de 79 milímetros.

**FIGURA 34. EJEMPLO ILUSTRADO DE LA CORRECCIÓN DEL ERROR SISTEMÁTICO**

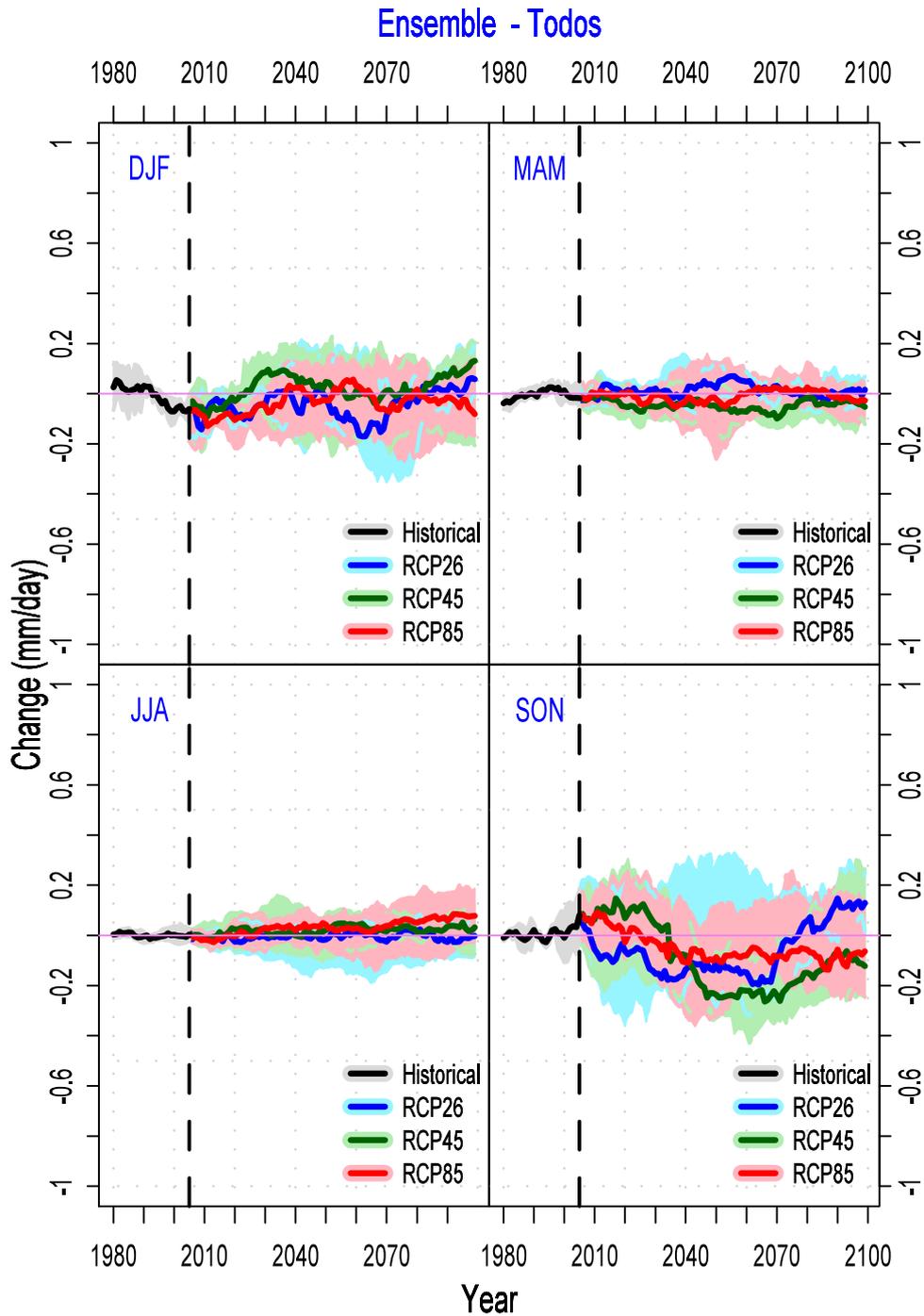
Visualización, con ejemplos, de la corrección del error sistemático. Los puntos negros se corresponden con valores observados, los azules con simulados para un periodo de control, y los verdes con simulaciones de periodos futuros. Las líneas continuas son las distribuciones teóricas de cada grupo. El uso del periodo de retorno (como inversa de la probabilidad) muestra las relaciones entre los grupos, ejemplificadas en los casos de 33 y 41 milímetros.

### 1.9.2. Escenarios futuros corregidos

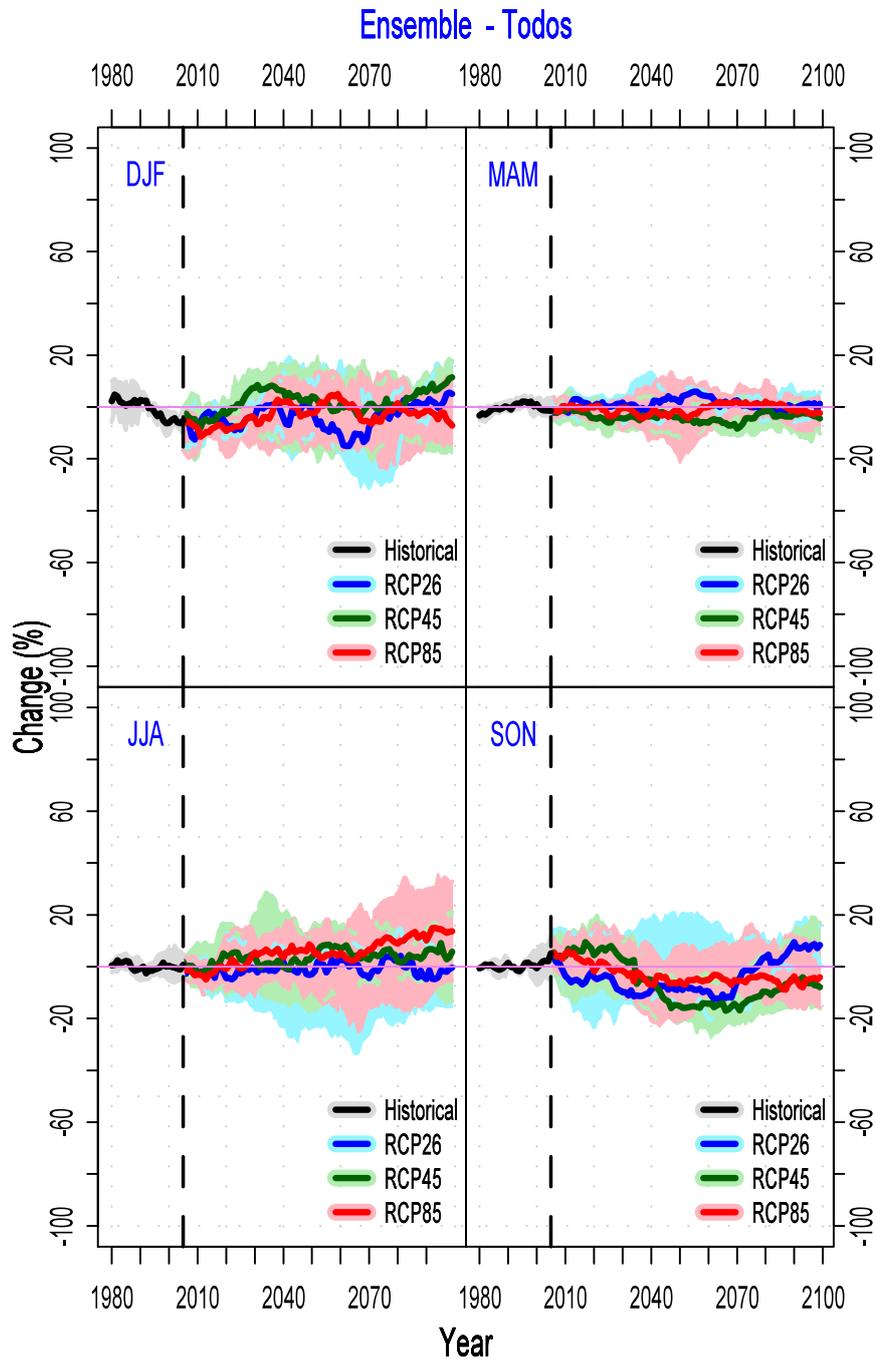
La corrección de los escenarios futuros conduce a un nuevo grupo de datos para cada simulación realizada que, de nuevo, se puede analizar estadísticamente para extraer conclusiones sobre la evolución futura de la variable precipitación. Esta información se ilustra gráficamente en las figuras 35 y 36, construidas con los mismos criterios que se detallaron anteriormente.

Como se puede apreciar en ambas, el comportamiento futuro de estas dos medidas (incremento absoluto de la precipitación, e incremento relativo de la precipitación) es similar al descrito para las mismas antes de corregir los datos, como era de desear, ya que la corrección del error sistemático no debería cambiar tanto los datos como para que las conclusiones climáticas fueran diferentes, ya que entonces cambiaría la naturaleza propia de las características de los modelos. La única leve diferencia apreciable aparece, y sólo en ciertos puntos, en la extensión de las sombras asociadas a las simulaciones, es decir, de su margen de variabilidad (percentiles 90 y 10), y tiene sentido que así sea ya que algunas de las correcciones de los extremos han podido cambiar un margen de variabilidad concreto (sus percentiles).

**FIGURA 35. INCREMENTOS ESTACIONALES ABSOLUTOS DE LOS DATOS, CON ERROR SISTEMÁTICO CORREGIDO, DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI**



*Incrementos estacionales absolutos de los datos, con error sistemático corregido, de la precipitación para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCP representados (2.6, 4.5, y 8.5), respecto al promedio del periodo tomado como referencia (1971 – 2000). La línea discontinua marca el fin del experimento Historical y el comienzo de los RCP. Simulaciones de todos los modelos sobre todos los observatorios. Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.*

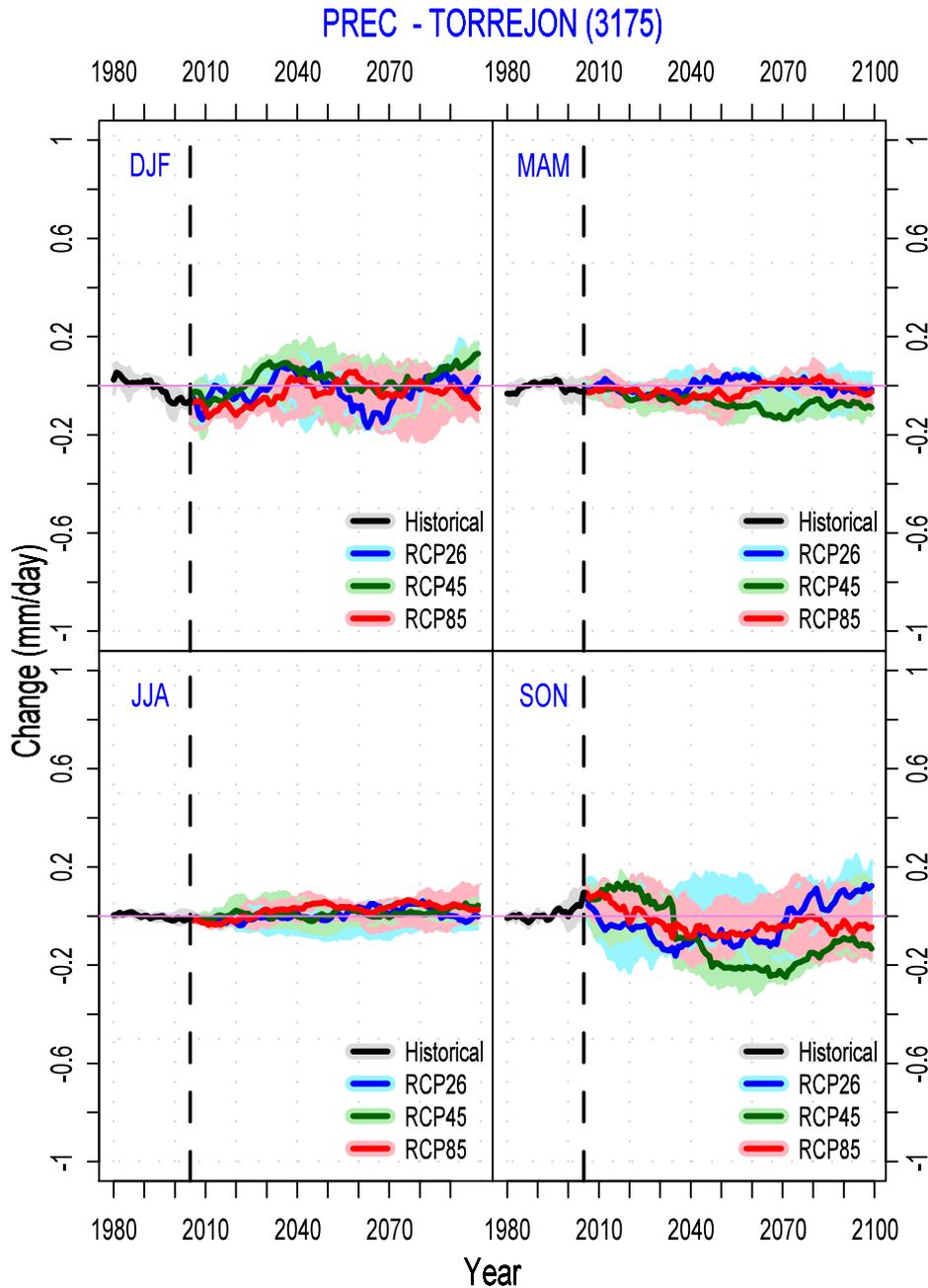
**FIGURA 36. INCREMENTOS ESTACIONALES RELATIVOS ESPERADOS DE LOS DATOS, CON ERROR SISTEMÁTICO CORREGIDO, DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI**

Incrementos estacionales relativos esperados de los datos, con error sistemático corregido, de la precipitación para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCP representados (2.6, 4.5, y 8.5), con respecto al promedio del periodo tomado como referencia (1971 – 2000). La línea discontinua marca el fin del experimento Historical y el comienzo de los RCP. Simulaciones de todos los modelos sobre todos los observatorios. Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.

Las figuras 37 a 42 muestran los mismos resultados de incrementos esperados, tanto absolutos como relativos, con el error sistemático corregido, pero desglosados para cada uno de los observatorios estudiados. Como se puede observar, las conclusiones son similares a las obtenidas para el promedio de todos los observatorios.

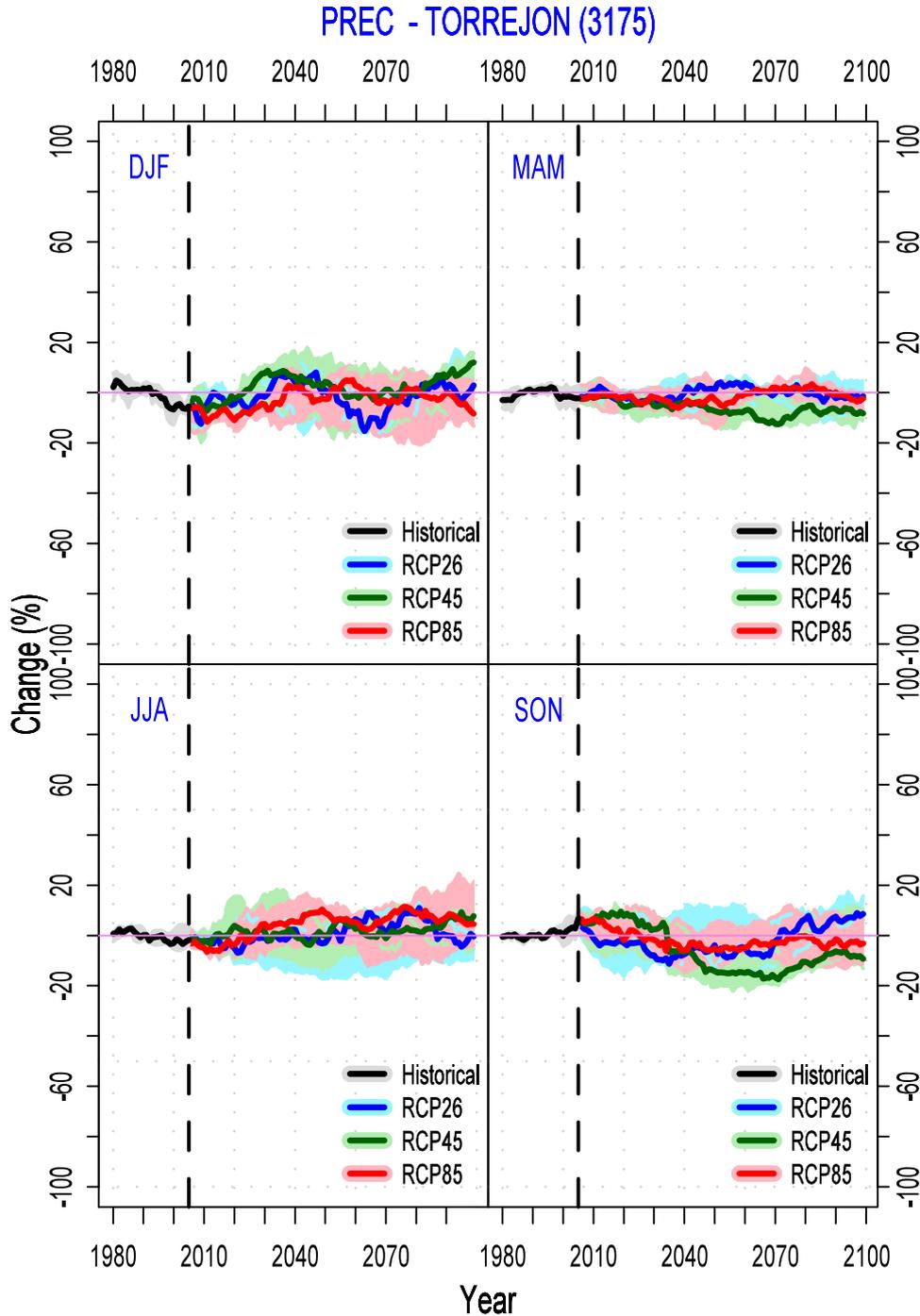
Para una mejor comprensión de los resultados obtenidos, para cada uno de los observatorios se han desglosado numéricamente los incrementos absolutos y relativos para tres periodos, 2001–2030, 2041–2070, y 2071–2100, entendidos como principio, mediados, y fin de siglo, con respecto al tiempo tomado como referencia 1970–2000, entendido como periodo del pasado (ver tablas 8 a 10).

**FIGURA 37. INCREMENTOS ESTACIONALES ABSOLUTOS DE LOS DATOS, CON ERROR SISTEMÁTICO CORREGIDO, DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI, REPRESENTADOS COMO MEDIAS MÓVILES DE 30 AÑOS. OBSERVATORIO DE TORREJÓN (3175)**



*Incrementos estacionales absolutos de los datos, con error sistemático corregido, de la precipitación para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCP representados (2.6, 4.5, y 8.5), con respecto al promedio del periodo tomado como referencia (1971–2000). La línea discontinua marca el fin del experimento Historical y el comienzo de los RCP. Simulaciones de todos los modelos sobre el observatorio de Torrejón (identificador 3175). Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.*

**FIGURA 38. INCREMENTOS ESTACIONALES RELATIVOS ESPERADOS DE LOS DATOS, CON ERROR SISTEMÁTICO CORREGIDO, DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI, REPRESENTADOS COMO MEDIAS MÓVILES DE 30 AÑOS. OBSERVATORIO DE TORREJÓN (3175)**



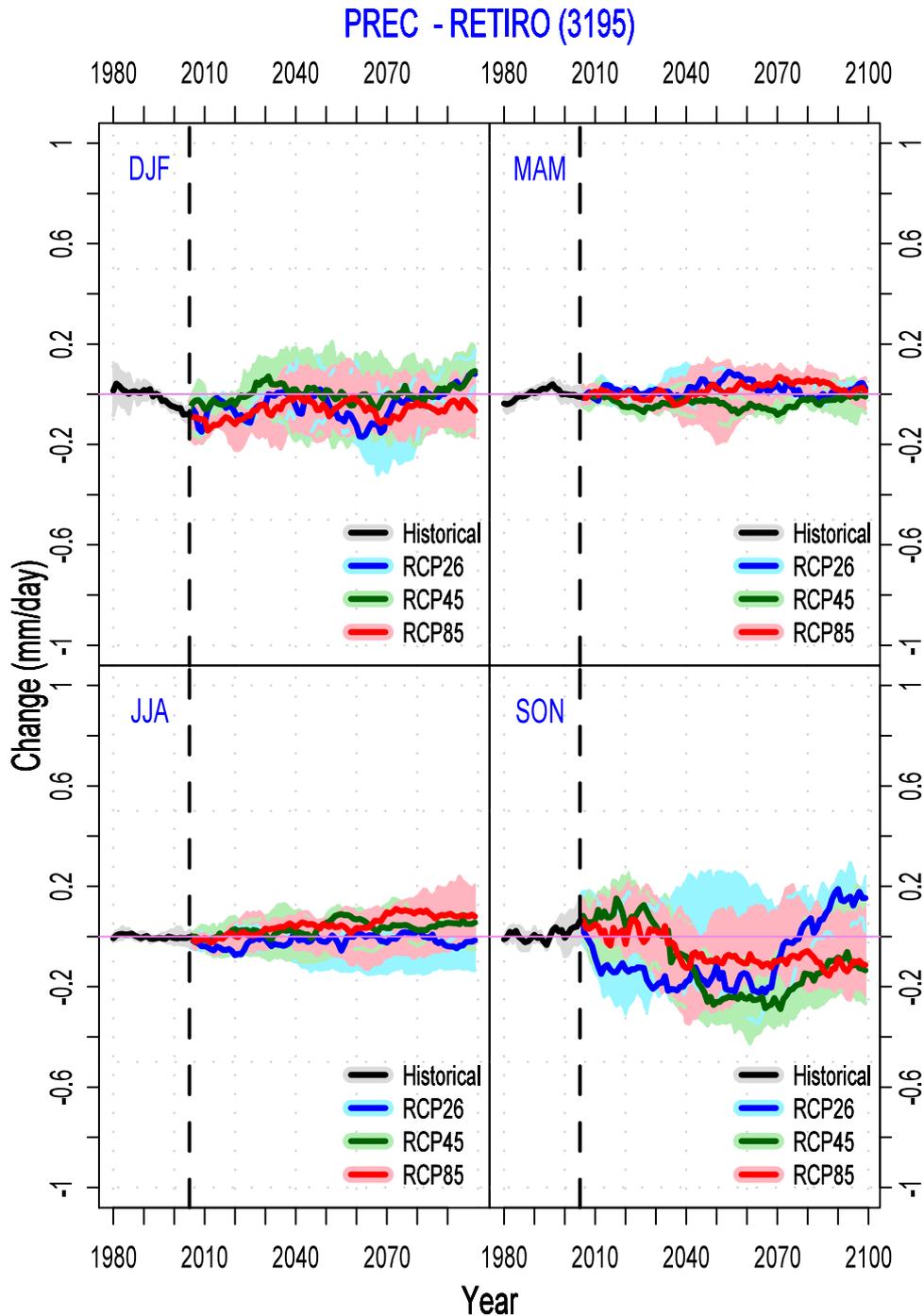
Incrementos estacionales relativos esperados de los datos, con error sistemático corregido, de la precipitación para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCP representados (2.6, 4.5, y 8.5) con respecto al promedio del periodo tomado como referencia (1971 – 2000). La línea discontinua marca el fin del experimento Historical y el comienzo de los RCP. Simulaciones de todos los modelos sobre el observatorio de Torrejón (identificador 3175). Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.

TABLA 8. OBSERVATORIO DE TORREJÓN

Precipitación incrementos absolutos (milímetros/día) - Torrejón				
Estación	Escenario	2001-2030	2041-2070	2071-2100
DEF	RCP 2.6	0,12	0,07	0,6
	RCP 4.5	0,1	0,07	0,13
	RCP 6.0	0,16	0,18	-0,1
	RCP 8.5	0,1	0,15	0,05
MAM	RCP 2.6	-0,04	0	0,04
	RCP 4.5	-0,01	-0,01	-0,06
	RCP 6.0	-0,07	-0,08	-0,12
	RCP 8.5	-0,04	-0,02	-0,08
JJA	RCP 2.6	0,03	0,01	0,01
	RCP 4.5	0,02	-0,01	0,01
	RCP 6.0	0,02	0,02	0
	RCP 8.5	0,01	0,03	0,04
SON	RCP 2.6	-0,04	-0,03	0
	RCP 4.5	0	-0,06	0,01
	RCP 6.0	-0,03	-0,07	0,06
	RCP 8.5	0,03	-0,04	-0,04
Precipitación incrementos relativos (%) - Torrejón				
Estación	Escenario	2001-2030	2041-2070	2071-2100
DEF	RCP 2.6	10	6	13
	RCP 4.5	8	6	11
	RCP 6.0	13	14	-8
	RCP 8.5	8	13	4
MAM	RCP 2.6	-4	0	4
	RCP 4.5	-1	-1	-5
	RCP 6.0	-6	-7	-11
	RCP 8.5	-3	-2	-7
JJA	RCP 2.6	6	3	2
	RCP 4.5	4	-1	1
	RCP 6.0	4	3	1
	RCP 8.5	3	6	7
SON	RCP 2.6	-3	-2	0
	RCP 4.5	0	-5	0
	RCP 6.0	-3	-6	4
	RCP 8.5	3	-3	-4

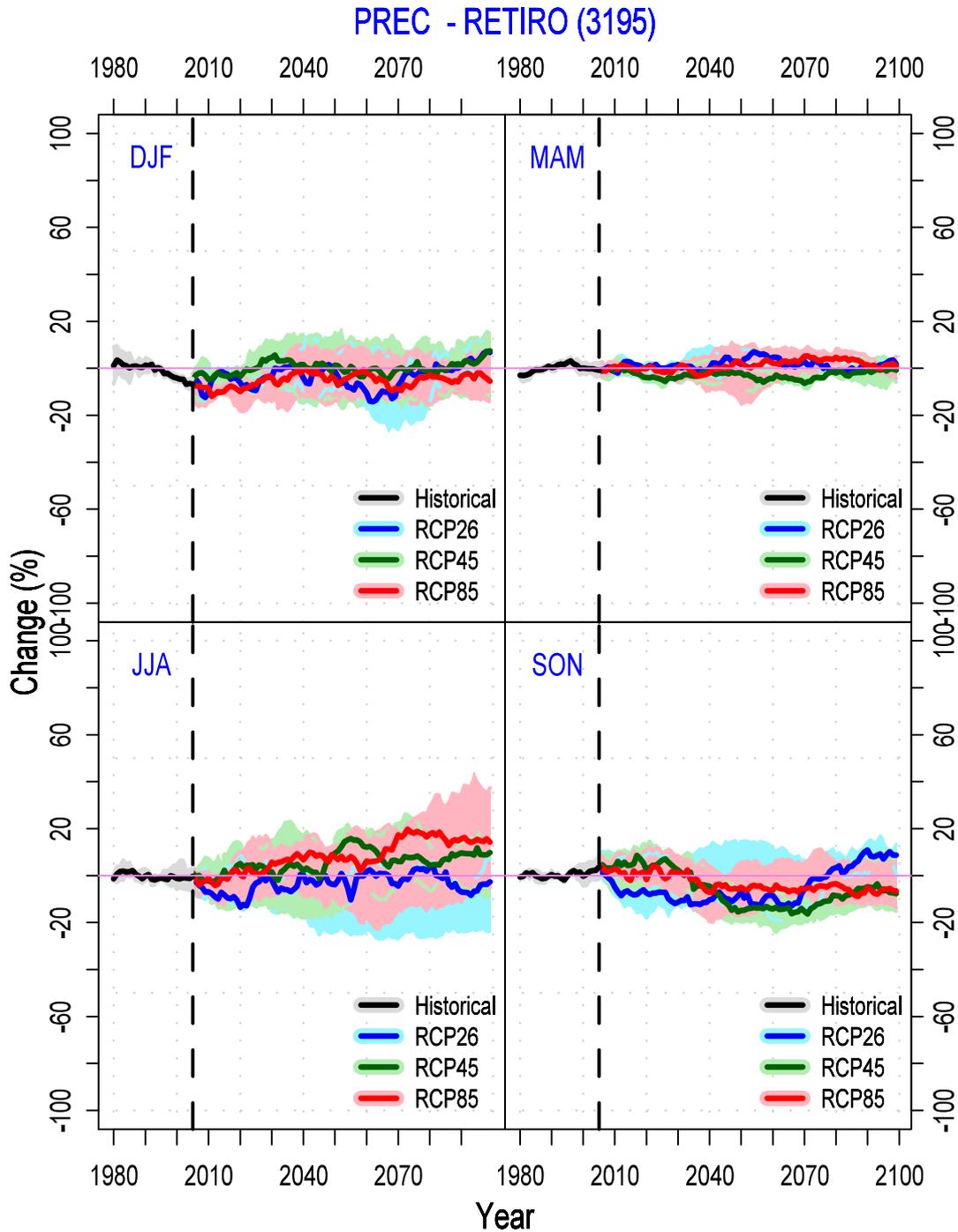
Incrementos absolutos y relativos esperados de la precipitación para el observatorio de Torrejón, en los periodos 2001–2030, 2041–2070, y 2071–2100 (entendidos como principio, mediados, y fin de siglo), con respecto al periodo 1970 – 2000 (entendido como del pasado). Resultados promediados de todos los modelos, para cada una de las estaciones del año y para cada uno de los escenarios futuros considerados.

