

2020



# EVENTOS HIDROLÓGICOS EXTREMOS Y CAMBIO CLIMÁTICO

Mejores prácticas de modelización



FUNDACIÓN CANAL  
Canal de Isabel II





**Autores:**

**Luis Garrote, Álvaro Sordo-Ward, Ana Iglesias**

**Universidad Politécnica de Madrid / Fundación Agustín de Betancourt**

**ISBN: 978-84-947881-2-3**



<b>1</b>	<b>RESUMEN EJECUTIVO.....</b>	<b>8</b>
1.1	PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO.....	8
1.1.1	<i>Información presentada.....</i>	8
1.1.2	<i>Destinatarios de la información.....</i>	9
1.1.3	<i>Tipos de trabajo .....</i>	10
1.2	SELECCIÓN DE BUENAS PRÁCTICAS .....	10
1.2.1	<i>Recopilación bibliográfica .....</i>	10
1.2.2	<i>Identificación de bloques temáticos.....</i>	11
1.2.3	<i>Selección de las prácticas .....</i>	13
1.3	RESULTADOS DEL ESTUDIO .....	14
1.3.1	<i>Impacto fijando un valor de calentamiento global .....</i>	15
1.3.2	<i>Estudios de impacto a partir de modelos globales de clima.....</i>	15
1.3.3	<i>Análisis de tendencias de valores extremos en un ámbito local .....</i>	15
1.3.4	<i>Análisis de tendencias de valores extremos en un ámbito regional .....</i>	16
1.3.5	<i>Métodos de reducción de escala.....</i>	17
1.3.6	<i>Selección de métodos de reducción de escala .....</i>	17
1.3.7	<i>Técnicas de corrección de sesgo .....</i>	18
1.3.8	<i>Caracterización de la incertidumbre de los conjuntos de simulaciones.....</i>	19
1.3.9	<i>Análisis de riesgo en sistemas hidráulicos .....</i>	19
1.3.10	<i>Técnicas de perturbación de series hidrológicas .....</i>	20
1.3.11	<i>Análisis de efectos sobre extremos hidrológicos.....</i>	20
1.3.12	<i>Análisis de efectos sobre aguas subterráneas .....</i>	21
<b>2</b>	<b>INTERÉS DEL ESTUDIO.....</b>	<b>22</b>
2.1	INTRODUCCIÓN .....	22
2.1.1	<i>¿Por qué se realiza el estudio?.....</i>	22
2.1.2	<i>¿En qué consiste el estudio?.....</i>	23
2.2	INFORMACIÓN PRESENTADA .....	23
2.2.1	<i>Metodologías de análisis .....</i>	24
2.2.2	<i>Herramientas de cálculo .....</i>	24
2.2.3	<i>Técnicas específicas .....</i>	24
2.2.4	<i>Fuentes de datos .....</i>	25
2.3	PERFILES PROFESIONALES.....	25
2.3.1	<i>Confederaciones Hidrográficas.....</i>	25
2.3.2	<i>Operadores de agua.....</i>	26
2.3.3	<i>Empresas eléctricas .....</i>	27
2.3.4	<i>Administración autonómica y local .....</i>	27
2.3.5	<i>Otros colectivos interesados.....</i>	27
2.3.6	<i>Proveedores de servicios tecnológicos .....</i>	28
2.3.7	<i>Ingeniería, consultoría e investigación .....</i>	28
2.4	TIPOS DE TRABAJO .....	28
2.4.1	<i>Detección de efectos .....</i>	28
2.4.2	<i>Evaluación de impactos .....</i>	29
2.4.3	<i>Identificación de riesgos .....</i>	30
2.4.4	<i>Definición de estrategias.....</i>	31



<b>3</b>	<b>SELECCIÓN DE BUENAS PRÁCTICAS .....</b>	<b>32</b>
3.1	PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO .....	32
3.1.1	<i>Fase 1: Revisión bibliográfica .....</i>	32
3.1.2	<i>Fase 2: Selección de buenas prácticas.....</i>	32
3.1.3	<i>Fase 3: Documentación de las buenas prácticas.....</i>	33
3.2	BLOQUES TEMÁTICOS .....	34
3.2.1	<i>Caracterización de impactos a partir de modelos globales de clima.....</i>	34
3.2.2	<i>Técnicas basadas en observaciones.....</i>	35
3.2.3	<i>Técnicas específicas .....</i>	36
3.2.4	<i>Análisis de efectos en sistemas naturales y sociales .....</i>	37
3.3	SELECCIÓN DE BUENAS PRÁCTICAS .....	39
3.3.1	<i>Caracterización de impactos a partir de modelos globales de clima.....</i>	40
3.3.2	<i>Técnicas basadas en observaciones.....</i>	41
3.3.3	<i>Técnicas específicas .....</i>	42
3.3.4	<i>Análisis de efectos en sistemas naturales y sociales .....</i>	44
<b>4</b>	<b>ANÁLISIS DE BUENAS PRÁCTICAS .....</b>	<b>46</b>
4.1	CARACTERIZACIÓN DE IMPACTOS A PARTIR DE MODELOS GLOBALES DE CLIMA.....	46
4.1.1	<i>Impacto fijando un valor de calentamiento global .....</i>	46
4.1.2	<i>Estudios de impacto a partir de modelos globales de clima.....</i>	54
4.2	TÉCNICAS BASADAS EN OBSERVACIONES.....	69
4.2.1	<i>Análisis de tendencias de valores extremos en un ámbito local .....</i>	69
4.2.2	<i>Análisis de tendencias de valores extremos en un ámbito regional .....</i>	77
4.3	TÉCNICAS ESPECÍFICAS.....	86
4.3.1	<i>Métodos de reducción de escala.....</i>	86
4.3.2	<i>Selección de métodos de reducción de escala .....</i>	98
4.3.3	<i>Técnicas de corrección de sesgo .....</i>	104
4.3.4	<i>Caracterización de la incertidumbre de los conjuntos de simulaciones.....</i>	111
4.3.5	<i>Análisis de riesgo en sistemas hidráulicos .....</i>	118
4.3.6	<i>Técnicas de perturbación de series hidrológicas .....</i>	129
4.4	ANÁLISIS DE EFECTOS EN SISTEMAS NATURALES Y SOCIALES .....	137
4.4.1	<i>Análisis de efectos sobre sequías .....</i>	137
4.4.2	<i>Análisis de efectos sobre aguas subterráneas .....</i>	145
<b>5</b>	<b>REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>	<b>154</b>
5.1	INTRODUCCIÓN .....	154
5.2	IDENTIFICACIÓN DE BLOQUES TEMÁTICOS Y CATEGORÍAS.....	155
5.3	CARACTERIZACIÓN DE IMPACTOS A PARTIR DE MODELOS GLOBALES DE CLIMA.....	157
5.3.1	<i>Estudios integrales de inundaciones y sequías .....</i>	157
5.3.2	<i>Impacto de cambio climático fijando un valor de calentamiento global....</i>	166
5.3.3	<i>Análisis de la evolución de patrones de circulación atmosférica.....</i>	168
5.4	TÉCNICAS BASADAS EN OBSERVACIONES .....	169
5.4.1	<i>Caracterización de la no estacionariedad de variables observadas.....</i>	169
5.4.2	<i>Análisis de tendencias de extremos de variables observadas .....</i>	173
5.4.3	<i>Análisis de cambios a largo plazo (paleo-hidrología).....</i>	178
5.5	TÉCNICAS ESPECÍFICAS.....	180
5.5.1	<i>Técnicas de reducción de escala .....</i>	180





5.5.2	<i>Técnicas de corrección de sesgo</i> .....	185
5.5.3	<i>Técnicas de análisis de incertidumbre</i> .....	187
5.6	ANÁLISIS DE EFECTOS EN SISTEMAS NATURALES Y SOCIALES .....	190
5.6.1	<i>Técnicas de caracterización y evaluación de fenómenos extremos</i> .....	190
5.6.2	<i>Efecto en la erosión y sedimentación</i> .....	196
5.6.3	<i>Efecto en las aguas subterráneas</i> .....	197
5.6.4	<i>Estudios de impacto, vulnerabilidad y adaptación</i> .....	198
5.6.5	<i>Análisis de disponibilidad de agua</i> .....	205
5.6.6	<i>Efecto sobre la seguridad de infraestructuras</i> .....	207
5.7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	210



## Índice de Tablas

Tabla 1: Identificación de bloques temáticos y categorías	13
Tabla 2: Identificación de buenas prácticas seleccionadas	14
Tabla 3: Ficha de características básicas de la buena práctica	49
Tabla 4: Resumen de las 11 proyecciones climáticas analizadas y períodos analizados	50
Tabla 5: Características principales de los modelos hidrológicos utilizados.	51
Tabla 6: Ficha de características básicas de la buena práctica	58
Tabla 7: Resumen de las 12 proyecciones climáticas analizadas.	59
Tabla 8: Rango orientativo de valores de los parámetros del modelo SIMPA	66
Tabla 9: Ficha de características básicas de la buena práctica de caudales máximos	72
Tabla 10: Ficha de características básicas de la buena práctica de caudales mínimos	72
Tabla 11: Ficha de características básicas de la buena práctica de caudales máximos	80
Tabla 12: Ficha de características básicas de la buena práctica de caudales mínimos	80
Tabla 13: Ficha de características básicas de la buena práctica	89
Tabla 14: Resumen de las cualidades relativas de las técnicas estadísticas y dinámicas de reducción de escala.	93
Tabla 15: Ficha de características básicas de la buena práctica	100
Tabla 16: Ejemplos de índices con su correspondiente medida para evaluar la habilidad de simulación.	104
Tabla 17: Ficha de características básicas de la buena práctica	107
Tabla 18: Ficha de características básicas de la buena práctica	114
Tabla 19: Modelos hidrológicos aplicados a cada una de las cuencas analizadas.	115
Tabla 20: Ficha de características básicas de la buena práctica de inundaciones	121
Tabla 21: Ficha de características básicas de la buena práctica de sequías	121
Tabla 22: Ficha de características básicas de la buena práctica	131
Tabla 23: Resumen de las 29 proyecciones climáticas analizadas.	132
Tabla 24: Ficha de características básicas de la buena práctica	139
Tabla 25: Ficha de características básicas de la buena práctica	148
Tabla 26: Bloques temáticos y categorías identificadas.	156



## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Esquema metodológico de la buena práctica	48
Ilustración 2: Esquema metodológico de la buena práctica	57
Ilustración 3: Esquema conceptual del balance hídrico del modelo SIMPA	64
Ilustración 4: Esquema metodológico de la buena práctica	71
Ilustración 5: Representación esquemática del cuantil de diseño $Y_{p0}$ con: a) probabilidad de excedencia constante $p_0$ , y b) probabilidad de excedencia variable en el tiempo $p_t$ , $t = 1, 2, \dots, \infty$ .	76
Ilustración 6: Esquema metodológico de la buena práctica	79
Ilustración 7: Esquema metodológico de la buena práctica	88
Ilustración 8: Esquema metodológico de la buena práctica	99
Ilustración 9: Esquema metodológico de la buena práctica	106
Ilustración 10: Esquema metodológico de la buena práctica	113
Ilustración 11: Esquema metodológico de la buena práctica	120
Ilustración 12: Ejemplo de decisiones óptimas dadas las diferentes condiciones climáticas.	126
Ilustración 13: Esquema metodológico de la buena práctica	130
Ilustración 14: Esquema metodológico de la buena práctica	138
Ilustración 15: Ejemplo esquemático de curvas severidad-área-frecuencia	143
Ilustración 16: Esquema metodológico de la buena práctica	147
Ilustración 17: Esquema propuesto para la modelación integrada	152
Ilustración 18: Documentación identificada a nivel mundial sobre la temática de sequías e inundaciones en un contexto de cambio climático.	155
Ilustración 19: Definición de bloques temáticos relevantes y número de documentos seleccionados para estudiar con más detalle.	156



# 1 Resumen ejecutivo

## 1.1 Planteamiento del estudio

Este estudio, realizado entre septiembre de 2019 y mayo de 2020 por el equipo de la Fundación Agustín de Betancourt de la Escuela de Ingenieros de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid, presenta una colección de buenas prácticas en el análisis de los efectos del cambio climático, con énfasis especial en la modelación de extremos hidrológicos. En esta tarea se suele emplear un conjunto de herramientas de modelación enlazadas entre sí para trasladar las proyecciones climáticas realizadas mediante modelos globales de clima a variables útiles en el proceso de toma de decisiones en la gestión de riesgos. Este análisis viene motivado por la necesidad de incorporar los efectos del cambio climático en la gestión de los sistemas de recursos hídricos, en su doble vertiente de gestión del riesgo de sequías y de inundaciones. Normalmente, la exigencia técnica de estos trabajos requiere que sean realizados por especialistas en modelación hidrológica, que no necesariamente disponen de conocimientos avanzados sobre cambio climático. Sin embargo, la complejidad del fenómeno del cambio climático exige también un alto grado de especialización para poder comprender y manejar la gran cantidad de información disponible. Con este documento se pretende prestar ayuda a los técnicos especializados en gestión de recursos hídricos que necesiten aproximarse al tema del cambio climático para realizar análisis de extremos hidrológicos.

Se ha decidido estructurar la información en torno a un conjunto de buenas prácticas que desarrollan las tareas que habitualmente surgen al realizar este tipo de análisis. Las prácticas presentadas cubren un espectro muy amplio, tanto por las metodologías empleadas, como por la escala de trabajo, las técnicas empleadas o los problemas analizados. No se ha pretendido realizar un catálogo completo de prácticas adecuadas, sino simplemente recopilar un conjunto de trabajos que se puedan tomar como punto de partida para aproximarse al problema. La mayor parte de los trabajos presentados corresponden a estudios de investigación, publicados en revistas especializadas. En este sentido, se ha pretendido también acortar la distancia que existe entre el mundo de la investigación y el mundo profesional, presentando los trabajos de investigación de un modo que pueda ser asimilado por un profesional especialista sin conocimientos profundos de las técnicas de investigación.

### 1.1.1 Información presentada

La información presentada en las prácticas es muy diversa. Para cada práctica se ha presentado su planteamiento general, un resumen de la metodología desarrollada, los componentes básicos del análisis y las técnicas específicas empleadas en el trabajo. Los contenidos presentados se pueden encuadrar en una de las categorías siguientes:

**Metodologías de análisis:** Las buenas prácticas ilustran sobre cómo se ha planteado el análisis de un determinado problema. En todas ellas se presenta el esquema metodológico seguido, definiendo las operaciones que se han realizado: qué datos se han recopilado y de dónde proceden, qué modelos de cálculo se han aplicado, qué resultados se han obtenido, cómo se han analizado dichos resultados, qué estadísticos o parámetros se han considerado, etc.

**Herramientas de cálculo:** Se proporciona una colección muy completa de herramientas de análisis. Se proporciona información sobre modelos hidrológicos, cubriendo la gama de escalas desde modelos globales a modelos desarrollados para cuencas medianas a pequeñas. También se presentan modelos de comportamiento de sistemas hidráulicos orientados al análisis de recursos o de crecidas. Finalmente, las prácticas ilustran sobre utilidades específicas que realizan tareas concretas, como acceder a datos codificados, hacer operaciones espaciales con los datos, realizar análisis estadísticos o representar visualmente los resultados.

**Técnicas específicas:** Se describen técnicas específicas para desarrollar las tareas asociadas al análisis de proyecciones climáticas: técnicas para realizar operaciones de detección y ajuste de tendencias en observaciones, reducción de escala, corrección de sesgo, evaluación de incertidumbre, perturbación de series hidrológicas, análisis de riesgo, simulación de Monte-Carlo, caracterización de



sequías, etc. El acceso a este tipo de técnicas se puede tomar como un punto de partida para encontrar el procedimiento que resulte más apropiado a las necesidades que surjan en cada caso.

**Fuentes de datos:** Los informes correspondientes a las buenas prácticas contienen numerosas referencias a repositorios de resultados de modelos climáticos, proyecciones climáticas, observaciones o re-análisis meteorológicos, propiedades del terreno (topografía, usos del suelo, tipos de suelo, cobertura vegetal), bases de datos de episodios adversos o desastres naturales, etc. Las fuentes de datos descritas pueden resultar relevantes para encontrar la información de contexto que se necesita para interpretar la información climática correspondiente a un caso concreto.

### 1.1.2 Destinatarios de la información

El trabajo se ha planteado como un apoyo a los analistas especializados en hidrología y recursos hídricos que proporcionan información a los tomadores de decisión en distintos niveles de la Administración o del sector privado. Esta necesidad puede surgir en una gran variedad de contextos, como los siguientes:

**Confederaciones Hidrográficas:** Son responsables de la elaboración de los planes hidrológicos, de los planes de gestión del riesgo de inundación y de los planes especiales de sequía. También son responsables de la seguridad de las presas y embalses de titularidad estatal. El cambio climático altera los extremos hidrológicos que, a su vez influyen en los resultados del análisis técnico que soporta este tipo de actividades. Las buenas prácticas contenidas en este trabajo pueden suponer un apoyo útil, ofreciendo alternativas metodológicas y herramientas de análisis para acometer la tarea de incorporar los efectos del cambio climático en estas actividades.

**Operadores de agua:** Son responsables de la planificación estratégica de los servicios de abastecimiento de agua y saneamiento. Este tipo de operadores suelen trabajar con un nivel de garantía muy elevado, lo que exige una gran anticipación en la toma de decisiones. Para ellos, resulta imprescindible incorporar el efecto del cambio climático en sus análisis a medio y largo plazo del ciclo urbano del agua. Estas empresas tienen la responsabilidad de la explotación de un número importante de grandes presas, cuya seguridad puede verse alterada como consecuencia del cambio climático.

**Empresas eléctricas:** El sector eléctrico es uno de los más activos en la planificación estratégica relacionada con el cambio climático. Aunque este tipo de empresas cuentan ya con especialistas muy competentes en cambio climático, es posible que algunas de las aportaciones de este documento les resulten de utilidad, particularmente las relacionadas con el análisis de riesgos. Al igual que los operadores de agua, estas empresas también tienen la responsabilidad de la explotación de grandes presas.

**Administración autonómica y local:** Tienen competencias relacionadas con los extremos climáticos, tanto en la protección frente a las inundaciones como en la gestión de sequías. La administración autonómica es responsable de la implantación de los planes de gestión del riesgo de inundación y de gran parte de las competencias relacionadas con la gestión de sequías. La administración local debe adaptar el entorno urbano al cambio climático, considerando el riesgo de inundación, la gestión de la red de drenaje, la ordenación de los usos del suelo y la eficiencia del uso del agua en el municipio.

**Otros colectivos:** Hay numerosos sectores afectados por los extremos hidrológicos: usuarios de agua (en particular la agricultura), colectivos interesados en el medio ambiente, protección civil, aseguradoras, etc. En todos ellos puede ser necesario estimar el efecto del cambio climático sobre los extremos hidrológicos para la toma de decisiones.

**Proveedores de servicios tecnológicos:** Existe una gran variedad de proveedores de servicios tecnológicos que prestan apoyo a los tomadores de decisión. En esta categoría se incluyen los proveedores de servicios climáticos o los proveedores de los equipos y tecnologías de información y comunicaciones que se emplean en la captación y proceso de datos hidrológicos. Estas entidades pueden estar interesadas en conocer el tipo de análisis que se hace con la información que proporcionan.





**Proveedores de asistencia técnica:** Dentro de este grupo se incluyen los sectores de consultoría, ingeniería e investigación. Gran parte de las actividades de análisis tendrán que ser ejecutadas por este tipo de proveedores de servicios. Las buenas prácticas recopiladas en este documento pueden ser una ayuda en el proceso de capacitación de su personal para poder prestar la asistencia técnica requerida en estudios de cambio climático.