**FIGURA 39. INCREMENTOS ESTACIONALES ABSOLUTOS DE LOS DATOS, CON ERROR SISTEMÁTICO CORREGIDO, DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI, REPRESENTADOS COMO MEDIAS MÓVILES DE 30 AÑOS. OBSERVATORIO DE MADRID RETIRO (3195)**



Incrementos estacionales absolutos de los datos, con error sistemático corregido, de la precipitación para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCP representados (2.6, 4.5, y 8.5), con respecto al promedio del periodo tomado como referencia (1971 – 2000). La línea discontinua marca el fin del experimento Historical y el comienzo de los RCP. Simulaciones de todos los modelos sobre el observatorio de Madrid Retiro (identificador 3195). Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.

**FIGURA 40. INCREMENTOS ESTACIONALES RELATIVOS ESPERADOS DE LOS DATOS, CON ERROR SISTEMÁTICO CORREGIDO, DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI, REPRESENTADOS COMO MEDIAS MÓVILES DE 30 AÑOS. OBSERVATORIO DE MADRID RETIRO (3195)**



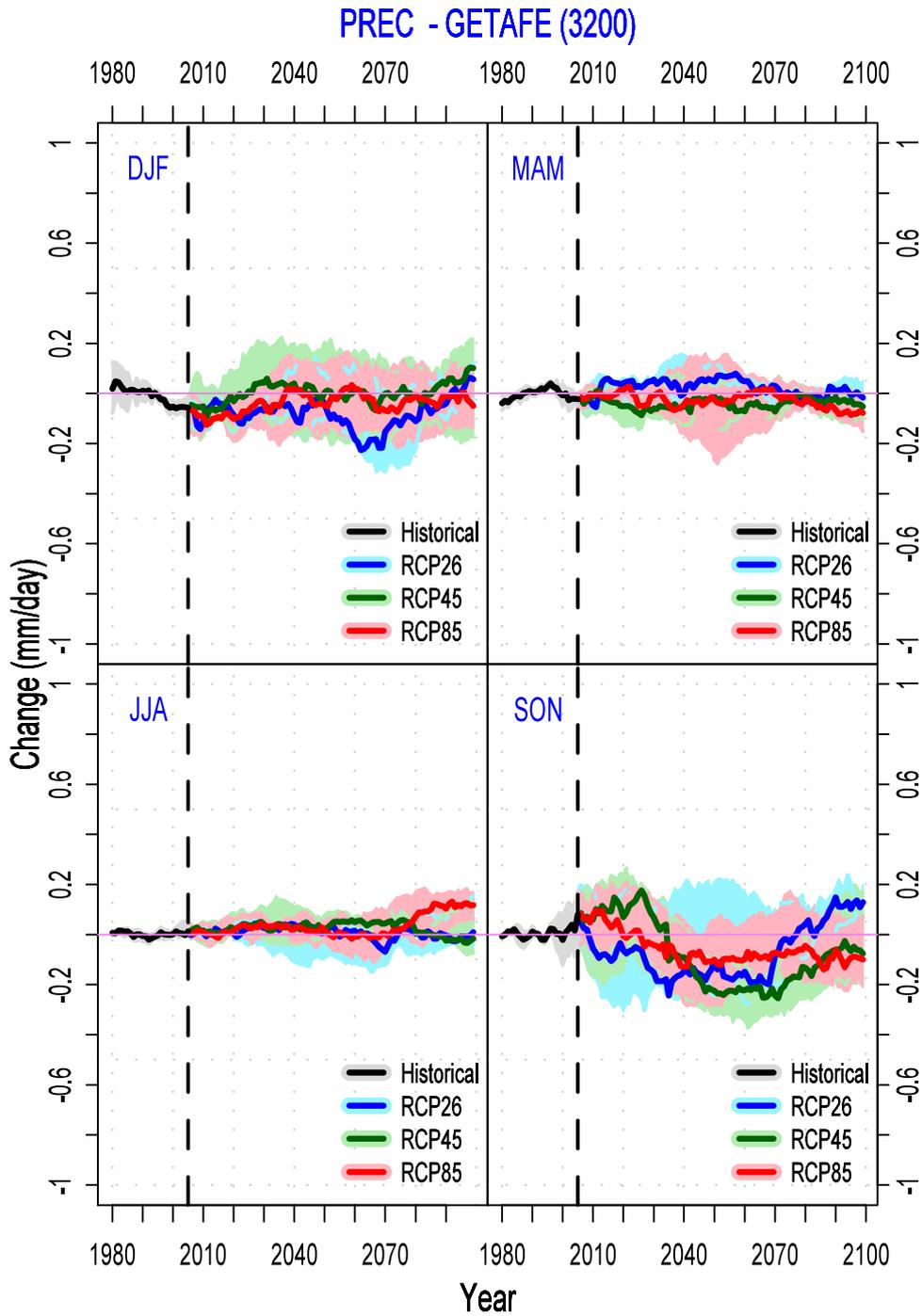
*Incrementos estacionales relativos esperados de los datos, con error sistemático corregido, de la precipitación para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCP representados (2.6; 4.5; y 8.5) con respecto al promedio del periodo tomado como referencia (1971–2000). La línea discontinua marca el fin del experimento Historical y el comienzo de los RCP. Simulaciones de todos los modelos sobre el observatorio de Madrid Retiro (identificador 3195). Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.*

TABLA 9. OBSERVATORIO MADRID RETIRO

Precipitación incrementos absolutos (milímetros /día) – Madrid Retiro				
Estación	Escenario	2001-2030	2041-2070	2071-2100
DEF	RCP 2.6	0,08	0,07	0,13
	RCP 4.5	0,1	0,11	0,1
	RCP 6.0	0,07	0,09	-0,04
	RCP 8.5	0,08	0,12	0,09
MAM	RCP 2.6	-0,05	-0,02	0,05
	RCP 4.5	-0,01	0,01	-0,04
	RCP 6.0	-0,02	-0,04	-0,05
	RCP 8.5	0,02	0,03	-0,09
JJA	RCP 2.6	0,04	0,06	0,03
	RCP 4.5	0,05	0,05	0,09
	RCP 6.0	0,08	0,15	0,06
	RCP 8.5	0,08	0,11	0,16
SON	RCP 2.6	-0,02	-0,08	-0,02
	RCP 4.5	0,01	-0,07	-0,01
	RCP 6.0	0,03	-0,05	-0,18
	RCP 8.5	0,01	-0,09	-0,12
Precipitación incrementos relativos (%) - Madrid Retiro				
Estación	Escenario	2001-2030	2041-2070	2071-2100
DEF	RCP 2.6	6	5	9
	RCP 4.5	7	8	7
	RCP 6.0	5	7	-3
	RCP 8.5	5	8	6
MAM	RCP 2.6	-4	-2	3
	RCP 4.5	-1	0	-3
	RCP 6.0	-2	-3	-4
	RCP 8.5	1	2	-7
JJA	RCP 2.6	7	10	5
	RCP 4.5	9	8	15
	RCP 6.0	14	26	10
	RCP 8.5	14	20	28
SON	RCP 2.6	-1	-5	-1
	RCP 4.5	1	-5	-1
	RCP 6.0	2	-3	-12
	RCP 8.5	1	-6	-8

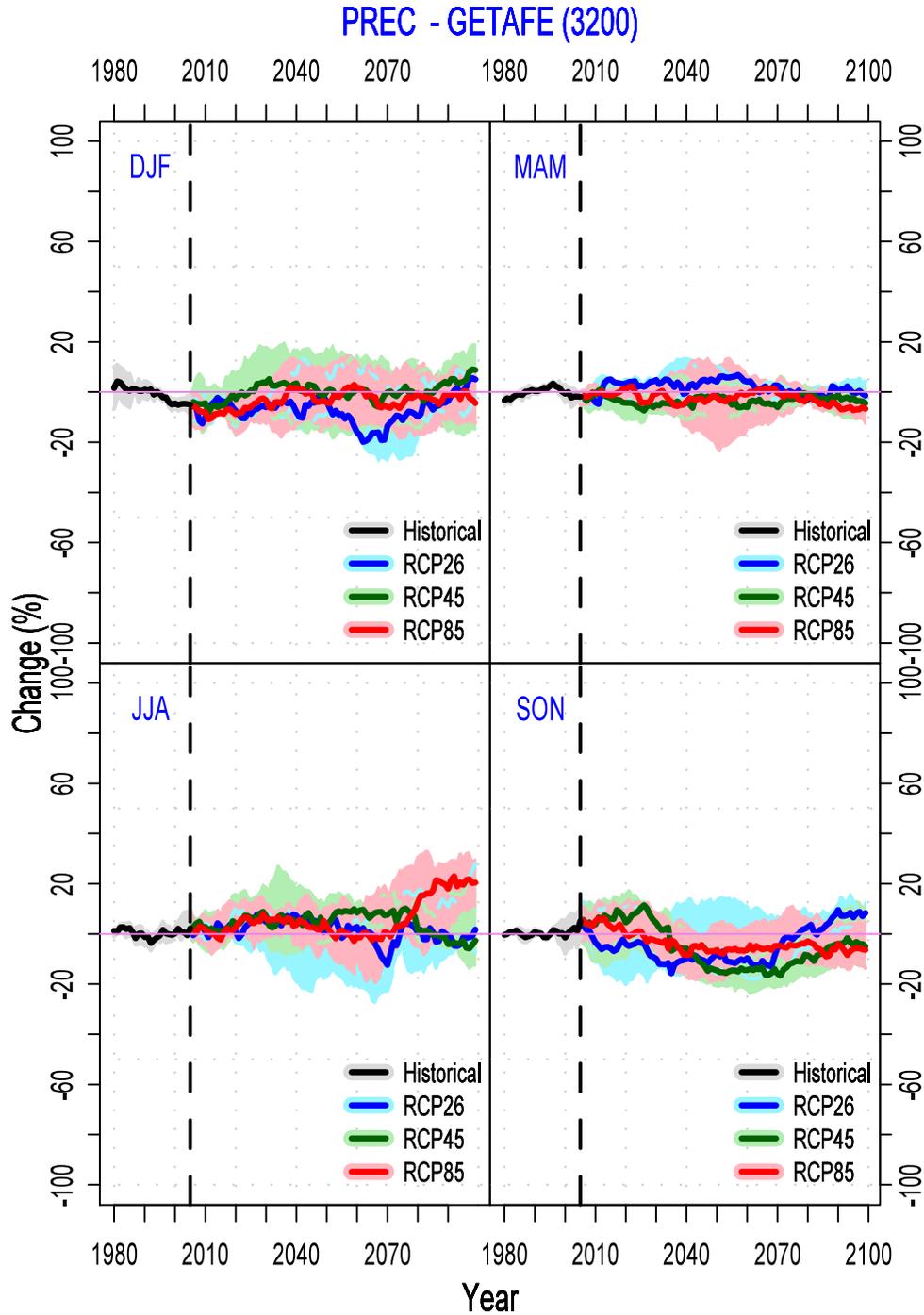
Incrementos absolutos y relativos esperados de la precipitación, para el observatorio de Madrid Retiro, en los periodos 2001–2030, 2041–2070, y 2071–2100 (entendidos como principio, mediados, y fin de siglo), con respecto al periodo 1970–2000 (entendido como del pasado). Resultados promediados de todos los modelos, para cada una de las estaciones del año y para cada uno de los escenarios futuros considerados.

**FIGURA 41. INCREMENTOS ESTACIONALES ABSOLUTOS DE LOS DATOS, CON ERROR SISTEMÁTICO CORREGIDO, DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI, REPRESENTADOS COMO MEDIAS MÓVILES DE 30 AÑOS. OBSERVATORIO DE GETAFE (3200)**



Incrementos estacionales absolutos de los datos, con error sistemático corregido, de la precipitación para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCP representados (2.6; 4.5; y 8.5), con respecto al promedio del periodo tomado como referencia (1971 – 2000). La línea discontinua marca el fin del experimento Historical y el comienzo de los RCP. Simulaciones de todos los modelos sobre el observatorio de Getafe (identificador 3200). Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.

**FIGURA 42. INCREMENTOS ESTACIONALES RELATIVOS ESPERADOS DE LOS DATOS, CON ERROR SISTEMÁTICO CORREGIDO, DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI, REPRESENTADOS COMO MEDIAS MÓVILES DE 30 AÑOS. OBSERVATORIO DE GETAFE (3200)**



*Incrementos estacionales relativos esperados de los datos, con error sistemático corregido, de la precipitación para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCP representados (2.6; 4.5; y 8.5) con respecto al promedio del periodo tomado como referencia (1971–2000). La línea discontinua marca el fin del experimento Historical y el comienzo de los RCP. Simulaciones de todos los modelos sobre el observatorio de Getafe (identificador 3200). Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.*

TABLA 10. OBSERVATORIO GETAFE

Precipitación incrementos absolutos (milímetros /día) – Getafe				
Estación	Escenario	2001-2030	2041-2070	2071-2100
DEF	RCP 2.6	0,07	0,07	0,14
	RCP 4.5	0,13	0,14	0,14
	RCP 6.0	0,07	0,07	-0,11
	RCP 8.5	0,08	0,12	0,12
MAM	RCP 2.6	-0,02	0	0,05
	RCP 4.5	-0,01	-0,02	-0,02
	RCP 6.0	0,1	-0,03	-0,06
	RCP 8.5	0,05	0	-0,07
JJA	RCP 2.6	-0,02	-0,01	0,02
	RCP 4.5	0	0,01	-0,02
	RCP 6.0	0	0,03	-0,01
	RCP 8.5	0,02	0,02	0,08
SON	RCP 2.6	-0,01	-0,06	0,04
	RCP 4.5	-0,02	-0,06	-0,04
	RCP 6.0	0,05	0	0,12
	RCP 8.5	-0,03	-0,07	-0,05
Precipitación incrementos relativos (%) - Getafe				
Estación	Escenario	2001-2030	2041-2070	2071-2100
DEF	RCP 2.6	5	5	11
	RCP 4.5	10	11	11
	RCP 6.0	5	5	-9
	RCP 8.5	6	10	9
MAM	RCP 2.6	-1	0	4
	RCP 4.5	-1	-2	-2
	RCP 6.0	8	-3	-5
	RCP 8.5	4	0	-6
JJA	RCP 2.6	-3	-2	3
	RCP 4.5	0	1	-3
	RCP 6.0	1	5	-1
	RCP 8.5	4	4	14
SON	RCP 2.6	-1	-5	3
	RCP 4.5	-2	-4	-3
	RCP 6.0	4	0	9
	RCP 8.5	-2	-5	-4

Incrementos absolutos y relativos esperados de la precipitación, para el observatorio de Getafe, en los periodos 2001–2030, 2041–2070, y 2071–2100 (entendidos como principio, mediados, y fin de siglo), con respecto al periodo 1970–2000 (entendido como del pasado). Resultados promediados de todos los modelos, para cada una de las estaciones del año y para cada uno de los escenarios futuros considerados.

## 1.10. CONCLUSIONES

### 1.10.1. Sobre la metodología de “Downscaling”

La metodología empleada para realizar la regionalización recoge muy bien la variación climática de la precipitación (su ciclo anual): bajas precipitaciones en los meses de verano, fuerte incremento en los meses de otoño (septiembre, octubre, y noviembre), precipitaciones elevadas en invierno (diciembre, enero, y febrero), y repunte en primavera (marzo, abril, y mayo). En el lado negativo, no se recogen adecuadamente los extremos de los meses de octubre y noviembre, una situación causada por el hecho de que las lluvias de esos meses vienen especialmente determinadas por fenómenos convectivos (como las tormentas), unos fenómenos de pequeño o medio tamaño que no son capaces de ser recogidos completamente por los modelos ya que sus grandes tamaños de rejilla no permiten especificar correctamente esos fenómenos.

Para precisar la bondad de la metodología se han evaluado dos estadísticos. En primer lugar, el **BIAS** (promedio de las diferencias), que al oscilar en torno a 0, en general, expresa que la metodología no introduce ningún sesgo en las simulaciones realizadas (al menos no en términos climáticos). El mayor sesgo introducido se corresponde con los meses de octubre y noviembre debido al carácter predominantemente convectivo de las lluvias en esos meses.

En segundo lugar, el **MAE** (promedio del valor absoluto de las diferencias), muestra que el rango de variabilidad de la simulación no es capaz de ajustarse exactamente al rango de variabilidad de la observación, un fenómeno común a los procesos de **Downscaling** estadístico. En el caso concreto de estos observatorios de estudio, el elevado **MAE**, correspondiente al verano, indica que los resultados que se puedan obtener para esa estación del año deben ser tratados con extrema cautela.

### 1.10.2. Sobre los escenarios futuros

Los resultados obtenidos para los observatorios estudiados muestran que los incrementos absolutos de la precipitación en las estaciones de primavera y verano son prácticamente nulos y no cabe esperar un cambio climático que varíe especialmente el régimen de precipitación con respecto al del pasado. El invierno, tras una primera etapa de descenso, muestra una evolución continuista excepto para el escenario **RCP 2.6** que muestra un cierto descenso con una sucesión de cambios como la oscilación aquí recogida, parece sugerir que los cambios son más debidos a la propia variabilidad climática de la precipitación, que a la respuesta climática asociada al forzamiento radiativo de los diferentes RCP. El otoño, tras un comienzo de órdenes diferentes según el RCP considerado (incremento positivo, negativo, o sin incremento), es la única estación que muestra un descenso continuado para el restante periodo de siglo, con un leve repunte a finales de éste (especialmente para el **RCP 2.6**). Nótese que se habla de precipitación media y no de los picos de intensidad en los eventos pluviométricos extremos que se tratarán en el siguiente capítulo.

Si se estudian los incrementos relativos obtenidos se obtienen conclusiones similares; la diferencia principal estriba en que los incrementos esperados en verano muestran una mayor variación, un efecto provocado por el hecho de que, siendo el verano una estación con una precipitación tan baja, pequeños incrementos absolutos reflejarán incrementos relativos mayores.

2. Cálculo de los coeficientes de cambio climático, para diferentes horizontes y escenarios, a partir de las proyecciones de precipitación diaria



## 2.1. INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PRECIPITACIÓN DE LA PENÍNSULA IBÉRICA

En los recientes trabajos de investigación sobre el clima de nuestra Península y las repercusiones del cambio climático en el régimen de la precipitación, la mayoría de los autores (Pérez y Boscolo, 2010) coinciden en que la precipitación anual en la Península Ibérica, **PI**, en las últimas tres décadas ha disminuido, de forma significativa en comparación con las décadas de los años 60 y 70, especialmente a finales de invierno. En particular la última década registra los valores más bajos de precipitación anual desde el año 1950. Sin embargo, la fuerte variabilidad interanual y la falta de series que se remonten a principios de siglo impiden afirmar que la precipitación haya descendido de forma generalizada a mínimos históricos. En conjunto, la señal antropogénica en la precipitación no ha emergido de forma evidente por encima del “ruido de fondo” natural.

El aumento global de la temperatura del planeta conllevará, sin duda, alteraciones permanentes del ciclo hidrológico, por lo que cabe esperar cambios en la distribución espacial de la precipitación, con aumentos en algunas áreas y disminuciones en otras. Aun cuando no cambiase la cantidad total de precipitación, la frecuencia de días lluviosos o la intensidad de la precipitación podrían experimentar fuertes variaciones en respuesta a un aumento de la concentración atmosférica de vapor de agua, lo cual complica la detección de una posible señal antropogénica. Asimismo, es importante tener en cuenta que incluso un pequeño desplazamiento en el valor medio de la precipitación puede acarrear cambios importantes en la distribución de valores extremos, por lo que es preciso examinar también posibles variaciones en la frecuencia de episodios extremos de precipitación. También se argumenta que el calentamiento global podría conducir a un aumento de los eventos extremos de precipitación. En conformidad con estas predicciones teóricas, las simulaciones del siglo XXI con modelos climáticos pronostican importantes disminuciones de la precipitación en la Península Ibérica, especialmente en verano, donde el descenso podría alcanzar el 50% a finales del siglo XXI.

En cuanto a las proyecciones regionales de clima futuro sobre la Península Ibérica, las principales conclusiones de los informes y trabajos realizados apuntan un descenso general de la precipitación en verano, y en invierno presentan una estructura norte-sur, con aumentos ligeros en la mitad norte y descensos en la parte sur. No obstante, las discrepancias entre los resultados de los diferentes modelos son mayores que los obtenidos al comparar las temperaturas. También se obtiene un descenso en el número total de días de lluvia en todas las estaciones y para toda la región. Otros autores encuentran que las funciones de distribución de probabilidad de cambios de precipitación anual indican un descenso de entre el 18% y el 0,4% para los percentiles 1 y 99. La función de distribución de precipitación diaria apunta hacia un descenso de los valores ligeros de precipitación.

Algunos autores (Buonomo et al., 2007) han encontrado que los cambios en las cantidades extremas de lluvia son tanto mayores cuanto mayor es el periodo de retorno de la lluvia y menor es la duración que se considera. Así, para la región europea, en promedio, la lluvia en 24 horas de periodo de retorno 20 años aumentará un 18% a finales del siglo XXI, mientras que, para un periodo de retorno de 2 años el aumento en promedio será de un 13%. Los aumentos son menores cuando se consideran duraciones superiores a 24 horas.

**Se observa, en general, un aumento de las lluvias extremas en contraposición a una disminución de la precipitación media anual, lo que indica un cambio en el clima del futuro con una sustancial reducción de los sucesos de lluvia débil y moderada y un aumento de los episodios de lluvia intensa.**

## 2.2. ANÁLISIS DE LAS SERIES DE PRECIPITACIÓN DIARIA 2006-2100

En este apartado se presentan los resultados del análisis de las series de precipitación diaria, simuladas por la Fundación para la Investigación del Clima (en adelante **FIG**) para el periodo 2006-2100, a partir de la información proporcionada por distintos modelos de circulación general.

Las series corresponden a tres estaciones termo-pluviométricas (en adelante, **TP**) que la Agencia Estatal de Meteorología (**AEMET**) tiene instaladas en el área metropolitana de Madrid, (Madrid-Retiro, observatorio 3195; Madrid-Torrejón, observatorio 3175 y Getafe, observatorio 3200). Se han utilizado nueve Modelos de Circulación General (MCG) y cuatro escenarios de clima futuro (RCP 2.6; RCP 4.5; RCP 6.0 y RCP 8.5).

Se han considerado las series de lluvia diaria para cada una de las tres estaciones TP correspondientes a tres periodos climáticos futuros (2006-2036, 2037-2068, 2069-2100), y al periodo histórico de control (1951-2005), subdividiéndolas en las cuatro estaciones del año (primavera, verano, otoño e invierno). De este modo se han analizado un total de 1.530 series. A partir de ellas se han obtenido las correspondientes series de lluvia diaria máxima (ver Figura 43).

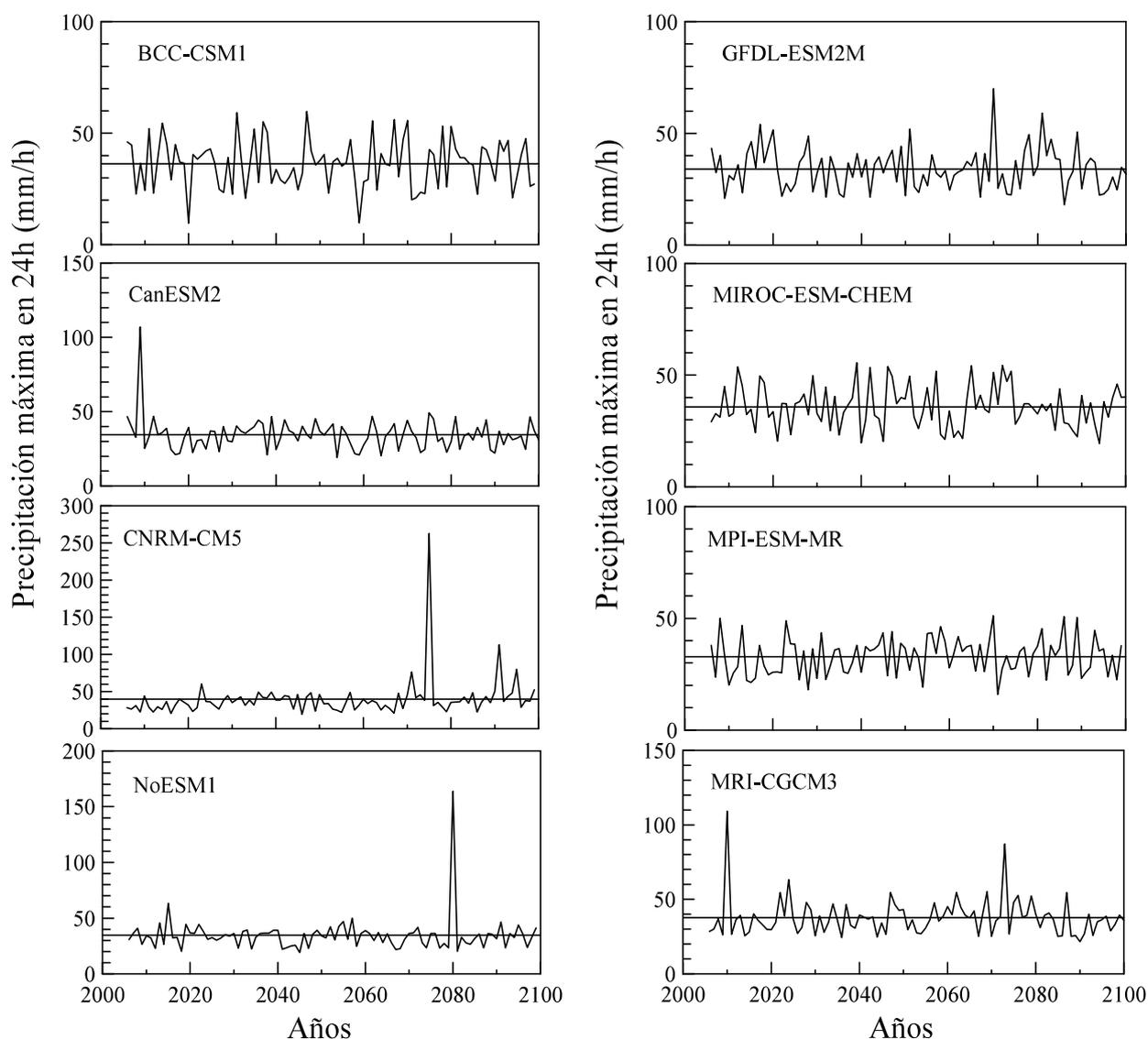
Con el fin de calcular la lluvia máxima diaria correspondientes a diferentes períodos de retorno, se han ajustado las series a la función de distribución de valores extremos **SQRT-ETmax**, propuesta por Etoh et al. (1987) y Zorraquino (2004).

Los periodos de retorno escogidos han sido 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 500 años. En todos los casos la función de distribución escogida ajusta correctamente los datos. En la Figura 44 se han representado algunos de estos ajustes.

El factor de cambio climático, **FC**, (Arnbjerg-Nielsen, 2008) es el cociente entre la intensidad de lluvia de periodo de retorno **T** y la duración **d** correspondiente a un escenario de clima futuro,  $I(T,d)_{Futuro}$  y la intensidad de lluvia equivalente en el clima presente  $I(T,d)_{Presente}$ , esto es:

$$FC = \frac{I(T,d)_{Futuro}}{I(T,d)_{Presente}} \quad (2)$$

Se pueden calcular estos factores de cambio climático, para cada periodo de retorno, a partir de las series de precipitación diaria simuladas y las correspondientes al periodo histórico de control (clima presente).

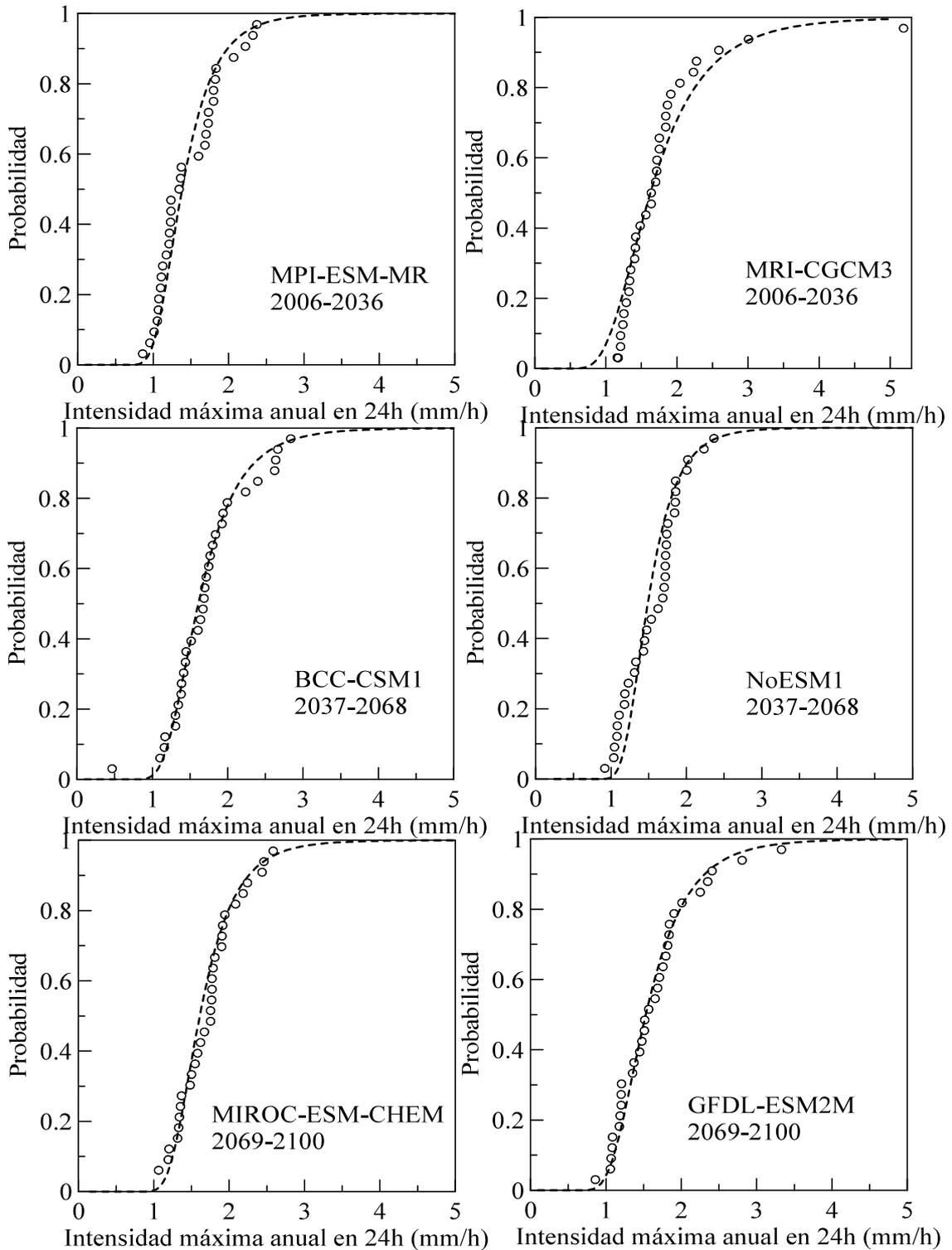
**FIGURA 43. SERIES DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS ANUALES EN 24 HORAS, CORRESPONDIENTES A LA ESTACIÓN TP DE GETAFE, Y AL ESCENARIO RCP 2.6**

Se han calculado los factores **FC**, correspondientes a la lluvia máxima en 24 horas para cada una de las tres estaciones TP, y para cada escenario de cambio climático y modelos de circulación general (24 casos corresponden al escenario **RCP 2.6**; 27 casos al **RCP 4.5**; 15 casos al **RCP 6.0** y 27 casos al escenario **RCP 8.5**).

En la Figura 45 se muestran los resultados obtenidos para uno de los escenarios contemplados.

Para conocer la limitación de los resultados es conveniente efectuar una verificación previa sobre la incertidumbre asociada a los factores del cambio climático, comparando las observaciones de las curvas IDF actuales y las obtenidas a partir de las simulaciones de los periodos históricos de control de los modelos (Willems y Vrac, 2011).

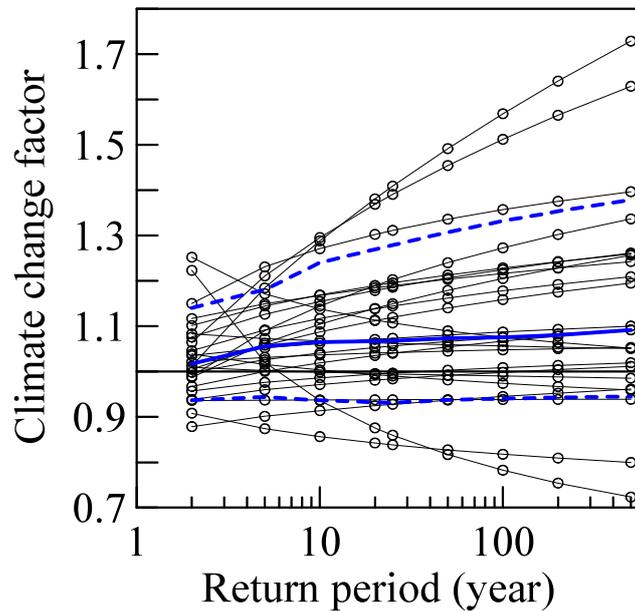
FIGURA 44. AJUSTES DE ALGUNAS DE LAS SERIES DE MÁXIMOS ANUALES DE GETAFE



Ajustes de algunas de las series de máximos anuales de Getafe bajo el escenario RCP 2.6 a la función SQRT-ETmax

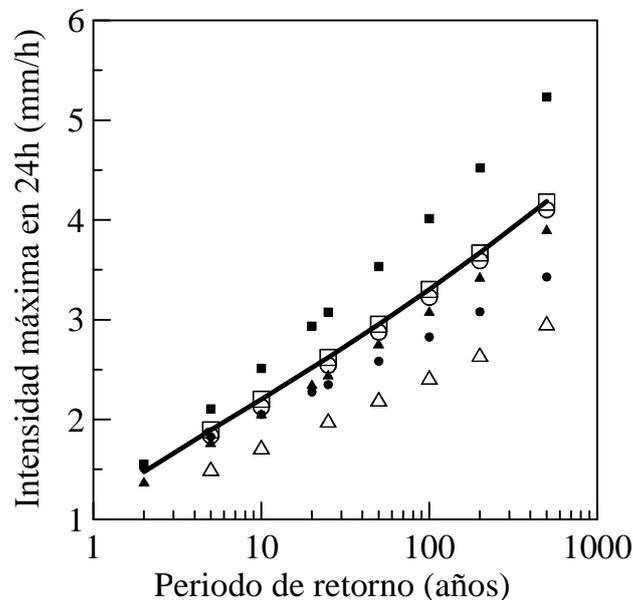
La Figura 46 muestra la comparación entre los valores de intensidad para diferentes periodos de retorno correspondientes a 24 horas, basados en observaciones históricas de lluvias de las tres estaciones TP de Madrid y los valores de intensidad-frecuencia obtenidos a partir de los modelos climáticos para el periodo histórico de control, promediados para las tres estaciones TP.

**FIGURA 45. FACTORES CLIMÁTICOS (FC) OBTENIDOS EN LOS 24 CASOS DEL ESCENARIO RCP 2.6 EN FUNCIÓN DEL PERIODO DE RETORNO**



Factores climáticos (FC) obtenidos en los 24 casos del escenario RCP 2.6 en función del periodo de retorno. La línea azul continua representa la mediana del conjunto de casos correspondientes a todos los modelos y todas las estaciones TP, y las líneas discontinuas representan los percentiles: superior, P90, e inferior, P10.

**FIGURA 46. VALORES ACTUALES DE INTENSIDAD MÁXIMA EN 24 HORAS, PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO ENTRE 2 AÑOS Y 500 AÑOS**



Valores actuales de intensidad máxima en 24 horas, para diferentes periodos de retorno entre 2 años y 500 años, obtenidos a partir de las series de máximos anuales de las estaciones, 3195 Retiro (cuadrado), 3200 Getafe (círculo) y 3175 Torrejón (triángulo), en comparación con los valores promedio de intensidad obtenidos para los periodos históricos de control de los nueve modelos CGMS considerados para cada estación TP, 3195 Retiro (cuadrado negro), 3200 Getafe (círculo negro) y 3175 Torrejón (triángulo negro). La línea continua muestra el promedio de las tres estaciones TP.

### 2.3. CÁLCULO DE LA INTENSIDAD MÁXIMA HORARIA, PARA DIFERENTES ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y OBTENCIÓN DEL FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO (FC)

A partir de las series de precipitación simuladas por la FIC, para las tres estaciones TP (Madrid-Retiro, Madrid-Getafe y Madrid- Torrejón), se han obtenido los valores de la intensidad máxima de lluvia diaria, para los diferentes escenarios climáticos, en función del periodo de retorno, para el área de Madrid. Si se quiere a partir de ellos calcular las curvas de **Intensidad, Duración y Frecuencia** para los distintos escenarios climáticos es preciso aplicar alguna hipótesis o técnica de reducción de escala, que nos permita estimar las intensidades de lluvia para duraciones menores que las resueltas por los modelos de simulación climática, que no van más allá de las 24 horas de resolución temporal.

Este método de obtención de curvas IDF ha sido aplicado por diferentes autores (Benjoudi et al., 1997; De Michele et al., 2002; Pao-Shan et al., 2004; Desramaut, 2008; Rodríguez et al., 2013) como técnica de *Downscaling* de la intensidad de lluvia de baja a alta resolución y, en esencia, consiste en aplicar la invariancia de escala característica de los procesos fractales.

Muchos procesos atmosféricos, entre los que se cuentan los de generación de lluvia, se producen mediante complejos procesos dinámicos que actúan en un amplio rango temporal, la repetición de la dinámica del fenómeno, a escalas de tiempo diferentes, se traduce en que el fenómeno tiene el mismo aspecto, independientemente de la escala a la que lo contemplemos (*autosimilitud*). Podemos considerarlo un proceso de tipo fractal, y sus propiedades obedecen a leyes potenciales del parámetro de escala, las llamadas **leyes de escala**. Las leyes potenciales están libres de cualquier escala característica y ningún otro tipo de función posee esta propiedad. El parámetro de escala,  $\lambda$ , se define como la razón entre la escala de trabajo (cualquier escala desde la resolución, hasta la longitud de la serie) y la escala de resolución del fenómeno (en este caso 1 día). Las propiedades de este tipo de procesos pueden obedecer a una escala simple, con un único exponente constante que las gobierna y que está relacionado con la dimensión fractal (comportamiento monofractal), o seguir un comportamiento de multiescala (multifractal) en que el exponente es una función.

La *autosimilitud* de los procesos fractales naturales, como los de generación de lluvia, es de tipo estadístico, en contraposición con los fractales matemáticos en los que las partes son una copia exacta de la totalidad. Por lo tanto, las propiedades de escala de fenómenos como la lluvia se expresan mediante ciertas relaciones estadísticas que describen su comportamiento fractal (Schertzer y Lovejoy, 1987). La distribución de probabilidad de la intensidad de precipitación, y también la distribución de las intensidades máximas de precipitación, cumplen relaciones de escala (Koutsoyiannis y Foufoula-Georgiou, 1993; Burlando y Rosso, 1996; Menabde et al., 1999), lo que significa, que la distribución de probabilidad (**I<sub>d</sub>**) de la serie de intensidad diaria máxima anual (duración **d<sub>0</sub>**= 1 día) estará relacionada con la correspondiente (**I<sub>d0</sub>**) a otra escala (duración **d= λ d<sub>0</sub>**), mediante un factor que es una función potencial del parámetro de escala  $\lambda$ :

$$I_d^{dist} = \lambda^\beta \cdot I_{d_0}$$

(3)

Esta igualdad se debe entender como una igualdad entre funciones de distribución de probabilidad.

La invariancia de escala de las distribuciones estadísticas se pone de manifiesto en la igualdad de sus momentos estadísticos de orden  $q$ .

$$\langle I_d^q \rangle = \lambda^{K(q)} \langle I_{d_0}^q \rangle \quad (4)$$

Si la función de escala  $K(q)$  es lineal ( $K(q)=\beta q$ ), el proceso es de escala simple o monofractal y, si no, el proceso es multiescalar o multifractal.

Los ajustes obtenidos entre la función de escala  $K(q)$  y el orden  $q$  de los momentos de la serie, determinan el exponente  $\beta$  de la función potencial que expresa la dependencia con la duración de la intensidad de lluvia máxima.

$$I(T, d) = \frac{f(T)}{d^\beta} \quad (5)$$

A partir de la ecuación (5), y haciendo uso de los valores del exponente  $\beta$  calculados, se pueden obtener las intensidades máximas para una duración de 1 hora y para los distintos periodos de retorno seleccionados, según la relación siguiente:

$$I(T, d) = I(T, 24) \times \left( \frac{24}{d} \right)^\beta$$

$$I(T, d) = \frac{f(T)}{d^\beta} \quad (6)$$

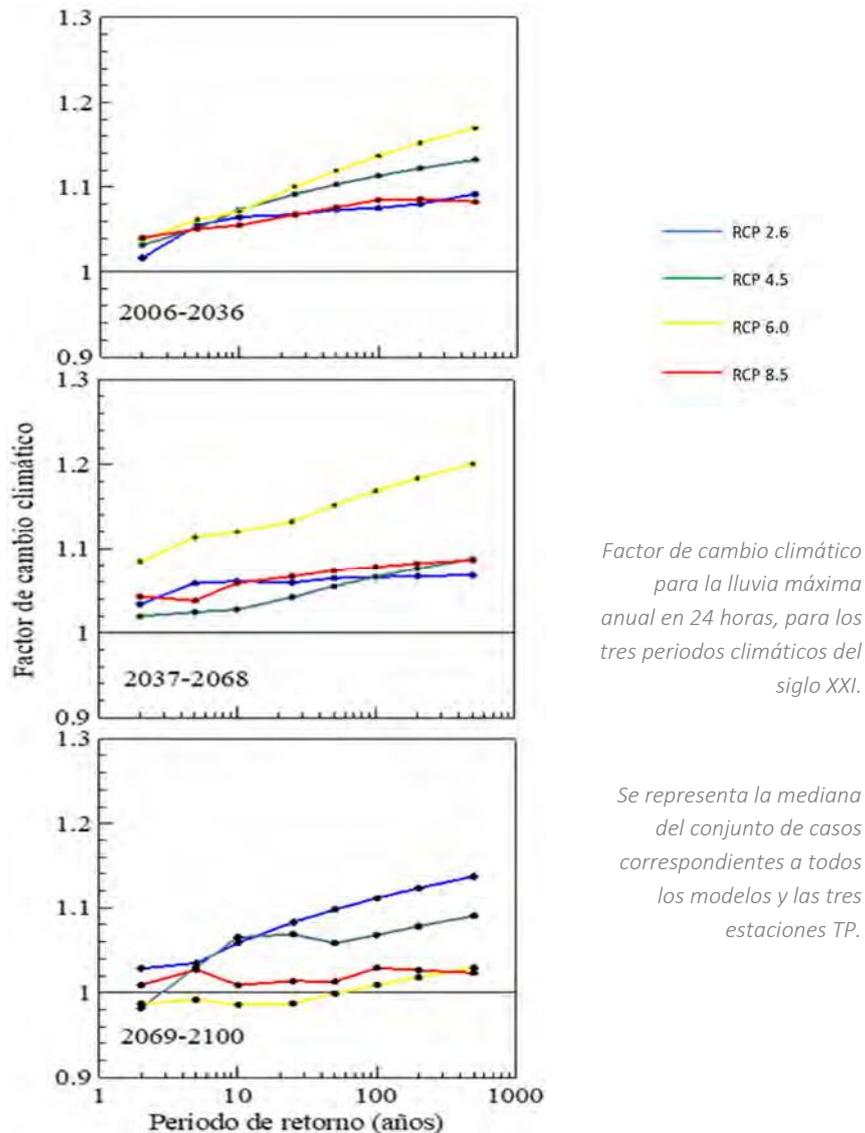
Una vez calculada la intensidad horaria máxima para los periodos de retorno y los escenarios que se han considerado, incluido el periodo de control, se ha calculado, utilizando la ecuación (2), el factor climático para una duración de 1 hora para todos casos estudiados.

## 2.4. ELEMENTOS CLIMÁTICOS ANUALES PROMEDIO DE LAS TRES ESTACIONES TERMO - PLUVIOMÉTRICAS (TP)

En este apartado se han calculado los factores climáticos anuales promediando los resultados de las tres estaciones TP. Para ello se han obtenido, en primer lugar, los factores FC anuales correspondientes a la lluvia máxima en 24 horas, para cada una de las tres estaciones TP, y para cada escenario de cambio climático y modelo de circulación general. A continuación, se ha calculado para cada escenario, la mediana de los casos correspondientes a todos los modelos y a las tres estaciones TP. La dispersión de los resultados se ha cuantificado a partir de los percentiles 90 y 10 del conjunto de casos.

En la Figura 47 se representan las medianas de los factores de cambio climático anuales (FC) para los cuatro escenarios de cambio climático que se han contemplado en el estudio, agrupados en los periodos 2006- 2036, 2037-2068 y 2069-2100. En la Tabla 11 se presentan los resultados obtenidos para los cuatro escenarios de cambio climático considerados y los periodos climáticos analizados.

**FIGURA 47. FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA LLUVIA MÁXIMA ANUAL EN 24 HORAS, PARA LOS TRES PERIODOS CLIMÁTICOS DEL SIGLO XXI**



**TABLA 11. FACTOR CLIMÁTICO ANUAL Y PERCENTILES 10 Y 90, PARA LLUVIA MÁXIMA EN 24 HORAS**

<i>Anual</i>	<i>RCP 2.6</i>			<i>RCP 4.5</i>			<i>RCP 6.0</i>			<i>RCP 8.5</i>			
	<i>T (años)</i>	<i>mediana</i>	<i>P10</i>	<i>P90</i>	<i>mediana</i>	<i>P10</i>	<i>P90</i>	<i>mediana</i>	<i>P10</i>	<i>P90</i>	<i>mediana</i>	<i>P10</i>	<i>P90</i>
2006 - 2036	2	1,02	0,94	1,14	1,03	0,94	1,17	1,04	0,95	1,14	1,04	0,96	1,11
	5	1,06	0,94	1,18	1,05	0,93	1,23	1,06	0,96	1,18	1,05	0,94	1,17
	10	1,07	0,94	1,24	1,07	0,91	1,32	1,07	0,93	1,22	1,06	0,93	1,21
	20	1,07	0,93	1,28	1,09	0,85	1,41	1,10	0,91	1,27	1,07	0,92	1,24
	50	1,07	0,94	1,31	1,10	0,82	1,44	1,12	0,89	1,31	1,08	0,92	1,25
	100	1,08	0,94	1,33	1,11	0,81	1,46	1,14	0,88	1,34	1,09	0,92	1,26
	200	1,08	0,94	1,35	1,12	0,79	1,48	1,15	0,87	1,37	1,09	0,92	1,28
	500	1,09	0,94	1,38	1,13	0,78	1,51	1,17	0,86	1,40	1,08	0,92	1,29
2037 - 2068	2	1,03	0,99	1,12	1,02	0,91	1,10	1,08	0,94	1,14	1,04	0,94	1,12
	5	1,06	0,96	1,11	1,02	0,92	1,12	1,11	0,90	1,31	1,04	0,92	1,18
	10	1,06	0,92	1,14	1,03	0,93	1,14	1,12	0,88	1,41	1,06	0,91	1,21
	20	1,06	0,87	1,17	1,04	0,91	1,16	1,13	0,86	1,53	1,07	0,89	1,24
	50	1,06	0,85	1,20	1,05	0,90	1,17	1,15	0,85	1,61	1,07	0,88	1,26
	100	1,07	0,83	1,22	1,07	0,89	1,18	1,17	0,83	1,69	1,08	0,87	1,28
	200	1,07	0,82	1,24	1,08	0,88	1,20	1,18	0,82	1,75	1,08	0,86	1,30
	500	1,07	0,80	1,26	1,09	0,88	1,21	1,20	0,81	1,84	1,09	0,84	1,33
2069- 2100	2	1,03	0,95	1,18	0,98	0,92	1,12	0,99	0,89	1,13	1,01	0,91	1,12
	5	1,03	0,95	1,36	1,03	0,90	1,23	0,99	0,89	1,19	1,03	0,91	1,17
	10	1,06	0,89	1,44	1,07	0,90	1,29	0,99	0,87	1,27	1,01	0,89	1,20
	20	1,08	0,85	1,54	1,07	0,90	1,39	0,99	0,84	1,32	1,01	0,86	1,22
	50	1,10	0,83	1,60	1,06	0,89	1,46	1,00	0,82	1,36	1,01	0,85	1,24
	100	1,11	0,82	1,65	1,07	0,88	1,53	1,01	0,80	1,39	1,03	0,83	1,26
	200	1,12	0,80	1,70	1,08	0,87	1,58	1,02	0,79	1,41	1,03	0,82	1,28
	500	1,14	0,79	1,76	1,09	0,87	1,64	1,03	0,78	1,45	1,02	0,80	1,31

Factor climático anual y percentiles 10 y 90, para lluvia máxima en 24 horas

Entrando más en detalle, el método para obtener las curvas IDF a partir de los registros históricos de lluvia diaria consiste en aplicar la invariancia de escala característica de los procesos fractales para determinar el exponente de escala  $\beta$  de la función potencial que expresa la dependencia con la duración de la intensidad de lluvia máxima.

En la Tabla 12 se presentan los valores del exponente medio  $\beta$ , para todos los escenarios y periodos considerados.

**TABLA 12. EXPONENTE DE ESCALA MEDIO ( $\beta$ ) PARA TODOS LOS PERIODOS Y ESCENARIOS**

<i>Anual</i>		<i>RCP 2.6</i>	<i>RCP 4.5</i>	<i>RCP 6.0</i>	<i>RCP 8.5</i>
<i>Histórica</i>	0,754				
<i>2006-2036</i>		0,780	0,777	0,784	0,768
<i>2037-2068</i>		0,777	0,782	0,792	0,774
<i>2069-2100</i>		0,796	0,780	0,781	0,782

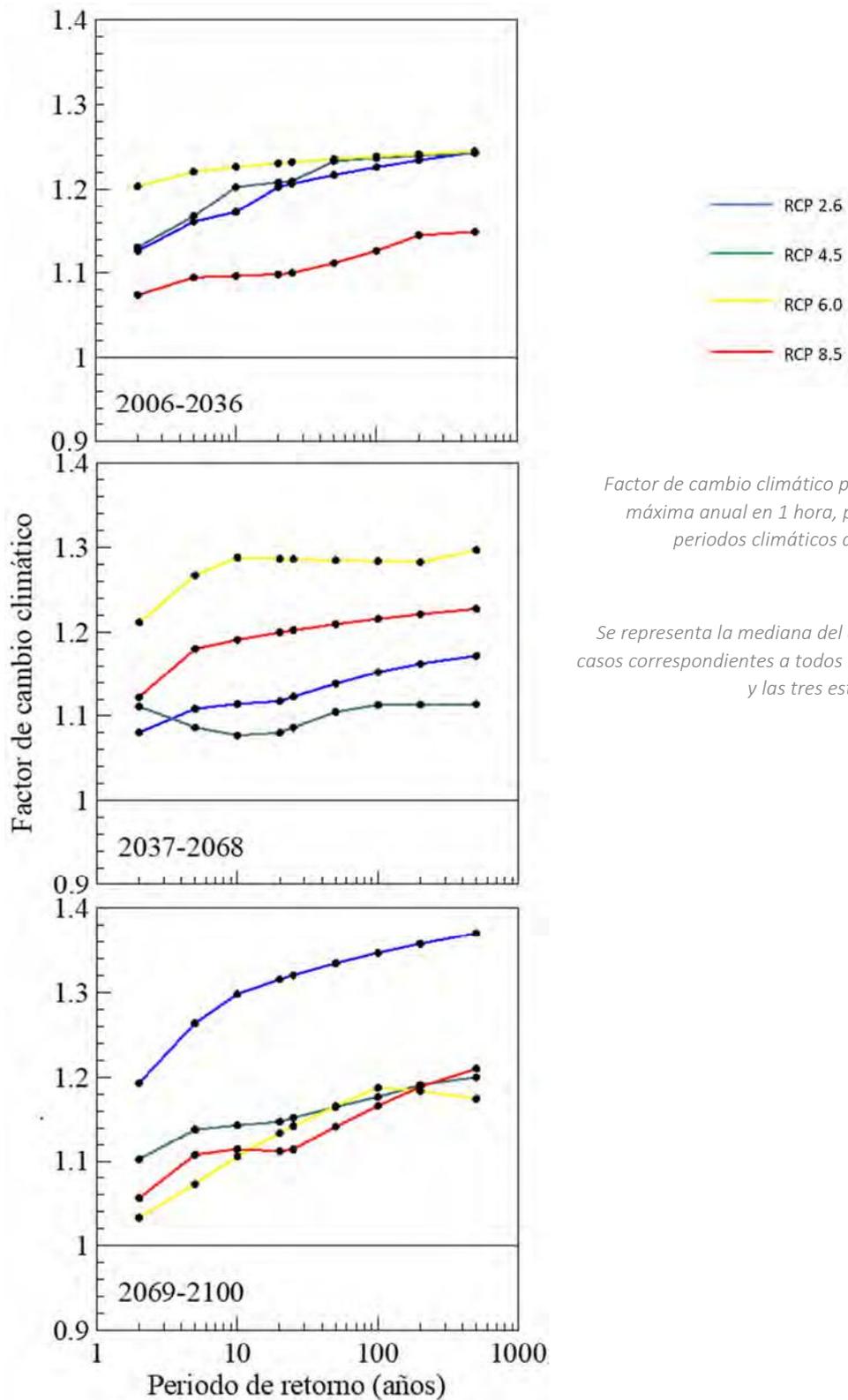
*Exponente de escala medio ( $\beta$ ) para todos los periodos y escenarios*

Haciendo uso de los valores del exponente  $\beta$  calculados, se han obtenido las intensidades máximas para una duración de 1 hora, y para los distintos periodos de retorno seleccionados.

Una vez calculada la intensidad horaria máxima anual para los periodos de retorno, y los escenarios que se han considerado, incluido el periodo de control, se ha calculado el factor climático para una duración de 1 hora, para todos casos estudiados.

En la Figura 48 y en la Tabla 13 se presentan los resultados para todos los escenarios y periodos climáticos considerados.