### 1.1.3 Tipos de trabajo

Las prácticas que se han seleccionado son relevantes para distintos tipos de trabajo que surgen en el contexto del análisis del cambio climático. Estos trabajos se pueden clasificar en cuatro grandes categorías.

**Detección de efectos:** Son trabajos que se centran en el análisis de las observaciones con la finalidad de detectar los efectos del cambio climático. El principal reto de este tipo de trabajos es discriminar entre la variabilidad natural de los fenómenos, los efectos de la actividad humana y los efectos del cambio climático. Para ello existen técnicas estadísticas de detección de tendencias o de falta de homogeneidad en las series. Las prácticas presentan estas técnicas e ilustran sobre la metodología de análisis.

**Evaluación de impactos:** Es el tipo de trabajo más frecuente. Se suele aplicar una secuencia encadenada de modelos, partiendo de las proyecciones climáticas y concluyendo en la caracterización del efecto del cambio climático sobre la ocurrencia de fenómenos extremos: modificaciones en su frecuencia, intensidad, duración, magnitud o severidad. Las prácticas ilustran sobre las alternativas metodológicas para realizar este análisis, dependiendo del alcance y objetivos del estudio, del ámbito territorial, del enfoque y de los recursos empleados. El análisis completo de toda la secuencia de modelación exige un esfuerzo considerable. Por ello, las prácticas presentan ejemplos parciales, donde se resuelven específicamente algunas de estas tareas o se aprovecha la disponibilidad de información sobre resultados de análisis previos para centrar el estudio en un aspecto particular. De esta forma se puede aprovechar el abundantísimo trabajo ya realizado para plantear estudios eficaces en función de los objetivos que se persigan y de los recursos de los que se pueda disponer.

**Identificación de riesgos:** En muchos casos resulta necesario ir más allá de la mera caracterización del comportamiento de los extremos hidrológicos, puesto que lo que realmente importa es la caracterización de los riesgos. Para ello resulta necesario analizar los daños producidos por las inundaciones o las sequías. Esto plantea una dificultad metodológica, porque las series de las proyecciones climáticas suelen ser poco representativas de extremos con baja probabilidad de ocurrencia. Las prácticas ilustran sobre cómo plantear el análisis de riesgos a partir de proyecciones climáticas, con ejemplos concretos sobre daños de inundación o gestión de recursos.

**Definición de estrategias:** Las prácticas presentadas pueden resultar relevantes para estudios de definición de estrategias de actuación para la gestión de los riesgos vinculados a los fenómenos hidrológicos. Alguna de las prácticas presentadas prolonga la cadena de modelación, entrando en la simulación del comportamiento de sistemas expuestos al riesgo, como planas de inundación, infraestructuras hidráulicas o sistemas de recursos hídricos. Esto permite definir estrategias de gestión del riesgo basadas en umbrales climáticos.

## 1.2 Selección de buenas prácticas

La selección de buenas prácticas se ha basado fundamentalmente en la revisión bibliográfica. El trabajo se estructuró en tres fases: recopilación de literatura, identificación de bloques temáticos y selección de las prácticas a desarrollar. El proceso de selección se realizó con la inestimable colaboración de los técnicos de Canal de Isabel II y Fundación Canal, cuyas aportaciones fueron clave para identificar las prácticas que podrían resultar más relevantes para proporcionar asistencia a los tomadores de decisión.

### 1.2.1 Recopilación bibliográfica

La literatura existente sobre efectos del cambio climático en extremos hidrológicos es muy abundante. Hay una enorme cantidad de trabajos referenciados, tanto en el ámbito científico como



en el profesional. Sólo en el ámbito científico, el número de referencias puede cifrarse en decenas de miles. Por este motivo, la recopilación bibliográfica se centró en un doble objetivo: realizar una selección preliminar de referencias que serían objeto de un análisis posterior y documentar las que se consideraron más relevantes, de cara a un análisis detallado. Se consultaron las fuentes bibliográficas habituales: artículos de revista, comunicaciones a congresos, libros o capítulos de libro, informes técnicos elaborados por organismos de prestigio, tesis doctorales y trabajos profesionales. El análisis preliminar se realizó mediante los procedimientos habituales de búsqueda bibliográfica: se identificaron los trabajos mediante búsqueda de términos en el título o las palabras clave de la referencia y se seleccionaron de acuerdo con indicadores de relevancia y calidad. Se priorizaron estudios recientes, avalados por un número importante de citas de terceros autores o realizados en instituciones de reconocido prestigio. También se aplicaron criterios de representatividad, seleccionando estudios realizados a distintas escalas y sobre regiones cuyas características son similares a las encontradas en España, buscando representación suficiente de ambos extremos hidrológicos.

En la selección preliminar se recopilaron aproximadamente unas 400 referencias bibliográficas. En estos documentos se identificaron las prácticas seguidas para modelar el efecto del cambio climático en los fenómenos hidrológicos extremos. A partir de esta valoración inicial, se realizó la documentación de unas 140 referencias que se consideraron más relevantes, redactando una breve reseña para cada una de ellas, que se ha incluido en el quinto capítulo de este documento. Las referencias seleccionadas se introdujeron en una base de datos, donde se agregaron atributos que permiten su clasificación y tratamiento para realizar un análisis global.

### 1.2.2 Identificación de bloques temáticos

Para facilitar la tarea de selección de buenas prácticas, se realizó una clasificación de los trabajos referenciados en bloques temáticos y categorías que reflejan el espectro de trabajos que aparecen publicados con más frecuencia en la literatura. A continuación, se presentan las categorías que integran cada uno de los bloques temáticos, que se resumen en la Tabla 1.

**Caracterización de impactos a partir de modelos globales de clima:** En este bloque temático se incluyen los estudios donde los impactos del cambio climático sobre los extremos hidrológicos se caracterizan a partir de los resultados de modelos globales de clima. Los estudios suelen aplicar una secuencia de análisis que parte de las proyecciones climáticas. En algunos casos, el análisis se realiza directamente sobre los resultados de los modelos climáticos, mientras que en otros casos se aplican modelos hidrológicos para transformar las variables climáticas en series hidrológicas. En este bloque temático se identificaron tres categorías:

- Estudios integrales de inundaciones y sequías
- Impacto de cambio climático fijando un valor de calentamiento global
- Análisis de la evolución de patrones de circulación atmosférica

**Técnicas basadas en observaciones:** En este bloque temático se incluyen los trabajos basados en el análisis de los registros de variables hidrológicas (precipitaciones o caudales) para detectar alteraciones, posiblemente producidas por el cambio climático. Se suelen aplicar técnicas estadísticas de análisis de estacionariedad o tendencias y técnicas basadas en análisis de registros históricos. En este bloque se identificaron tres categorías:

- Caracterización de la no estacionariedad de variables observadas
- Análisis de tendencias de extremos de variables observadas
- Análisis de cambios a largo plazo (paleo-hidrología)

**Técnicas específicas** En este bloque temático se incluyen distintas técnicas que son necesarias para realizar los estudios de impacto de cambio climático. Están relacionadas con las tareas de modelación climática, como reducción de escala, corrección de sesgo o análisis de incertidumbre. En este bloque se identificaron las siguientes categorías:



- Técnicas de reducción de escala
- Técnicas de corrección de sesgo
- Técnicas de análisis de incertidumbre

**Análisis de efectos en sistemas naturales y sociales** En este bloque temático se incluyen los trabajos que analizan los efectos del cambio climático en sistemas naturales o sociales. Son trabajos que propagan los efectos de los extremos hidrológicos en otros sistemas, normalmente mediante herramientas de modelación específica como en el caso de transporte de sedimentos o aguas subterráneas para sistemas naturales, o mediante el análisis de riesgos, como en el caso de disponibilidad de agua o seguridad de infraestructuras para sistemas sociales. En este bloque se identificaron las siguientes categorías:

- Efecto en la erosión y sedimentación
- Efecto en las aguas subterráneas
- Técnicas de caracterización y evaluación de fenómenos extremos
- Estudios de impacto, vulnerabilidad y adaptación
- Análisis disponibilidad de agua
- Efecto sobre la seguridad de infraestructuras



Tabla 1: Identificación de bloques temáticos y categorías

Bloque temático	Categoría identificada
Caracterización de impactos a partir de modelos globales de clima	Estudios integrales de inundaciones y sequías
	Impacto de cambio climático fijando un valor de calentamiento global
	Análisis de la evolución de patrones de circulación atmosférica
Técnicas basadas en observaciones	Caracterización de la no estacionariedad de variables observadas
	Análisis de tendencias de extremos de variables observadas
	Análisis de cambios a largo plazo (paleo-hidrología)
Técnicas específicas	Técnicas de reducción de escala
	Técnicas de corrección de sesgo
	Técnicas de análisis de incertidumbre
Análisis de efectos en sistemas naturales y sociales	Efecto en la erosión y sedimentación
	Efecto en las aguas subterráneas
	Técnicas de caracterización y evaluación de fenómenos extremos
	Estudios de impacto, vulnerabilidad y adaptación
	Análisis disponibilidad de agua
	Efecto sobre la seguridad de infraestructuras

### 1.2.3 Selección de las prácticas

La selección de las prácticas a desarrollar se realizó mediante reuniones del equipo de trabajo con los técnicos de Canal de Isabel II y Fundación Canal. Se organizaron dos reuniones de trabajo, celebradas los días 28 de noviembre y 13 de diciembre de 2019. Como resultado del intercambio de opiniones, se identificaron las categorías que resultaban más relevantes para la gestión de extremos hidrológicos en un contexto de cambio climático. A partir de las categorías seleccionadas, se elaboró la relación de doce buenas prácticas que se presentan en este estudio. Esta propuesta de buenas prácticas cubre adecuadamente el rango de actividades vinculadas a la modelización de fenómenos hidrológicos extremos en un contexto de cambio climático. Cada práctica está asociada a una o dos publicaciones de referencia, que se toman como base para la descripción de los contenidos. Las publicaciones adoptadas como referencia para las prácticas seleccionadas se presentan en la Tabla 2.



Tabla 2: Identificación de buenas prácticas seleccionadas

Categoría	Práctica seleccionada	Referencia
Estudios integrales de inundaciones y sequías	Estudios integrales de inundaciones y sequías	CEDEX (2017)
Impacto de cambio climático fijando un valor de calentamiento global	Impacto de cambio climático fijando un valor de calentamiento global	Donnelly et al. (2017)
Análisis de tendencias de extremos de variables observadas	Análisis de tendencias de valores extremos en un ámbito local	López y Francés (2013)
		Du et al. (2015)
	Análisis de tendencias de valores extremos en un ámbito regional	Blöschl et al. (2017)
		Spinoni et al. (2016)
Técnicas de reducción de escala	Métodos de reducción de escala	Fowler et al. (2007)
	Selección de métodos de reducción de escala	Maraun et al. (2015)
Técnicas de corrección de sesgo	Técnicas de corrección de sesgo	Rojas et al. (2011)
Técnicas de análisis de incertidumbre	Caracterización de la incertidumbre de los conjuntos de simulaciones	Vetter et al. (2017)
	Análisis de riesgo en sistemas hidráulicos	Steinschneider et al. (2014)
		Sordo-Ward et al. (2016)
	Técnicas de perturbación de series hidrológicas	Chávez-Jiménez et al. (2013)
Técnicas de caracterización y evaluación de fenómenos extremos	Análisis de efectos sobre sequías	Vicente-Serrano et al. (2014)
Efecto en las aguas subterráneas	Análisis de efectos sobre aguas subterráneas	Pulido-Velázquez et al. (2015)

### 1.3 Resultados del estudio

En la parte fundamental del estudio se procedió al análisis y documentación de las buenas prácticas identificadas. Se estudió la referencia principal y otras referencias complementarias con la finalidad de comprender el enfoque y alcance de las tareas planteadas y documentar su aplicación. Se elaboró una base de datos con la información relevante de cada práctica. En el capítulo cuarto de este documento se describen las buenas prácticas, indicando su planteamiento general, sus objetivos, los datos de partida, la metodología de trabajo, los resultados proporcionados, su utilidad y sus limitaciones. En este resumen ejecutivo se presentan los aspectos más destacados de cada práctica.





### 1.3.1 Impacto fijando un valor de calentamiento global

**Trabajo de referencia:** Donnelly, C., Greuell, W., Andersson, J. et al. (2019): Impacts of climate change on European hydrology at 1.5, 2 and 3 degrees mean global warming above preindustrial level. *Climatic Change*, 143, 13–26.

**Contenido:** Se trata de un trabajo que analiza el impacto del cambio climático sobre la escorrentía en Europa para niveles de calentamiento global de 1.5, 2 y 3 °C por encima del nivel preindustrial. Se acoplan conjuntos de proyecciones climáticas que representan cada uno de los niveles de calentamiento. Estos conjuntos se utilizan para forzar cinco modelos hidrológicos globales y se analizan los cambios en los indicadores hidrológicos.

**Características:** El estudio ilustra cómo debe hacerse el análisis del impacto del cambio climático sobre los fenómenos hidrológicos extremos fijando un valor de calentamiento global. Los resultados que se obtienen caracterizan el comportamiento hidrológico esperado en todo el continente y se pueden utilizar como punto de partida para análisis posteriores. Se enlazan adecuadamente modelos de análisis de resoluciones diferentes. La cadena de modelación se aplica al ámbito europeo, lo que permite obtener resultados para España y encuadrarlos en su contexto regional. El trabajo proporciona acceso a los resultados de modelos climáticos, que incluyen proyecciones de escorrentía con paso de tiempo diario.

**Técnicas específicas:** Destaca la técnica empleada para describir situaciones correspondientes a un umbral de incremento específico de temperatura global. Los escenarios que superan el nivel propuesto de calentamiento se utilizan como instantáneas en el tiempo, representando dicho nivel de calentamiento. También se describen métodos para identificar las respuestas climáticas regionales a un incremento específico de temperatura global.

### 1.3.2 Estudios de impacto a partir de modelos globales de clima

**Trabajo de referencia:** CEDEX 2017: Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España. Centro de Estudios Hidrográficos.

**Contenido:** En el trabajo seleccionado se presenta la evaluación el impacto de doce proyecciones climáticas sobre los recursos hídricos en todo el territorio español. El trabajo emplea el modelo hidrológico SIMPA y presenta resultados de las variables características: precipitación, evapotranspiración, infiltración y escorrentía para cada una de las demarcaciones hidrográficas. Incluye un apartado especial donde se hizo un análisis específico de las sequías.

**Características:** Este estudio es el punto de partida para muchos trabajos de análisis de impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos en España. Se estudia el impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos a escala nacional con una metodología única, lo que proporciona uniformidad de criterio en el análisis del cambio climático en las diferentes demarcaciones hidrográficas. El trabajo incluye diferentes combinaciones de modelos de clima global y escenarios de emisión, desarrollando los escenarios oficiales establecidos por la Agencia Estatal de Meteorología. Los resultados obtenidos con el modelo SIMPA en el período histórico constituyen una referencia de los recursos hídricos en régimen natural en todo el territorio español. La alta resolución espacial del análisis (1 km<sup>2</sup>) permite el análisis a distintas escalas.

**Técnicas específicas:** En el trabajo se emplea el modelo SIMPA, que es la fuente oficial de datos de aportaciones en régimen natural en todo el territorio español. El análisis de las proyecciones climáticas se realiza mediante el método "delta" o escalado directo. Este método consiste en realizar la comparación directa de los valores simulados entre los periodos futuros y el periodo de control, aplicando los valores porcentuales de cambio detectados a las observaciones históricas en el periodo de control.

### 1.3.3 Análisis de tendencias de valores extremos en un ámbito local

En esta práctica se seleccionaron dos trabajos de referencia, uno para crecidas y otro para sequías.



**Trabajo de referencia de crecidas:** López, J., Francés, F. (2013): Non-stationary flood frequency analysis in continental Spanish rivers, using climate and reservoir indices as external covariates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(8), 3189-3203.

**Resumen:** En el trabajo seleccionado para crecidas se realiza el análisis de frecuencia de caudales máximos considerando series de tiempo no estacionarias en veinte ríos continentales españoles. Se emplea la metodología denominada "modelos aditivos generalizados para ubicación, escala y forma" (GAMLSS). El modelado no estacionario de las series máximas crecidas anuales se realizó empleando como variables explicativas el tiempo, índices climáticos y un índice de regulación de la cuenca.

**Trabajo de referencia de sequías:** Du Tao, Xiong Lihua, Xu Chong-Yu, Gippel Christopher J., Guo Shenglian, Liu Pan (2015): Return period and risk analysis of nonstationary low-flow series under climate change. *Journal of Hydrology*, 527 (2015), 234–250.

**Resumen:** En el trabajo seleccionado para sequías se presentan técnicas para caracterización del período de retorno no estacionario de sequías mediante el uso de covariables meteorológicas. Las variables meteorológicas se utilizan para calcular los parámetros estadísticos no estacionarios y las probabilidades de excedencia para los años futuros.

**Características:** Los trabajos presentados son dos buenos ejemplos de análisis no estacionario de eventos extremos. Presentan procedimientos que permiten tener en cuenta la potencial no estacionariedad de la serie de caudales extremos, máximos y mínimos anuales. En el caso del estudio de sequías, se proponen dos formas de definir el período de retorno no estacionario: el tiempo de recurrencia esperado y el número de excedencias esperado. Se utilizan tres modelos de ajuste estadístico de las series que permiten comparar las diferencias en el análisis de frecuencia de extremos: un modelo estacionario, un modelo donde los parámetros de la distribución varían solo en función del tiempo, y un modelo que incorpora covariables externas. Los modelos del tipo GAMLSS empleados en el estudio están disponibles en la plataforma R, de acceso libre y gratuito.

**Técnicas específicas:** Se utiliza la técnica de "modelos aditivos generalizados para ubicación, escala y forma" (GAMLSS) para la modelación de series temporales no estacionarias. En este esquema, la variable aleatoria modelada (caudal máximo anual) se define mediante una función de distribución paramétrica. Sus parámetros se pueden modelar como función de distintas covariables seleccionadas. En el trabajo se empleó como variable explicativa el tiempo o una combinación de índices climáticos con el índice de embalse.

#### 1.3.4 Análisis de tendencias de valores extremos en un ámbito regional

En esta práctica se seleccionaron dos trabajos de referencia, uno para crecidas y otro para sequías.

**Trabajo de referencia de crecidas:** Blöschl, G., Hall, J., et al. (2017): Changing climate shifts timing of European floods. *Science*, 357(6351), 588-590.

**Contenido:** En el trabajo correspondiente a crecidas se presenta un análisis del momento en que ocurren las crecidas en los ríos de Europa a lo largo de las últimas cinco décadas. Se analiza específicamente el patrón espacial de los resultados, que muestran claramente que el momento de ocurrencia de las avenidas ha ido cambiando.

**Trabajo de referencia de sequías:** Spinoni, J., Naumann, G., Vogt, J., Barbosa, P. (2016): Meteorological Droughts in Europe: Events and Impacts – Past Trends and Future Projections. Joint Research Centre Technical Reports.

**Contenido:** En el trabajo seleccionado para sequías se analizan los eventos de sequía registrados en Europa desde 1950, empleando tres indicadores de sequía: el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI), el Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizado (SPEI) y el Indicador de Reconocimiento de Sequía (RDI). Se hizo un estudio especial de 21 grandes sequías que azotaron Europa desde 1950 hasta 2012, seis de las cuales ocurrieron después del año 2000.