**FIGURA 48. FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA LLUVIA MÁXIMA ANUAL EN 1 HORA, PARA LOS TRES PERIODOS CLIMÁTICOS DEL SIGLO XXI**



*Factor de cambio climático para la lluvia máxima anual en 1 hora, para los tres periodos climáticos del siglo XXI.*

*Se representa la mediana del conjunto de casos correspondientes a todos los modelos y las tres estaciones TP.*

**TABLA 13. FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO ANUAL (FC) PARA UNA DURACIÓN DE 1 HORA**

Anual	RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 6.0			RCP 8.5			
	T (años)	mediana	P10	P90	mediana	P10	P90	mediana	P10	P90	mediana	P10	P90
2006 - 2036	2	1,13	0,94	1,34	1,13	0,88	1,50	1,20	0,85	1,35	1,07	0,90	1,33
	5	1,16	0,96	1,42	1,17	0,78	1,65	1,22	0,80	1,43	1,09	0,91	1,35
	10	1,17	0,97	1,46	1,20	0,76	1,71	1,23	0,78	1,49	1,10	0,91	1,37
	20	1,20	0,98	1,49	1,21	0,75	1,79	1,23	0,76	1,54	1,10	0,91	1,38
	50	1,22	0,99	1,54	1,23	0,71	1,87	1,24	0,74	1,59	1,11	0,91	1,41
	100	1,23	0,99	1,59	1,24	0,69	1,94	1,24	0,73	1,63	1,13	0,90	1,43
	200	1,23	0,99	1,65	1,24	0,67	2,00	1,24	0,72	1,66	1,14	0,89	1,45
	500	1,24	0,99	1,71	1,24	0,65	2,08	1,24	0,71	1,70	1,15	0,88	1,47
2037 - 2068	2	1,08	0,91	1,41	1,11	0,92	1,28	1,21	0,90	1,65	1,12	0,85	1,40
	5	1,11	0,85	1,48	1,09	0,92	1,41	1,27	0,89	1,85	1,18	0,83	1,44
	10	1,11	0,81	1,53	1,08	0,91	1,46	1,29	0,88	1,99	1,19	0,81	1,46
	20	1,12	0,79	1,58	1,08	0,91	1,48	1,29	0,87	2,11	1,20	0,79	1,48
	50	1,14	0,76	1,64	1,10	0,90	1,52	1,28	0,85	2,26	1,21	0,77	1,50
	100	1,15	0,75	1,67	1,11	0,89	1,55	1,28	0,84	2,35	1,22	0,76	1,51
	200	1,16	0,74	1,68	1,11	0,89	1,58	1,28	0,83	2,44	1,22	0,75	1,52
	500	1,17	0,72	1,70	1,11	0,88	1,61	1,30	0,82	2,55	1,23	0,73	1,54
2069- 2100	2	1,19	0,90	1,66	1,10	0,81	1,45	1,03	0,80	1,52	1,06	0,87	1,39
	5	1,26	0,77	1,84	1,14	0,81	1,60	1,07	0,76	1,71	1,11	0,84	1,48
	10	1,30	0,70	1,95	1,14	0,82	1,67	1,11	0,74	1,83	1,11	0,82	1,52
	20	1,32	0,68	2,05	1,15	0,82	1,73	1,13	0,72	1,94	1,11	0,80	1,55
	50	1,33	0,67	2,16	1,16	0,82	1,84	1,17	0,70	2,06	1,14	0,78	1,58
	100	1,35	0,66	2,23	1,18	0,82	1,93	1,19	0,69	2,13	1,17	0,76	1,61
	200	1,36	0,65	2,30	1,19	0,82	2,01	1,18	0,68	2,18	1,19	0,75	1,64
	500	1,37	0,65	2,38	1,20	0,82	2,11	1,17	0,67	2,23	1,21	0,74	1,67

Factor de cambio climático anual (FC) para una duración de 1 hora

## 2.5. FACTORES CLIMÁTICOS PARA CADA ESTACIÓN TERMO-PLUVIOMÉTRICA (TP)

En este apartado se presentan los factores climáticos anuales de cada una de las tres estaciones TP. Se calcularon los FC anuales, correspondientes a la lluvia máxima en 24 horas, para cada una de las tres estaciones TP y cada escenario de cambio climático y modelos de circulación general.

Para cada escenario, se obtuvo la mediana de los casos correspondientes a todos los modelos. La dispersión de los resultados se cuantificó a partir de los percentiles 90 y 10 del conjunto de casos. En las tablas 14, 15 y 16 se presentan los resultados obtenidos para los escenarios de cambio climático considerados y los periodos climáticos analizados.

Al analizar las estaciones TP por separado, solo se promedian:

- 8 casos correspondientes al escenario RCP 2.6
- 9 casos al RCP 4.5
- 5 casos al RCP 6.0 y
- 9 casos al escenario RCP 8.5.

Aquí no se han considerado los resultados correspondientes al escenario RCP 6.0 ya que el limitado número de casos hace que el resultado no sea representativo.

En las figuras 49, 50 y 51 se han representado las medianas de los factores de cambio climático (**FC**) para lluvia máxima anual en 24 horas, de cada una de las estaciones TP, para los cuatro escenarios de cambio climático que se han contemplado en el estudio, en los periodos 2006-2036, 2037-2068 y 2069-2100.

**TABLA 14. FACTOR CLIMÁTICO ANUAL Y PERCENTILES 10 Y 90 PARA LLUVIA MÁXIMA EN 24 HORAS. GETAFE**

<i>Getafe</i>		<i>RCP 2.6</i>			<i>RCP 4.5</i>			<i>RCP 8.5</i>		
<i>T (años)</i>	<i>mediana</i>	<i>P10</i>	<i>P90</i>	<i>mediana</i>	<i>P10</i>	<i>P90</i>	<i>mediana</i>	<i>P10</i>	<i>P90</i>	
<b>2006 - 2036</b>	2	1,04	0,94	1,09	1,06	0,98	1,08	1,01	0,97	1,19
	5	1,09	0,97	1,19	1,06	1,01	1,16	1,05	0,98	1,18
	10	1,11	0,98	1,29	1,05	1,01	1,19	1,06	0,99	1,17
	20	1,12	0,97	1,37	1,06	1,01	1,22	1,07	0,99	1,16
	50	1,14	0,97	1,47	1,07	1,00	1,26	1,08	1,00	1,15
	100	1,15	0,97	1,53	1,08	1,00	1,29	1,09	1,00	1,15
	200	1,16	0,96	1,59	1,09	0,99	1,32	1,09	1,01	1,16
	500	1,17	0,96	1,66	1,09	0,99	1,36	1,10	1,01	1,17
<b>2037 - 2068</b>	2	1,05	0,99	1,10	1,01	0,92	1,09	1,04	0,92	1,10
	5	1,08	0,96	1,11	1,03	0,95	1,11	1,06	0,93	1,13
	10	1,08	0,95	1,12	1,04	0,95	1,11	1,06	0,95	1,14
	20	1,08	0,94	1,13	1,05	0,95	1,12	1,07	0,93	1,16
	50	1,09	0,93	1,15	1,07	0,94	1,15	1,07	0,92	1,17
	100	1,10	0,92	1,16	1,07	0,94	1,16	1,08	0,91	1,18
	200	1,11	0,92	1,17	1,07	0,94	1,18	1,08	0,91	1,19
	500	1,12	0,91	1,18	1,07	0,93	1,19	1,09	0,90	1,20
<b>2069- 2100</b>	2	1,01	0,95	1,05	0,98	0,94	1,14	1,03	0,93	1,06
	5	1,03	0,98	1,13	1,03	0,96	1,13	1,04	0,92	1,09
	10	1,05	0,99	1,18	1,07	0,96	1,19	1,04	0,94	1,13
	20	1,07	0,99	1,22	1,07	0,96	1,20	1,04	0,96	1,16
	50	1,10	0,99	1,27	1,06	0,94	1,24	1,04	0,96	1,19
	100	1,12	0,99	1,30	1,05	0,93	1,26	1,04	0,95	1,21
	200	1,14	0,99	1,33	1,04	0,92	1,29	1,04	0,94	1,23
	500	1,16	1,00	1,36	1,03	0,91	1,32	1,04	0,92	1,26

Factor climático anual y percentiles 10 y 90 para lluvia máxima en 24 horas. Estación Getafe.

**TABLA 15. FACTOR CLIMÁTICO ANUAL Y PERCENTILES 10 Y 90 PARA LLUVIA MÁXIMA EN 24 HORAS.****RETIRO**

<i>Retiro</i>	<i>RCP 2.6</i>			<i>RCP 4.5</i>			<i>RCP 8.5</i>			
<i>T (años)</i>	<i>mediana</i>	<i>P10</i>	<i>P90</i>	<i>mediana</i>	<i>P10</i>	<i>P90</i>	<i>mediana</i>	<i>P10</i>	<i>P90</i>	
<b>2006 - 2036</b>	2	1,00	0,93	1,21	1,00	0,95	1,18	1,05	0,97	1,10
	5	1,04	0,92	1,20	1,06	0,91	1,22	1,02	0,94	1,20
	10	1,06	0,91	1,18	1,08	0,89	1,32	1,02	0,93	1,27
	20	1,08	0,91	1,19	1,11	0,85	1,39	1,03	0,92	1,34
	50	1,08	0,90	1,22	1,13	0,82	1,46	1,04	0,92	1,40
	100	1,08	0,90	1,23	1,15	0,80	1,50	1,05	0,91	1,45
	200	1,07	0,90	1,25	1,17	0,79	1,54	1,06	0,91	1,49
	500	1,07	0,90	1,27	1,18	0,78	1,59	1,07	0,91	1,54
<b>2037 - 2068</b>	2	1,02	0,98	1,08	1,07	0,90	1,12	1,01	0,95	1,11
	5	0,99	0,95	1,13	1,11	0,91	1,13	1,03	0,92	1,12
	10	0,99	0,92	1,17	1,12	0,92	1,16	1,05	0,88	1,15
	20	0,99	0,90	1,21	1,11	0,91	1,20	1,06	0,85	1,17
	50	0,99	0,87	1,25	1,10	0,90	1,24	1,08	0,82	1,19
	100	0,99	0,86	1,28	1,10	0,89	1,27	1,08	0,80	1,20
	200	0,99	0,84	1,30	1,10	0,89	1,30	1,09	0,79	1,23
	500	0,99	0,83	1,33	1,10	0,88	1,33	1,10	0,77	1,25
<b>2069 - 2100</b>	2	1,02	0,92	1,22	0,99	0,87	1,07	0,99	0,89	1,11
	5	1,00	0,93	1,25	1,00	0,87	1,24	0,94	0,89	1,20
	10	0,99	0,89	1,31	1,00	0,88	1,34	0,93	0,89	1,24
	20	1,00	0,86	1,36	1,00	0,88	1,41	0,94	0,88	1,28
	50	1,01	0,84	1,42	1,00	0,88	1,49	0,96	0,85	1,32
	100	1,01	0,83	1,46	1,00	0,87	1,54	0,96	0,84	1,34
	200	1,02	0,82	1,50	1,01	0,87	1,58	0,97	0,82	1,36
	500	1,02	0,81	1,54	1,01	0,86	1,63	0,98	0,81	1,39

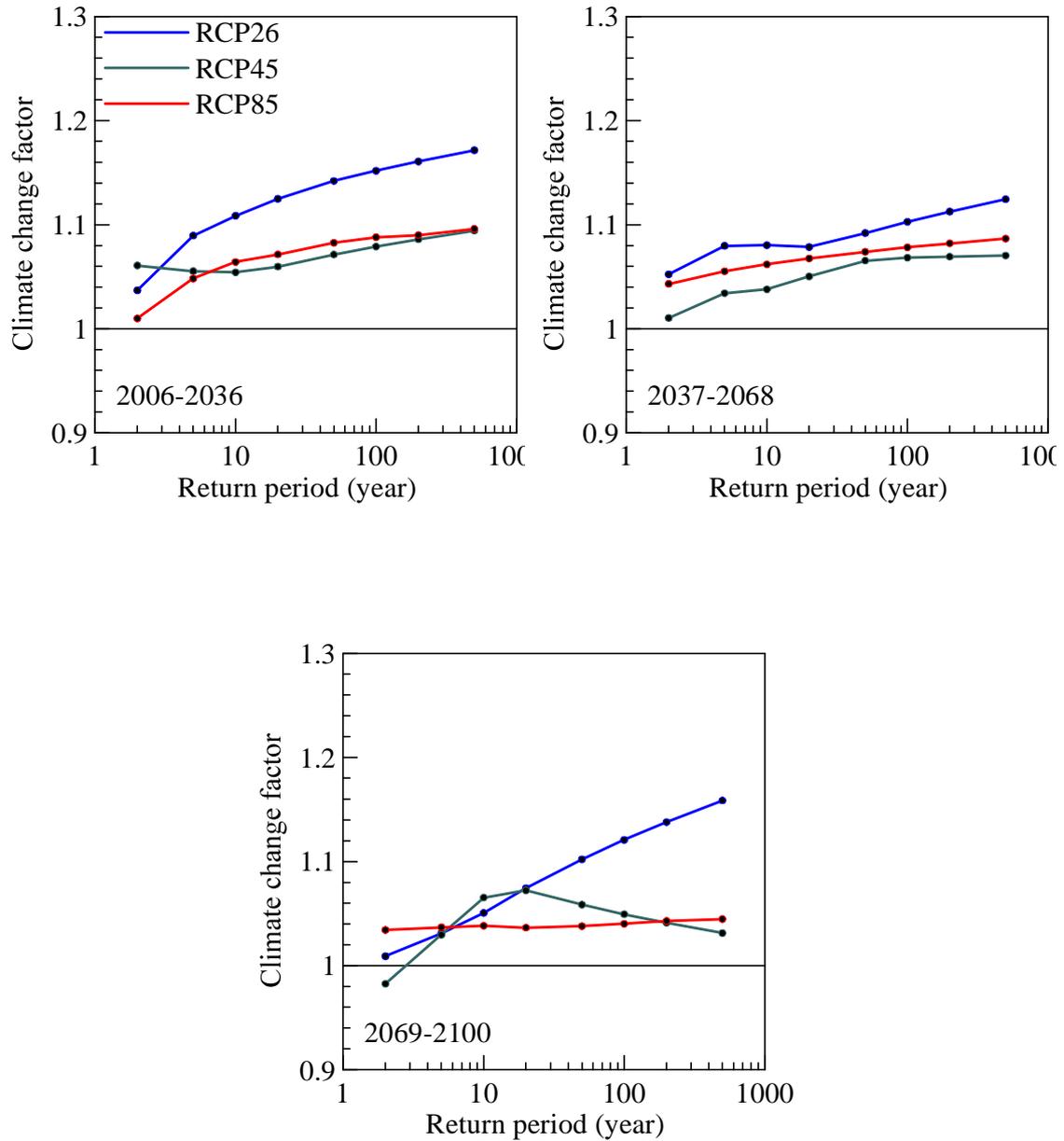
Factor climático anual y percentiles 10 y 90 para lluvia máxima en 24 horas. Estación Retiro.

**TABLA 16. FACTOR CLIMÁTICO ANUAL Y PERCENTILES 10 Y 90 PARA LLUVIA MÁXIMA EN 24 HORAS. TORREJÓN**

Torrejón		RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 8.5		
T(años)	mediana	P10	P90	mediana	P10	P90	mediana	P10	P90	
2006 - 2036	2	1,02	0,98	1,12	1,00	0,94	1,16	1,02	0,99	1,09
	5	1,07	0,99	1,17	1,04	0,93	1,17	1,05	1,00	1,09
	10	1,09	1,00	1,20	1,07	0,91	1,20	1,06	1,02	1,10
	20	1,10	1,00	1,22	1,09	0,90	1,23	1,06	1,03	1,12
	50	1,12	1,00	1,27	1,10	0,89	1,27	1,07	1,02	1,15
	100	1,13	1,00	1,30	1,11	0,88	1,29	1,07	1,02	1,17
	200	1,14	1,01	1,32	1,12	0,88	1,31	1,07	1,02	1,18
2037 - 2068	500	1,15	1,01	1,35	1,13	0,87	1,33	1,07	1,02	1,20
	2	1,05	1,00	1,11	1,03	0,95	1,10	1,05	0,95	1,24
	5	1,07	0,98	1,14	1,00	0,97	1,11	1,05	0,99	1,28
	10	1,08	0,97	1,17	1,02	0,96	1,12	1,09	0,97	1,30
	20	1,09	0,96	1,20	1,01	0,95	1,13	1,09	0,95	1,32
	50	1,10	0,96	1,22	1,00	0,93	1,13	1,09	0,92	1,34
	100	1,11	0,95	1,24	1,00	0,92	1,14	1,09	0,90	1,35
2069- 2100	200	1,11	0,95	1,26	0,99	0,92	1,16	1,09	0,89	1,36
	500	1,12	0,95	1,27	0,99	0,91	1,19	1,09	0,89	1,38
	2	1,04	1,00	1,11	0,98	0,92	1,12	0,98	0,93	1,15
	5	1,11	1,00	1,18	1,04	0,94	1,16	0,97	0,93	1,18
	10	1,15	0,98	1,21	1,08	0,95	1,18	1,00	0,92	1,20
	20	1,18	0,97	1,24	1,11	0,93	1,20	1,02	0,91	1,20
	50	1,21	0,96	1,28	1,14	0,91	1,22	1,01	0,90	1,24
100	1,23	0,96	1,31	1,15	0,90	1,24	1,01	0,89	1,26	
200	1,24	0,95	1,34	1,16	0,89	1,26	1,00	0,88	1,27	
500	1,26	0,94	1,37	1,17	0,88	1,28	1,00	0,88	1,29	

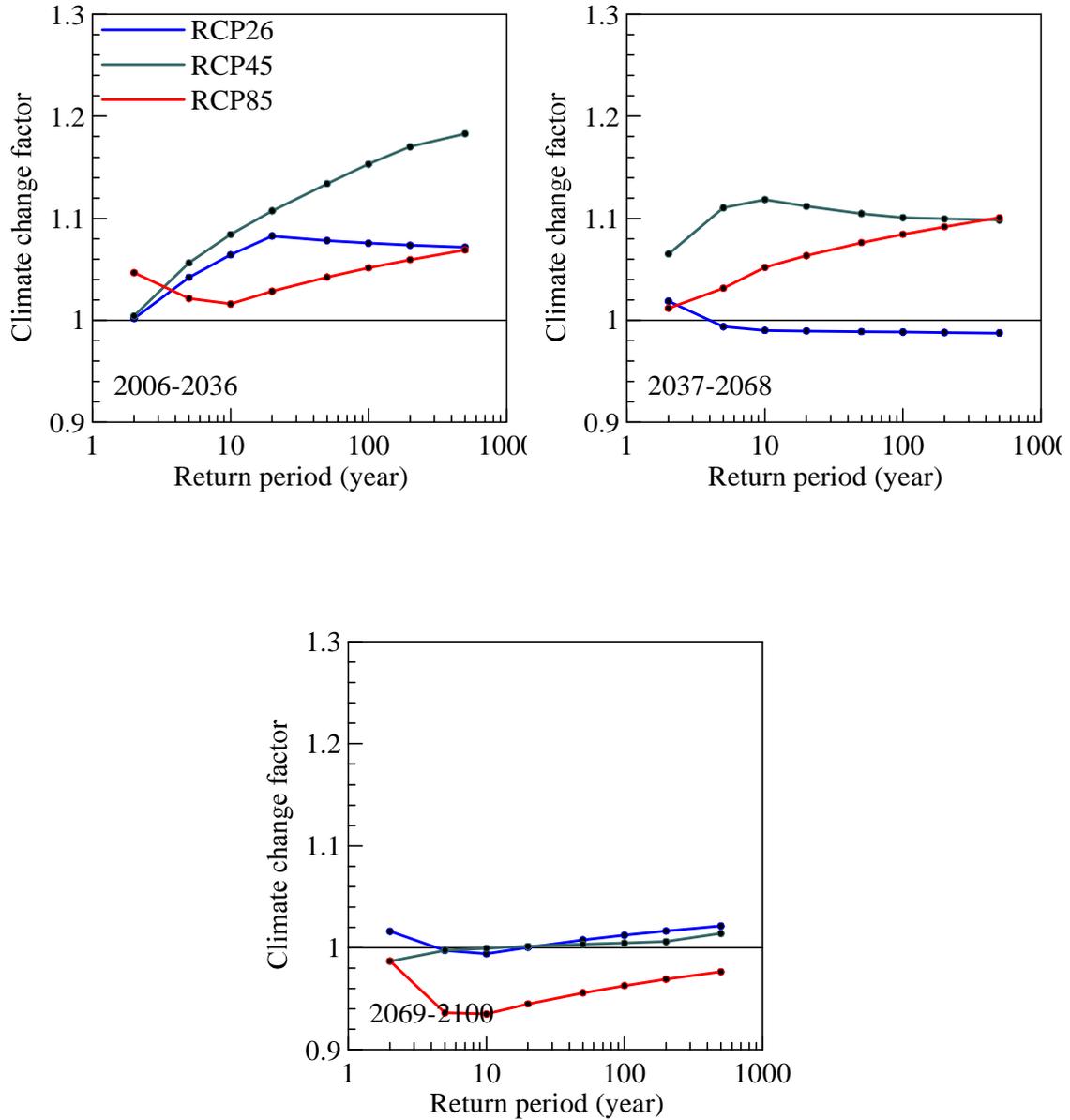
Factor climático anual y percentiles 10 y 90 para lluvia máxima en 24 horas. Estación Torrejón.

**FIGURA 49. FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA LLUVIA MÁXIMA ANUAL EN 24 HORAS. ESTACIÓN TP DE GETAFE. PERIODOS CLIMÁTICOS DEL SIGLO XXI**



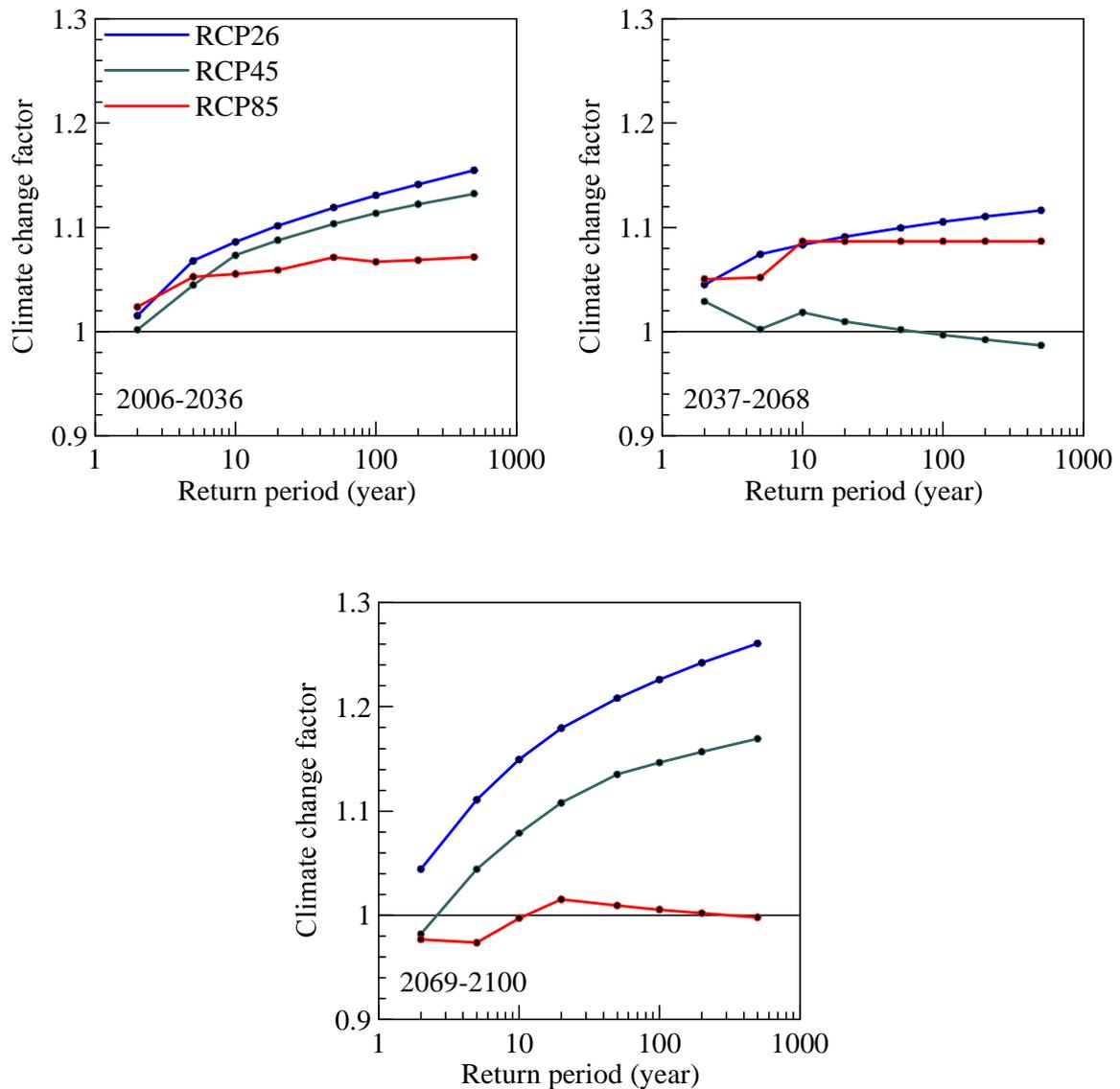
Factor de cambio climático para la lluvia máxima anual en 24 horas, estación TP de Getafe, para los tres periodos climáticos del siglo XXI. Se representa la mediana del conjunto de casos correspondientes a todos los modelos.

**FIGURA 50. FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA LLUVIA MÁXIMA ANUAL EN 24 HORAS. ESTACIÓN TP DE RETIRO. PERIODOS CLIMÁTICOS DEL SIGLO XXI**



Factor de cambio climático para la lluvia máxima anual en 24 horas, estación TP de Retiro, para los tres periodos climáticos del siglo XXI. Se representa la mediana del conjunto de casos correspondientes a todos los modelos.

**FIGURA 51. FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA LLUVIA MÁXIMA ANUAL EN 24 HORAS. ESTACIÓN TP DE TORREJÓN. PERIODOS CLIMÁTICOS DEL SIGLO XXI**



Factor de cambio climático para la lluvia máxima anual en 24 horas, estación TP de Torrejón, para los tres periodos climáticos del siglo XXI. Se representa la mediana del conjunto de casos correspondientes a todos los modelos.

El método empleado para obtener los valores de lluvia máxima anual correspondientes a 1 hora de duración y poder calcular posteriormente los correspondientes factores climáticos, consiste en aplicar la invariancia de escala característica de los procesos fractales para determinar el exponente de escala  $\beta$  de la función potencial que expresa la dependencia con la duración de la intensidad de lluvia máxima.

En la Tabla 17 se presentan los valores del exponente medio  $\beta$  para todos los escenarios y periodos considerados.

**TABLA 17. EXPONENTE DE ESCALA MEDIO ( $\beta$ ) PARA TODOS LOS PERIODOS Y ESCENARIOS**

<i>Getafe</i>	<i>Histórica</i>	<i>RCP 2.6</i>	<i>RCP 4.5</i>	<i>RCP 8.5</i>
<i>Histórica</i>	0,727			
<i>2006-2036</i>		0,757	0,763	0,747
<i>2037-2068</i>		0,766	0,773	0,758
<i>2069-2100</i>		0,824	0,754	0,733
<i>Retiro</i>	<i>Histórica</i>	<i>RCP 2.6</i>	<i>RCP 4.5</i>	<i>RCP 8.5</i>
<i>Histórica</i>	0,773			
<i>2006-2036</i>		0,781	0,775	0,778
<i>2037-2068</i>		0,77	0,787	0,764
<i>2069-2100</i>		0,767	0,792	0,778
<i>Torrejón</i>	<i>Histórica</i>	<i>RCP 2.6</i>	<i>RCP 4.5</i>	<i>RCP 8.5</i>
<i>Histórica</i>	0,762			
<i>2006-2036</i>		0,801	0,792	0,781
<i>2037-2068</i>		0,795	0,786	0,802
<i>2069-2100</i>		0,797	0,793	0,836

Haciendo uso de los valores del exponente  $\beta$  calculados, se han obtenido las intensidades máximas, para una duración de 1 hora, para cada uno de los periodos de retorno seleccionados.

Una vez calculada la intensidad horaria máxima anual para los periodos de retorno y los escenarios que se han considerado, incluido el periodo de control, se ha calculado el factor climático, para una duración de una hora, para todos casos estudiados.

En las tablas 18, 19 y 20, así como en las figuras 52, 53 y 54 siguientes se presentan los resultados para todos los escenarios y periodos climáticos.