**Características:** Los trabajos presentados son dos buenos ejemplos de análisis regional de eventos extremos. En el trabajo de crecidas se utilizaron 3298 series de caudales de estaciones distribuidas



por todo el territorio de Europa con al menos 35 años de datos. Es el resultado de la colaboración de un gran número de investigadores de muchos países y ha sido publicado en una de las revistas científicas más prestigiosas del mundo: Science. El desarrollo de la buena práctica se basó en la aplicación de paquetes estadísticos disponibles en la plataforma R, de acceso libre y gratuito, lo que facilita su replicabilidad. El alcance geográfico del trabajo de sequías también abarca toda Europa, lo que permite hacer análisis comparados de la evolución de las sequías en cada región. Se aplicaron diferentes índices de sequía por separado y en combinación, lo que permitió identificar y caracterizar de una manera más robusta las sequías registradas. La metodología planteada es simple, fácilmente replicable y utiliza herramientas informáticas disponibles de forma gratuita.

**Técnicas específicas:** En el trabajo se crecidas se proponen distintos métodos para el análisis regional de tendencias. Se define una forma de determinar el momento en que ocurren las crecidas utilizando estadísticas circulares. Se propone analizar su tendencia mediante la pendiente de Sen. También se estudia la evolución en el tiempo del momento de ocurrencia del máximo caudal diario del año mediante un filtro de media móvil. Estas tendencias observadas se relacionan con las alteraciones de la precipitación en la cuenca, a partir de bases de datos distribuidas en cuadrícula.

### 1.3.5 Métodos de reducción de escala

**Trabajo de referencia:** Fowler, H.J., Blenkinsop, S., Tebaldi, C. (2007): Linking climate change modelling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, 27(12), 1547-1578.

**Contenido:** En esta práctica se seleccionó como trabajo de referencia un artículo de revisión que ofrece una panorámica general sobre la literatura científica de reducción de escala. En el trabajo seleccionado se describen y valoran los métodos de reducción de escala que se aplican para estimar impactos hidrológicos. Se concluye que los desarrollos que pueden ofrecer el mayor potencial son el modelado probabilístico, la escala de patrones y la reducción de escala de múltiples variables.

**Características:** El trabajo seleccionado se proporciona una revisión general de los métodos de escalado, orientada específicamente a su aplicación en análisis hidrológicos. Explica con gran claridad en qué consisten los distintos métodos de reducción de escala y proporciona una clasificación que es fácil de comprender. El trabajo está muy bien documentado y no sólo proporciona acceso a numerosas fuentes bibliográficas, sino que elabora diversos temas de interés, como la comparación entre los distintos métodos, ventajas y desventajas, fuentes de incertidumbre, limitaciones en la aplicación o necesidades de investigación. Se incluyen abundantes consejos de aplicación práctica sobre la elección del método más apropiado en cada caso y la conveniencia de aplicar varios métodos en paralelo para comparar los resultados obtenidos en las proyecciones futuras.

**Técnicas específicas:** El trabajo proporciona una clasificación de métodos de reducción de escala en reducción de escala dinámica y reducción de escala estadística. La reducción de escala dinámica consiste en el uso de modelos regionales de clima o modelos de área limitada para mejorar la resolución alcanzada con los modelos globales. Es una técnica computacionalmente costosa, que depende en gran medida de los posibles sesgos heredados del modelo global y de la presencia y magnitud de los forzamientos a escala regional, como la orografía, el contraste tierra-mar y la cubierta vegetal. La reducción de escala estadística utiliza métodos estadísticos para establecer relaciones empíricas entre las variables climáticas con la resolución de los modelos globales y el clima local. Las técnicas más empleadas son los modelos de regresión, los esquemas de tipificación del clima y los generadores meteorológicos o de clima. En el caso de estudios de impacto hidrológico, se utiliza una gran variedad de métodos de reducción de escala: métodos dinámicos con o sin corrección de sesgo, enfoques estadísticos simples como regresión múltiple, reducción de escala ampliada, generadores estocásticos, métodos de tipificación de clima e índices de circulación del clima.

### 1.3.6 Selección de métodos de reducción de escala

**Trabajo de referencia:** Maraun, D., Widmann, M. et al. (2015): VALUE: A framework to validate downscaling approaches for climate change studies. *Earth's Future*, 3(1), 1-14.



**Contenido:** En el trabajo seleccionado se presenta un marco de validación que permite comparar y seleccionar el método de reducción de escala más apropiado para una tarea concreta. Se propone un árbol de validación que guía la selección de índices de comparación relevantes y proporciona la forma de cuantificar su rendimiento.

**Características:** El estudio seleccionado se deriva de la cooperación de instituciones de toda Europa y utiliza protocolos de comparación y validación comunes, lo que permite la comparación de la aplicación de diferentes métodos de reducción de escala. Se materializa en un marco de validación sistemático para permitir la evaluación y comparación de métodos de reducción de escala tanto dinámicos como estadísticos. El enfoque está centrado en el usuario: a partir de un problema específico del usuario, el árbol de validación guía la selección de índices de validación relevantes y formas de cuantificar su rendimiento.

**Técnicas específicas:** El procedimiento propuesto para la selección de los métodos de reducción de escala es un marco de validación que se denomina VALUE. Los objetivos que se persiguen son: definir un marco transparente que proporcione orientación relevante y defendible para los usuarios, evaluar el desempeño de cada método en un entorno de cambio climático y permitir la comparación de los distintos métodos dinámicos y estadísticos de reducción de escala. La validación consiste en derivar índices climáticos del resultado del modelo, comparar estos índices con índices de referencia calculados a partir de datos observados y cuantificar las diferencias a través de la medición del rendimiento. Se sigue un árbol de decisión para la selección de los índices relevantes y las medidas de desempeño o rendimiento. El usuario elige los fenómenos relevantes para el problema en consideración, identifica los aspectos marginales, temporales o espaciales que resultan de interés y selecciona los índices para cuantificar estos aspectos. Finalmente, se seleccionan las medidas de rendimiento apropiadas, como sesgos o puntuación por habilidad, para comparar los índices derivados de los datos del modelo con los de las observaciones.

### 1.3.7 Técnicas de corrección de sesgo

**Trabajo de referencia:** Rojas, R., Feyen, L., Dosio, A., Bavera, D. (2011): Improving pan-European hydrological simulation of extreme events through statistical bias correction of RCM-driven climate simulations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(8), 2599-2620.

**Contenido:** En el trabajo seleccionado se analiza el beneficio obtenido al eliminar el sesgo de los datos climáticos que se emplean en el análisis de inundaciones a escala europea. El sesgo de las proyecciones climáticas se corrige a partir de las observaciones de precipitación y temperatura. Las funciones de transferencia obtenidas para eliminar el sesgo se utilizan para corregir las simulaciones climáticas en los periodos futuros.

**Características:** En el trabajo se ilustra muy bien la secuencia de operaciones necesaria para enlazar un modelo global, uno regional y un modelo hidrológico de gran escala para realizar un estudio de impacto. Esta cadena de modelación se aplica a un ámbito territorial extenso, que permite obtener resultados para España y encuadrarlos en su contexto regional. Se aplica una técnica de corrección de sesgo, basada en la comparación de histogramas, que está específicamente concebida para el análisis de extremos. Se realiza una comparación de los errores que se pueden cometer si no se realiza la operación de corrección de sesgo.

**Técnicas específicas:** Se aplica un procedimiento estadístico para la corrección del sesgo de precipitación y temperatura, denominado método de "ecualización de histograma". En esta técnica, la variable corregida es una función de su correspondiente simulada. La función que las relaciona, denominada "función de transferencia", se define de manera tal que coincidan los histogramas de intensidad de las variables corregidas y observadas. La función de transferencia se obtiene estimando el valor acumulado de las funciones de distribución de probabilidad de los valores observado y simulado. Posteriormente, se asocia a cada valor simulado el valor observado que tiene la misma probabilidad de excedencia.



### 1.3.8 Caracterización de la incertidumbre de los conjuntos de simulaciones

**Trabajo de referencia:** Vetter, T., Reinhardt, J. et al. (2017): Evaluation of sources of uncertainty in projected hydrological changes under climate change in 12 large-scale river basins. *Climatic Change*, 141(3), 419-433.

**Contenido:** En el trabajo se referencia se evalúan las fuentes de incertidumbre en el estudio de impacto de cambio climático en la hidrología de doce grandes cuencas. Los cambios se evaluaron mediante nueve modelos hidrológicos forzados por una combinación de cuatro escenarios de emisiones y cinco modelos globales de clima. Se analizaron tres fuentes de incertidumbre: escenarios de emisiones, modelos globales y modelos hidrológicos, mediante el método ANOVA de análisis de varianza.

**Características:** Se trata de un ejemplo riguroso, donde se muestra cómo debe hacerse el análisis de incertidumbre en el estudio del impacto del cambio climático sobre los fenómenos hidrológicos extremos. Incluye el análisis de valores medios y percentiles altos y bajos de caudal. Los resultados que se obtienen caracterizan el comportamiento esperado de fenómenos hidrológicos extremos en doce cuencas de los cinco continentes, incluyendo la cuenca del Tajo en la Península Ibérica. Los resultados se analizan en 63 períodos de 30 años (ventana móvil desde 2008 al 2099), lo que permite ver la evolución en el tiempo de cada una de las fuentes de incertidumbre analizadas. La técnica de análisis de incertidumbre aplicada permite cuantificar las distintas fuentes de incertidumbre y compararlas entre sí.

**Técnicas específicas:** Se emplea el método ANOVA para la cuantificación de las tres fuentes de incertidumbre: escenarios de emisiones, modelos globales de clima y modelos hidrológicos. El método se basa en estudiar la variabilidad de los resultados que se obtienen y analizarla en función de los factores que intervienen en el análisis. La variable básica es la suma total del cuadrado de las diferencias de escorrentía con relación al valor medio, para cada una de las tres fuentes de incertidumbre analizadas. La suma total se descompone en siete sumandos: tres valores de fuentes de incertidumbre individuales, tres combinaciones de dos fuentes y una combinación de las tres fuentes. Los términos de interacción tienen en cuenta los efectos no lineales y no aditivos de las tres fuentes. Este tipo de análisis suele poner de manifiesto que la variabilidad asociada a los distintos modelos climáticos es incluso mayor que la asociada a los distintos escenarios de emisiones.

### 1.3.9 Análisis de riesgo en sistemas hidráulicos

En esta práctica se seleccionaron dos trabajos de referencia, uno para crecidas y otro para sequías.

**Trabajo de referencia de crecidas:** Steinschneider, S., Wi, S. and Brown, C. (2015): The integrated effects of climate and hydrologic uncertainty on future flood risk assessments. *Hydrological Processes*, 29(12), pp. 2823-2839.

**Contenido:** En el trabajo representativo de crecidas se analiza el riesgo futuro de inundación integrando la incertidumbre asociada a la modelación climática e hidrológica. Las proyecciones climáticas se propagan mediante una secuencia integrada por modelos hidrológicos y un modelo de simulación de la operación de un embalse en crecidas. La finalidad es definir la seguridad hidrológica de una presa en función de las condiciones climáticas.

**Trabajo de referencia de crecidas:** Sordo-Ward A., Granados I., Martín-Carrasco, F. Garrote L. (2016): Impact of Hydrological Uncertainty on Water Management Decisions. *Water Resources Management*, 30, 5535.

**Contenido:** En el trabajo representativo de sequías se aplica un método de simulación de Monte Carlo para generar escenarios hidrológicos, que se enlazan con un modelo de gestión de sistemas de recursos hídricos para obtener sus indicadores de desempeño. La finalidad es definir la sensibilidad de los indicadores de desempeño a la incertidumbre en la solicitud hidrológica.

**Características:** Los trabajos presentan metodologías que permiten evaluar la sensibilidad y vulnerabilidad de sistemas hidráulicos a las diferentes situaciones que se pueden derivar del cambio climático. Los dos trabajos presentan una cadena de análisis que, partiendo de una situación de





incertidumbre climática, permite trasladar dicha incertidumbre a valores relevantes para la gestión de sistemas hidráulicos. En el caso de crecidas se analizan los daños por inundación y en el caso de sequías los déficits de suministro a las demandas. Los trabajos obtienen conclusiones de interés relativas a cómo debe abordarse la toma de decisiones en gestión de sistemas hidráulicos bajo incertidumbre climática. Este tipo de análisis permite planificar escenarios de contingencia y reducir la vulnerabilidad ante los potenciales cambios climáticos. En ambos estudios se utilizan modelos estocásticos de clima para reproducir numerosos escenarios climáticos potenciales, lo que permite abarcar un amplio rango de proyecciones de clima futuro.

**Técnicas específicas:** El trabajo de crecidas emplea la técnica de “escalado de decisión”. Se trata de una metodología para el uso de proyecciones de cambio climático en los procesos de toma de decisiones o evaluación de riesgos. Consta de tres etapas: identificación de las condiciones climáticas que generan riesgo, desarrollo de la función de respuesta climática y adaptación de la información climática para ayudar a la toma de decisión. Con este enfoque, se delimitan zonas de riesgo que conducirían a diferentes decisiones de gestión y se estiman las probabilidades relativas de ocurrencia de cada una de las zonas.

### 1.3.10 Técnicas de perturbación de series hidrológicas

**Trabajo de referencia:** Chavez-Jimenez, A., Lama, B., Garrote, L., Martin-Carrasco, F., Sordo-Ward, A., Mediero, L. (2013): Characterisation of the Sensitivity of Water Resources Systems to Climate Change. *Water Resources Management*, 27(12), 4237-4258.

**Contenido:** En el trabajo seleccionado se estudia la sensibilidad de los sistemas de recursos hídricos a las alteraciones hidrológicas producidas el cambio climático. Se emplea un procedimiento para traducir los resultados de estudios regionales de impacto del cambio climático a las series temporales que se utilizan en los modelos de gestión de sistemas de recursos hídricos mediante una técnica de perturbación.

**Características:** El procedimiento de perturbación de series empleado permite incorporar los resultados agregados de los análisis de cambio climático que produce el Centro de Estudios Hidrográficos para las cuencas o sistemas de explotación de recursos de España a los modelos de análisis que se emplean en los Planes Hidrológicos para analizar medidas de adaptación al cambio climático. Este procedimiento se puede generalizar para aplicarlo a variables distintas de caudal, como precipitación o temperatura. En el estudio realizado en el trabajo de referencia se cuantifica el efecto del cambio climático en el desempeño de los sistemas de recursos hídricos, calculando la garantía con que la demanda es satisfecha mediante el uso de indicadores agregados de desempeño. El estudio se aplica a varios casos reales con situaciones de partida diferentes, por lo que, el enfoque metodológico podría ser replicado en otros casos y pasar de ser una práctica aplicada en el ámbito científico a una herramienta viable en la práctica profesional habitual.

**Técnicas específicas:** Se emplea un procedimiento para generación de escenarios de cambio climático cuando no se dispone de proyecciones climáticas locales basadas en modelos hidrológicos debidamente calibrados. Las proyecciones regionales de cambio climático se suelen formular en términos muy simples, como variación media de escorrentía. Sin embargo, los modelos de análisis de sistemas de recursos hídricos requieren series temporales mensuales para evaluar el riesgo de déficit de suministro. El procedimiento propuesto permite alterar una serie temporal mensual, modificando su media, su variabilidad interanual o su variación estacional para adaptarla a los resultados de las proyecciones climáticas regionales. Esto permite su empleo en modelos de análisis de riesgo bajo escenarios de cambio climático.

### 1.3.11 Análisis de efectos sobre extremos hidrológicos

**Trabajo de referencia:** Vicente-Serrano, S.M., Lopez-Moreno, J.-I., Beguería, S., (...), Coelho, F., Espejo, F. (2014): Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. *Environ. Res. Lett.*, 9, 044001.

**Contenido:** En el trabajo seleccionado se estudia la evolución de las sequías en la Península Ibérica a partir de las observaciones en los últimos cincuenta años, analizando el impacto de la sequía climática



en el régimen hidrológico de los ríos. Se concluye que la severidad de la sequía ha aumentado en ese periodo, debido a la mayor evapotranspiración ocasionada por el aumento de la temperatura.

**Características:** El trabajo realiza un diagnóstico de las causas climatológicas que han modificado los patrones de ocurrencia de sequías en la Península Ibérica en los últimos años. Emplea índices de sequía que son de uso habitual por la comunidad científica y profesional. El significado de estos índices es fácilmente comprensible y su evolución en el tiempo permite detectar cambios significativos en la ocurrencia de sequías. La metodología de trabajo es relativamente simple de aplicar, ya que el cálculo de los índices propuestos requiere pocos datos y su esfuerzo computacional es bajo. Proporciona resultados específicos sobre la evolución de las sequías en la Península Ibérica, con importantes consecuencias para la planificación de la gestión de los recursos hídricos en España.

**Técnicas específicas:** El trabajo emplea el “índice de precipitación-evapotranspiración estandarizada” (SPEI). Este índice extiende el concepto del “índice de precipitación estandarizada” (SPI), incorporando la variable evapotranspiración. Como otros índices, permite caracterizar la sequía según su intensidad y duración, y puede identificar el inicio y el final de los episodios de sequía. Una ventaja importante del SPEI sobre otros índices de sequía es que considera el efecto de la evapotranspiración. Esto permite incorporar directamente el impacto de la temperatura en el balance hídrico, por lo que resulta particularmente apropiado para realizar estudios de impacto de cambio climático.

### 1.3.12 Análisis de efectos sobre aguas subterráneas

**Trabajo de referencia:** Pulido-Velazquez, M., Peña-Haro, S. et al. (2015): Integrated assessment of the impact of climate and land use changes on groundwater quantity and quality in the Mancha Oriental system (Spain). *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(4), 1677-1693.

**Contenido:** En el trabajo seleccionado se presenta una metodología para evaluar los impactos potenciales del cambio climático y los cambios de uso del suelo en las aguas subterráneas, aplicada al caso del acuífero de la Mancha Oriental. En el trabajo se combinan modelos climáticos, modelos de cambio de uso del suelo, modelos hidrológicos, modelos de flujo de aguas subterráneas y modelos de transporte de contaminantes para obtener conclusiones útiles para la gestión.

**Características:** Este trabajo constituye un buen ejemplo de análisis integrado de un sistema físico en escenarios de cambio climático, en el que se combinan herramientas de modelación heterogéneas para analizar un conjunto de fenómenos complejos de gran trascendencia para la gestión del acuífero. En su planteamiento trasciende el mero cambio climático e incorpora el cambio global, mediante el análisis del efecto de la actividad humana en el sistema natural a través del cambio de uso del suelo. Analiza el acuífero de la Mancha Oriental, que es un caso de estudio tratado por numerosos investigadores a lo largo del tiempo y destaca por los problemas físicos, químicos, biológicos, sociales y económicos que plantea. La metodología de combinación de modelos para el análisis de un sistema complejo se puede generalizar para estudiar un número importante de sistemas físicos y sociales: humedales, lagos y embalses, tramos de río, zonas regables, etc.

**Técnicas específicas:** El trabajo describe el diseño de un entorno integrado de modelación, donde se combinan distintos tipos de modelos operativos que representan los procesos relevantes en el sistema hidrológico de una manera eficiente. El entorno permite simular diferentes procesos del ciclo hidrológico, facilitando los enlaces entre las distintas herramientas de modelación. Se integra el modelo hidrológico superficial SWAT para evaluar los impactos del cambio climático y de uso del suelo en la distribución temporal y espacial de la recarga de aguas subterráneas y la aportación de contaminantes. También se incorpora el cálculo de la dinámica del desarrollo de los cultivos y sus rendimientos, la evapotranspiración, las necesidades de riego y los cambios de bombeo de aguas subterráneas. Si se estudian procesos relacionados con la calidad de agua se activa módulo correspondiente de SWAT, que permite la simulación de los ciclos evolutivos de los contaminantes más habituales. Finalmente, el proceso se cierra con un modelo de aguas subterráneas totalmente distribuido, MODFLOW, y un modelo de transporte de nitratos, MT3DMS.



## 2 Interés del estudio

### 2.1 Introducción

El objetivo principal de este trabajo es la recopilación de un conjunto de buenas prácticas en la modelación de los impactos hidrológicos del cambio climático. La finalidad es divulgar el conocimiento sobre herramientas de análisis que puedan apoyar la planificación hidrológica en la Comunidad de Madrid y otras regiones geográficas. Este estudio es relevante porque los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos pueden ser significativos. El efecto del cambio climático sobre la temperatura ya se ha hecho notar de manera clara en España. Según un informe de la Agencia Estatal de Meteorología<sup>1</sup>, existe una clara tendencia desde 1971 a temperaturas más altas en España, tanto en valores promedio como en máximas y mínimas. También se ha producido un aumento de la extensión de los climas semiáridos que se puede estimar en más de 30.000 km<sup>2</sup> (en torno al 6% de la superficie de España). El comportamiento de la precipitación es menos claro, debido a su gran variabilidad interanual. Luna et al (2012) obtuvieron tendencias decrecientes significativas en el periodo 1951-2008 en 17 de 66 estaciones analizadas en España. El comportamiento de los extremos hidrológicos es aún más incierto, debido a que sólo pueden observarse ocasionalmente. Por este motivo, la estimación del impacto del cambio climático en los extremos hídricos suele basarse en las proyecciones climáticas, que señalan una clara reducción de los valores medios y un posible aumento de los valores extremos (IPCC, 2018). Este aumento amenaza con intensificar los cuantiosos daños que ya se producen habitualmente como consecuencia de sequías e inundaciones. En este capítulo se presenta la motivación básica para realizar el estudio, los perfiles profesionales a los que va destinado y la información que se puede extraer de él.

#### 2.1.1 ¿Por qué se realiza el estudio?

Los registros históricos y las proyecciones climáticas proporcionan amplia evidencia de que los recursos hídricos son vulnerables y se pueden ver afectados de forma significativa por el cambio climático. Las consecuencias de esta afección pueden ser trascendentales, tanto para el medio natural y los ecosistemas, como para nuestra estructura social y económica. La cuenca del Mediterráneo es una región particularmente vulnerable a esta amenaza climática, debido a la acusada irregularidad espacio-temporal de los recursos hídricos, a su alto grado de aprovechamiento y a la trascendencia socio-económica de su utilización. Los países del Mediterráneo han estado secularmente expuestos a fenómenos hidrológicos extremos, alternando sequías prolongadas con inundaciones fuertemente dañinas. Las proyecciones climáticas indican que los recursos hídricos de la región se verán singularmente afectados por el cambio climático. Prácticamente todos los modelos coinciden en una reducción importante de las precipitaciones y una intensificación de los fenómenos extremos. Ambas circunstancias amenazan el delicado equilibrio en que nos encontramos. Junto a ello, una dinámica social que induce el desplazamiento de la población a las ciudades y promueve la agricultura intensiva y el turismo como actividades económicas emblemáticas, componen un panorama en el que resulta necesario tener en cuenta los cambios climáticos para abordar las decisiones estratégicas de futuro.

La región de Madrid comparte estos problemas con su entorno. Aunque la agricultura no tiene un peso excesivo en su actividad económica, la fuerte concentración de población en un territorio con recursos hídricos limitados hace de la planificación hidrológica una actividad muy delicada. Desde la construcción del Canal de Isabel II en la segunda mitad del siglo XIX, el abastecimiento de agua a la ciudad de Madrid ha estado convenientemente garantizado. Este logro se ha conseguido con fuertes inversiones y grandes sacrificios. Desde las primeras obras decimonónicas, que fueron un modelo en su concepción y en el orden y previsión con que se ejecutaron los trabajos, hasta las actuaciones más recientes, se ha ido trabajando en la robustez y diversificación de las fuentes de suministro, en la densificación de las redes de distribución, en la mejora del tratamiento y depuración de las aguas y en el fortalecimiento de las capacidades operativas, de gestión y de planificación. Se dispone de

1 [http://www.aemet.es/en/noticias/2019/03/Efectos\\_del\\_cambio\\_climatico\\_en\\_espanha](http://www.aemet.es/en/noticias/2019/03/Efectos_del_cambio_climatico_en_espanha)



un patrimonio hidráulico amplio y diverso, de conocimiento experto y de técnicos preparados para resolver los problemas. Sin embargo, la tarea no está finalizada, ya que la situación es cambiante y requiere adaptación permanente. Hay muchas líneas de trabajo en marcha, tanto a nivel municipal como regional, para mejorar la seguridad de los ciudadanos, asegurando su protección frente a las inundaciones y la garantía de su abastecimiento frente a las sequías. En este contexto, se deben tener en cuenta las alteraciones de la hidrología regional que se podrían producir como consecuencia del cambio climático. Para ello será necesario acometer los estudios técnicos apropiados para analizar estos problemas en profundidad y proponer soluciones eficaces. Madrid es también la sede del Gobierno de la Nación y de todos sus Ministerios. Es, por tanto, un centro neurálgico de análisis de los problemas importantes del país y es sede de un gran número de empresas de ingeniería y consultores individuales que realizan análisis técnicos relacionados con la planificación hidrológica. Estos técnicos deberán acometer las tareas de incorporar las proyecciones climáticas en sus análisis para facilitar la toma de decisiones que permitan establecer la estrategia para afrontar el reto del cambio climático con una base cuantitativa.

En las dos últimas décadas se han desarrollado infinidad de trabajos dedicados a analizar el cambio climático con enfoques muy variados, desde los grandes proyectos internacionales de modelación de clima hasta las pequeñas iniciativas de adaptación local. En todos ellos, los participantes han debido asimilar conceptos difíciles, relacionarse con disciplinas desconocidas para ellos, incorporar un vocabulario muy diverso, desentrañar infinidad de acrónimos y lidiar con distintas fuentes de incertidumbre, para, al final, proponer resultados sencillos, que se comprendan fácilmente y se puedan tomar inmediatamente como punto de partida de decisiones estratégicas de gran trascendencia. Se trata, evidentemente, de una tarea muy difícil. Este trabajo se ha concebido para facilitar esta tarea en la medida de lo posible.

### 2.1.2 ¿En qué consiste el estudio?

El trabajo realizado ha consistido en la identificación de un conjunto de buenas prácticas para ponerlas a disposición de la comunidad de técnicos que trabajan en la incorporación del cambio climático en la gestión de los sistemas de recursos hídricos. Estas prácticas se comparten con la esperanza de que puedan resultar útiles como apoyo en las tareas de análisis en planificación hidrológica. No se trata de una recopilación exhaustiva, porque el número de buenas prácticas que se podrían identificar es potencialmente muy alto. Es más bien una recopilación ilustrativa, que pretende informar sobre los enfoques y las metodologías de trabajo que se han presentado en el mundo de la investigación en los últimos años. Con este documento se pretende acortar la distancia que habitualmente existe entre el mundo de la investigación y la práctica profesional. Pretende ser una respuesta a la constatación de que, a pesar de que el número de trabajos de investigación sobre cambio climático es abundantísimo y muy variado, el mundo profesional manifiesta frecuentemente que no dispone de criterios o herramientas para incorporar las proyecciones climáticas a su quehacer habitual.

## 2.2 Información presentada

En esta sección se presenta brevemente el tipo de información presentada en las buenas prácticas. Para cada una de ellas se ha seguido una estructura similar, consistente en un planteamiento general, donde se expone la motivación para la elección de la práctica y se identifica el trabajo que se ha tomado como referencia mediante una ficha de características básicas. A continuación, se presenta un resumen de la metodología desarrollada en el trabajo. Seguidamente se describen los componentes básicos del análisis: fuentes de datos, variables analizadas y modelos empleados, prestando especial atención a las fuentes de incertidumbre. Finalmente, se detallan las técnicas específicas empleadas en el trabajo que se consideran relevantes por su interés o utilidad. Los contenidos de todas las prácticas presentadas se pueden encuadrar en una o varias de las cuatro categorías que se describen a continuación.



### 2.2.1 Metodologías de análisis

El primer grupo de contenidos corresponde a las metodologías de análisis. Es decir, la secuencia de operaciones analíticas que se pueden realizar para analizar o resolver un problema. Las buenas prácticas ilustran sobre cómo se ha planteado el análisis de un determinado problema. En todas ellas se presenta el esquema metodológico seguido, definiendo las operaciones que se han realizado: qué datos se han recopilado y de dónde proceden, qué modelos de cálculo se han aplicado, qué resultados se han obtenido, cómo se han analizado dichos resultados, qué estadísticos o parámetros se han considerado, etc. Se ha aprovechado la oportunidad para generalizar la metodología, si ello ha sido posible, detallando las operaciones que podrían realizarse en casos similares al analizado, donde se estudian otros aspectos. Muchas de las secuencias de análisis que se presentan en las prácticas se pueden generalizar o adaptar para su aplicación en otras tareas o pueden tomarse como referencia para abordar trabajos similares.

### 2.2.2 Herramientas de cálculo

Las buenas prácticas dan acceso a una colección muy completa de herramientas de análisis, que abarcan un espectro muy amplio. En el extremo más elaborado, se proporciona información sobre modelos de cálculo. La mayor parte de los modelos relacionados son modelos hidrológicos, con una gran variedad de enfoques y formulaciones. Hay modelos hidrológicos globales, que fueron diseñados para ser ejecutados en ámbitos espaciales muy extensos con una resolución relativamente baja. También se citan modelos de cálculo que han sido aplicados a grandes cuencas hidrográficas o a países. Finalmente, hay modelos que están diseñados para el análisis de cuencas medianas a pequeñas. Estos últimos son los que incorporan un mayor grado de detalle. En otro tipo de análisis se han empleado modelos de comportamiento de sistemas hidráulicos, bien para la gestión de avenidas o para la gestión de recursos hídricos.

El coste de adquisición de estos modelos es muy variado. Algunos modelos se distribuyen libremente y otros requieren una licencia comercial para su uso. Sin embargo, la componente fundamental del coste es la inversión en su aprendizaje. Muchos de los modelos mencionados están soportados por aplicaciones informáticas que llevan muchos años en desarrollo y han alcanzado un alto grado de madurez, por lo que disponen de distribuciones correctamente documentadas que facilitan su uso. En otros casos, los modelos son el resultado del desarrollo no estructurado de elementos de cálculo que van resolviendo las cuestiones puntuales que resultan necesarias. Este tipo de modelos requieren de una mayor dedicación para su uso, pero suelen tener una estructura más abierta que permite las modificaciones.

Junto a los modelos de cálculo, las buenas prácticas dan acceso a utilidades específicas que realizan tareas concretas, sin llegar a constituir un modelo integrado. Por ejemplo, se proporciona información sobre utilidades para acceder a datos codificados, hacer operaciones espaciales con los datos, realizar análisis estadísticos o representar visualmente los resultados. Este tipo de utilidades suelen estar disponibles en los entornos de análisis que se utilizan en el ámbito científico, como librerías para lenguajes de programación, utilidades en entornos de cálculo o rutinas en sistemas de información geográfica. En algunos casos se trata de aplicaciones comerciales, pero es frecuente que los investigadores elijan entornos gratuitos de desarrollo, como, por ejemplo, Linux, QGIS o R. En el ámbito científico es muy frecuente el desarrollo colaborativo de herramientas de computación. Según este modelo, algunos investigadores que desarrollan rutinas de cálculo las agrupan en un paquete que distribuyen para que puedan ser utilizadas por otros investigadores. Esto proporciona mayor visibilidad a su trabajo y les ofrece mejores oportunidades de promoción.

### 2.2.3 Técnicas específicas

En las buenas prácticas se describen técnicas específicas para desarrollar las tareas asociadas al análisis de proyecciones climáticas. En este grupo se encuentran las técnicas para realizar operaciones de detección y ajuste de tendencias en observaciones, reducción de escala, corrección de sesgo, evaluación de incertidumbre, perturbación de series hidrológicas, análisis de riesgo, simulación de Monte-Carlo, caracterización de sequías, etc. El catálogo de técnicas posibles es muy amplio y no se puede realizar una revisión pormenorizada de cada una de ellas, pero se han seleccionado las que se consideran más interesantes y se ha presentado brevemente su objetivo, su





estructura y las ecuaciones que se aplican en cada buena práctica. El acceso a este tipo de técnicas se puede tomar como un punto de partida para encontrar el procedimiento que resulte más apropiado a las necesidades que surjan en cada caso.

#### 2.2.4 Fuentes de datos

El análisis de las buenas prácticas ofrece muchas oportunidades para identificar fuentes de información. En algunos casos, las fuentes de datos son sobradamente conocidas, pero en otros casos se trata de bases de datos científicas que no tienen gran difusión en el ámbito profesional. Los informes correspondientes a las buenas prácticas contienen numerosas referencias a repositorios de resultados de modelos climáticos, proyecciones climáticas, observaciones o re-análisis meteorológicos, propiedades del terreno (topografía, usos del suelo, tipos de suelo, cobertura vegetal), bases de datos de episodios adversos o desastres naturales, etc. En algunos casos son datos correspondientes a España y en otros se refiere a ámbitos territoriales más extensos. La resolución espacio-temporal y la propia calidad de los datos son muy variables. También lo es la facilidad de acceso y proceso de la información, porque en ocasiones están codificados en estructuras de datos complejas, como los ficheros *netcdf*. Las fuentes de datos descritas pueden resultar relevantes para encontrar la información de contexto que se necesita para interpretar la información climática correspondiente a un caso concreto.

### 2.3 Perfiles profesionales

El trabajo presentado en este documento va destinado a analistas especializados en hidrología y recursos hídricos que proporcionan información a los tomadores de decisión en distintos niveles de la Administración o del sector privado. Se trata de prestar apoyo en las tareas de análisis de los efectos del cambio climático en los extremos hidrológicos, centrado en la resolución de problemas prácticos relacionados con la evaluación del riesgo de inundaciones y sequías o identificación de las medidas necesarias para su gestión. Esta necesidad puede surgir en una gran variedad de contextos, En esta sección se presentan algunos ejemplos.

#### 2.3.1 Confederaciones Hidrográficas

Las Confederaciones Hidrográficas y las unidades equivalentes de la Administración Autonómica tienen competencias en planificación hidrológica. Actualmente, son responsables de la elaboración de los planes hidrológicos de cuenca contemplados en la Directiva Marco del Agua y de los planes de gestión del riesgo de inundación contemplados en la Directiva de Inundaciones. También elaboran los planes especiales de sequía previstos en la Ley 10/2001 del Plan Hidrológico Nacional. Finalmente, son responsables de la seguridad de las presas y embalses de titularidad estatal. Todas estas competencias se ven afectadas por el cambio climático, a través de los efectos que pueda tener en los extremos hidrológicos.

La tarea de planificación hidrológica incluye la evaluación de recursos hídricos y la asignación de dichos recursos a las demandas de agua en la cuenca. Los recursos disponibles se verán alterados por el cambio climático a través de su influencia en los valores medios de las aportaciones, su variabilidad y el comportamiento de los ciclos de sequía. En consecuencia, el análisis del efecto del cambio climático sobre los recursos hídricos es una actividad esencial en la planificación hidrológica. Así se reconoce en los Esquemas Provisionales de Temas Importantes de los planes hidrológicos del tercer ciclo de planificación (2021-2027), sometidos a participación pública en enero de 2020, donde se contempla el cambio climático como una de las cuestiones relevantes a tener en cuenta en la planificación. En estos estudios se parte del trabajo elaborado en el año 2017 por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, pero la incorporación de estos escenarios climáticos a las herramientas de análisis de la disponibilidad de agua (entorno Aquatool) requiere de una elaboración posterior para poder transformar los valores medios de escorrentía obtenidos por el CEDEX en series de aportaciones que se puedan manejar en Aquatool. También es necesario definir una metodología de trabajo para gestionar la diversidad de hipótesis que se derivan de los distintos escenarios de



emisiones, proyecciones climáticas y horizontes de análisis y obtener conclusiones útiles en el ciclo de planificación.

En el caso de los planes de gestión del riesgo de inundación, también resulta necesario incorporar los resultados de los análisis de cambio climático en los mapas de peligrosidad y en la selección de medidas de gestión del riesgo. Existe un grupo de trabajo que en noviembre de 2019 celebró una jornada sobre el efecto del cambio climático en el riesgo de inundación. En esta jornada se analizaron las alternativas metodológicas para evaluar el impacto del cambio climático en el riesgo de inundación. En este caso no existe un trabajo unificado de ámbito nacional que se pueda tomar como referencia, por lo que los análisis se deben realizar directamente a partir de las proyecciones climáticas. Es necesario pasar de dichas proyecciones a la producción de mapas de inundabilidad y posteriormente evaluar el riesgo y definir medidas de gestión adecuadas.

Los planes especiales de sequías son el instrumento fundamental para la gestión del riesgo de sequía en el ámbito de competencias de las Confederaciones Hidrográficas. Estos planes contemplan un sistema de indicadores que se emplea para activar distintas medidas de gestión destinadas a afrontar los problemas coyunturales de escasez de agua. El análisis técnico que soporta los indicadores y la activación de las medidas es sensible a las alteraciones que el cambio climático puede producir en el comportamiento de las series hidrológicas. La alteración de los caudales bajos puede modificar las probabilidades de fallo de suministro y debe tenerse en cuenta a la hora de diseñar este tipo de medidas. Al igual que en casos anteriores, estos estudios deben realizarse para los distintos escenarios climáticos, obteniendo conclusiones que resulten útiles para la modificación, si procede, de las medidas contempladas en los planes.

La gestión de la seguridad de las presas es competencia del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Además, las Confederaciones Hidrográficas son responsables de la explotación de un gran número de grandes presas en España. Algunos aspectos relativos a la seguridad de las presas se ven directamente afectados por el cambio climático. En particular, la seguridad hidrológica de las presas se puede ver alterada si se producen cambios en el régimen de máximas crecidas que puede entrar al embalse. También podría ser necesario modificar las normas de explotación en situaciones extraordinarias, con la finalidad de poder adaptar la seguridad de la presa y los objetivos de laminación de avenidas a las alteraciones que se pudieran producir en la sollicitación hidrológica.

Todas las actividades descritas suponen un reto para el personal de las Confederaciones Hidrográficas, que debe además atender el resto de las obligaciones de su trabajo. Es necesario combinar el conocimiento específico sobre su ámbito de actuación (planificación hidrológica, inundaciones, sequías o presas) con el conocimiento sobre el cambio climático y los métodos para su análisis. Este tipo de trabajos son particularmente exigentes, puesto que las decisiones se basan en los resultados del análisis técnico de sistemas que son muy complejos y corresponden a situaciones con una probabilidad de ocurrencia muy baja, conforme a datos históricos pasados. A las dificultades propias de esta tarea, ya de por sí exigente cuando se analizan situaciones estacionarias, debe añadirse la complejidad introducida por la posible no estacionariedad de las sollicitaciones hidrológicas. Las buenas prácticas contenidas en este trabajo pueden suponer un apoyo útil, ofreciendo alternativas metodológicas y herramientas de análisis para acometer esta tarea.

### 2.3.2 Operadores de agua

Las entidades encargadas de la prestación de servicios de abastecimiento de agua y saneamiento son responsables de su planificación estratégica. Uno de sus cometidos fundamentales es el garantizar el suministro de agua, identificando las necesidades que pudieran surgir en el futuro con la suficiente antelación como para poder actuar sin comprometer la garantía de servicio. En este contexto, la incorporación del cambio climático en el análisis del ciclo urbano del agua es una necesidad que se debe poner de manifiesto en sus análisis a medio y largo plazo. Este tipo de operadores suelen trabajar con un nivel de garantía muy elevado, en el que se deben evitar los fallos de suministro siempre que sea posible. Esto exige una gran anticipación en la toma de decisiones. Junto a ello, estas empresas tienen la responsabilidad de la explotación de un número importante de grandes presas, cuya seguridad puede verse alterada como consecuencia del cambio climático.