**TABLA 18. FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO I (FC) PARA UNA DURACIÓN DE 1 HORA. ESTACIÓN TP DE GETAFE**

<i>Getafe</i>		<i>RCP 2.6</i>			<i>RCP 4.5</i>			<i>RCP 8.5</i>		
<i>T (años)</i>		<i>mediana</i>	<i>P10</i>	<i>P90</i>	<i>mediana</i>	<i>P10</i>	<i>P90</i>	<i>mediana</i>	<i>P10</i>	<i>P90</i>
<i>2006 - 2036</i>	<i>2</i>	1,10	0,95	1,36	1,17	0,92	1,32	1,06	0,91	1,36
	<i>5</i>	1,16	0,98	1,43	1,22	0,91	1,40	1,10	0,92	1,34
	<i>10</i>	1,22	1,00	1,49	1,24	0,91	1,44	1,12	0,93	1,32
	<i>20</i>	1,27	1,01	1,54	1,26	0,91	1,47	1,14	0,94	1,31
	<i>50</i>	1,30	1,03	1,59	1,27	0,91	1,52	1,17	0,94	1,33
	<i>100</i>	1,31	1,03	1,65	1,28	0,90	1,54	1,18	0,95	1,33
	<i>200</i>	1,32	1,03	1,72	1,29	0,90	1,57	1,20	0,95	1,34
	<i>500</i>	1,34	1,02	1,81	1,30	0,90	1,60	1,21	0,96	1,34
<i>2037 - 2068</i>	<i>2</i>	1,14	0,97	1,47	1,12	0,95	1,52	1,14	0,92	1,33
	<i>5</i>	1,13	0,99	1,45	1,12	0,96	1,27	1,19	0,93	1,36
	<i>10</i>	1,13	1,00	1,47	1,11	0,95	1,28	1,22	0,93	1,37
	<i>20</i>	1,13	1,01	1,49	1,12	0,95	1,29	1,25	0,93	1,38
	<i>50</i>	1,15	1,02	1,52	1,14	0,95	1,31	1,28	0,94	1,40
	<i>100</i>	1,15	1,03	1,54	1,15	0,94	1,33	1,29	0,94	1,41
	<i>200</i>	1,16	1,02	1,55	1,16	0,94	1,35	1,30	0,94	1,41
	<i>500</i>	1,17	1,01	1,57	1,16	0,94	1,36	1,30	0,94	1,42
<i>2069- 2100</i>	<i>2</i>	1,25	1,03	1,40	1,13	0,95	1,36	1,16	0,97	1,42
	<i>5</i>	1,35	1,05	1,44	1,14	0,97	1,39	1,18	1,00	1,49
	<i>10</i>	1,40	1,06	1,47	1,14	0,95	1,47	1,20	0,99	1,51
	<i>20</i>	1,43	1,07	1,52	1,15	0,94	1,48	1,21	0,98	1,53
	<i>50</i>	1,45	1,08	1,57	1,15	0,92	1,50	1,22	0,96	1,55
	<i>100</i>	1,47	1,08	1,61	1,17	0,91	1,51	1,23	0,96	1,56
	<i>200</i>	1,49	1,09	1,65	1,19	0,90	1,51	1,24	0,95	1,58
	<i>500</i>	1,50	1,10	1,69	1,22	0,89	1,53	1,25	0,94	1,60

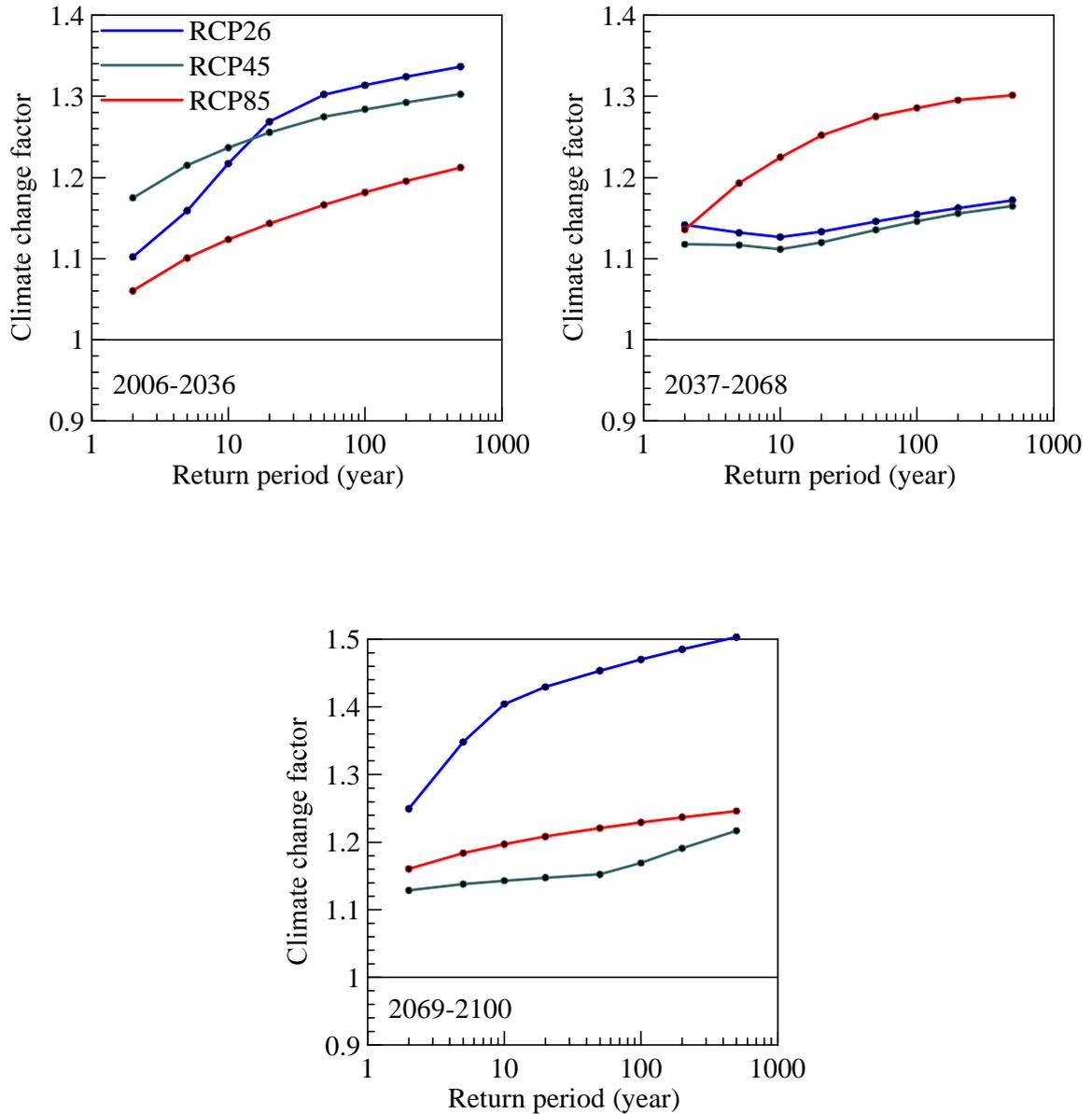
**TABLA 19. FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO I (FC) PARA UNA DURACIÓN DE 1 HORA. ESTACIÓN TP DE RETIRO**

<b>Retiro</b>		<b>RCP 2.6</b>			<b>RCP 4.5</b>			<b>RCP 8.5</b>		
<b>T (años)</b>		<i>mediana</i>	<i>P10</i>	<i>P90</i>	<i>mediana</i>	<i>P10</i>	<i>P90</i>	<i>mediana</i>	<i>P10</i>	<i>P90</i>
<b>2006 - 2036</b>	<b>2</b>	1,18	0,92	1,25	1,10	0,82	1,42	1,07	0,92	1,34
	<b>5</b>	1,18	0,91	1,30	1,17	0,71	1,60	1,09	0,90	1,52
	<b>10</b>	1,19	0,90	1,33	1,20	0,66	1,73	1,09	0,89	1,61
	<b>20</b>	1,20	0,90	1,36	1,23	0,63	1,85	1,08	0,88	1,69
	<b>50</b>	1,22	0,90	1,39	1,26	0,60	1,97	1,10	0,87	1,77
	<b>100</b>	1,23	0,90	1,41	1,29	0,58	2,06	1,11	0,87	1,83
	<b>200</b>	1,23	0,89	1,43	1,30	0,56	2,13	1,12	0,86	1,88
	<b>500</b>	1,24	0,89	1,45	1,33	0,55	2,22	1,13	0,86	1,94
<b>2037 - 2068</b>	<b>2</b>	1,04	0,92	1,24	1,16	0,93	1,25	1,07	0,83	1,18
	<b>5</b>	1,05	0,85	1,31	1,20	0,95	1,41	1,09	0,76	1,23
	<b>10</b>	1,06	0,83	1,36	1,20	0,93	1,45	1,10	0,73	1,27
	<b>20</b>	1,07	0,81	1,40	1,20	0,93	1,48	1,11	0,70	1,31
	<b>50</b>	1,07	0,79	1,44	1,20	0,92	1,52	1,12	0,68	1,35
	<b>100</b>	1,08	0,77	1,47	1,19	0,91	1,54	1,13	0,66	1,38
	<b>200</b>	1,08	0,76	1,50	1,19	0,90	1,57	1,13	0,65	1,40
	<b>500</b>	1,09	0,75	1,53	1,19	0,90	1,59	1,14	0,64	1,43
<b>2069- 2100</b>	<b>2</b>	1,04	0,86	1,44	1,01	0,75	1,36	1,00	0,90	1,39
	<b>5</b>	1,05	0,72	1,53	1,01	0,73	1,63	1,04	0,85	1,49
	<b>10</b>	1,06	0,67	1,57	1,01	0,72	1,74	1,06	0,83	1,54
	<b>20</b>	1,06	0,64	1,61	1,01	0,71	1,84	1,08	0,81	1,58
	<b>50</b>	1,07	0,63	1,65	1,01	0,70	1,94	1,10	0,78	1,62
	<b>100</b>	1,07	0,62	1,69	1,01	0,69	2,01	1,12	0,77	1,65
	<b>200</b>	1,08	0,61	1,74	1,01	0,69	2,07	1,13	0,76	1,67
	<b>500</b>	1,08	0,60	1,79	1,02	0,68	2,14	1,14	0,74	1,70

**TABLA 20. FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO I (FC) PARA UNA DURACIÓN DE 1 HORA. ESTACIÓN TP DE TORREJÓN**

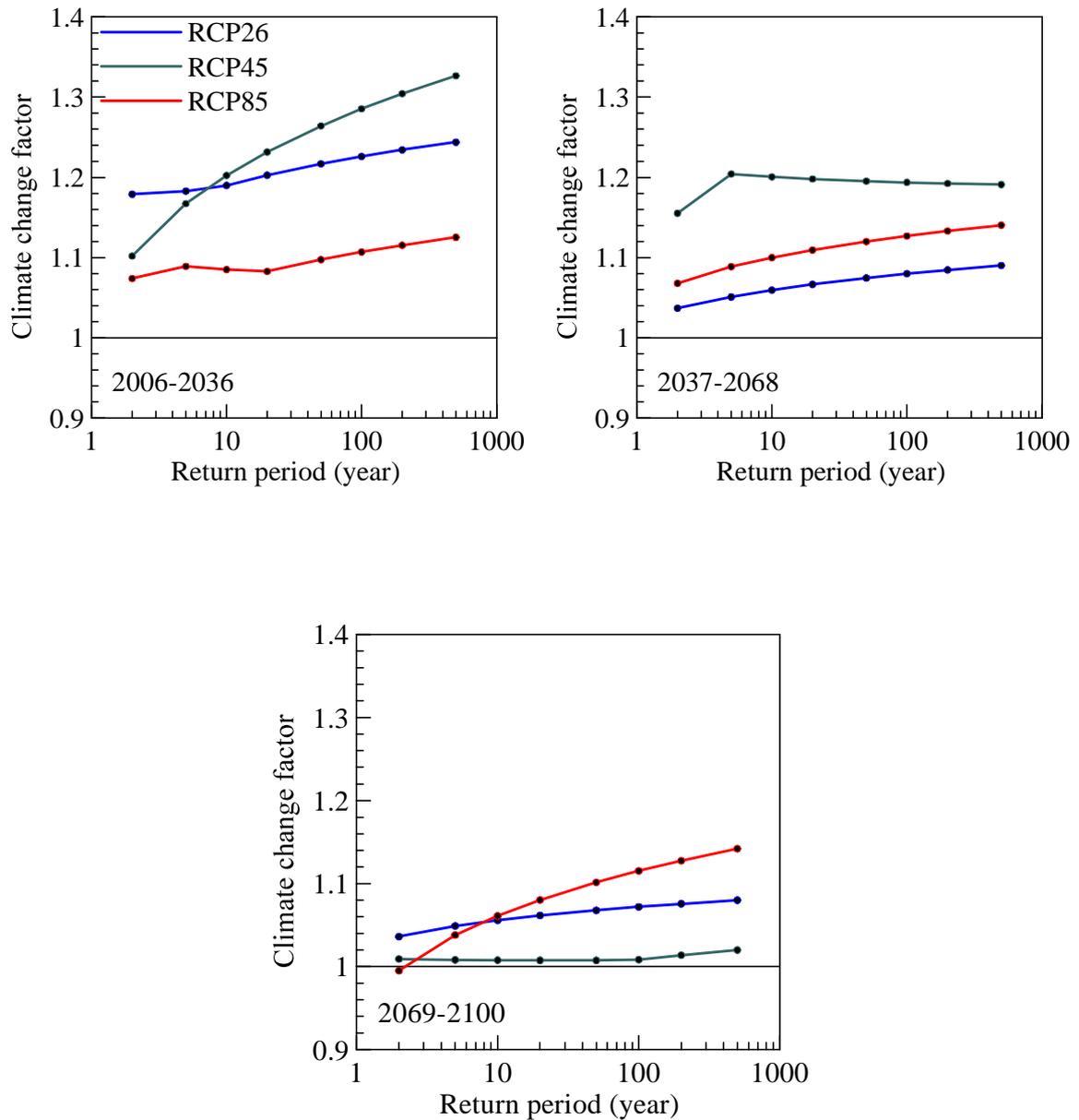
<b>Torrejón</b>		<b>RCP 2.6</b>			<b>RCP 4.5</b>			<b>RCP 8.5</b>		
<b>T (años)</b>		<i>mediana</i>	<i>P10</i>	<i>P90</i>	<i>mediana</i>	<i>P10</i>	<i>P90</i>	<i>mediana</i>	<i>P10</i>	<i>P90</i>
<b>2006 - 2036</b>	2	1,15	1,00	1,35	1,13	0,95	1,35	1,09	1,00	1,23
	5	1,19	1,06	1,42	1,16	0,87	1,43	1,09	1,03	1,23
	10	1,21	1,06	1,45	1,17	0,83	1,47	1,10	1,04	1,23
	20	1,24	1,06	1,48	1,20	0,80	1,51	1,10	1,07	1,23
	50	1,27	1,06	1,51	1,21	0,78	1,55	1,11	1,06	1,23
	100	1,28	1,06	1,53	1,22	0,77	1,58	1,13	1,06	1,23
	200	1,30	1,06	1,55	1,22	0,77	1,60	1,14	1,05	1,24
	500	1,32	1,06	1,57	1,23	0,76	1,63	1,15	1,05	1,27
<b>2037 - 2068</b>	2	1,15	0,92	1,45	1,11	1,00	1,20	1,11	0,97	1,68
	5	1,17	0,91	1,53	1,06	1,03	1,23	1,22	0,91	1,75
	10	1,18	0,91	1,56	1,05	1,01	1,24	1,29	0,88	1,78
	20	1,18	0,90	1,60	1,06	1,02	1,26	1,33	0,85	1,80
	50	1,19	0,90	1,63	1,07	1,00	1,27	1,33	0,84	1,83
	100	1,20	0,89	1,66	1,08	0,99	1,28	1,33	0,83	1,85
	200	1,20	0,89	1,68	1,07	0,98	1,29	1,33	0,83	1,86
	500	1,21	0,89	1,70	1,07	0,97	1,30	1,33	0,82	1,88
<b>2069- 2100</b>	2	1,22	0,97	1,30	1,08	0,96	1,37	1,12	0,88	1,36
	5	1,27	0,98	1,39	1,11	0,96	1,43	1,12	0,88	1,37
	10	1,30	0,99	1,45	1,13	0,94	1,45	1,13	0,87	1,38
	20	1,33	1,00	1,50	1,15	0,92	1,48	1,16	0,87	1,39
	50	1,36	1,01	1,55	1,16	0,91	1,50	1,18	0,87	1,40
	100	1,38	1,02	1,59	1,18	0,89	1,52	1,19	0,86	1,40
	200	1,40	1,02	1,62	1,19	0,88	1,54	1,21	0,85	1,41
	500	1,42	1,02	1,66	1,20	0,87	1,56	1,21	0,85	1,43

**FIGURA 52** FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA LLUVIA HORARIA MÁXIMA ANUAL. ESTACIÓN TP DE GETAFE. PERIODOS CLIMÁTICOS DEL SIGLO XXI



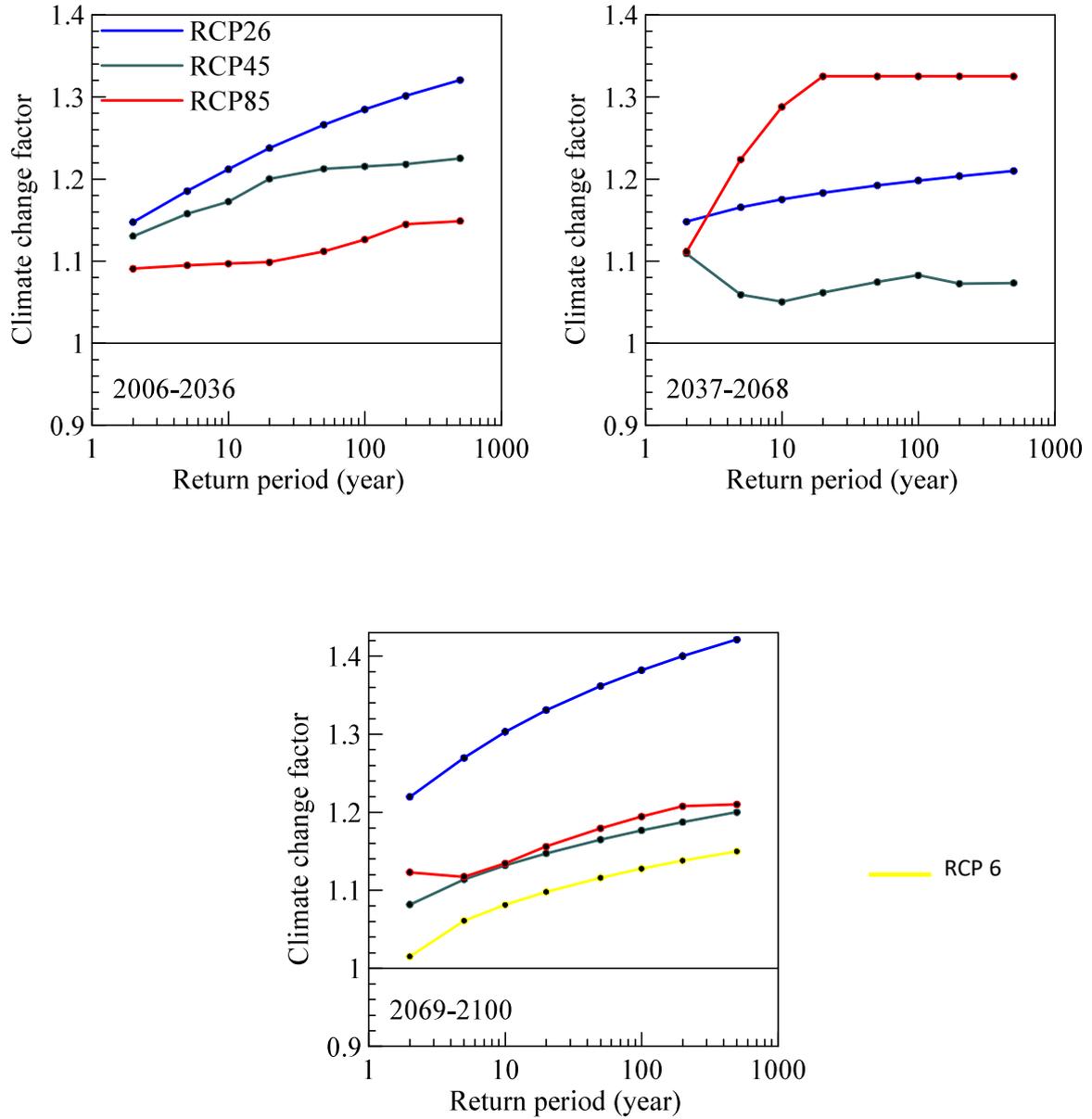
Factor de cambio climático para la lluvia horaria máxima anual correspondiente a la estación TP de Getafe, para los tres periodos climáticos del siglo XXI. Se representa la mediana del conjunto de casos correspondientes a todos los modelos.

**FIGURA 53. FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA LLUVIA HORARIA MÁXIMA ANUAL. ESTACIÓN TP DE RETIRO. PERIODOS CLIMÁTICOS DEL SIGLO XXI**



Factor de cambio climático para la lluvia horaria máxima anual correspondiente a la estación TP de Retiro, para los tres periodos climáticos del siglo XXI. Se representa la mediana del conjunto de casos correspondientes a todos los modelos.

**FIGURA 54. FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA LLUVIA HORARIA MÁXIMA ANUAL. ESTACIÓN TP DE TORREJÓN. PERIODOS CLIMÁTICOS DEL SIGLO XXI**



Factor de cambio climático para la lluvia horaria máxima anual correspondiente a la estación TP de Torrejón, para los tres periodos climáticos del siglo XXI. Se representa la mediana del conjunto de casos correspondientes a todos los modelos. La gráfica inferior contiene, además, un valor adicional (línea amarilla) correspondiente al RCP 6.0.

## 2.6. FACTORES CLIMÁTICOS EN FUNCIÓN DE LA ESTACIÓN DEL AÑO

En este apartado se presenta el valor del FC obtenido para cada una de las cuatro estaciones del año (primavera, verano, otoño e invierno). Se ha calculado, para cada escenario, la mediana de los casos correspondientes a todos los modelos y las tres estaciones TP. La dispersión de los resultados se ha cuantificado a partir de los percentiles 90 y 10 del conjunto de casos. En las tablas 21 a 24 se presentan, para las cuatro estaciones del año, los resultados obtenidos para los cuatro escenarios de cambio climático considerados y los periodos climáticos analizados.

**TABLA 21. FACTOR CLIMÁTICO Y PERCENTILES 10 Y 90 PARA LLUVIA MÁXIMA EN 24 HORAS. PRIMAVERA**

Primavera		RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 6.0			RCP 8.5		
T (años)		mediana	P10	P90									
2006 - 2036	2	1,00	0,88	1,08	1,01	0,92	1,12	1,05	0,94	1,13	0,99	0,93	1,12
	5	0,95	0,82	1,19	1,02	0,83	1,20	1,06	0,90	1,17	1,03	0,92	1,28
	10	0,94	0,81	1,24	1,03	0,79	1,26	1,06	0,85	1,26	1,07	0,91	1,37
	20	0,96	0,75	1,29	1,00	0,74	1,32	1,06	0,80	1,35	1,08	0,87	1,47
	50	0,98	0,71	1,33	0,98	0,72	1,37	1,07	0,78	1,41	1,08	0,85	1,53
	100	1,00	0,68	1,36	0,98	0,69	1,41	1,06	0,75	1,47	1,09	0,83	1,58
	200	1,00	0,66	1,38	0,99	0,67	1,44	1,06	0,74	1,52	1,09	0,81	1,63
	500	1,00	0,63	1,42	1,03	0,65	1,48	1,06	0,71	1,58	1,10	0,79	1,68
2037 - 2068	2	1,04	0,89	1,13	1,02	0,86	1,10	1,04	0,95	1,10	1,02	0,94	1,11
	5	1,02	0,82	1,17	1,04	0,92	1,18	1,10	0,87	1,21	1,02	0,91	1,19
	10	1,03	0,79	1,22	1,06	0,88	1,23	1,09	0,82	1,29	1,02	0,87	1,24
	20	1,02	0,73	1,30	1,07	0,88	1,32	1,09	0,78	1,38	1,03	0,86	1,28
	50	1,04	0,70	1,36	1,07	0,86	1,37	1,09	0,76	1,44	1,04	0,84	1,30
	100	1,04	0,68	1,40	1,06	0,84	1,42	1,09	0,74	1,49	1,04	0,83	1,32
	200	1,05	0,65	1,43	1,06	0,82	1,47	1,09	0,73	1,54	1,05	0,81	1,33
	500	1,06	0,63	1,49	1,07	0,81	1,51	1,09	0,71	1,59	1,05	0,79	1,35
2069 - 2100	2	0,98	0,90	1,12	0,98	0,88	1,11	0,98	0,89	1,11	0,96	0,86	1,06
	5	1,01	0,89	1,19	0,96	0,81	1,13	0,96	0,82	1,10	0,99	0,84	1,07
	10	1,02	0,85	1,24	0,98	0,74	1,16	0,98	0,79	1,12	0,99	0,83	1,17
	20	1,02	0,83	1,30	0,97	0,72	1,20	0,99	0,75	1,16	0,99	0,80	1,23
	50	1,02	0,81	1,35	0,96	0,72	1,22	0,98	0,73	1,19	0,98	0,77	1,27
	100	1,02	0,79	1,42	0,95	0,72	1,25	0,97	0,72	1,21	0,98	0,75	1,30
	200	1,02	0,78	1,47	0,94	0,72	1,28	0,98	0,70	1,23	0,98	0,74	1,32
	500	1,02	0,76	1,53	0,94	0,70	1,30	0,98	0,68	1,26	0,98	0,72	1,36

TABLA 22. FACTOR CLIMÁTICO Y PERCENTILES 10 Y 90 PARA LLUVIA MÁXIMA EN 24 HORAS. VERANO

Verano		RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 6.0			RCP 8.5		
T (años)		mediana	P10	P90									
2006 - 2036	2	0,98	0,85	1,16	0,98	0,83	1,18	1,01	0,89	1,13	1,00	0,83	1,14
	5	1,00	0,79	1,20	0,97	0,77	1,20	1,00	0,89	1,07	0,99	0,83	1,12
	10	1,02	0,77	1,22	0,96	0,73	1,21	0,98	0,90	1,04	1,01	0,79	1,14
	20	1,04	0,77	1,26	0,95	0,70	1,22	0,95	0,89	1,07	1,02	0,77	1,17
	50	1,04	0,77	1,30	0,94	0,69	1,23	0,95	0,89	1,09	1,02	0,75	1,19
	100	1,04	0,75	1,33	0,94	0,69	1,23	0,95	0,89	1,10	1,01	0,73	1,20
	200	1,03	0,74	1,36	0,94	0,68	1,24	0,94	0,88	1,12	1,01	0,71	1,21
	500	1,03	0,73	1,38	0,93	0,67	1,25	0,93	0,86	1,13	1,01	0,69	1,23
2037 - 2068	2	1,00	0,85	1,08	0,98	0,78	1,12	1,07	0,95	1,27	1,03	0,79	1,21
	5	0,99	0,84	1,10	0,98	0,83	1,16	1,10	0,88	1,30	1,01	0,83	1,24
	10	0,99	0,86	1,11	0,99	0,79	1,17	1,10	0,85	1,30	1,02	0,92	1,26
	20	0,98	0,87	1,13	1,02	0,76	1,20	1,05	0,82	1,32	1,05	0,91	1,29
	50	0,97	0,87	1,14	1,02	0,74	1,22	1,05	0,81	1,34	1,05	0,88	1,30
	100	0,97	0,86	1,15	1,02	0,73	1,23	1,06	0,80	1,36	1,05	0,85	1,32
	200	0,97	0,85	1,17	1,02	0,71	1,24	1,07	0,79	1,37	1,05	0,83	1,33
	500	0,97	0,85	1,18	1,01	0,70	1,26	1,08	0,77	1,39	1,05	0,83	1,34
2069- 2100	2	0,99	0,84	1,15	1,01	0,89	1,25	0,99	0,87	1,14	1,09	0,92	1,33
	5	0,99	0,82	1,19	0,98	0,89	1,26	0,99	0,80	1,19	1,05	0,90	1,28
	10	0,95	0,82	1,29	1,00	0,86	1,27	1,02	0,75	1,23	1,07	0,88	1,26
	20	0,95	0,81	1,30	1,00	0,83	1,28	1,04	0,70	1,33	1,06	0,85	1,26
	50	0,95	0,80	1,31	1,00	0,83	1,28	1,05	0,68	1,37	1,06	0,83	1,25
	100	0,95	0,80	1,33	1,01	0,81	1,28	1,07	0,66	1,39	1,06	0,80	1,24
	200	0,95	0,79	1,35	1,01	0,80	1,27	1,08	0,64	1,41	1,06	0,78	1,26
	500	0,94	0,78	1,38	0,99	0,78	1,27	1,09	0,62	1,43	1,04	0,75	1,27