Las modificaciones del régimen hidrológico que se contemplan en algunas proyecciones climáticas afectarán a la garantía de suministro y es muy probable que requieran de medidas específicas para mantener el nivel de servicio. En consecuencia, resulta conveniente disponer de los estudios técnicos que permitan traducir las proyecciones climáticas a variables directamente relacionadas con la operación de estos sistemas. Este tipo de estudios tiene un alto grado de exigencia, por la gran trascendencia del servicio prestado y por el alto coste de las medidas que pueden ser necesarias. Los gabinetes técnicos de los operadores de agua se pueden beneficiar de las prácticas descritas en este documento. En general, estos servicios están integrados por especialistas, con un gran conocimiento del territorio del que obtienen los recursos hídricos y de las técnicas que se aplican para su estudio y modelación. Sin embargo, es posible que estén menos familiarizados con las técnicas propias de los análisis de cambio climático. Este documento puede constituir un apoyo útil para facilitar la tarea de obtención de información sobre la disponibilidad de datos, las metodologías de análisis más apropiadas o las técnicas más eficaces.

### 2.3.3 Empresas eléctricas

El sector de la energía es uno de los protagonistas de las acciones de respuesta al cambio climático, tanto desde la perspectiva de la mitigación como de la adaptación. En los escenarios de reducción de emisiones que se manejan, resulta imprescindible la transformación de los procesos de generación de energía hacia fuentes renovables sin emisiones. Las energías solar y eólica son fuertemente irregulares. Aunque hay otras alternativas en desarrollo, es de esperar que una parte importante de la responsabilidad de la regulación recaiga sobre la energía hidroeléctrica, que será un recurso estratégico de importancia creciente en el futuro. En este contexto, la garantía de potencia será un imperativo para poder hacer frente a la variabilidad de la generación y el consumo de electricidad. Junto a ello, está previsto que aumente el parque de centrales reversibles para absorber el exceso de generación derivado del incremento de potencia renovable instalada cuando no haya consumo suficiente. En consecuencia, el sector eléctrico es uno de los más activos en la planificación estratégica relacionada con el cambio climático. Aunque este tipo de empresas cuentan ya con especialistas muy competentes en cambio climático, es posible que algunas de las aportaciones de este documento les resulten de utilidad, particularmente las relacionadas con el análisis de riesgos. Estas empresas también tienen la responsabilidad de la explotación de grandes presas, que están expuestas al riesgo del cambio climático.

### 2.3.4 Administración autonómica y local

Las administraciones autonómica y local también tienen competencias relacionadas con los extremos climáticos, tanto en la protección frente a las inundaciones como en la gestión de sequías. En el caso de la administración autonómica, son responsables de la implantación de planes de gestión del riesgo de inundación y de gran parte de las competencias relacionadas con la gestión de sequías, particularmente aquéllas relacionadas con el sector agrario. La ordenación del territorio está también relacionada con la disponibilidad de recursos y la evaluación de riesgos. En el caso de la administración local, el cambio climático supone a la vez una amenaza y una oportunidad para la transformación del entorno urbano. Tiene incidencia significativa sobre el riesgo de inundación, la gestión de la red de drenaje, la ordenación de los usos del suelo y sobre la eficiencia del uso del agua en el municipio.

### 2.3.5 Otros colectivos interesados

Además de los ya relacionados, existen otros colectivos que pudieran beneficiarse de la información contenida en este trabajo. En general, todos los usuarios de agua, tanto si disponen de título concesional como si no, pueden verse afectados por el cambio climático. En particular, los regantes tienen un interés especial en el efecto del cambio climático, no sólo para la toma de decisiones en periodos coyunturales de escasez, sino, sobre todo, para valorar la viabilidad de su actividad a largo plazo. En determinadas zonas, las proyecciones de reducción de recursos comprometen seriamente la posibilidad de mantener en un futuro los usos actuales de agua. Es muy posible que los usos de regadío experimenten una transformación profunda como consecuencia de la escasez de agua derivada del cambio climático y resulta conveniente acometer los estudios técnicos necesarios para contemplar esta posibilidad. Los colectivos interesados en el medio ambiente deben prestar atención



a las modificaciones del régimen de caudales, particularmente los caudales bajos, puesto que pueden producir alteraciones muy importantes en los ecosistemas acuáticos. La toma de decisiones en espacios naturales es compleja, y la información técnica puede resultar muy útil para anticipar los problemas y definir las medidas de actuación. Otros colectivos que se pueden citar por su relación con la gestión de riesgos son la protección civil y las aseguradoras, especialmente el Consorcio de Compensación de Seguros.

### 2.3.6 Proveedores de servicios tecnológicos

Existe una gran variedad de proveedores de servicios tecnológicos que prestan apoyo a los tomadores de decisión. En esta categoría se incluyen los proveedores de servicios climáticos o los proveedores de los equipos y tecnologías de información y comunicaciones que se emplean en la captación y proceso de datos hidrológicos. Estas entidades pueden estar interesadas en conocer el tipo de análisis que se hace con la información que proporcionan.

### 2.3.7 Ingeniería, consultoría e investigación

Gran parte de las actividades de análisis tendrán que ser ejecutadas por empresas de ingeniería y consultoría, a través de contratos de asistencia técnica con las Administraciones. El personal de estas empresas tiene una habilidad especial para adaptar sus capacidades a las necesidades del mercado y está en continua evolución, en un proceso de aprendizaje permanente. Las buenas prácticas recopiladas en este documento pueden ser una ayuda en el proceso de capacitación para poder prestar la asistencia técnica requerida en estudios de cambio climático. Aunque este documento no está especialmente concebido para investigadores, también puede resultar útil a personas que se dedican a la investigación, tanto a especialistas de cambio climático que desean obtener información sobre efectos en los recursos hídricos, como a investigadores en hidrología y recursos hídricos que desean afrontar problemas relacionados con el cambio climático. Además, dada la naturaleza transversal de la hidrología, puede resultar también de interés para investigadores de otras disciplinas, como agricultura, medio ambiente, energía, desastres naturales, urbanismo, ordenación del territorio, gestión de riesgos o economía. Aunque no constituye una revisión exhaustiva del estado del arte, este trabajo contiene más de 500 referencias bibliográficas, de las que se ofrece una reseña de más de 140 artículos y un análisis detallado de 15 trabajos de investigación. Además de prestar acceso a la bibliografía, este documento es un buen punto de partida para localizar fuentes de información, grupos de trabajo, herramientas analíticas y computacionales o técnicas específicas de análisis.

## 2.4 Tipos de trabajo

Las prácticas que se han seleccionado para su presentación tienen un enfoque muy diverso. La selección es el resultado de la interacción con los técnicos del Canal de Isabel II y Fundación Canal, que han planteado las cuestiones que pueden resultar más interesantes para las tareas que tienen pendientes de análisis de proyecciones climáticas. En esta sección se realiza una breve introducción los tipos de trabajo para los que las prácticas recopiladas pueden resultar de interés.

### 2.4.1 Detección de efectos

Un grupo importante de trabajos relacionados con el análisis del cambio climático se centra en la detección de efectos en observaciones. En este tipo de trabajos se trata de identificar los efectos ya detectados del posible cambio climático en las observaciones disponibles en un emplazamiento. Estos trabajos únicamente son viables si se dispone de series largas de observaciones y se puede garantizar que el método de toma de datos no ha cambiado sustancialmente durante el periodo analizado.

El principal problema de este tipo de estudios es discriminar entre la variabilidad natural de los fenómenos, los efectos de la actividad humana y los efectos del cambio climático. Los fenómenos hidrológicos extremos son, por su propia naturaleza, poco frecuentes. Resulta muy difícil atribuir la variabilidad observada a una tendencia subyacente, y mucho más aún concluir que dicha tendencia se debe al cambio climático. Es frecuente que muestras tomadas de una distribución estacionaria



presenten una tendencia aparente que se pueda llegar a confundir con el efecto del cambio climático. Esto es particularmente significativo en el caso de las distribuciones extremales de precipitación o caudales. Cada vez que ocurre un fenómeno de alto periodo de retorno se modifica al alza la estimación de las características de la ley de frecuencia que había previamente a la aparición del fenómeno. Esta circunstancia se suele interpretar como evidencia de cambio climático, indicando con insistencia que los fenómenos adversos son cada vez más frecuentes y más intensos. Sin embargo, esto no necesariamente indica un cambio climático. Es simplemente una manifestación del carácter aleatorio del estimador que se utiliza en la ley de frecuencia y un indicador de la sensibilidad que tiene a las observaciones, en particular a la longitud de la serie observada y a la aparición de fenómenos con baja probabilidad de superación.

Para controlar estos efectos existen técnicas estadísticas de detección de tendencias o de falta de homogeneidad en las series. La aplicación rigurosa de este tipo de técnicas permite, en muchas ocasiones, discriminar entre la variabilidad y la tendencia, puesto que disponen de mecanismos para tener en cuenta la variabilidad de la serie o la longitud de las observaciones. Las buenas prácticas presentadas pueden ayudar a identificar las metodologías adecuadas para hacer este análisis y las herramientas de cálculo (test estadísticos) que son apropiadas para detectar este tipo de fenómenos. Las prácticas también ayudan a formular el modelo adecuado para describir las tendencias, utilizando las variables explicativas que proporcionen el mejor ajuste. Finalmente, las prácticas contienen algún ejemplo sobre cómo se puede tener en cuenta la intervención humana para explicar las tendencias observadas en las series.

#### 2.4.2 Evaluación de impactos

Probablemente, la aplicación más frecuente de las proyecciones climáticas es el análisis de impactos. Se trata de estimar los efectos esperados del cambio climático sobre la ocurrencia de fenómenos hidrológicos extremos. Esta tarea se suele acometer mediante una cadena de modelación, en la que el punto de partida son las proyecciones climáticas obtenidas mediante los modelos globales de clima. El resultado del análisis debe ser la caracterización del efecto que tiene el cambio climático sobre determinados aspectos de la ocurrencia de fenómenos extremos: modificaciones en su frecuencia, intensidad, duración, magnitud o severidad. El estudio se puede realizar a escala global, continental, regional, nacional o local.

Hay numerosas alternativas metodológicas para realizar este análisis, que dependen del alcance y objetivos del estudio, el ámbito territorial, el enfoque y los recursos que se puedan destinar. Las buenas prácticas ofrecen algunos ejemplos de este tipo de estudios, bien considerados como una práctica en sí mismos o bien para ilustrar alguna de las técnicas específicas o aplicaciones que se presentan. En particular, las prácticas contienen ejemplos de estudios de alcance continental, que requieren un gran esfuerzo computacional y muchos medios de análisis, estudios realizados a escala nacional, menos ambiciosos en su planteamiento, pero que también requieren de un gran esfuerzo de proceso de la información, y estudios locales de alcance más modesto que, al centrarse en un ámbito territorial más reducido, pueden ser más específicos.

El cualquier caso, un estudio que partiera directamente de los resultados de un conjunto de modelos globales de clima y pretendiera obtener resultados en una cuenca de tamaño medio o pequeño en varios escenarios de emisiones requeriría de un esfuerzo considerable, tanto desde el punto de vista del conocimiento necesario para su planteamiento, la capacidad para identificar las técnicas adecuadas de proceso y los recursos computacionales de cálculo y proceso de información que se requerirían. Sería necesario acceder a los resultados de los modelos globales, realizar las operaciones de reducción de escala y corrección de sesgo de las variables de interés, aplicar uno o varios modelos hidrológicos, correctamente calibrados, para traducir las variables climáticas a variables hidrológicas y analizar los resultados obtenidos mediante el estudio de las series de extremos derivadas. Habría que resolver todos los problemas de transferencia de información entre las distintas herramientas utilizadas, modificando la resolución espacial o temporal según fuera necesario. La resolución espacial vendría determinada por el tamaño de la cuenca, pero con seguridad sería mucho más fina que la ofrecida por los modelos climáticos. Si el estudio se centra en las crecidas, probablemente sería necesario trabajar con una resolución temporal diaria o superior, caracterizando hidrogramas



individuales. Sería necesario hacer todo ello en un gran número de hipótesis de cálculo, combinando escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero, modelos climáticos y horizontes temporales de análisis. Además, habría que gestionar las fuentes de incertidumbre, realizando un tratamiento de los resultados para poder extraer las conclusiones relevantes para la toma de decisiones.

Frente a esta alternativa maximalista, probablemente inabordable en la mayor parte de los casos, las prácticas presentan ejemplos parciales, donde se resuelven específicamente algunas de estas tareas o se aprovecha la disponibilidad de información sobre resultados de análisis previos para centrar el estudio en un aspecto particular. Así, hay trabajos que han realizado el análisis del efecto del cambio climático sobre los extremos hidrológicos a escala global o regional, analizando los resultados de los modelos climáticos y empleando modelos hidrológicos globales. Existen estudios que han resuelto el problema de la reducción de escala en ámbitos geográficos extensos, como, por ejemplo, los resultados del proyecto CMIP5 o los escenarios regionalizados que ha producido AEMET en España. También hay estudios donde se han realizado análisis globales a escala nacional, como el trabajo del Centro de Estudios Hidrográficos sobre impacto del cambio climático en los recursos hídricos. Estos trabajos pueden ser el punto de partida para estudios de detalle, en los que se aproveche el trabajo realizado a una escala determinada para pasar a una escala de mayor resolución. Las prácticas presentadas ilustran cómo se puede aprovechar el abundantísimo trabajo ya realizado para plantear estudios eficaces en función de los objetivos que se planteen y de los recursos de los que se pueda disponer.

### 2.4.3 Identificación de riesgos

En el análisis de extremos hidrológicos, la mera caracterización de su comportamiento puede no ser suficiente. Es importante conocer si las inundaciones van a ser más frecuentes o si las sequías serán más prolongadas o de mayor intensidad. Sin embargo, desde el punto de vista social, lo que realmente importa es la caracterización de los riesgos. En extremos climáticos, los riesgos hidrológicos se suelen asociar a los daños producidos, por lo que el análisis de riesgos suele concluir con una estimación de daños. En crecidas, se trataría de estimar los daños producidos por las inundaciones. En sequías, el análisis económico suele ser menos frecuente y se suele admitir que los déficits de suministro son una variable subrogada de los daños.

La literatura científica dedicada a la caracterización de riesgos hidrológicos bajo cambio climático es mucho menos abundante que la dedicada a la caracterización de extremos. Esto se justifica porque la caracterización de la influencia del cambio climático en los riesgos requiere un paso adicional de análisis que no resulta fácil. El motivo fundamental es que el análisis bajo proyecciones climáticas puede no ser lo suficientemente representativo. Las proyecciones climáticas suelen materializarse en resultados de simulación hidrológica en ventanas determinadas de tiempo, correspondientes a los horizontes temporales del análisis. Estas ventanas no suelen tener una gran longitud; el valor más frecuente que se encuentra en la literatura suele estar próximo a los 30 años. No resulta fácil realizar la caracterización del riesgo a partir de ventanas de análisis tan cortas, particularmente si tenemos en cuenta que en la práctica profesional se suele trabajar con periodos de retorno muy superiores a 30 años. Por este motivo, el análisis de la influencia del cambio climático sobre el riesgo hidrológico requiere no sólo añadir uno o varios modelos adicionales de cálculo a la cadena de modelación, sino que, en muchas ocasiones, exige plantear una metodología de análisis específica.

Alguna de las buenas prácticas presentadas se puede tomar como referencia para plantear un análisis de riesgos. En particular, hay prácticas donde se aborda específicamente la cuestión de los daños por inundación o los indicadores de garantía en sistemas de recursos hídricos. En ellas se ilustra sobre la técnica de simulación de Monte Carlo como procedimiento complementario que permite hacer una evaluación de los riesgos, reproduciendo, por ejemplo, las leyes de frecuencia de crecidas, el valor anual esperado de los daños por inundación o la garantía de suministro de un abastecimiento en tiempo o en volumen. Lógicamente, la diversidad de situaciones en la que sería necesario hacer este tipo de análisis imposibilita que se puedan presentar ejemplos de todos los casos, pero es posible que los ejemplos presentados se puedan tomar como guía. Por ejemplo, el riesgo de inundación pluvial en zona urbana requiere de métodos de análisis muy específicos, vinculados a las condiciones meteorológicas y topográficas locales. El análisis de una plana de inundación compleja requeriría de





un análisis de la sollicitación hidrológica en combinación con los modelos hidráulicos de inundación. La seguridad de una presa se debería abordar combinando la sollicitación hidrológica con un modelo de operación del embalse. Todos estos casos se podrían abordar a partir de modelos estocásticos de simulación de lluvia ajustados en escenarios climáticos, de forma similar a los ejemplos que se presentan en alguna de las prácticas.

#### 2.4.4 Definición de estrategias

Aunque este trabajo no está centrado en la adaptación al cambio climático, sino en la modelación de eventos hidrológicos extremos, las prácticas presentadas pueden resultar relevantes para estudios de definición de estrategias de actuación para la gestión de los riesgos vinculados a los fenómenos hidrológicos. alguna de las prácticas presentadas prolonga la cadena de modelación, entrando en la simulación del comportamiento de sistemas expuestos al riesgo, como planas de inundación, infraestructuras hidráulicas o sistemas de recursos hídricos. La definición de estrategias de gestión del riesgo se puede plantear de forma similar a los planes de gestión del riesgo de sequías: se realizan previamente unos análisis técnicos que identifican unos indicadores y determinan unos umbrales de actuación en función del valor de los indicadores. La forma habitual de proceder consiste en realizar unos análisis técnicos de evaluación del riesgo de falta de suministro y establecer que se realicen determinadas actuaciones cuando el riesgo alcance valores no aceptables. En el caso del cambio climático, se pueden hacer los análisis de riesgo en distintos escenarios climáticos y detectar en cuáles de ellos el riesgo no resulta asumible, por lo que sería necesario plantear medidas de gestión.

Los métodos de análisis descritos en las prácticas se pueden adaptar para realizar este tipo de estudios, en los que se puede vincular determinadas actuaciones a que se alcancen unos umbrales climáticos previamente definidos. Por ejemplo, la técnica de escalado de decisión, presentada en una de las prácticas, está específicamente concebida para prestar apoyo en esta tarea. Evidentemente, la casuística de las medidas de gestión del riesgo es muy amplia y no se puede presentar un ejemplo de cada tipo, pero sí se ofrecen algunos ejemplos que se pueden tomar como guía.





## 3 Selección de buenas prácticas

### 3.1 Planteamiento metodológico

La metodología para la elaboración de este trabajo se estructuró en tres fases: una primera fase de recopilación de literatura, una segunda fase de selección de las mejores prácticas a desarrollar en el estudio y una tercera fase de análisis detallado de las prácticas seleccionadas.

#### 3.1.1 Fase 1: Revisión bibliográfica

El trabajo de la primera fase consistió en la identificación y recopilación de la literatura más relevante sobre el tema objeto del estudio. Se consultaron artículos de revista, comunicaciones a congresos, libros o capítulos de libro, informes técnicos elaborados por organismos de prestigio, tesis doctorales y trabajos profesionales.

Los criterios para la selección de la literatura más relevante se resumen a continuación:

- Trabajos cuya temática está asociada a modelos hidrológicos aptos para la evaluación de fenómenos extremos (sequías e inundaciones) e impacto del cambio climático.
- Estudios representativos a distintas escalas: mundial, continental, regional, nacional y local.
- Estudios realizados sobre regiones cuyas características son similares a las encontradas en España: clima mediterráneo, con cuencas de tamaño medio y grande (desde cientos de km<sup>2</sup> a decenas de miles de km<sup>2</sup>).
- Se priorizan los estudios más recientes, por incorporar técnicas más avanzadas.
- Se priorizan los estudios realizados por instituciones de reconocido prestigio en el ámbito académico, institucional y profesional.
- Se priorizan los estudios que están avalados por un número importante de citas de terceros autores.
- Se priorizan los trabajos realizados por investigadores españoles, por ser más representativos de las condiciones de las cuencas españolas.

En la primera fase se recopilaron un total aproximado de 400 referencias bibliográficas. En estos documentos se identificaron las prácticas seguidas para comprender y modelar los fenómenos hidrológicos extremos en un contexto de cambio climático. Se realizó una valoración inicial del material recopilado, seleccionando unas 140 referencias para un análisis más detallado. De cada una de estas referencias se realizó una breve reseña, que se presenta en el capítulo 5 de este documento. Las referencias seleccionadas se introdujeron en una base de datos, donde se agregaron atributos que permiten su clasificación y tratamiento para realizar un análisis global.

A partir de la documentación recopilada se ha seleccionado un conjunto de referencias para estudiar con más atención y se han identificado y clasificado las prácticas aplicadas en bloques generales, describiendo brevemente cada una de las categorías.

El día 19 de septiembre de 2019 se realizó la primera reunión de trabajo con técnicos de Fundación Canal y Canal de Isabel II.

#### 3.1.2 Fase 2: Selección de buenas prácticas

En la segunda fase se procedió a la selección de las buenas prácticas que se desarrollarían en el trabajo. Para ello, se elaboró una primera relación de bloques temáticos, resultado del análisis bibliográfico realizado. Esta relación se presenta en la segunda sección de este capítulo. A partir de la clasificación inicial de bloques temáticos, se plantearon reuniones del equipo de trabajo con los técnicos del Canal de Isabel II y Fundación Canal, con el objeto de intercambiar impresiones y elegir



las buenas prácticas que resultaran más relevantes para los fines del estudio. Se organizaron dos reuniones de trabajo, celebradas los días 28 de noviembre y 13 de diciembre de 2019. En la primera reunión se presentaron los resultados de la investigación bibliográfica realizada, clasificando los trabajos revisados en cuatro grandes bloques temáticos:

- Estudios de caracterización de impactos a partir de MCG
- Técnicas basadas en observaciones
- Técnicas específicas
- Análisis de efectos en sistemas naturales y sociales

A lo largo de la reunión se expusieron, a grandes rasgos, los tipos de trabajos incluidos en cada uno de los bloques, discutiendo su contenido y presentando ejemplos de algunos de ellos.

En la segunda reunión, los técnicos de Canal de Isabel II presentaron una relación de las prácticas que, a su juicio, eran más relevantes para su gestión en asuntos relacionados con el cambio climático. Las categorías seleccionadas fueron las relacionadas a continuación:

- Estudios de impacto de cambio climático fijando un valor de calentamiento global
- Análisis de tendencias de extremos de variables observadas
- Técnicas de reducción de escala
- Técnicas de corrección de sesgo
- Técnicas de análisis de incertidumbre
- Efecto en las aguas subterráneas

A partir de estas consideraciones, se elaboró la propuesta de doce buenas prácticas a desarrollar en la tercera fase del estudio. En ella se incluyeron las identificadas por Canal de Isabel II (en algunos casos desdobladas en dos versiones), más dos prácticas adicionales, seleccionadas por su relevancia, hasta completar el total de doce. Esta propuesta de buenas prácticas cubre adecuadamente el rango de actividades vinculadas a la modelización de fenómenos hidrológicos extremos en un contexto de cambio climático.

### 3.1.3 Fase 3: Documentación de las buenas prácticas

En la tercera fase se procedió al análisis y documentación de las buenas prácticas identificadas. Se estudió la referencia principal y otras referencias complementarias con la finalidad de comprender el enfoque y alcance de las tareas planteadas y documentar su aplicación. Para cada práctica se elaboró una base de datos con la información relevante de cada una:

- Autor, año y referencia bibliográfica
- Datos históricos utilizados y periodo temporal modelizado
- Tipo de evento extremo considerado y alcance geográfico
- Enfoque del estudio
- Modelos utilizados en la estimación de impactos (escenarios de emisiones, modelos globales, regionales, hidrológicos)
- Variables de salida de la modelización climática e hidrológica
- Principales incertidumbres de los modelos utilizados
- Elementos del estudio que lo convierten en una buena práctica dentro del sector
- Técnicas específicas de interés para replicar la buena práctica



En el capítulo cuarto de este estudio se presentan las buenas prácticas, indicando su planteamiento general, sus objetivos, los datos de partida, la metodología de trabajo, los resultados proporcionados, su utilidad y sus limitaciones.

## 3.2 Bloques temáticos

Como consecuencia de la revisión de literatura, se identificaron varios bloques temáticos de trabajos que podrían ser objeto de un análisis posterior para seleccionar las buenas prácticas que se desarrollarían en el trabajo. La clasificación se realizó a partir de la bibliografía, buscando una representatividad equilibrada del tipo de trabajos que aparecen publicados con más frecuencia. Se identificaron los bloques siguientes:

- Caracterización de impactos a partir de modelos globales de clima
- Técnicas basadas en observaciones
- Técnicas específicas
- Análisis de efectos en sistemas naturales y sociales

En esta sección se describe brevemente cada bloque temático y se presentan algunos ejemplos de los trabajos más relevantes.

### 3.2.1 Caracterización de impactos a partir de modelos globales de clima

El primer bloque temático está integrado por los estudios donde se caracterizan impactos del cambio climático sobre los extremos hidrológicos a partir de los resultados de modelos globales de clima. Se trata de un bloque muy amplio, caracterizado por el empleo de una cadena de modelación que parte de los modelos climáticos. En algunos casos, el análisis se realiza directamente sobre los resultados de los modelos, mientras que en otros casos se aplican modelos hidrológicos para transformar las variables climáticas en series hidrológicas. En este bloque temático se identificaron las siguientes categorías:

- Estudios integrales de inundaciones y sequías
- Impacto de cambio climático fijando un valor de calentamiento global
- Análisis de la evolución de patrones de circulación atmosférica

#### 3.2.1.1 Estudios integrales de inundaciones y sequías

Son estudios que analizan el impacto del cambio climático sobre las crecidas y sequías. Están basados en un esquema de modelos vinculados en cascada que comienza con la consideración de proyecciones climáticas derivadas de modelos globales o regionales de clima, tanto para escenario de control como para escenarios futuros. En algunos casos acoplan modelos hidrológicos y, posiblemente, modelos de estimación de riesgos: daño económico, área, actividades económicas y población afectada por inundaciones o sequías, etc. En el proceso se suele aplicar técnicas de escalado, corrección de sesgo o análisis de incertidumbre, que se tratan en una categoría independiente. A continuación, se citan algunos ejemplos de esta categoría:

- Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España.
- Regionalised Impacts of Climate Change on Flood Flows: Hydrological Models, Catchments and Calibration. R&D Milestone Report FD2020/MR1
- Regionalised Impacts of Climate Change on Flood Flows. R&D Technical Report FD2020/TR
- Alfieri, L., Burek, P., Feyen, L., Forzieri, G. (2015): Global warming increases the frequency of river floods in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences* 19(5) 2247-2260. Nº citas: 127



- Marcos-García, P., López-Nicolas, A., Pulido-Velázquez, M. (2017): Combined use of relative drought indices to analyze climate change impact on meteorological and hydrological droughts in a Mediterranean basin. *Journal of Hydrology* 554(2) 292-305. Nº citas: 10
- Forzieri, G., Feyen, L., Rojas, R., Flörke, M., Wimmer, F., Bianchi, A. (2014): Ensemble projections of future streamflow droughts in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences* 18(1) 85-108. Nº citas: 97
- Krysanova V., Vetter T., Eisner S., et al. (2017): Intercomparison of regional-scale hydrological models and climate change impacts projected for 12 large river basins worldwide - A synthesis. *Environmental Research Letters* 12(10). Nº citas: 20

### 3.2.1.2 *Impacto de cambio climático fijando un valor de calentamiento global*

Son estudios similares a los de la categoría anterior, con la particularidad de que, en lugar de realizar proyecciones basadas en escenarios de emisiones analizando periodos de impacto, se analizan los impactos que se derivan de un determinado nivel de calentamiento global, independientemente de los motivos que conduzcan a ello y de la época en la que se produce. Esta opción reduce la dispersión de resultados entre modelos y facilita la toma de decisiones de adaptación, ya que la puesta en marcha de medidas se puede vincular a alcanzar un grado determinado de calentamiento. Algunos ejemplos de esta categoría son los siguientes:

- Alfieri, L., Bisselink, B., Dottori, F., Naumann, G., de Roo, A., Salamon, P., Wyser, K., Feyen, L. (2017): Global projections of river flood risk in a warmer world. *Earth's Future* 5(2) 171-182. Nº citas: 75
- Naumann, G., Alfieri, L., Wyser, K., Mentaschi, L., Betts, R.A., Carrao, H., Spinoni, J., Vogt, J., Feyen, L. (2018): Global Changes in Drought Conditions Under Different Levels of Warming. *Geophysical Research Letters* 45(7) 3285-3296. Nº citas: 36
- Arnell, N.W., Lowe, J.A., Challinor, A.J., Osborn, T.J. (2019): Global and regional impacts of climate change at different levels of global temperature increase. *Climatic Change* 155(3) 377-391. Nº citas: 1

### 3.2.1.3 *Análisis de la evolución de patrones de circulación atmosférica*

En esta categoría se incluyen estudios que se basan en el supuesto de que los modelos globales de clima son especialmente buenos para simular los patrones de circulación atmosférica que controlan el transporte de humedad y que se puede esperar que cambien en respuesta al calentamiento global. Sin embargo, estos modelos no son tan buenos para estimar variables climáticas como la precipitación, temperatura y mucho menos variables derivadas como los caudales. Por este motivo, el análisis se centra en el estudio de la frecuencia con la que se repiten determinados patrones de circulación que son responsables de fenómenos atmosféricos extremos. Estos patrones atmosféricos pueden posteriormente relacionarse con las variables hidrológicas mediante análisis específicos. Se cita el siguiente ejemplo de esta categoría:

- Gupta H.V., Sapriza-Azuri G., Jódar J., Carrera J. (2018): Circulation pattern-based assessment of projected climate change for a catchment in Spain. *Journal of Hydrology* 556 944-960. Nº citas: 2

## 3.2.2 *Técnicas basadas en observaciones*

En el segundo bloque temático se incluyen los análisis basados en las observaciones. El planteamiento básico de estos estudios es el análisis de los registros de variables hidrológicas (precipitaciones o caudales) para detectar alteraciones, posiblemente producidas por el cambio climático. Se suelen aplicar técnicas estadísticas de análisis de estacionariedad o tendencias y técnicas basadas en análisis de registros históricos. En este bloque temático se identificaron tres categorías:

- Caracterización de la no estacionariedad de variables observadas
- Análisis de tendencias de extremos de variables observadas
- Análisis de cambios a largo plazo (paleo-hidrología)



### 3.2.2.1 Caracterización de la no estacionariedad de variables observadas

Son estudios basados en datos de caudales observados o en modelos hidrológicos que estiman el caudal a partir de los datos observados de clima. Intentan mejorar la caracterización de su período de retorno. Suelen analizar la frecuencia de las crecidas o estiajes para verificar si se puede rechazar la hipótesis de que las series son estacionarias. Se suelen comparar los cuantiles (o períodos de retorno) de caudales máximos o mínimos obtenidos según un análisis estacionario y otro no estacionario. Pueden citarse los siguientes trabajos como ejemplo:

- López, J., Francés, F. (2013): Non-stationary flood frequency analysis in continental Spanish rivers, using climate and reservoir indices as external covariates. *Hydrology and Earth System Sciences* 17(8) 3189-3203. Nº citas: 101
- Du Tao, Xiong Lihua, Xu Chong-Yu, Gippel Christopher J., Guo Shenglian, Liu Pan (2015): Return period and risk analysis of nonstationary low-flow series under climate change. *Journal of Hydrology* 527 (2015) 234-250. Nº citas: 57

### 3.2.2.2 Análisis de tendencias de extremos de variables observadas

Son estudios basados en datos observados (variables climáticas y caudales, entre otras) donde se buscan patrones claros de tendencias y cambios de tendencia sobre, por ejemplo, el período de recurrencia de las crecidas, momento en el que ocurren (dentro de un año hidrológico). El siguiente trabajo es un buen ejemplo de esta categoría:

- Blöschl, G., Hall, J., Parajka, J., et al. (2017): Changing climate shifts timing of European floods. *Science* 357(6351) 588-590. Nº citas: 112

### 3.2.2.3 Análisis de cambios a largo plazo (paleo-hidrología)

En este tipo de estudios se utilizan técnicas para proporcionar información sobre la variabilidad hidrológica y las inundaciones extremas durante largos intervalos de tiempo (100 a 10000 años). Se pueden usar combinando datos históricos de inundaciones (últimos 1000 años) con registros de aforo (últimos 30-50 años). La metodología de trabajos se basa en la reconstrucción de las series históricas de caudales extremos en diferentes entornos geomorfológicos, utilizando diferentes fuentes documentales. Se citan los siguientes ejemplos de esta categoría:

- Machado, M.J., Botero, B.A., López, J., Francés, F., Díez-Herrero, A., Benito, G. (2015): Flood frequency analysis of historical flood data under stationary and non-stationary modelling. *Hydrology and Earth System Sciences* 19(6) 2561-2576. Nº citas: 34
- Benito, G., Lang, M., Barriendos, M., et al. (2004): Use of systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation. Review of scientific method. *Natural Hazards* 31(3) 623-643. Nº citas: 169

## 3.2.3 Técnicas específicas

En este bloque temático se incluyen distintas técnicas que son necesarias para realizar los estudios de impacto de cambio climático. Pueden estar relacionadas con las tareas de modelación climática, como reducción de escala, corrección de sesgo o análisis de incertidumbre. En este bloque temático se identificaron las siguientes categorías:

- Técnicas de reducción de escala
- Técnicas de corrección de sesgo
- Técnicas de análisis de incertidumbre

### 3.2.3.1 Técnicas de reducción de escala

La reducción de escala consiste en la transformación de los resultados que producen los modelos globales a la escala que resulta necesaria en los análisis hidrológicos. Esta es una cuestión sujeta a una cierta controversia, en la que la comunidad científica no ha sido capaz de ponerse de acuerdo sobre el procedimiento más adecuado. Pueden citarse los siguientes trabajos como ejemplo:



- Maraun, D., Widmann, M., Gutiérrez, J.M., Kotlarski, S., Chandler, R.E., Hertig, E., Wibig, J., Huth, R., Wilcke, R.A.I. (2015): VALUE: A framework to validate downscaling approaches for climate change studies. *Earth's Future* 3(1) 1-14. Nº citas: 72

Fowler, H., Blenkinsop, S., Tebaldi, C. (2007): Linking climate change modelling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, 27, 1547-1578. Nº citas: 1320

### 3.2.3.2 Técnicas de corrección de sesgo

Son estudios centrados en corregir el sesgo inherente a las estimaciones de clima generadas por los modelos globales y regionales de clima, así como de variables derivadas como son las estimaciones de caudales. Las funciones de transferencia de eliminación de sesgo se suelen obtener para el período de referencia histórico y posteriormente, se utilizan para corregir las simulaciones climáticas. Los siguientes trabajos son ejemplos de esta categoría:

- Rojas, R., Feyen, L., Dosio, A., Bavera, D. (2011): Improving pan-European hydrological simulation of extreme events through statistical bias correction of RCM-driven climate simulations. *Hydrology and Earth System Sciences* 15(8) 2599-2620. Nº citas: 74
- González-Zeas, D., Garrote, L., Iglesias, A., Sordo-Ward, A. (2012): Improving runoff estimates from regional climate models: A performance analysis in Spain. *Hydrology and Earth System Sciences* 16(6) 1709-1723. Nº citas: 19

### 3.2.3.3 Técnicas de análisis de incertidumbre

En estos estudios se analiza la incertidumbre asociada a los diferentes procesos que se consideran en los estudios de impacto de cambio climático sobre los caudales. Entre las principales fuentes de incertidumbre destacan: los escenarios de emisiones, los modelos globales y regionales de clima, las técnicas de reducción de escala, los modelos hidrológicos y los modelos de impacto. A continuación, se relacionan algunos ejemplos de esta categoría:

- Obeysekera J., Salas J.D. (2014): Quantifying the uncertainty of design floods under nonstationary conditions. *Journal of Hydrologic Engineering* 19(7) 1438-1446. Nº citas: 55
- Prudhomme C., Davies H. (2009a) Assessing uncertainties in climate change impact analyses on the river flow regimes in the UK. Part 1: Baseline climate. *Climatic Change* 93: 177. Nº de citas: 121
- Prudhomme C., Davies H. (2009b) Assessing uncertainties in climate change impact analyses on the river flow regimes in the UK. Part 2: Future climate. *Climatic Change* 93: 197. 105. Nº de citas: 173.
- Vetter, T., Reinhardt, J., Flörke, M., van Griensven, A., Hattermann, F., Huang, S., Koch, H., Pechlivanidis, I.G., Plötner, S., Seidou, O., Su, B., Vervoort, R.W., Krysanova, V. (2017): Evaluation of sources of uncertainty in projected hydrological changes under climate change in 12 large-scale river basins. *Climatic Change* 141(3) 419-433. Nº citas: 49

### 3.2.4 Análisis de efectos en sistemas naturales y sociales

En el cuarto bloque temático se incluyen los trabajos que analizan los efectos del cambio climático en sistemas naturales o sociales. Son trabajos que caracterizan y evalúan fenómenos hidrológicos extremos, propagando los efectos de los extremos hidrológicos en otros sistemas, normalmente mediante herramientas de modelación específica como en el caso de transporte de sedimentos o aguas subterráneas para sistemas naturales, o mediante el análisis de riesgos, como en el caso de disponibilidad de agua o seguridad de infraestructuras para sistemas sociales. En este bloque temático se identificaron las siguientes categorías:

- Técnicas de caracterización y evaluación de fenómenos extremos
- Efecto en la erosión y sedimentación



- Efecto en las aguas subterráneas
- Estudios de impacto, vulnerabilidad y adaptación
- Análisis disponibilidad de agua
- Efecto sobre la seguridad de infraestructuras

#### **3.2.4.1 Técnicas de caracterización y evaluación de fenómenos extremos**

En esta categoría se incluyen las técnicas que permiten caracterizar los fenómenos hidrológicos extremos a partir de las series hidrológicas. En el caso de crecidas, se suelen utilizar las leyes de frecuencia de precipitaciones o caudales máximos. En el caso de sequías, una técnica muy extendida para su caracterización es el empleo de índices de sequía, que permiten evaluarlas en términos de tiempo, espacio (porcentaje del área total), intensidad o severidad. También existen técnicas para relacionar varios factores como son las curvas de severidad-área-frecuencia de sequía (SAF), que se desarrollaron para relacionar cuantitativamente la distribución de frecuencia de ocurrencia de sequía con la severidad de sequía y el área afectada. Los ejemplos de esta categoría son los siguientes:

- Sordo-Ward, A., Bejarano, M.D., Iglesias, A., Asenjo, V., Garrote, L. (2017): Analysis of current and future SPEI droughts in the La Plata Basin based on results from the regional Eta Climate Model. *Water (Switzerland)* 9(11). Nº citas: 6
- Meteorological Droughts in Europe: Events and Impacts – Past Trends and Future Projections. Technical Reports EUR 27748
- Drought Risk Assessment and Management - A Conceptual Framework. Technical Reports EUR 29464

#### **3.2.4.2 Efecto en la erosión y sedimentación**

Son estudios que analizan los efectos del cambio climático en la erosión y sedimentación en cuencas, ríos y embalses. A partir de los escenarios de emisión y las variables climáticas se aplican modelos hidro-sedimentológicos que han sido calibrados con información histórica de campañas sedimentológicas específicas, paleo-hidrología y registros de sedimentación en embalses. Se pueden citar los siguientes ejemplos:

- Bussi, G., Francés, F., Horel, E., López-Tarazón, J.A., Batalla, R.J. (2014): Modelling the impact of climate change on sediment yield in a highly erodible Mediterranean catchment. *Journal of Soils and Sediments* 14(12) 1921-1937. Nº citas: 25
- Rodríguez-Lloveras, X., Corella, J.P., Benito, G. (2017): Modelling the Hydro-Sedimentary Dynamics of a Mediterranean Semiarid Ungauged Watershed Beyond the Instrumental Period. *Land Degradation and Development* 28(5) 1506-1518. Nº citas: 2

#### **3.2.4.3 Efecto en las aguas subterráneas**

En esta categoría se consideran los estudios que evalúan los efectos del cambio climático en las aguas subterráneas y los ecosistemas dependientes. Pueden incorporar también análisis complementarios, como estudios de calidad de agua o de explotación de los acuíferos. Los siguientes trabajos son ejemplos de esta categoría:

- Kløve, B., Ala-Aho, P., Bertrand, et al. (2014): Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. *Journal of Hydrology* 518(PB) 250-266. Nº citas: 176
- Pulido-Velázquez, M., Peña-Haro, S., García-Prats, A., et al. (2015): Integrated assessment of the impact of climate and land use changes on groundwater quantity and quality in the Mancha Oriental system (Spain). *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(4), 1677-1693. Nº citas: 32

#### **3.2.4.4 Estudios de impacto, vulnerabilidad y adaptación**

Son estudios que no sólo analizan el impacto del cambio climático en los sistemas de recursos hídricos, sino que continúan para estudiar la vulnerabilidad e identificar opciones de adaptación.