TABLA 23. FACTOR CLIMÁTICO Y PERCENTILES 10 Y 90 PARA LLUVIA MÁXIMA EN 24 HORAS. OTOÑO

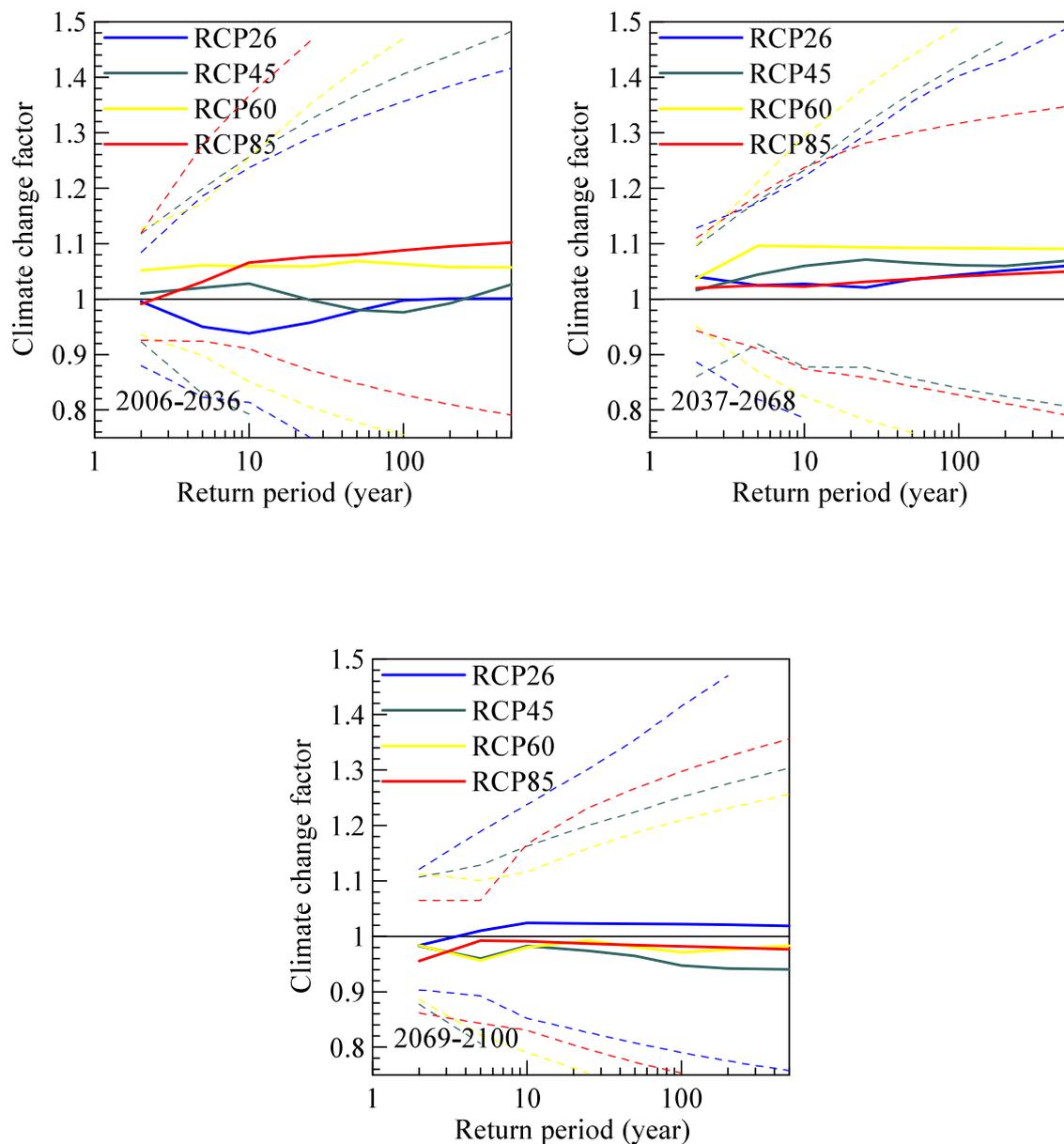
Otoño		RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 6.0			RCP 8.5		
T (años)		mediana	P10	P90									
2006 - 2036	2	0,95	0,89	1,07	0,97	0,91	1,04	1,01	0,86	1,06	0,99	0,91	1,05
	5	0,99	0,87	1,07	1,00	0,91	1,11	1,02	0,94	1,08	0,99	0,91	1,13
	10	1,00	0,85	1,07	1,00	0,92	1,15	1,01	0,95	1,13	0,99	0,90	1,19
	20	1,02	0,83	1,10	1,01	0,91	1,23	1,04	0,95	1,20	1,01	0,89	1,23
	50	1,04	0,82	1,12	1,01	0,91	1,28	1,06	0,94	1,22	1,00	0,88	1,25
	100	1,04	0,81	1,14	1,02	0,90	1,32	1,06	0,94	1,24	1,00	0,87	1,27
	200	1,04	0,80	1,16	1,02	0,89	1,36	1,07	0,94	1,26	1,00	0,86	1,29
	500	1,04	0,79	1,18	1,03	0,88	1,40	1,08	0,93	1,29	1,00	0,85	1,32
2037 - 2068	2	1,01	0,93	1,05	0,97	0,87	1,06	0,97	0,87	1,10	0,95	0,90	1,08
	5	1,01	0,93	1,07	0,98	0,90	1,11	1,02	0,82	1,13	0,97	0,90	1,10
	10	1,01	0,91	1,09	1,00	0,89	1,14	1,04	0,79	1,15	0,98	0,90	1,11
	20	1,02	0,89	1,12	1,02	0,87	1,17	1,06	0,76	1,17	0,99	0,89	1,13
	50	1,03	0,88	1,14	1,04	0,86	1,19	1,07	0,75	1,18	0,99	0,89	1,16
	100	1,03	0,87	1,15	1,05	0,86	1,21	1,09	0,73	1,20	0,99	0,88	1,18
	200	1,03	0,86	1,17	1,06	0,85	1,23	1,10	0,72	1,21	0,99	0,88	1,19
	500	1,04	0,85	1,18	1,06	0,84	1,25	1,11	0,70	1,23	0,99	0,87	1,21
2069- 2100	2	1,00	0,87	1,12	0,99	0,90	1,08	0,98	0,88	1,08	0,96	0,82	1,04
	5	1,04	0,89	1,12	1,02	0,91	1,11	1,00	0,89	1,13	0,96	0,81	1,08
	10	1,06	0,92	1,16	1,03	0,92	1,13	1,01	0,90	1,14	0,96	0,85	1,12
	20	1,06	0,94	1,22	1,04	0,92	1,18	1,02	0,90	1,17	0,96	0,85	1,14
	50	1,07	0,94	1,25	1,05	0,92	1,21	1,03	0,90	1,18	0,99	0,85	1,16
	100	1,08	0,93	1,28	1,05	0,91	1,23	1,03	0,90	1,20	0,99	0,84	1,18
	200	1,09	0,92	1,31	1,06	0,90	1,24	1,03	0,90	1,21	0,99	0,84	1,19
	500	1,09	0,92	1,35	1,07	0,89	1,26	1,03	0,90	1,23	0,98	0,83	1,21

**TABLA 24. FACTOR CLIMÁTICO Y PERCENTILES 10 Y 90 PARA LLUVIA MÁXIMA EN 24 HORAS. INVIERNO**

<i>Invierno</i>		<i>RCP 2.6</i>			<i>RCP 4.5</i>			<i>RCP 6.0</i>			<i>RCP 8.5</i>		
<i>T (años)</i>		<i>mediana</i>	<i>P10</i>	<i>P90</i>									
<b>2006 - 2036</b>	<b>2</b>	1,02	0,88	1,25	1,02	0,95	1,35	1,00	0,87	1,13	1,02	0,89	1,16
	<b>5</b>	1,01	0,89	1,28	1,01	0,89	1,34	1,04	0,86	1,25	1,02	0,86	1,18
	<b>10</b>	1,03	0,82	1,31	1,02	0,86	1,38	1,04	0,81	1,32	1,07	0,79	1,22
	<b>20</b>	1,03	0,76	1,36	1,03	0,80	1,42	1,05	0,76	1,39	1,05	0,76	1,25
	<b>50</b>	1,02	0,74	1,39	1,03	0,77	1,42	1,05	0,73	1,44	1,06	0,73	1,30
	<b>100</b>	1,02	0,73	1,41	1,01	0,74	1,43	1,05	0,71	1,49	1,07	0,71	1,34
	<b>200</b>	1,02	0,72	1,45	1,01	0,72	1,43	1,05	0,70	1,54	1,08	0,69	1,36
	<b>500</b>	1,03	0,70	1,50	1,01	0,70	1,45	1,05	0,69	1,60	1,08	0,67	1,39
<b>2037 - 2068</b>	<b>2</b>	1,00	0,90	1,27	1,05	0,85	1,16	1,00	0,94	1,19	1,03	0,91	1,32
	<b>5</b>	0,98	0,88	1,24	1,01	0,80	1,13	1,07	0,85	1,22	1,05	0,89	1,18
	<b>10</b>	0,97	0,84	1,26	1,01	0,83	1,14	1,07	0,80	1,26	1,04	0,85	1,24
	<b>20</b>	0,97	0,80	1,31	1,02	0,79	1,19	1,05	0,76	1,34	1,03	0,80	1,30
	<b>50</b>	0,97	0,78	1,36	1,02	0,76	1,22	1,05	0,74	1,39	1,02	0,76	1,33
	<b>100</b>	0,97	0,77	1,39	1,01	0,73	1,24	1,04	0,72	1,44	1,01	0,73	1,36
	<b>200</b>	0,97	0,76	1,41	1,00	0,70	1,26	1,04	0,71	1,49	1,00	0,70	1,39
	<b>500</b>	0,97	0,75	1,44	0,99	0,68	1,28	1,03	0,69	1,54	1,00	0,68	1,43
<b>2069- 2100</b>	<b>2</b>	1,05	0,93	1,21	1,02	0,90	1,19	0,97	0,85	1,12	1,02	0,89	1,26
	<b>5</b>	1,04	0,88	1,24	1,03	0,85	1,17	0,99	0,85	1,10	1,01	0,83	1,22
	<b>10</b>	1,01	0,85	1,31	1,01	0,82	1,23	1,02	0,83	1,14	1,03	0,81	1,21
	<b>20</b>	1,00	0,79	1,37	1,00	0,79	1,27	1,00	0,80	1,19	1,03	0,75	1,22
	<b>50</b>	1,00	0,76	1,40	1,00	0,75	1,30	0,98	0,79	1,24	1,03	0,72	1,23
	<b>100</b>	1,00	0,74	1,44	0,99	0,73	1,32	0,97	0,78	1,30	1,05	0,69	1,25
	<b>200</b>	1,00	0,72	1,47	0,99	0,70	1,34	0,98	0,77	1,35	1,05	0,66	1,28
	<b>500</b>	1,00	0,71	1,51	0,99	0,68	1,36	0,99	0,75	1,42	1,06	0,63	1,32

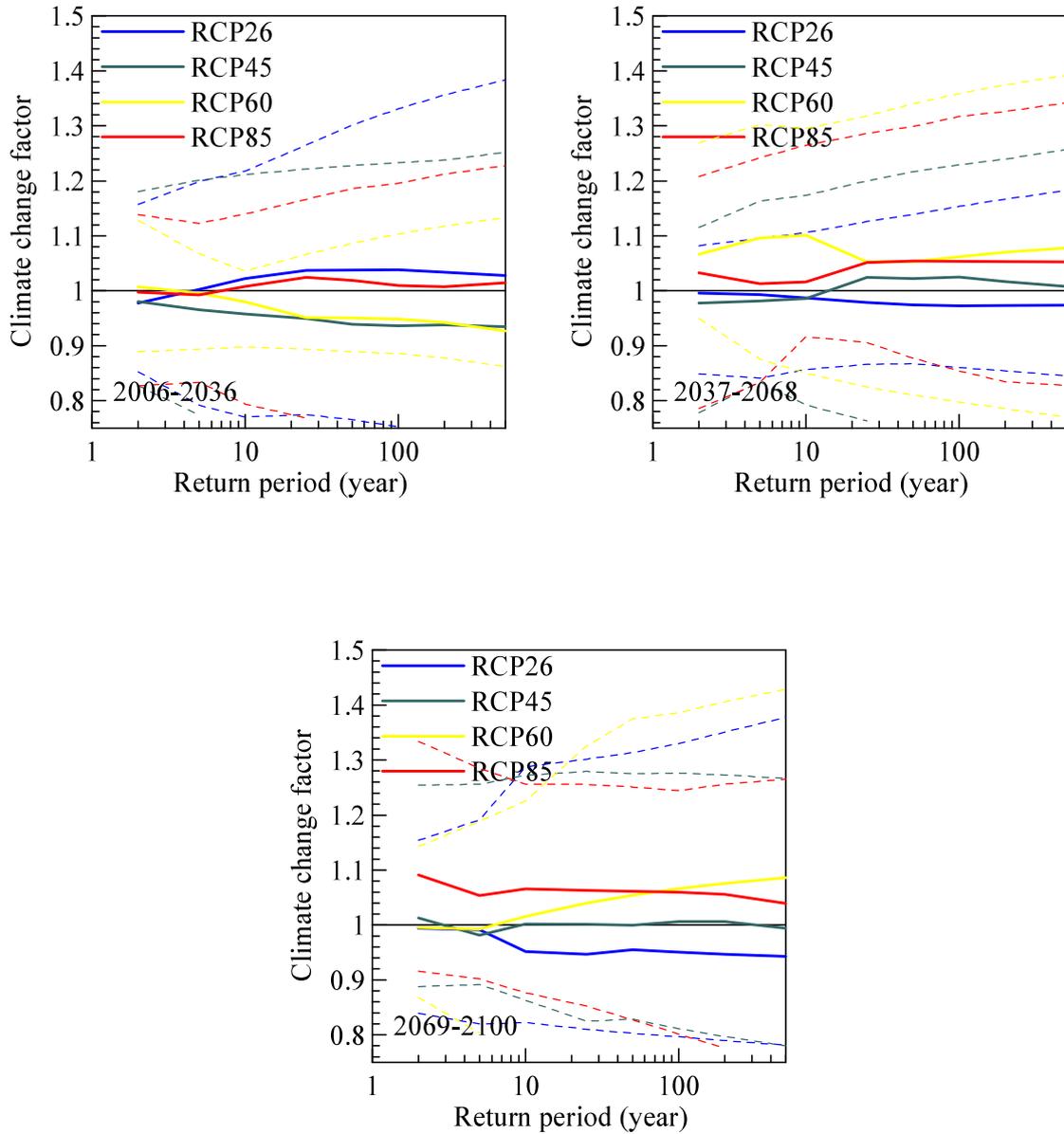
En las figuras 55 a 58 se representan gráficamente las medianas y el percentil superior P90, e inferior P10, de los factores de cambio climático (FC), para los cuatro escenarios de cambio climático que se han contemplado en el estudio, agrupados en los periodos 2006-2036, 2037-2068 y 2069-2100, así como para las cuatro estaciones del año.

**FIGURA 55. FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA LLUVIA MÁXIMA EN 24 HORAS. PRIMAVERA, TRES PERIODOS CLIMÁTICOS DEL SIGLO XXI**



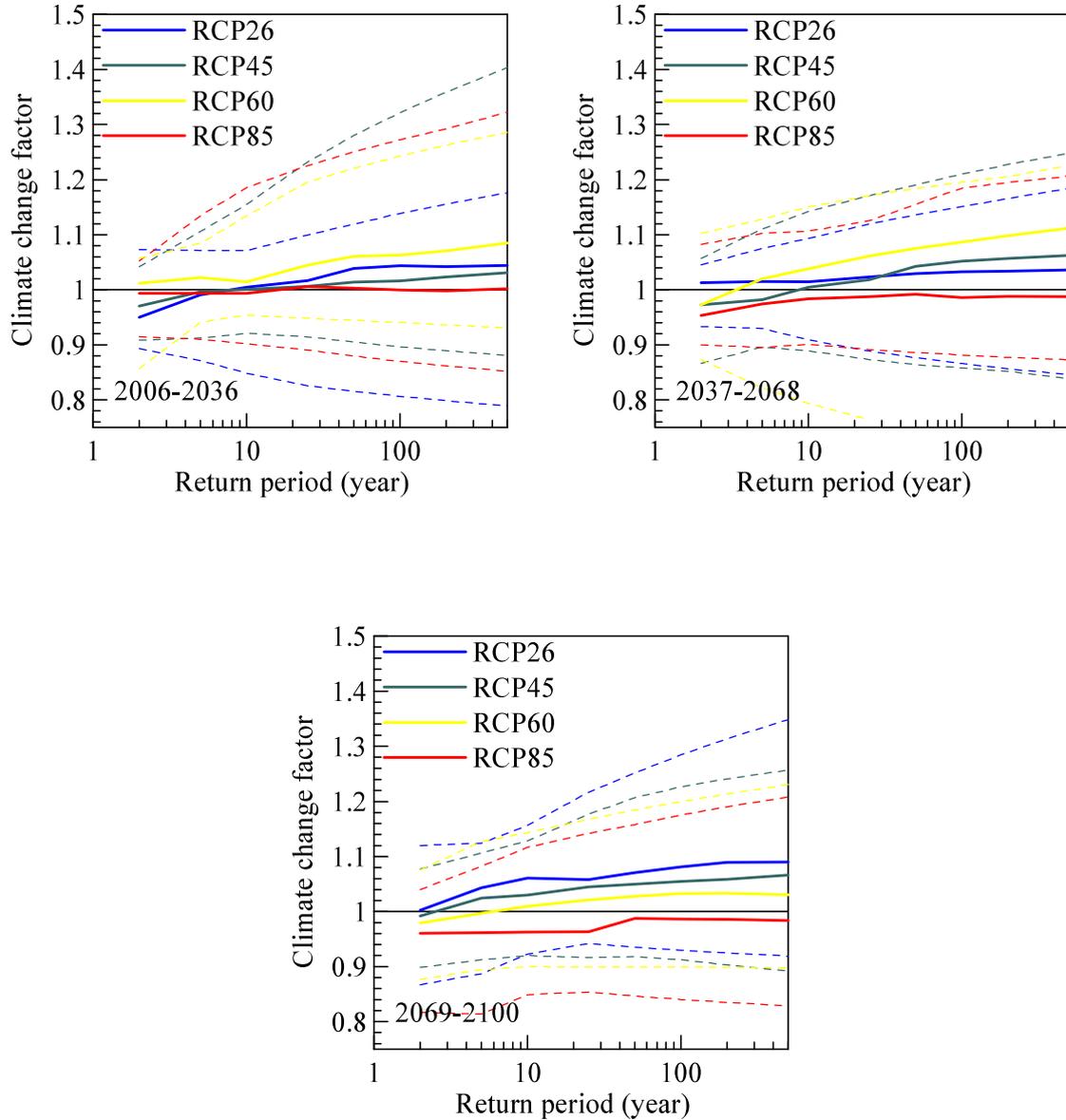
Factor de cambio climático para la lluvia máxima en 24 horas, correspondiente a primavera, para los tres periodos climáticos del siglo XXI. Se representa la mediana del conjunto de casos correspondiente a todos los modelos y las tres estaciones TP (línea continua), así como los percentiles: superior P90, e inferior P10 (líneas discontinuas).

**FIGURA 56. FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA LLUVIA MÁXIMA EN 24 HORAS. VERANO  
TRES PERIODOS CLIMÁTICOS DEL SIGLO XXI**



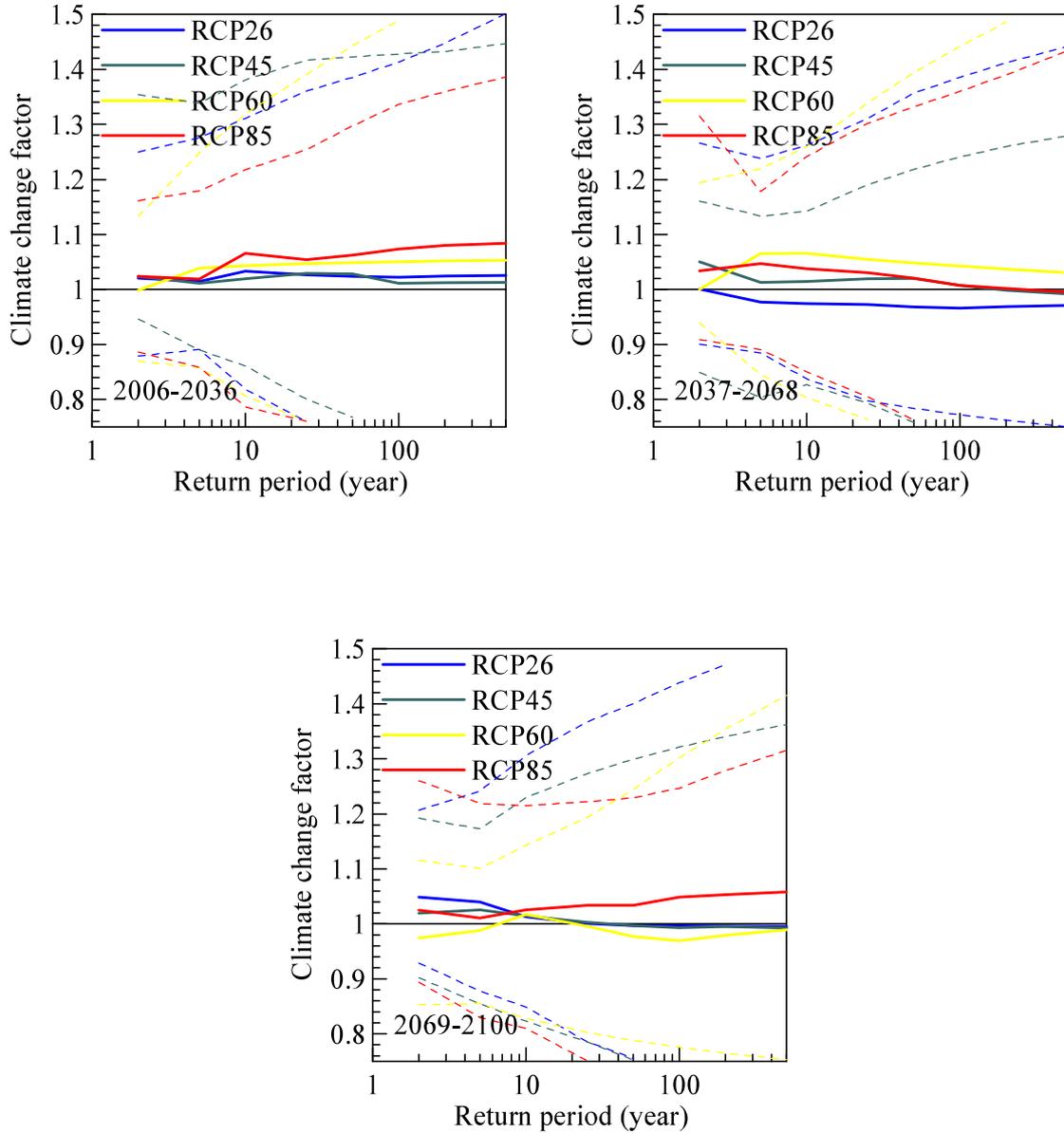
Factor de cambio climático para la lluvia máxima en 24 horas, correspondiente a verano, para los tres periodos climáticos del siglo XXI. Se representa la mediana del conjunto de casos correspondiente a todos los modelos y las tres estaciones TP (línea continua) y los percentiles: superior P90 e inferior P10 (líneas discontinuas).

**FIGURA 57. FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA LLUVIA MÁXIMA EN 24 HORAS. OTOÑO, TRES PERIODOS CLIMÁTICOS DEL SIGLO XXI**



Factor de cambio climático para la lluvia máxima en 24 horas, correspondiente a otoño, para los tres periodos climáticos del siglo XXI. Se representa la mediana del conjunto de casos correspondiente a todos los modelos y las tres estaciones TP (línea continua) y los percentiles: superior P90 e inferior P10 (líneas discontinuas).

**FIGURA 58. FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA LLUVIA MÁXIMA EN 24 HORAS. INVIERNO, TRES PERIODOS CLIMÁTICOS DEL SIGLO XXI**



Factor de cambio climático para la lluvia máxima en 24 horas, correspondiente a invierno, para los tres periodos climáticos del siglo XXI. Se representa la mediana del conjunto de casos correspondiente a todos los modelos y las tres estaciones TP (línea continua) y los percentiles: superior P90 e inferior P10 (líneas discontinuas).

El método empleado para obtener las intensidades horarias, a partir de los datos de lluvia diaria, consiste en aplicar la invariancia de escala característica de los procesos fractales para determinar el exponente de escala  $\beta$  de la función potencial que expresa la dependencia con la duración de la intensidad de lluvia máxima.

En la Tabla 25 se presentan los valores del exponente medio  $\beta$  para todos los escenarios y periodos considerados.

**TABLA 25. EXPONENTE DE ESCALA MEDIO ( $\beta$ ) PARA TODOS LOS PERIODOS Y ESCENARIOS**

<b>PRIMAVERA</b>	<b>Histórica</b>	<b>RCP 2.6</b>	<b>RCP 4.5</b>	<b>RCP 6.0</b>	<b>RCP 8.5</b>
<i>Histórica</i>	0,776				
<i>2006-2036</i>		0,791	0,779	0,792	0,801
<i>2037-2068</i>		0,796	0,807	0,799	0,794
<i>2069-2100</i>		0,796	0,793	0,797	0,803
<b>VERANO</b>	<b>Histórica</b>	<b>RCP 2.6</b>	<b>RCP 4.5</b>	<b>RCP 6.0</b>	<b>RCP 8.5</b>
<i>Histórica</i>	0,856				
<i>2006-2036</i>		0,878	0,843	0,847	0,847
<i>2037-2068</i>		0,888	0,859	0,869	0,847
<i>2069-2100</i>		0,881	0,869	0,875	0,869
<b>OTOÑO</b>	<b>Histórica</b>	<b>RCP 2.6</b>	<b>RCP 4.5</b>	<b>RCP 6.0</b>	<b>RCP 8.5</b>
<i>Histórica</i>	0,7				
<i>2006-2036</i>		0,714	0,724	0,732	0,71
<i>2037-2068</i>		0,721	0,727	0,726	0,715
<i>2069-2100</i>		0,726	0,719	0,732	0,729
<b>INVIERNO</b>	<b>Histórica</b>	<b>RCP 2.6</b>	<b>RCP 4.5</b>	<b>RCP 6.0</b>	<b>RCP 8.5</b>
<i>Histórica</i>	0,74				
<i>2006-2036</i>		0,743	0,746	0,737	0,722
<i>2037-2068</i>		0,738	0,725	0,739	0,745
<i>2069-2100</i>		0,753	0,737	0,747	0,734

A partir de la ecuación (5), y haciendo uso de los valores del exponente  $\beta$  calculados, se han obtenido las intensidades máximas, para una duración de 1 hora y para los distintos periodos de retorno seleccionados.

Una vez calculada la intensidad horaria máxima para los periodos de retorno y los escenarios que se han considerado, incluido el periodo de control, se ha calculado, utilizando la ecuación (2), el factor climático para una duración de 1 hora, para todos casos estudiados. En las tablas 26 a 29 se presentan los resultados para todos los escenarios y periodos climáticos considerados.