Suelen analizar varios escenarios hidrológicos futuros y para ello emplean un conjunto de modelos acoplados en cascada. La lista siguiente incluye algunos ejemplos de esta categoría:

- Pulido-Velazquez, D., Garrote, L., Andreu, J., Martin-Carrasco, F.-J., Iglesias, A. (2011): A methodology to diagnose the effect of climate change and to identify adaptive strategies to reduce its impacts in conjunctive-use systems at basin scale. *Journal of Hydrology* 405(43497) 110-122. Nº citas: 38
- Tanaka, S.K., Zhu, T., Lund, J.R., Howitt, R.E., Jenkins, M.W., Pulido, M.A., Tauber, M., Ritzema, R.S., Ferreira, I.C. (2006): Climate warming and water management adaptation for California. *Climatic Change* 76(43558) 361-387. Nº citas: 166
- Lobanova A., Liersch S., Tàbara J.D., Koch H., Hattermann F.F., Krysanova V. (2017): Harmonizing human-hydrological system under climate change: A scenario-based approach for the case of the headwaters of the Tagus River. *Journal of Hydrology* 548 436-447. Nº citas: 8
- Lobanova, A., Koch, H., Liersch, S., Hattermann, F.F., Krysanova, V. (2016): Impacts of changing climate on the hydrology and hydropower production of the Tagus River basin. *Hydrological Processes* 30(26) 5039-5052. Nº citas: 11
- Water Resources, climate change. Guidelines. How to achieve sustainable adaptation.

#### 3.2.4.5 *Análisis disponibilidad de agua*

Son estudios que evalúan la disponibilidad de agua en sistemas de recursos hídricos bajo diferentes supuestos de cambio climático, reglas de explotación, demandas o infraestructura. Cabe señalar que existe una diferencia significativa entre escorrentía y disponibilidad de agua, por lo que no se puede suponer que las reducciones de disponibilidad de agua serán directamente proporcionales a las reducciones de escorrentía. El siguiente trabajo es un ejemplo de esta categoría:

- Sordo-Ward, A., Granados, I., Iglesias, A., Garrote, L. (2019): Blue water in Europe: Estimates of current and future availability and analysis of uncertainty. *Water (Switzerland)* 11(3). Nº citas: 3

#### 3.2.4.6 *Efecto sobre la seguridad de infraestructuras*

En esta categoría se incluyen los estudios enfocados a evaluar la vulnerabilidad y capacidad de recuperación de las infraestructuras críticas frente a los fenómenos meteorológicos extremos en un escenario de cambio climático. Se suelen analizar diferentes escenarios hidrológicos, integrando los diversos efectos que actúan sobre cada componente del riesgo. Los ejemplos de esta categoría son los siguientes:

- Fluixá-Sanmartín, J., Morales-Torres, A., Escuder-Bueno, I., Paredes-Arquiola, J. (2019): Quantification of climate change impact on dam failure risk under hydrological scenarios: A case study from a Spanish dam. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 19(10) 2117-2139. Nº citas: 1
- Reder, A., Iturbide, M., Herrera, S., Rianna, G., Mercogliano, P., Gutiérrez, J.M. (2018): Assessing variations of extreme indices inducing weather-hazards on critical infrastructures over Europe—the INTACT framework. *Climatic Change* 148(43497) 123-138. Nº citas: 4

## 3.3 Selección de buenas prácticas

A partir de la relación inicial de bloques temáticos, las reuniones de trabajo realizadas permitieron identificar las doce buenas prácticas que se desarrollaron en la tercera fase del estudio. A continuación, se presentan las buenas prácticas y las publicaciones de referencia seleccionadas. La presentación se estructura en los cuatro grandes bloques temáticos.



### 3.3.1 Caracterización de impactos a partir de modelos globales de clima

En este bloque temático se seleccionaron dos buenas prácticas para su desarrollo en detalle. Las prácticas seleccionadas en este bloque son las siguientes:

- Impacto fijando un valor de calentamiento global
- Estudios de impacto a partir de modelos globales de clima

A continuación, se presentan brevemente los trabajos seleccionados para el desarrollo de estas prácticas.

#### 3.3.1.1 *Impacto fijando un valor de calentamiento global*

El trabajo de referencia seleccionado en esta práctica es:

- Donnelly, C., Greuell, W., Andersson, J. et al. (2019): Impacts of climate change on European hydrology at 1.5, 2 and 3 degrees mean global warming above preindustrial level. *Climatic Change* 143, 13–26. Nº citas: 71

En este trabajo se analiza el impacto del cambio climático sobre la escorrentía y espesor de nieve en Europa para 1.5, 2 y 3 °C de calentamiento global por encima del nivel preindustrial (período 1881-1910). Este planteamiento enlaza con las directrices seguidas en la definición de las políticas relativas a cambio climático, que adoptan como objetivo intentar limitar el calentamiento a niveles específicos de temperatura media global. Este planteamiento tiene la ventaja de reducir la incertidumbre que se obtiene al comparar resultados de distintos modelos climáticos. Esto facilita que los resultados del análisis se puedan trasladar al ámbito de la toma de decisiones, vinculando las actuaciones a situaciones climáticas concretas, independientemente del instante en que ocurran. En el desarrollo de la práctica también se han tenido en cuenta los siguientes trabajos complementarios:

- Naumann, G., Alfieri, L., Wyser, et al. (2018): Global Changes in Drought Conditions Under Different Levels of Warming. *Geophysical Research Letters* 45(7) 3285-3296. Nº citas: 45
- Arnell, N.W., Lowe, J.A., Challinor, A.J., Osborn, T.J. (2019): Global and regional impacts of climate change at different levels of global temperature increase. *Climatic Change* 155(3) 377-391. Nº citas: 2

#### 3.3.1.2 *Estudios de impacto a partir de modelos globales de clima*

Esta buena práctica se desarrolla a partir del siguiente trabajo de referencia:

- CEDEX (2017). Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España

En este trabajo se presenta un estudio realizado en todo el territorio nacional en el que se evaluó el impacto de 12 proyecciones climáticas sobre los recursos hídricos mediante el empleo del modelo SIMPA. El trabajo presenta resultados de las variables hidrológicas características: precipitación, evapotranspiración, infiltración y escorrentía, para el conjunto de España y para cada una de las demarcaciones hidrográficas. Incluye un apartado especial donde se hizo un análisis específico de las sequías. En el desarrollo de la práctica se han considerado otros trabajos complementarios, como los siguientes:

- Alfieri, L., Burek, P., Feyen, L., and Forzieri, G.: Global warming increases the frequency of river floods in Europe, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 2247–2260. Nº citas: 140
- Krysanova V., Vetter T. et al. (2017): Intercomparison of regional-scale hydrological models and climate change impacts projected for 12 large river basins worldwide - A synthesis. *Environmental Research Letters* 12(10). Nº citas: 25
- Alfieri, L., Bisselink, B. et al. (2018): Global Changes in Drought Conditions Under Different Levels of Warming. *Geophysical Research Letters* 45(7) 3285-3296. Nº citas: 45



### 3.3.2 Técnicas basadas en observaciones

En el bloque temático dedicado a técnicas basadas en observaciones se seleccionaron las dos buenas prácticas siguientes:

- Análisis de tendencias de valores extremos en un ámbito local
- Análisis de tendencias de valores extremos en un ámbito regional

Los trabajos seleccionados para el desarrollo de estas dos prácticas se presentan a continuación.

#### 3.3.2.1 Análisis de tendencias de valores extremos en un ámbito local

Para el desarrollo de esta práctica se eligieron dos trabajos de referencia. El primero de ellos corresponde a crecidas y el segundo a sequías:

- López, J., Francés, F. (2013): Non-stationary flood frequency analysis in continental Spanish rivers, using climate and reservoir indices as external covariates. *Hydrology and Earth System Sciences* 17(8) 3189-3203. Nº citas: 106
- Du Tao, Xiong Lihua, Xu Chong-Yu, Gippel Christopher J., Guo Shenglian, Liu Pan (2015): Return period and risk analysis of nonstationary low-flow series under climate change. *Journal of Hydrology* 527 (2015) 234–250. Nº citas: 57

En el trabajo de referencia de crecidas se presenta una metodología para el realizar el análisis de frecuencia de caudales máximos considerando series de tiempo no estacionarias. La metodología elegida se denomina "modelos aditivos generalizados para ubicación, escala y forma" (GAMLSS). En el trabajo se realizó el modelado no estacionario de los registros de inundación máxima anual de 20 ríos continentales españoles empleando dos enfoques. En el primero de ellos, los parámetros de las distribuciones seleccionadas se modelaron solo en función del tiempo. En el segundo, los parámetros de las distribuciones de inundaciones se modelan como funciones de varios índices climáticos y un índice de regulación de la cuenca. El trabajo de referencia de sequías tiene como objetivo mejorar la caracterización del período de retorno no estacionario de sequías mediante el uso de covariables meteorológicas. Las variables meteorológicas se utilizan para calcular los parámetros estadísticos no estacionarios y las probabilidades de excedencia para los años futuros. También se consultaron los siguientes trabajos complementarios:

- Clarke, R. T. (2013): How should trends in hydrological extremes be estimated?, *Water Resour. Res.*, 49, 6756–6764. Nº citas: 11
- Salas, J., Obeysekera, J. (2014): Revisiting the concepts of return period and risk for nonstationary hydrologic extreme events. *J Hydrol Eng* 19:554–568. Nº citas: 182

#### 3.3.2.2 Análisis de tendencias de valores extremos en un ámbito regional

En esta práctica se emplearon dos trabajos de referencia, uno de crecidas y otro de sequías.

- Blöschl, G., Hall, J., et al. (2017): Changing climate shifts timing of European floods. *Science* 357(6351) 588-590. Nº citas: 112
- Spinoni, J., Naumann, G., Vogt, J., Barbosa, P. (2016): Meteorological Droughts in Europe: Events and Impacts – Past Trends and Future Projections. Joint Research Centre Technical Reports.

En el trabajo correspondiente a crecidas analiza el cambio en el momento en que ocurren las crecidas en los ríos de Europa a lo largo de las últimas cinco décadas. Se emplea una base de datos de 4262 estaciones de 38 países europeos. Se analiza específicamente el patrón espacial de los resultados, que muestran claramente que el momento de ocurrencia de las avenidas ha ido cambiando. Los autores afirman haber detectado una clara señal climática en las observaciones de avenidas a escala continental. En el estudio de sequías se identificaron y analizaron eventos de sequía en Europa desde 1950 a diferentes escalas espaciales. Se manejaron tres indicadores de sequía diferentes: el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI), el Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizado (SPEI) y el Indicador de Reconocimiento de Sequía (RDI). Se definieron además dos indicadores



compuestos que permitieron derivar las características clave de las sequías durante el período analizado. Se hizo un estudio especial de 21 grandes sequías que azotaron Europa desde 1950 hasta 2012, seis de las cuales ocurrieron después del año 2000. Para elaborar la práctica se consultaron también los siguientes trabajos complementarios:

- Mediero, L., Santillán, D., Garrote, L. & Granados, A. Detection and attribution of trends in magnitude, frequency and timing of floods in Spain. *J. Hydrol.* 517, 1072–1088 (2014). N° citas: 37
- Vicente-Serrano S.M. et al. (2014): Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. *Environmental Research Letters*, 9(4). N° citas: 215

### 3.3.3 Técnicas específicas

En el bloque temático de técnicas específicas se seleccionaron seis buenas prácticas para su presentación. Las prácticas seleccionadas son las siguientes:

- Métodos de reducción de escala
- Selección de métodos de reducción de escala
- Técnicas de corrección de sesgo

Caracterización de la incertidumbre de los conjuntos de simulaciones

- Análisis de riesgo en sistemas hidráulicos
- Técnicas de perturbación de series hidrológicas

Los trabajos seleccionados para el desarrollo de estas prácticas se presentan en los apartados siguientes.

#### 3.3.3.1 *Métodos de reducción de escala*

El trabajo de referencia que se adoptó para el desarrollo de esta práctica es el siguiente:

- Fowler, H.J., Blenkinsop, S., Tebaldi, C. (2007): Linking climate change modelling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology* 27(12) 1547-1578. N° citas: 1258

Dado que no existe un consenso en la comunidad científica sobre qué método de reducción de escala debe aplicarse, se seleccionó como trabajo de referencia un artículo de revisión que ofrece una panorámica general sobre la literatura científica de reducción de escala. En el trabajo se describen los nuevos desarrollos producidos en el campo de reducción de escala, prestando atención a los que se centran en impactos hidrológicos. Sucesivamente, se discute el concepto de reducción de escala y se presentan nuevos métodos, estudios metodológicos comparativos, el modelado de extremos y la aplicación a impactos hidrológicos. Se indica que los desarrollos que pueden ofrecer el mayor potencial son el modelado probabilístico, la escala de patrones y la reducción de escala de múltiples variables. También se emplearon los siguientes trabajos complementarios:

- Schmidli, J., Goodess, C.M., Frei, C., Haylock, M.R., Hundsdoerfer, Y., Ribalaygua, J., Schmith, T. (2007): Statistical and dynamical downscaling of precipitation: An evaluation and comparison of scenarios for the European Alps. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 112(4). N° citas: 188
- San-Martín, D., Manzanar, R., Brands, S., Herrera, S., M. Gutiérrez, J. (2017): Reassessing model uncertainty for regional projections of precipitation with an ensemble of statistical downscaling methods. *Journal of Climate* 30(1) 203-223. N° citas: 15

#### 3.3.3.2 *Selección de métodos de reducción de escala*

El trabajo seleccionado para esta buena práctica es:

- Maraun, D., Widmann, M. et al. (2015): VALUE: A framework to validate downscaling approaches for climate change studies. *Earth's Future* 3(1) 1-14. N° citas: 72



En el trabajo de referencia se presenta un marco de validación que permite comparar y seleccionar el método de reducción de escala más apropiado para una tarea concreta. Se tratan métodos de reducción de escala tanto dinámicos como estadísticos. El planteamiento del método se centra en el usuario, partiendo de un problema específico. Se propone un árbol de validación que guía la selección de índices de comparación relevantes y proporciona de cuantificar su rendimiento. El marco de validación es útil para realizar una comparación de métodos de reducción de escala y elegir el más apropiado. Los trabajos complementarios que apoyan esta buena práctica son los siguientes:

- Hertig, E., Maraun, D. et al. (2019): Comparison of statistical downscaling methods with respect to extreme events over Europe: Validation results from the perfect predictor experiment of the COST Action VALUE. *International Journal of Climatology* 39(9) 3846-3867. Nº citas: 11
- Casanueva, A., Herrera, S., Fernández, J., Gutiérrez, J.M. (2016): Towards a fair comparison of statistical and dynamical downscaling in the framework of the EURO-CORDEX initiative. *Climatic Change* 137(43558) 411-426. Nº citas: 10

### 3.3.3.3 *Técnicas de corrección de sesgo*

El trabajo de referencia seleccionado para esta práctica es:

- Rojas, R., Feyen, L., Dosio, A., Bavera, D. (2011): Improving pan-European hydrological simulation of extreme events through statistical bias correction of RCM-driven climate simulations. *Hydrology and Earth System Sciences* 15(8) 2599-2620. Nº citas: 74

En el trabajo se analiza el beneficio obtenido al eliminar el sesgo de los datos climáticos que se emplean en los estudios hidrológicos. La aplicación se centra en el análisis de inundaciones a escala europea. El sesgo de las proyecciones climáticas se corrige a partir de las observaciones de precipitación y temperatura. Las funciones de transferencia obtenidas para eliminar el sesgo se utilizan para corregir las simulaciones climáticas en los periodos futuros. En el trabajo se realizó una validación en 554 estaciones de aforo y se comprobó que el método de corrección de sesgo funciona adecuadamente para la simulación de inundaciones. Los trabajos que complementan la práctica son:

- Piani, C., Weedon, G. et al. (2010): Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models, *J. Hydrol.*, 395, 199–215.
- Teutschbein, C., Seibert, J. (2012): Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology* 456–457, 12–29.

### 3.3.3.4 *Caracterización de la incertidumbre de los conjuntos de simulaciones*

Para esta práctica se seleccionó el siguiente trabajo de referencia:

- Vetter, T., Reinhardt, J. et al. (2017): Evaluation of sources of uncertainty in projected hydrological changes under climate change in 12 large-scale river basins. *Climatic Change* 141(3) 419-433. Nº citas: 49

La buena práctica consiste en evaluar las fuentes de incertidumbre de en los estudios de impacto de cambio climático en la hidrología. En el trabajo se referencia se realiza este estudio en doce grandes cuencas, centrándose en los cambios de los valores medios y de los extremos de caudal alto y bajo. Los cambios se evaluaron mediante 9 modelos hidrológicos forzados por una combinación de 4 escenarios de emisiones y 5 modelos globales de clima. Se analizaron tres fuentes principales de incertidumbre: escenarios de emisiones, modelos globales y modelos hidrológicos. La técnica empleada es el método ANOVA de análisis de varianza. En la preparación de la práctica se empleó también el siguiente trabajo:

- Velázquez J.A., Schmid, J. et al. (2013): An ensemble approach to assess hydrological models' contribution to uncertainties in the analysis of climate change impact on water resources. *Hydrol Earth Syst Sci* 17:565–578.