TABLA 26. FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO (FC) PARA DURACIÓN DE 1 HORA. PRIMAVERA

Primavera		RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 6.0			RCP 8.5		
T (años)		mediana	P10	P90									
2006-2036	2	0,99	0,79	1,34	1,04	0,75	1,29	1,13	0,87	1,39	1,10	0,90	1,29
	5	0,94	0,75	1,47	1,04	0,75	1,33	1,12	0,80	1,59	1,16	0,87	1,51
	10	0,98	0,74	1,53	1,04	0,70	1,39	1,11	0,76	1,71	1,19	0,85	1,67
	20	0,98	0,70	1,59	1,03	0,67	1,45	1,11	0,73	1,82	1,21	0,82	1,76
	50	1,01	0,65	1,65	1,04	0,63	1,52	1,10	0,69	1,93	1,22	0,80	1,86
	100	1,03	0,62	1,68	1,03	0,60	1,56	1,10	0,67	2,01	1,23	0,78	1,92
	200	1,02	0,60	1,72	1,05	0,58	1,60	1,09	0,66	2,08	1,24	0,77	1,98
	500	1,02	0,58	1,76	1,06	0,56	1,64	1,09	0,64	2,16	1,25	0,75	2,05
22037-2068	2	1,09	0,80	1,38	1,09	0,84	1,41	1,09	0,86	1,34	1,05	0,95	1,27
	5	1,05	0,74	1,50	1,09	0,82	1,55	1,17	0,78	1,54	1,05	0,91	1,32
	10	1,10	0,69	1,59	1,09	0,80	1,64	1,17	0,73	1,65	1,07	0,88	1,38
	20	1,11	0,65	1,66	1,09	0,78	1,72	1,17	0,70	1,74	1,09	0,85	1,42
	25	1,12	0,64	1,68	1,09	0,77	1,74	1,17	0,69	1,76	1,08	0,84	1,44
	50	1,13	0,62	1,75	1,12	0,76	1,81	1,17	0,66	1,84	1,06	0,81	1,47
	100	1,13	0,59	1,80	1,15	0,75	1,86	1,16	0,64	1,91	1,07	0,79	1,51
	200	1,13	0,58	1,85	1,16	0,74	1,91	1,16	0,62	1,97	1,07	0,78	1,54
500	1,13	0,55	1,91	1,16	0,73	1,97	1,16	0,60	2,04	1,08	0,76	1,57	
2069-2100	2	1,03	0,82	1,36	1,05	0,85	1,25	1,00	0,88	1,23	1,03	0,87	1,26
	5	1,04	0,78	1,51	1,05	0,73	1,38	1,01	0,76	1,18	1,07	0,78	1,35
	10	1,04	0,75	1,61	1,05	0,71	1,40	1,02	0,72	1,19	1,06	0,76	1,39
	20	1,08	0,73	1,61	1,04	0,71	1,46	1,03	0,70	1,22	1,07	0,72	1,43
	25	1,09	0,72	1,61	1,04	0,71	1,47	1,04	0,69	1,23	1,07	0,72	1,45
	50	1,10	0,69	1,62	1,04	0,71	1,51	1,04	0,67	1,26	1,08	0,70	1,50
	100	1,10	0,67	1,63	1,03	0,70	1,55	1,05	0,65	1,28	1,08	0,69	1,54
	200	1,10	0,66	1,63	1,03	0,68	1,58	1,06	0,64	1,31	1,08	0,68	1,58
500	1,11	0,64	1,64	1,02	0,67	1,61	1,06	0,63	1,33	1,08	0,67	1,62	

TABLA 27. FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO (FC) PARA DURACIÓN DE 1 HORA. VERANO

Verano		RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 6.0			RCP 8.5		
T (años)		mediana	P10	P90									
2006 - 2036	2	1,07	0,72	1,51	0,94	0,63	1,45	0,96	0,82	1,39	0,99	0,64	1,35
	5	1,11	0,65	1,56	0,92	0,61	1,43	1,06	0,82	1,35	1,01	0,63	1,38
	10	1,10	0,61	1,58	0,91	0,59	1,42	1,04	0,78	1,34	0,97	0,58	1,37
	20	1,11	0,61	1,60	0,90	0,57	1,43	1,02	0,76	1,33	1,01	0,55	1,39
	50	1,10	0,60	1,64	0,88	0,56	1,43	1,01	0,73	1,32	1,03	0,53	1,41
	100	1,10	0,60	1,66	0,87	0,57	1,43	0,99	0,72	1,31	1,01	0,51	1,42
	200	1,10	0,60	1,68	0,87	0,56	1,43	0,98	0,71	1,31	1,00	0,50	1,42
	500	1,11	0,60	1,72	0,86	0,55	1,43	0,97	0,69	1,30	0,98	0,48	1,43
2037 - 2068	2	1,12	0,85	1,34	1,01	0,68	1,31	1,16	0,90	1,74	0,97	0,73	1,28
	5	1,11	0,80	1,38	1,02	0,67	1,38	1,11	0,87	1,73	0,95	0,80	1,31
	10	1,11	0,84	1,40	0,98	0,68	1,41	1,10	0,84	1,88	0,94	0,79	1,33
	20	1,12	0,87	1,43	0,96	0,66	1,44	1,09	0,82	1,91	0,95	0,79	1,34
	50	1,12	0,88	1,46	0,94	0,64	1,46	1,11	0,80	1,93	0,96	0,78	1,35
	100	1,13	0,89	1,48	0,94	0,63	1,48	1,10	0,79	1,95	0,97	0,77	1,35
	200	1,13	0,89	1,50	0,93	0,62	1,49	1,10	0,77	1,97	0,98	0,77	1,36
	500	1,13	0,89	1,53	0,94	0,61	1,51	1,09	0,75	1,99	0,99	0,75	1,36
2069- 2100	2	1,07	0,80	1,31	1,07	0,77	1,59	1,05	0,82	1,64	1,21	0,80	1,51
	5	1,08	0,79	1,46	1,07	0,76	1,61	1,11	0,77	1,70	1,10	0,78	1,51
	10	1,06	0,82	1,90	1,03	0,75	1,60	1,14	0,74	1,73	1,06	0,75	1,52
	20	1,05	0,81	1,98	1,01	0,73	1,62	1,16	0,71	1,76	1,06	0,71	1,55
	50	1,03	0,80	1,99	1,01	0,71	1,63	1,18	0,67	1,83	1,05	0,67	1,57
	100	1,02	0,79	2,00	0,99	0,70	1,63	1,20	0,65	1,85	1,08	0,65	1,56
	200	1,01	0,78	2,01	0,97	0,69	1,63	1,21	0,63	1,85	1,11	0,63	1,55
	500	1,01	0,77	2,02	0,98	0,69	1,63	1,22	0,60	1,85	1,15	0,60	1,54

TABLA 28. FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO (FC) PARA DURACIÓN DE 1 HORA. OTOÑO

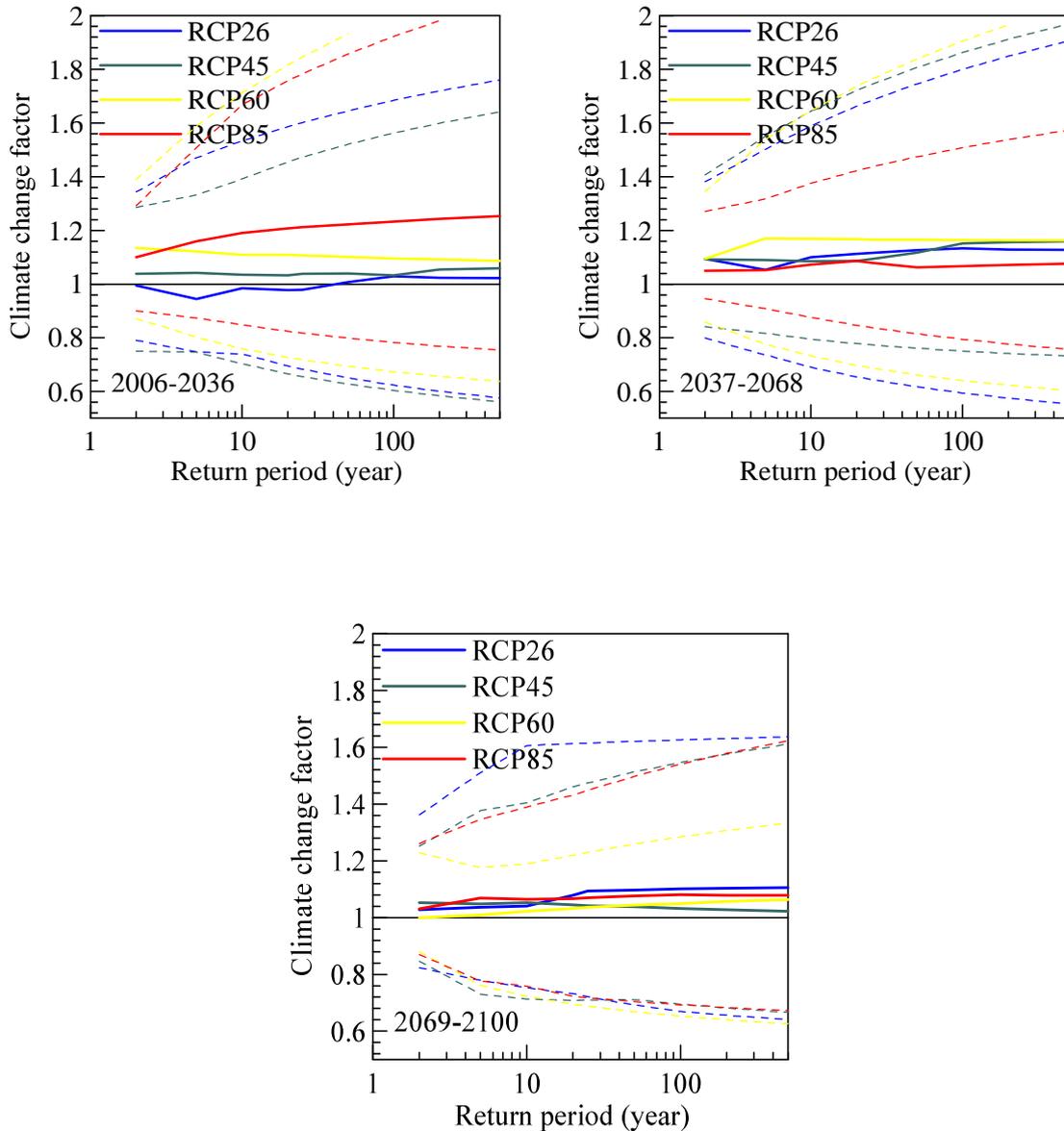
Otoño		RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 6.0			RCP 8.5		
T (años)		mediana	P10	P90									
2006 - 2036	2	1,01	0,84	1,27	1,02	0,88	1,33	1,09	0,86	1,25	1,00	0,87	1,22
	5	1,05	0,83	1,29	1,05	0,88	1,33	1,10	0,89	1,35	1,01	0,85	1,25
	10	1,06	0,84	1,30	1,08	0,87	1,34	1,10	0,89	1,41	1,00	0,84	1,30
	20	1,06	0,84	1,30	1,08	0,86	1,38	1,11	0,88	1,46	1,01	0,83	1,33
	50	1,07	0,85	1,31	1,09	0,86	1,42	1,11	0,87	1,53	1,02	0,82	1,36
	100	1,08	0,85	1,31	1,10	0,87	1,45	1,11	0,86	1,57	1,02	0,81	1,38
	200	1,08	0,86	1,32	1,11	0,87	1,47	1,12	0,87	1,61	1,02	0,80	1,41
	500	1,09	0,85	1,33	1,11	0,87	1,51	1,12	0,87	1,65	1,02	0,80	1,43
2037 - 2068	2	1,03	0,94	1,26	1,07	0,91	1,21	1,00	0,85	1,34	1,04	0,83	1,17
	5	1,08	0,93	1,25	1,07	0,97	1,27	1,06	0,84	1,40	1,04	0,83	1,24
	10	1,10	0,92	1,27	1,08	0,99	1,28	1,09	0,82	1,43	1,05	0,83	1,27
	20	1,11	0,90	1,30	1,09	0,98	1,30	1,12	0,80	1,45	1,04	0,83	1,30
	50	1,12	0,89	1,32	1,09	0,96	1,34	1,14	0,78	1,47	1,04	0,83	1,33
	100	1,13	0,88	1,34	1,09	0,94	1,37	1,15	0,76	1,49	1,05	0,83	1,36
	200	1,12	0,87	1,36	1,11	0,93	1,39	1,16	0,74	1,50	1,05	0,83	1,37
	500	1,11	0,86	1,40	1,12	0,91	1,41	1,18	0,73	1,52	1,05	0,83	1,40
2069- 2100	2	1,11	0,86	1,32	1,06	0,87	1,24	1,03	0,90	1,31	1,03	0,84	1,18
	5	1,15	0,87	1,37	1,10	0,88	1,31	1,06	0,90	1,32	1,06	0,87	1,22
	10	1,16	0,88	1,39	1,11	0,88	1,36	1,07	0,90	1,34	1,09	0,87	1,26
	20	1,19	0,88	1,42	1,11	0,88	1,40	1,08	0,89	1,36	1,09	0,86	1,28
	50	1,20	0,88	1,44	1,13	0,87	1,44	1,08	0,89	1,38	1,09	0,86	1,29
	100	1,20	0,88	1,45	1,14	0,87	1,47	1,09	0,89	1,40	1,09	0,86	1,32
	200	1,20	0,88	1,47	1,15	0,86	1,49	1,09	0,89	1,41	1,09	0,86	1,35
	500	1,20	0,88	1,51	1,17	0,85	1,51	1,10	0,89	1,42	1,09	0,85	1,37

TABLA 29. FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO (FC) PARA DURACIÓN DE 1 HORA. INVIERNO

Invierno		RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 6.0			RCP 8.5		
T (años)		mediana	P10	P90									
2006 - 2036	2	1,07	0,79	1,49	1,12	0,83	1,46	0,94	0,72	1,31	1,03	0,70	1,28
	5	1,13	0,74	1,51	1,08	0,75	1,56	1,06	0,65	1,45	1,08	0,60	1,31
	10	1,13	0,71	1,54	1,01	0,72	1,60	1,13	0,63	1,51	1,08	0,56	1,36
	20	1,13	0,69	1,59	0,98	0,69	1,64	1,16	0,61	1,56	1,08	0,54	1,40
	50	1,13	0,66	1,61	1,02	0,67	1,69	1,16	0,59	1,62	1,08	0,51	1,44
	100	1,13	0,65	1,64	1,05	0,65	1,72	1,16	0,57	1,66	1,08	0,49	1,47
	200	1,13	0,64	1,68	1,07	0,64	1,74	1,16	0,56	1,69	1,07	0,48	1,50
	500	1,13	0,62	1,74	1,09	0,62	1,77	1,16	0,55	1,73	1,07	0,47	1,53
2037 - 2068	2	1,04	0,77	1,39	1,02	0,70	1,33	1,13	0,69	1,41	1,05	0,87	1,40
	5	1,04	0,75	1,49	1,00	0,63	1,26	1,15	0,62	1,54	1,06	0,75	1,62
	10	1,03	0,75	1,59	1,01	0,59	1,26	1,17	0,60	1,64	1,07	0,68	1,73
	20	1,02	0,74	1,67	1,00	0,57	1,26	1,17	0,58	1,72	1,09	0,65	1,82
	50	1,00	0,73	1,72	1,01	0,54	1,30	1,18	0,56	1,82	1,10	0,61	1,92
	100	0,99	0,73	1,75	1,01	0,52	1,35	1,19	0,54	1,89	1,11	0,59	1,99
	200	0,99	0,72	1,78	1,02	0,51	1,38	1,20	0,53	1,95	1,12	0,58	2,04
	500	0,99	0,71	1,81	1,02	0,49	1,41	1,20	0,52	2,02	1,13	0,56	2,11
2069- 2100	2	1,04	0,83	1,34	1,02	0,77	1,26	1,02	0,82	1,28	1,05	0,75	1,34
	5	1,12	0,72	1,38	1,03	0,68	1,51	1,07	0,78	1,38	1,05	0,71	1,36
	10	1,14	0,68	1,47	1,04	0,63	1,54	1,10	0,74	1,42	1,07	0,68	1,39
	20	1,15	0,65	1,58	1,03	0,60	1,56	1,12	0,72	1,49	1,07	0,64	1,44
	50	1,15	0,62	1,71	1,04	0,57	1,58	1,14	0,69	1,59	1,07	0,61	1,49
	100	1,14	0,60	1,80	1,05	0,55	1,59	1,15	0,68	1,67	1,09	0,58	1,52
	200	1,14	0,59	1,86	1,04	0,54	1,60	1,16	0,66	1,74	1,10	0,56	1,54
	500	1,13	0,57	1,91	1,03	0,52	1,61	1,17	0,65	1,82	1,10	0,54	1,56

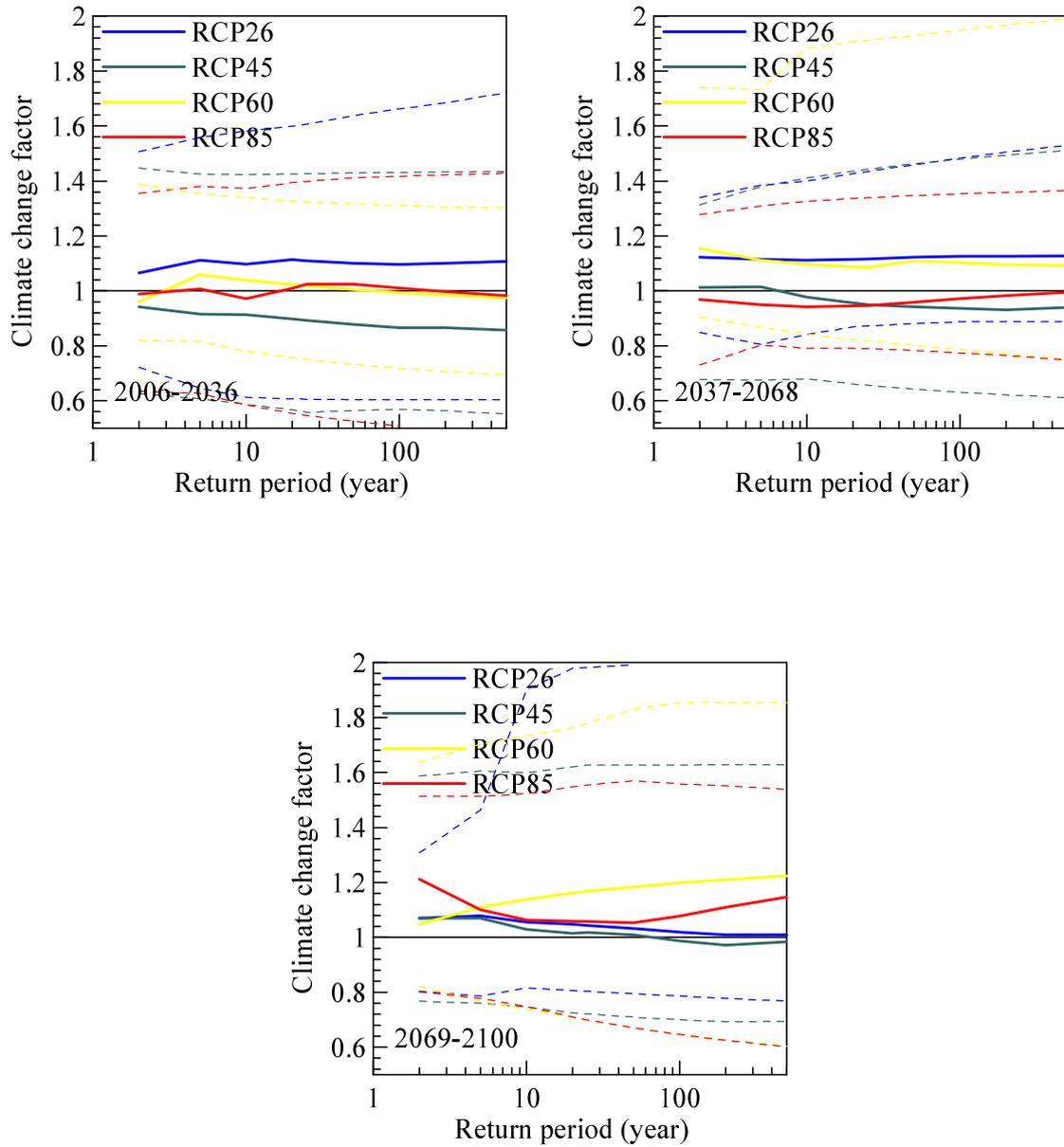
En las figuras 59 a 62 se representan, para cada estación del año, la mediana del factor climático para la duración de 1 hora y el percentil superior P90, e inferior P10, para los cuatro escenarios de cambio climático contemplados (RCP 2.6 – RCP 4.5 – RCP 6.0 – RCP 8.5), agrupados en los periodos climáticos 2006-2036, 2037-2068 y 2069-2100.

**FIGURA 59. FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA DURACIÓN DE 1 HORA. PRIMAVERA**



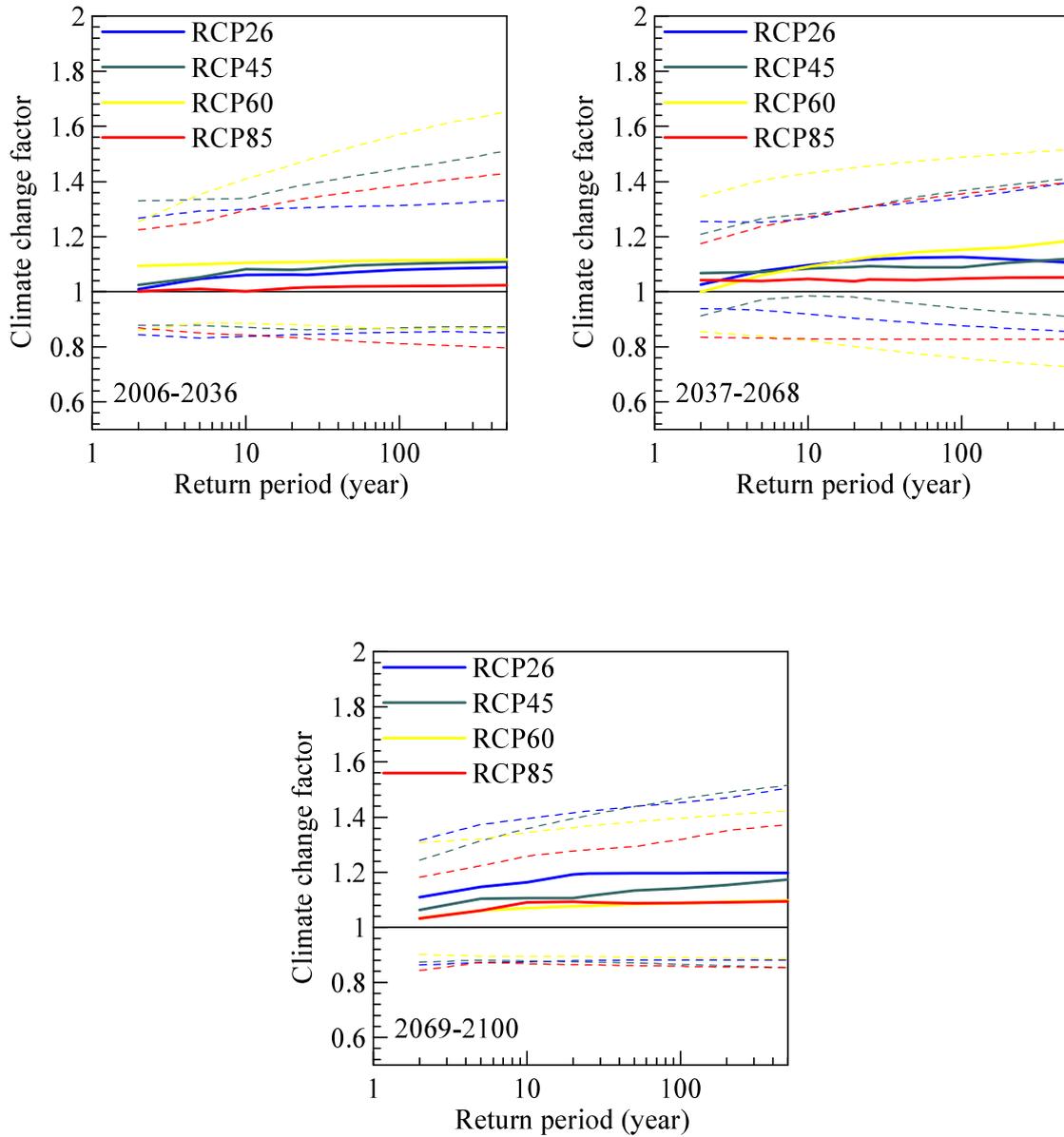
Factor de cambio climático para la duración de 1 hora, en primavera, obtenido para tres periodos climáticos del siglo XXI. Se representa la mediana del conjunto de casos correspondientes a todos los modelos y las tres estaciones TP (líneas continuas) y los percentiles, superior P90, e inferior P10 (líneas discontinuas).

**FIGURA 60. FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA DURACIÓN DE 1 HORA. VERANO**



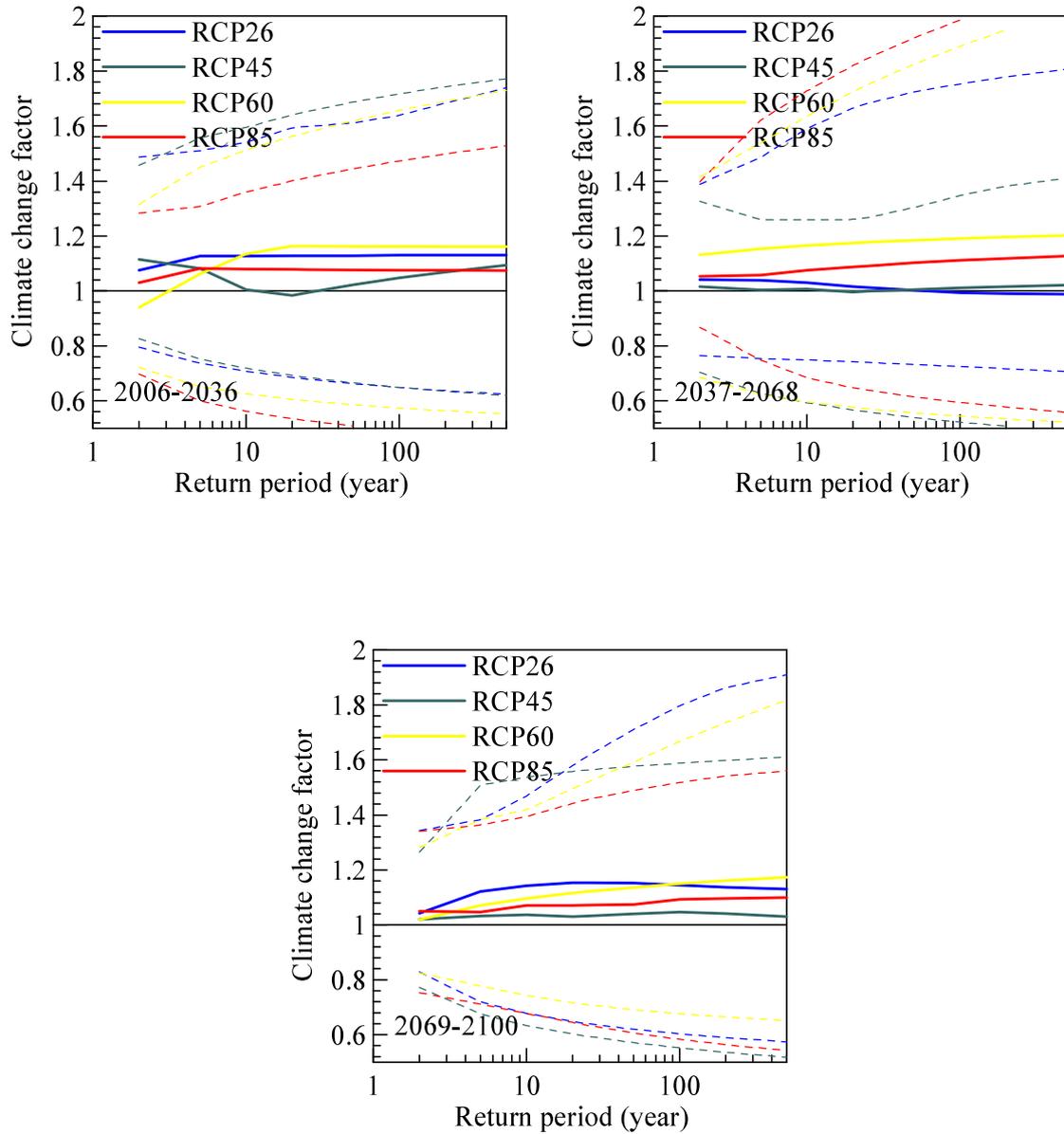
Factor de cambio climático para la duración de 1 hora, en verano, obtenido para tres periodos climáticos del siglo XXI. Se representa la mediana del conjunto de casos correspondientes a todos los modelos y las tres estaciones TP (líneas continuas) y los percentiles, superior P90, e inferior P10 (líneas discontinuas).

FIGURA 61. FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA DURACIÓN DE 1 HORA. OTOÑO



Factor de cambio climático para la duración de 1 hora, en otoño, obtenido para tres periodos climáticos del siglo XXI. Se representa la mediana del conjunto de casos correspondientes a todos los modelos y las tres estaciones TP (líneas continuas) y los percentiles, superior P90, e inferior P10 (líneas discontinuas).

**FIGURA 62. FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA DURACIÓN DE 1 HORA. INVIERNO**



Factor de cambio climático para la duración de 1 hora, en invierno, obtenido para tres periodos climáticos del siglo XXI. Se representa la mediana del conjunto de casos correspondientes a todos los modelos y las tres estaciones TP (líneas continuas) y los percentiles, superior P90, e inferior P10 (líneas discontinuas).

### 3. Conclusiones



Del estudio realizado sobre los escenarios de cambio climático aplicables a la Comunidad de Madrid se extraen las conclusiones que se resumen en este capítulo.

1. Del análisis de las series de lluvia diaria máxima anual obtenidas a partir de las series de lluvia diaria simuladas por la FIC se debe destacar, en primer lugar, la gran variabilidad que presentan en función del modelo de circulación general utilizado y la estación TP de referencia.

En la Figura 63 se puede observar la variabilidad de los casos correspondientes al escenario **RCP 2.6** para un período de retorno de 10 años, se encuentran variaciones que van, desde un 18% de disminución, a un 21% de aumento en la intensidad de precipitación diaria. Mientras que, para un período de retorno de 50 años las variaciones van de una disminución del 24%, a un aumento del 38%.

Se ha encontrado que el 33% de las series tienen puntos que se pueden considerar “*outliers*” a una distancia de la media mayor que  $3\sigma$ .

Hay 5 casos en que ha aparecido un punto a más de  $5\sigma$  de la media, se han descartado esas series para que no distorsionen los valores esperados de la intensidad extrema.

En la Tabla 30 se pueden ver los “*outliers*” detectados.

**TABLA 30. OBSERVATORIOS Y OUTLIERS DETECTADOS**

<i>Código Observatorio</i>	<i>Observatorio</i>	<i>Modelo</i>	<i>Escenario</i>	<i>Periodo</i>
3200	Getafe	CNRM-CM5	RCP 2.6	2075
23200	Getafe	NorESM1	RCP 2.6	2080
3195	Retiro	MPI-ESM-MR	RCP 4.5	2074
3200	Getafe	HADGEM2-CC	RCP 4.5	2007
3200	Getafe	MIROC-ESM-CHEM	RCP 4.5	2043

2. Teniendo en cuenta la gran variabilidad que se observa, es conveniente promediar el máximo número de casos para disminuir la incertidumbre de los resultados.

Cuando se promedian las tres estaciones TP:

- 24 casos le corresponden al escenario RCP 2.6
- 27 casos al RCP 4.5
- 15 casos al RCP 6.0 y
- 27 casos al escenario RCP 8.5.

Cuando se analizan las estaciones TP por separado:

- sólo se promedian 8 casos correspondientes al escenario RCP 2.6.
- 9 casos al RCP 4.5
- 5 casos al RCP 6.0 y
- 9 casos al escenario RCP 8.5.

Los resultados obtenidos en el escenario RCP 6.0, al analizar las estaciones termo pluviométricas TP por separado, son muy poco fiables, por lo que no se consideran en este estudio.

3. El factor climático, calculado para la lluvia máxima en 24 horas, es mayor que 1 en el 66% de los casos estudiados, para un periodo de retorno de 10 años, y mayor que 1,05 en el 51% de los casos.
4. Al analizar los FC calculados para la precipitación horaria a partir del **Downscaling** realizado mediante el análisis fractal se debe resaltar que el factor climático es mayor que 1 en el 75% de los casos estudiados, para el mismo periodo de retorno de 10 años y supera el 1,1 en el 57% del total de casos.
5. Para T = 10 años, el FC en 24 horas promedio de las tres estaciones TP tiene un valor de 1,06 – 1,07 para la mayoría de escenarios y periodos climáticos, con las siguientes excepciones: escenario RCP 4.5 (1,03); y escenario RCP 8.5 (1,01), (segundo y tercer tercio del siglo XXI, respectivamente, ver Tabla 31).

**TABLA 31. VALOR DE FC EN 24 HORAS PROMEDIO DE LAS TRES ESTACIONES (T=10 AÑOS)**

<i>Periodo observado</i>	<i>RCP 2.6</i>	<i>RCP 4.5</i>	<i>RCP 8.5</i>
2006-2036	1,07	1,07	1,06
2037-2068	1,06	1,03	1,06
2069-2100	1,06	1,07	1,01

6. Para T = 10 años, el FC en 1 hora tiene un valor promedio de 1,15 en el primer tercio del siglo XXI; 1,13 en el segundo tercio y 1,18 en el tercer tercio, ver Tabla 32.

**TABLA 32. VALOR DE FC EN 1 HORA PROMEDIO DE LAS TRES ESTACIONES (T=10 AÑOS)**

<i>Periodo observado</i>	<i>RCP 2.6</i>	<i>RCP 4.5</i>	<i>RCP 8.5</i>
2006-2036	1,17	1,20	1,10
2037-2068	1,11	1,08	1,19
2069-2100	1,30	1,14	1,11

# Anexos



**ANEXO 1. ÍNDICE DE FIGURAS**

<i>Figura</i>	<i>Título</i>	<i>Página</i>
1	MECANISMO ( <i>DOWNSCALING</i> ) DE REGIONALIZACIÓN O REDUCCIÓN DE ESCALA	15
2	FORZAMIENTO RADIATIVO A LO LARGO DEL SIGLO XXI, ASOCIADO A DIFERENTES RCP	20
3	COEFICIENTES DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA HORIZONTE 2006-2036	22
4	COEFICIENTES DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA HORIZONTE 2037-2068	22
5	COEFICIENTES DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA HORIZONTE 2069-2100	22
6	MECANISMO DE REGIONALIZACIÓN O REDUCCIÓN DE ESCALA ( <i>DOWNSCALING</i> )	27
7	ESQUEMA GENERAL DE LA METODOLOGÍA FICLIMA PARA LA PENÍNSULA IBÉRICA	31
8	SITUACIÓN DE LOS TRES OBSERVATORIOS METEOROLÓGICOS SUMINISTRADOS	34
9	CLIMOGRAMAS DE PRECIPITACIÓN MEDIA Y DE 3 OBSERVATORIOS METEOROLÓGICOS	35
10	PRECIPITACIÓN DIARIA OBSERVADA DEL OBSERVATORIO 3200 (GETAFE AÑO 2012)	37
11	SERIE OBSERVADA DIARIA DE TEMPERATURA MÁXIMA, CORRESPONDIENTE A UN OBSERVATORIO REAL UTILIZADO COMO EJEMPLO	38
12	RESULTADOS DE LA VERIFICACIÓN PARA EL PROMEDIO DE TODOS LOS OBSERVATORIOS	41
13	RESULTADOS DEL PROCESO DE VERIFICACIÓN PARA EL PROMEDIO DE TODOS LOS OBSERVATORIOS	42
14	RESULTADOS DEL PROCESO DE VERIFICACIÓN PARA EL OBSERVATORIO DE GETAFE. DATOS OBSERVADO / DATOS CALCULADOS	43
15	RESULTADOS DEL PROCESO DE VERIFICACIÓN PARA EL OBSERVATORIO DE GETAFE	43
16	RESULTADOS DEL PROCESO DE VERIFICACIÓN PARA EL OBSERVATORIO DE RETIRO. DATOS OBSERVADOS / DATOS CALCULADOS	44
17	RESULTADOS DEL PROCESO DE VERIFICACIÓN PARA EL OBSERVATORIO DE RETIRO	44
18	RESULTADOS DEL PROCESO DE VERIFICACIÓN PARA EL OBSERVATORIO DE TORREJÓN. DATOS OBSERVADOS / DATOS CALCULADOS	45
19	RESULTADOS DEL PROCESO DE VERIFICACIÓN PARA EL OBSERVATORIO DE TORREJÓN	45
20	MODELOS CLIMÁTICOS. PROMEDIO MENSUAL DE PRECIPITACIÓN, ESCENARIO <i>HISTORICAL</i> CONTRA VALOR DEL REANÁLISIS ERA40	48
21	MODELOS CLIMÁTICOS. PROMEDIO MENSUAL DE PRECIPITACIÓN, ESCENARIO <i>HISTORICAL</i> CONTRA VALOR DEL REANÁLISIS ERA40. OBSERVATORIO GETAFE	49

<i>Figura</i>	<i>Título</i>	<i>Página</i>
22	MODELOS CLIMÁTICOS. PROMEDIO MENSUAL DE PRECIPITACIÓN, ESCENARIO <i>HISTORICAL</i> CONTRA VALOR DEL REANÁLISIS ERA40. OBSERVATORIO RETIRO	49
23	MODELOS CLIMÁTICOS. PROMEDIO MENSUAL DE PRECIPITACIÓN, ESCENARIO <i>HISTORICAL</i> CONTRA VALOR DEL REANÁLISIS ERA40. OBSERVATORIO TORREJÓN	50
24	FORZAMIENTO RADIATIVO, PREVISIÓN ESCENARIOS SIGLO XXI ASOCIADOS A RCP	52
25	FORZAMIENTO RADIATIVO ALCANZADO EN 2100, SEGÚN ESCENARIOS	53
26	INCREMENTOS ESTACIONALES ABSOLUTOS ESPERADOS DE PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI. RCP REPRESENTADOS 26, 45, 85	56
27	INCREMENTOS ESTACIONALES RELATIVOS ESPERADOS DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI, REPRESENTADOS COMO MEDIAS MÓVILES DE 30 AÑOS	58
28	INCREMENTOS ESTACIONALES ABSOLUTOS ESPERADOS DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI, REPRESENTADOS COMO MEDIAS MÓVILES DE 30 AÑOS. OBSERVATORIO DE TORREJÓN	59
29	INCREMENTOS ESTACIONALES RELATIVOS ESPERADOS DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI, REPRESENTADOS COMO MEDIAS MÓVILES DE 30 AÑOS. OBSERVATORIO DE TORREJÓN	60
30	INCREMENTOS ESTACIONALES ABSOLUTOS ESPERADOS DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI. OBSERVATORIO DE MADRID RETIRO	61
31	INCREMENTOS ESTACIONALES RELATIVOS ESPERADOS DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI. OBSERVATORIO DE MADRID RETIRO	62
32	INCREMENTOS ESTACIONALES ABSOLUTOS ESPERADOS DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI. OBSERVATORIO DE GETAFE	63
33	INCREMENTOS ESTACIONALES RELATIVOS ESPERADOS DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI. OBSERVATORIO DE GETAFE	64
34	EJEMPLO ILUSTRADO DE LA CORRECCIÓN DEL ERROR SISTEMÁTICO	69
35	INCREMENTOS ESTACIONALES ABSOLUTOS DE LOS DATOS, CON ERROR SISTEMÁTICO CORREGIDO, DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI	70
36	INCREMENTOS ESTACIONALES RELATIVOS ESPERADOS DE LOS DATOS, CON ERROR SISTEMÁTICO CORREGIDO, DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI	71
37	INCREMENTOS ESTACIONALES ABSOLUTOS DE LOS DATOS, CON ERROR SISTEMÁTICO CORREGIDO, DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI, REPRESENTADOS COMO MEDIAS MÓVILES DE 30 AÑOS. OBSERVATORIO DE TORREJÓN (3175)	72
38	INCREMENTOS ESTACIONALES RELATIVOS ESPERADOS DE LOS DATOS, CON ERROR SISTEMÁTICO CORREGIDO, DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI, REPRESENTADOS COMO MEDIAS MÓVILES DE 30 AÑOS. OBSERVATORIO DE TORREJÓN (3175)	73

<i>Figura</i>	<i>Título</i>	<i>Página</i>
39	INCREMENTOS ESTACIONALES ABSOLUTOS DE LOS DATOS, CON ERROR SISTEMÁTICO CORREGIDO, DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI, REPRESENTADOS COMO MEDIAS MÓVILES DE 30 AÑOS. OBSERVATORIO DE MADRID RETIRO (3195)	75
40	INCREMENTOS ESTACIONALES RELATIVOS ESPERADOS DE LOS DATOS, CON ERROR SISTEMÁTICO CORREGIDO, DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI, REPRESENTADOS COMO MEDIAS MÓVILES DE 30 AÑOS. OBSERVATORIO DE MADRID RETIRO (3195)	76
41	INCREMENTOS ESTACIONALES ABSOLUTOS DE LOS DATOS, CON ERROR SISTEMÁTICO CORREGIDO, DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI, REPRESENTADOS COMO MEDIAS MÓVILES DE 30 AÑOS. OBSERVATORIO DE GETAFE (3200)	78
42	INCREMENTOS ESTACIONALES RELATIVOS ESPERADOS DE LOS DATOS, CON ERROR SISTEMÁTICO CORREGIDO, DE LA PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI, REPRESENTADOS COMO MEDIAS MÓVILES DE 30 AÑOS. OBSERVATORIO DE GETAFE (3200)	79
43	SERIES DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS ANUALES EN 24 HORAS, CORRESPONDIENTES A LA ESTACIÓN TP DE GETAFE, Y AL ESCENARIO RCP 2.6	85
44	AJUSTES DE ALGUNAS DE LAS SERIES DE MÁXIMOS ANUALES DE GETAFE	86
45	FACTORES CLIMÁTICOS (FC) OBTENIDOS EN LOS 24 CASOS DEL ESCENARIO RCP 2.6 EN FUNCIÓN DEL PERIODO DE RETORNO	87
46	VALORES ACTUALES DE INTENSIDAD MÁXIMA EN 24 HORAS, PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO ENTRE 2 AÑOS Y 500 AÑOS	87
47	FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA LLUVIA MÁXIMA ANUAL EN 24 HORAS, PARA LOS TRES PERIODOS CLIMÁTICOS DEL SIGLO XXI	90
48	FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA LLUVIA MÁXIMA ANUAL EN 1 HORA, PARA LOS TRES PERIODOS CLIMÁTICOS DEL SIGLO XXI	93
49	FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA LLUVIA MÁXIMA ANUAL EN 24 HORAS, ESTACIÓN TP DE GETAFE. PERIODOS CLIMÁTICOS DEL SIGLO XXI	99
50	FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA LLUVIA MÁXIMA ANUAL EN 24 HORAS, ESTACIÓN TP DE RETIRO. PERIODOS CLIMÁTICOS DEL SIGLO XXI	100
51	FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA LLUVIA MÁXIMA ANUAL EN 24 HORAS, ESTACIÓN TP DE TORREJÓN. PERIODOS CLIMÁTICOS DEL SIGLO XXI	101
52	FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA LLUVIA HORARIA MÁXIMA ANUAL. ESTACIÓN TP DE GETAFE. PERIODOS CLIMÁTICOS DEL SIGLO XXI	106

<i>Figura</i>	<i>Título</i>	<i>Página</i>
53	FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA LLUVIA HORARIA MÁXIMA ANUAL. ESTACIÓN TP DE RETIRO. PERIODOS CLIMÁTICOS DEL SIGLO XXI	107
54	FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA LLUVIA HORARIA MÁXIMA ANUAL. ESTACIÓN TP DE TORREJÓN. PERIODOS CLIMÁTICOS DEL SIGLO XXI	108
55	FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA LLUVIA MÁXIMA EN 24 HORAS. PRIMAVERA, TRES PERIODOS CLIMÁTICOS DEL SIGLO XXI	113
56	FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA LLUVIA MÁXIMA EN 24 HORAS. VERANO, TRES PERIODOS CLIMÁTICOS DEL SIGLO XXI	114
57	FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA LLUVIA MÁXIMA EN 24 HORAS. OTOÑO, TRES PERIODOS CLIMÁTICOS DEL SIGLO XXI	115
58	FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA LLUVIA MÁXIMA EN 24 HORAS. INVIERNO, TRES PERIODOS CLIMÁTICOS DEL SIGLO XXI	116
59	FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA DURACIÓN DE 1 HORA. PRIMAVERA.	122
60	FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA DURACIÓN DE 1 HORA. VERANO.	123
61	FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA DURACIÓN DE 1 HORA. OTOÑO.	124
62	FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA DURACIÓN DE 1 HORA. INVIERNO	125

**ANEXO 2. ÍNDICE DE TABLAS**

<i>Tabla</i>	<i>Título</i>	<i>Página</i>
1	MODELOS CLIMÁTICOS EMPLEADOS EN EL PROYECTO	18
2	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS DIFERENTES RCP EMPLEADOS EN EL PROYECTO	20
3	DIFERENCIAS ENTRE <i>DOWNSCALING</i> ESTADÍSTICO Y DINÁMICO	29
4	ACCIONES TOMADAS PARA CADA OBSERVATORIO METEOROLÓGICO. LAS ACCIONES SE TOMARON DESPUÉS DE EJECUTAR LOS TEST DE HOMOGENEIDAD	39
5	CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MODELOS CLIMÁTICOS EMPLEADOS	46
6	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS DIFERENTES RCP	52
7	ESCENARIOS PROPORCIONADOS POR CADA UNO DE LOS MODELOS CLIMÁTICOS USADOS	55
8	OBSERVATORIO DE TORREJÓN	74
9	OBSERVATORIO DE MADRID RETIRO	77
10	OBSERVATORIO DE GETAFE	80
11	FACTOR CLIMÁTICO ANUAL Y PERCENTILES 10 Y 90, PARA LLUVIA MÁXIMA EN 24 HORAS	91
12	EXPONENTE DE ESCALA MEDIO ( $\beta$ ) PARA TODOS LOS PERIODOS Y ESCENARIOS	92
13	FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO ANUAL (FC) PARA UNA DURACIÓN DE 1 HORA	94
14	FACTOR CLIMÁTICO ANUAL Y PERCENTILES 10 Y 90 PARA LLUVIA MÁXIMA EN 24 HORAS. GETAFE	96
15	FACTOR CLIMÁTICO ANUAL Y PERCENTILES 10 Y 90 PARA LLUVIA MÁXIMA EN 24 HORAS. RETIRO	97
16	FACTOR CLIMÁTICO ANUAL Y PERCENTILES 10 Y 90 PARA LLUVIA MÁXIMA EN 24 HORAS. TORREJÓN	98
17	EXPONENTE DE ESCALA MEDIO ( $\beta$ ) PARA TODOS LOS PERIODOS Y ESCENARIOS	102
18	FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO I (FC) PARA UNA DURACIÓN DE 1 HORA. ESTACIÓN TP DE GETAFE	103
19	FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO I (FC) PARA UNA DURACIÓN DE 1 HORA. ESTACIÓN TP DE MADRID RETIRO	104
20	FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO I (FC) PARA UNA DURACIÓN DE 1 HORA. ESTACIÓN TP DE TORREJÓN	105
21	FACTOR CLIMÁTICO Y PERCENTILES 10 Y 90 PARA LLUVIA MÁXIMA EN 24 HORAS. PRIMAVERA	109
22	FACTOR CLIMÁTICO Y PERCENTILES 10 Y 90 PARA LLUVIA MÁXIMA EN 24 HORAS. VERANO	110

<i>Tabla</i>	<i>Título</i>	<i>Página</i>
23	FACTOR CLIMÁTICO Y PERCENTILES 10 Y 90 PARA LLUVIA MÁXIMA EN 24 HORAS. OTOÑO	111
24	FACTOR CLIMÁTICO Y PERCENTILES 10 Y 90 PARA LLUVIA MÁXIMA EN 24 HORAS. INVIERNO	112
25	EXPONENTE DE ESCALA MEDIO ( $\beta$ ) PARA TODOS LOS PERIODOS Y ESCENARIOS	117
26	FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO (FC) PARA DURACIÓN DE 1 HORA. PRIMAVERA	118
27	FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO (FC) PARA DURACIÓN DE 1 HORA. VERANO	119
28	FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO (FC) PARA DURACIÓN DE 1 HORA. OTOÑO	120
29	FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO (FC) PARA DURACIÓN DE 1 HORA. INVIERNO	121
30	OBSERVATORIOS Y OUTLIERS DETECTADOS	127
31	VALOR DE FC EN 24 HORAS PROMEDIO DE LAS TRES ESTACIONES (T=10 AÑOS)	128
32	VALOR DE FC EN 1 HORA PROMEDIO DE LAS TRES ESTACIONES (T=10 AÑOS)	128

**ANEXO 3. ACRÓNIMOS Y TÉRMINOS**

<b>Acrónimo</b>	<b>Descripción</b>
<b>AEMET</b>	AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA
<b>BIAS</b>	PROMEDIO DE LAS DIFERENCIAS
<b>CC</b>	CAMBIO CLIMÁTICO
<b>CLABSA</b>	CLAVEGUERAM DE BARCELONA S.A.
<b>CMIP5</b>	COUPLED MODEL INTERCOMPARISON PROJECT 5
<b>ECDF</b>	EMPIRICAL CUMULATIVE DISTRIBUTION FUNTION
<b>ECMWF</b>	EUROPEAN CENTRE FOR MEDIUM-RANGE WEATHER FORECASTS
<b>EOGCM</b>	ATMOSPHERE-OCEAN COUPLED GENERAL CIRCULATION MODEL
<b>ESM</b>	EARTH SYSTEM MODEL
<b>FC</b>	FACTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO
<b>FIC</b>	FUNDACIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN DEL CLIMA
<b>FICLIMA</b>	METODOLOGÍA DE <i>DOWNSCALING</i>
<b>GCM</b>	MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL
<b>GEI</b>	GASES DE EFECTO INVERNADERO
<b>GEV</b>	FUNCIÓN GENERALIZADA DE VALORES EXTREMOS
<b>GFDL</b>	GEOPHYSICAL DYNAMICS LABORATORY
<b>IDF</b>	INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA
<b>IPCC</b>	INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE
<b>LAM</b>	MODELO DE ÁREA LIMITADA
<b>MAE</b>	PROMEDIO DE VALOR ABSOLUTO DE LAS DIFERENCIAS
<b>NCAR</b>	NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH
<b>PCMDI</b>	PROGRAMME FOR THE COMPARISON AND THE DIAGNOSIS OF THE CLIMATE RESEARCH PROGRAMME
<b>PI</b>	PENÍNSULA IBÉRICA
<b>RCM</b>	MODELOS REGIONALES DEL CLIMA
<b>RCP</b>	REPRESENTATIVE CONCENTRATION PATHWAYS
<b>TP</b>	TERMO-PLUVIOMÉTRICAS
<b>UB</b>	UNIVERSIDAD DE BARCELONA
<b>UPC</b>	UNIVERSIDAD POLITÈCNICA DE CATALUNYA
<b>WCRP</b>	WORLD CLIMATE RESEARCH PROGRAMME
<b>WMO</b>	WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION

**ANEXO 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**Arnbjerg-Nielsen, K., 2008**

Quantification of climate change impacts on extreme precipitation used for design of sewer systems. 11<sup>th</sup> International Conference on Urbane Drainage, Edinburgh, Scotland, UK.

**Benjoudi, H., Hubert, P., Schertzer, D., Lovejoy, S., 1997**

Multifractal point of view on rainfall intensity-duration-frequency curve. C. R. Acad. Sci. Paris Earth Planet. Sci. 325, 323-326.

**Buonomo, E., Jones, E., Huntingford, C., Hammafard, J., 2007**

On the robustness of changes in extreme precipitation over Europe from two high resolution climate change simulations. Q. J. R. Meteorol. Soc., 133, 65-81.

**Burlando, P., Rosso, R., 1996**

Scaling and multiscaling models of deph-duration-frequency curves for storm precipitation, J. Hydrol. 187, 45-64.

**Casas-Castillo, M. Carmen; Rodríguez-Solá, Raúl; Navarro, Xavier; Russo, Beniamino; Lastra, Antonio; González, Paula; Redaño, Ángel; 2016**

On the consideration of scaling properties of extreme rainfall in Madrid (Spain) for developing a generalized intensity-duration-frequency equation and assessing probable maximum precipitation estimates. Theoretical and Applied Climatology, Vol. 126, Nos 3-4 – DOI 10.1007/s00704-016-1998-0. ISSN 0177-798X.

**De Michele, C., Kottegoda, N.T., Rosso, R., 2002**

IDAF (intensity-duration-area-frequency) curves of extreme storm rainfall: a scaling approach. Water Science & Technology, 25, 2, 83-90.

**Desramaut, N., 2008**

Estimation of intensity Duration Frequency Curves for Current and Future Climates. Thesis of Master. Department of Civil Engineering and Applied Mechanics. McGill University, Montreal, Quebec, Canada.

**Etoh, T., Murota, A., y Nakanishi, M., 1987**

SQRT-Exponential Type Distribution of Maximum, Hydrologic Frequency Modelling, Proceedings of the International Symposium on Flood Frequency and Risk Analyses, 14-17 May 1986, Louisiana State University, V. P. Shing (ed.), Reidel Pub. Com. U.S.A., pp. 253-264.

**Fujino, J., R. Nair, M. Kainuma, T. Masui, and Y. Matsuoka (2006)**

Multi-gas mitigation analysis on stabilization scenarios using AIM global model. Multigas Mitigation and Climate Policy. The Energy Journal Special Issue.

**Koutsoyiannis, D., Foufoula-Georgiu, E., 1993**

A scaling model of storm hyetograph. Water Resources. Res. 29, 7, 2345-2361.

**Menabde, M., Seed, A., Pegram, G., 1999**

A simple scaling model for extreme rainfall. Water Resources Res. 35, 1, 335-339.

Meinshausen, Malte and Smith, S.J. and Calvin, K. and Daniel, J.S. and Kainuma, M.L.T. and Lamarque, J. F. and Matsumoto, K. and Montzka, S.A. and Raper, S.C.B. and Riahi, K. and Thomson, A. and Velders, G.J.M. and Vuuren, D.P.P. (2011)

The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, vol. 109, number 1-2, pp. 213-241. Doi: 10.1007/s10584-011-0156-z.

Pao-Shan, Y., Yang, T.C., Lin, C.S., 2004

Regional rainfall intensity formulas based on scaling property of rainfall. *J. Hydrol.* 295, 1-4, 108-123.

Pérez, F.F., Boscolo, R., 2010

Clima en España: Pasado, presente y futuro. Informe de Evaluación del Cambio climático Regional. Red Temática CLIVAR-España. [http://www.clivar.es/files/informe\\_clivar\\_final.pdf](http://www.clivar.es/files/informe_clivar_final.pdf)

Riahi, Keywan and Rao, Shilpa and Krey, Volker and Cho, Cheolhung and Chirkov, Vadim and Fischer, Guenther and Kindermann, Georg and Nakicenovic, Nebojsa and Rafaj, Peter (2011)

RCP 8.5 – A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, Volume 109, Issue 1-2, pp 33-57. Doi: 10.1007/s10584-011-0149-y.

Ribalaygua, J., Torres, L., Pórtoles, J., Monjo, R., Gaitán, E. and Pino, M.R. (2013)

Description and validation of a two-step analog/regression *downscaling* method. *Theoretical and Applied Climatology*, Volume 114, Issue 1-2, pp 253-269. Doi: 10.1007/s00704-013-0836-x. URL: <http://link.springer.com/article/10.1007/s00704-013-0836-x>

Rodriguez, R., Navarro, X., Casas, M.C., Ribalaygua, J., Russo, B., Pouget, L., Redaño, A., 2013

Influence of climate change on IDF curves for the metropolitan area of Barcelona (Spain). *Int. J. Climatol.* DOI: 10.1002/joc.3712.

Thomson, Allison M. and Calvin, Katherine V. and Smith, Steven J. and Kyle, G. Page and Volke, April and Patel, Pralit and Delgado-Arias, Sabrina and Bond-Lamberty, Ben and Wise, Marshall A. and Clarke, Leon E. and Edmonds, James A. (2011)

RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change*, Volume 109, Issue 1-2, pp 77-94; doi: 10.1007/s10584-011-0151-4.

Van Vuuren, Detlef P. and Stehfest, Elke and Elzen, Michel G.J. and Kram, Tom and Vliet, Jasper and Deetman, Sebastiaan and Isaac, Morna and Klein Goldewijk, Kees and Hof, Andries and Mendoza Beltran, Angelica and Oostenrijk, Rineke and Ruijven, Bas (2011)

RCP 2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C. *Climatic Change*, Volume 109, Issue 1-2, pp 95-116; doi: 10.1007/s10584-011-0152-3.

Zorraquino, C., 2004

La función SQRT-ET max. *Revista de Obras Públicas*, 3447, pp. 33-37.

[http://digitool.library.mcgill.ca/R/-?func=dbin-jump-full&object\\_id=40816&current\\_base=GEN01](http://digitool.library.mcgill.ca/R/-?func=dbin-jump-full&object_id=40816&current_base=GEN01)

# Canal de Isabel II



Santa Engracia, 125. 28003 Madrid

[www.canaldeisabelsegunda.es](http://www.canaldeisabelsegunda.es)