### 3.3.3.5 *Análisis de riesgo en sistemas hidráulicos*

Esta buena práctica está centrada en el análisis de riesgo en sistemas hidráulicos. Dado que las técnicas empleadas en crecidas y sequías son diferentes, se han seleccionado dos trabajos, cada uno de ellos representativo de uno de los dos tipos de extremo hidrológico. Los trabajos seleccionados son los siguientes:

- Steinschneider, S., Wi, S. and Brown, C. (2015): The integrated effects of climate and hydrologic uncertainty on future flood risk assessments. *Hydrological Processes*, 29(12), pp. 2823-2839. Nº citas: 43
- Sordo-Ward A., Granados I., Martín-Carrasco, F. Garrote L. (2016): Impact of Hydrological Uncertainty on Water Management Decisions. *Water Resources Management*, 30: 5535. Nº citas: 6.

En el trabajo representativo de crecidas se analiza el riesgo futuro de inundación integrando la incertidumbre asociada a la modelación climática e hidrológica. En el estudio se propagan las proyecciones climáticas a través de una cadena de modelos, integrada por modelos hidrológicos y un modelo de simulación de la operación de embalse en crecidas. La finalidad es definir la seguridad hidrológica de una presa en función de las condiciones climáticas. En el trabajo representativo de sequías se sigue un enfoque similar, pero centrado en el análisis de sistemas de recursos hídricos. Se aplica un método de simulación de Monte Carlo para generar series mensuales de aportaciones, que se enlazan con un modelo de gestión de sistemas de recursos hídricos para obtener sus indicadores de desempeño, relacionados con el déficit en la atención a las demandas. En ambos trabajos, los escenarios climáticos se exploran utilizando un generador estocástico y el análisis de incertidumbre se realiza utilizando una metodología basada en el riesgo. Los trabajos complementarios para el análisis de la práctica son los siguientes:

- Dittes, B., Špacková, O., Schoppa, L., Straub, D. (2018): Managing uncertainty in flood protection planning with climate projections. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 2511–2526. Nº citas: 4
- Ajami, N.K., Hornberger, G.M. and Sunding, D.L. (2008): Sustainable water resource management under hydrological uncertainty. *Water Resources Research*, 44(11). Nº citas: 73

### 3.3.3.6 *Técnicas de perturbación de series hidrológicas*

El trabajo de referencia empleado en el desarrollo de esta práctica es el siguiente:

- Chavez-Jimenez, A., Lama, B., Garrote, L., Martín-Carrasco, F., Sordo-Ward, A., Mediero, L. (2013): Characterisation of the Sensitivity of Water Resources Systems to Climate Change. *Water Resources Management* 27(12) 4237-4258. Nº citas: 21

En el trabajo de referencia seleccionado se estudia la sensibilidad de los sistemas de recursos hídricos a las alteraciones hidrológicas producidas el cambio climático. En el trabajo se emplea un procedimiento para traducir los resultados de estudios regionales de impacto hidrológico del cambio climático a las series temporales que se utilizan en los modelos de gestión de sistemas de recursos hídricos mediante una técnica de perturbación. Se parte de las variaciones esperadas de la media, coeficiente de variación o estacionalidad y se define un algoritmo que procesa cada serie mensual para obtener una nueva serie basada en la inicial, pero con valores alterados de su media, su coeficiente de variación o su estacionalidad. El trabajo complementario elegido para el desarrollo de la práctica es:

- Ntegeka V., Baguis P., Roulin E., Willems P. (2014): Developing tailored climate change scenarios for hydrological impact assessments. *Journal of Hydrology* 508() 307-321. Nº citas: 50

## 3.3.4 *Análisis de efectos en sistemas naturales y sociales*

En el bloque temático dedicado a análisis de efectos en sistemas naturales y sociales se seleccionaron las dos buenas prácticas siguientes:





- Análisis de efectos sobre sequías
- Análisis de efectos sobre aguas subterráneas

En los siguientes apartados se presentan los trabajos seleccionados para el desarrollo de estas dos buenas prácticas.

#### 3.3.4.1 Análisis de efectos sobre sequías

El trabajo de referencia que se ha elegido como base para el desarrollo de esta buena práctica es:

- Vicente-Serrano, S.M., Lopez-Moreno, J.-I., Beguería, S., (...), Coelho, F., Espejo, F. (2014): Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. *Environ. Res. Lett.* 9 044001. Nº citas: 199

En el trabajo de referencia se estudia la evolución de las sequías en la Península Ibérica a partir de las observaciones en los últimos cincuenta años, confirmando que la severidad de la sequía ha aumentado en ese periodo. Esto se debe fundamentalmente a la mayor evapotranspiración, resultado del aumento de la temperatura. En el trabajo se analiza el impacto de la sequía climática en el régimen hidrológico de los ríos. Del análisis de datos de caudal en 287 estaciones de aforo se dedujo que la frecuencia y severidad de las sequías también ha aumentado en cuencas reguladas. Junto a este trabajo, se analizaron otros similares que empleaban proyecciones climáticas en lugar de observaciones, como los siguientes.

- Naumann G., Alfieri L. et al. (2018): Global Changes in Drought Conditions Under Different Levels of Warming. *Geophysical Research Letters*, 45(7), 3285-3296. Nº citas: 62.
- Sordo-Ward, A., Bejarano, M.D., Iglesias, A., Asenjo, V., Garrote, L. (2017): Analysis of current and future SPEI droughts in the La Plata Basin based on results from the regional Eta Climate Model. *Water (Switzerland)* 9(11). Nº citas: 6.

#### 3.3.4.2 Análisis de efectos sobre aguas subterráneas

El trabajo que se tomó como punto de partida para la elaboración de la práctica fue:

- Pulido-Velazquez, M., Peña-Haro, S. et al. (2015): Integrated assessment of the impact of climate and land use changes on groundwater quantity and quality in the Mancha Oriental system (Spain). *Hydrology and Earth System Sciences* 19(4) 1677-1693. Nº citas: 29

En el trabajo de referencia se presenta una metodología para evaluar los impactos potenciales del cambio climático y los cambios de uso del suelo en las aguas subterráneas. Se analiza el caso del acuífero de la Mancha Oriental. En el trabajo se combinan modelos climáticos, modelos de cambio de uso del suelo, modelos hidrológicos, modelos de flujo de aguas subterráneas y modelos de transporte de contaminantes. Se aplica una variedad de esquemas computacionales, para adaptarse a las características de cada sistema analizado, destacando el esfuerzo realizado para acoplar adecuadamente los distintos modelos. El conjunto es una metodología de análisis que llega a conclusiones útiles para la gestión combinando múltiples herramientas de análisis. Para el desarrollo de la práctica también se consultó el siguiente trabajo:

- Ali R., McFarlane D. et al. (2012): Potential climate change impacts on groundwater resources of south-western Australia. *Journal of Hydrology* 475 456-472. Nº citas: 31





## 4 Análisis de buenas prácticas

### 4.1 Caracterización de impactos a partir de modelos globales de clima

#### 4.1.1 Impacto fijando un valor de calentamiento global

##### 4.1.1.1 Planteamiento general

Históricamente, la mayoría de las evaluaciones de los impactos del cambio climático han tendido a enmarcarse en términos de horizontes temporales futuros, tanto de corto, medio y largo plazo (por ejemplo: 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100). Sin embargo, la política climática internacional está ahora centrada en gran medida en intentar limitar el calentamiento a niveles específicos de temperatura media global, como 1.5 o 2 °C. Por tanto, las evaluaciones de impacto climático relevantes para las políticas deberían enmarcarse cada vez más en términos de niveles de calentamiento global respecto a un periodo de referencia, comúnmente un período pre-industrial. El “calentamiento global” en un momento dado, se define como el calentamiento promedio global de las temperaturas combinadas de la superficie terrestre del aire y de la superficie del mar durante un período determinado (por ejemplo, 30 años, aunque este periodo puede cambiar), con relación a un período de referencia, por ejemplo, de 1850 a 1900 como una aproximación de los niveles pre-industriales (IPCC 2018). Este planteamiento tiene la ventaja de reducir la incertidumbre que se obtiene al comparar resultados de distintos modelos climáticos, puesto que, si se unifica el nivel de calentamiento en todos ellos, los resultados son más homogéneos que si se analiza un periodo determinado, que puede producir situaciones climáticas diferentes en los distintos modelos. El análisis se puede trasladar con más facilidad al ámbito de la toma de decisiones. En este caso, las decisiones no se formulan para horizontes temporales de medio y largo plazo, sino que pueden vincularse a situaciones climáticas concretas, independientemente del instante en que ocurran. De esta manera, los planes de actuación pueden determinar que las acciones se materialicen cuando se alcance un calentamiento global determinado. La comparación de la tendencia reciente de calentamiento observado con el nivel de referencia permite establecer el momento en que deben ponerse en marcha las actuaciones, sin depender de la incertidumbre de las proyecciones climáticas. Por otro lado, actualmente se están definiendo políticas cuyo objetivo es limitar el calentamiento global a valores predeterminados, controlando por tanto los valores de emisión para poder cumplir con dicho objetivo (IPCC 2018). En este caso se evaluaría el impacto sobre cualquier variable si se logran poner en práctica medidas de mitigación que hagan posible limitar el calentamiento global a los valores predeterminados (por ejemplo 1.5 o 2 °C).

La buena práctica seleccionada corresponde al trabajo “Impactos del cambio climático en la hidrología de Europa para calentamientos medios globales de 1.5, 2 y 3 grados sobre los niveles pre-industriales”, publicado por Chantal Donnelly, Wouter Greuell, Jafet Andersson, Dieter Gerten, Giovanna Pisacane, Philippe Roudier y Fulco Ludwig en 2017 en la revista *Climatic Change*. Las características básicas del trabajo se resumen en la Tabla 3.

##### 4.1.1.2 Resumen del trabajo

El trabajo de referencia analiza el impacto del cambio climático sobre la escorrentía y espesor de nieve en Europa para 1.5, 2 y 3 °C de calentamiento global por encima del nivel pre-industrial (período 1881-1910). Se acoplan conjuntos de proyecciones climáticas que representan cada uno de los niveles de calentamiento. Estos conjuntos se utilizan para forzar cinco modelos hidrológicos globales y se calculan los cambios en los indicadores hidrológicos.

La metodología de trabajo que se sigue en esta buena práctica se representa esquemáticamente en la Ilustración 1. En primer lugar, dependiendo del tipo de impacto que se va a analizar, se determinan las variables climáticas que se analizarán. En el estudio de referencia, se plantea analizar escenarios de calentamiento de 1.5, 2 y 3 °C. A partir de las proyecciones climáticas derivadas de la combinación



de diferentes escenarios de emisión (RCP2.6 a RCP8.5) con modelos climáticos (derivados de iniciativas como CMIP5 o EURO-CORDEX) se identifica el periodo de 20 o 30 años (se pueden fijar otras duraciones) para el que se alcanzan los escenarios climáticos formulados, por ejemplo, con un incremento medio específico de temperatura respecto a los niveles pre-industriales. El periodo o ventana de análisis se suele centrar en el año en que se produce el valor de incremento específico. El periodo de tiempo obtenido es variable dependiendo del escenario de emisión y del modelo climático considerado. A continuación, se realiza el análisis de impacto sobre el sector de interés mediante el modelo apropiado. En el trabajo se referencia, el impacto sobre las variables hidrológicas (precipitación, escorrentía, inundaciones, sequías, etc.) se analiza con modelos hidrológicos globales. Una vez obtenidas las series hidrológicas, se pueden extraer conclusiones relevantes para los distintos sectores: agua potable, riego, hidroelectricidad, ecosistemas, etc.

Las conclusiones del análisis realizado en el trabajo de referencia muestran que hay cambios claros en los impactos locales sobre la evapotranspiración, la escorrentía media, baja y alta y el equivalente de agua de nieve para los diferentes niveles de calentamiento global. En un mundo más cálido, los impactos hidrológicos del cambio climático se esperan sean más intensos y espacialmente más extensos. Se detectan aumentos importantes de escorrentía que afectan las montañas escandinavas a 1.5 °C, pero a 3 °C estos efectos se extienden sobre la mayor parte de Noruega, Suecia y el norte de Polonia. A 3 °C, Noruega se ve afectada por cambios relevantes en todos los indicadores. Con un calentamiento de 1.5 °C, la disminución en la escorrentía media anual se observa sólo en Portugal, pero con un calentamiento de 3 °C, se observan disminuciones en la escorrentía a lo largo de toda la costa de la Península Ibérica, la costa de los Balcanes y parte de la costa francesa. En las zonas afectadas de Europa, hay un claro aumento en los cambios en la escorrentía media, baja y alta a 2 °C en comparación con 1.5 °C, lo que realza la necesidad de plantear políticas de mitigación que marquen como objetivos los niveles más bajos de calentamiento global. Entre 2 y 3 °C, los cambios en los fenómenos extremos de escorrentía (sequías e inundaciones) continúan aumentando, pero los cambios en la escorrentía media son menos claros.



Ilustración 1: Esquema metodológico de la buena práctica

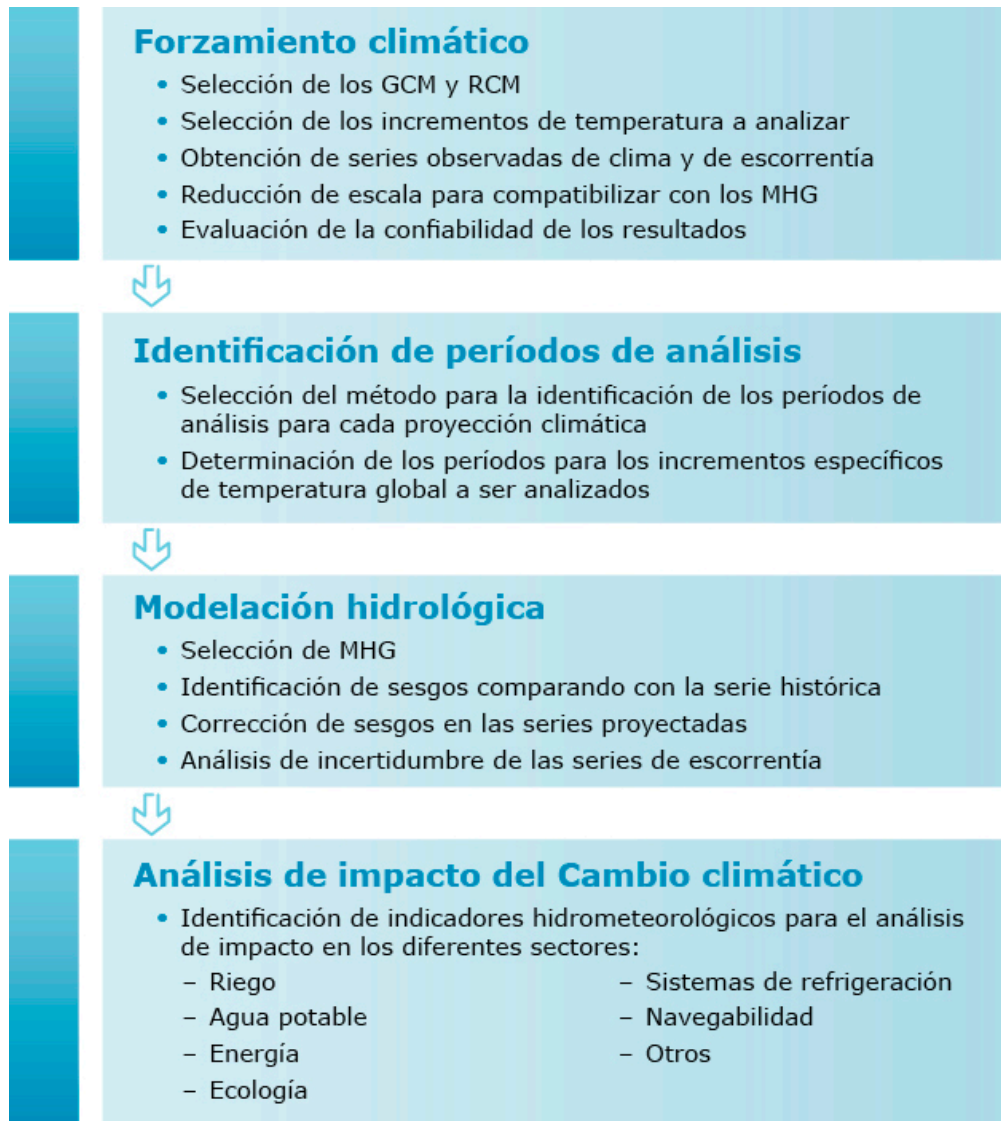




Tabla 3: Ficha de características básicas de la buena práctica

Concepto	Información básica
Título de la publicación	Impacts of climate change on European hydrology at 1.5, 2 and 3 degrees mean global warming above preindustrial level
Autores	Chantal Donnelly, Wouter Greuell, Jafet Andersson, Dieter Gerten, Giovanna Pisacane, Philippe Roudier y Fulco Ludwig
Año del estudio	2017
Publicación	Climatic Change, 143, 13–26. DOI: <a href="https://doi.org/10.1007/s10584-017-1971-7">https://doi.org/10.1007/s10584-017-1971-7</a> .
Enlace web	<a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-017-1971-7">https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-017-1971-7</a> Artículo de acceso gratuito
Alcance geográfico	Europa, con análisis detallado de las cuencas de los ríos Rin, Danubio, Ebro, Wisla, Glomma y Lule
Tipo de evento extremo	Sequías e inundaciones
Enfoque	Basado en simulaciones de modelos
Otros trabajos similares o complementarios	Naumann, G., Alfieri, L., Wyser, K., Mentaschi, L., Betts, R.A., Carrao, H., Spinoni, J., Vogt, J., Feyen, L. (2018): Global Changes in Drought Conditions Under Different Levels of Warming. <i>Geophysical Research Letters</i> 45(7) 3285-3296  Arnell, N.W., Lowe, J.A., Challinor, A.J., Osborn, T.J. (2019): Global and regional impacts of climate change at different levels of global temperature increase. <i>Climatic Change</i> 155(3) 377-391. Nº citas: 2

#### 4.1.1.3 Datos y modelos empleados en el trabajo Datos empleados

Los datos históricos utilizados en la investigación se tomaron de la base de datos E-OBS (Haylock et al. 2008), que contiene datos cuadrícula de todo el territorio europeo, con un tamaño de celda de 0.1º. Los datos analizados fueron los siguientes:

- Precipitación: 1950 – 2006 (datos diarios).
- Temperatura: 1950 – 2006 (datos mensuales: mínima, máxima y media).

En el horizonte futuro se analizaron proyecciones de precipitación y temperatura. Se consideraron 11 proyecciones tomadas del proyecto EURO-CORDEX (Jacob et al. 2014), combinando 4 modelos globales de clima (GCM), 4 modelos regionales de clima (RCM) y 3 escenarios de emisión: RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5. En la Tabla 4 se detallan las proyecciones consideradas. El período de análisis se extendió a lo largo de 30 años para poder identificar los escenarios de incremento de temperatura que se buscaban. El paso de tiempo de cálculo fue variable, dependiendo del modelo hidrológico utilizado.



Tabla 4: Resumen de las 11 proyecciones climáticas analizadas y períodos analizados.

RCP	Modelo Global	Modelo Regional	Periodo (años)		
			+1.5 °C	+2 °C	+3 °C
2.6	MPI-ESM-LR	CSC-Remo	2035-2064	2071-2100	-
2.6	EC-EARTH	SMHI-RCA4	2028-2057	2071-2100	-
4.5	MPI-ESM-LR	CSC-Remo	2020-2049	2050-2079	-
4.5	EC-EARTH	SMHI-RCA4	2019-2048	2042-2071	-
4.5	EC-EARTH	KNMI-RACMO22E	2018-2047	2042-2071	-
4.5	Had-GEM-ES	SMHI-RCA4	2007-2036	2023-2053	2055-2084
4.5	IPSL-CM5A-MR	IPSL-WRF331F	2009-2038	2028-2057	2053-2082
8.5	MPI-ESM-LR	CSC-Remo	2014-2043	2030-2059	2053-2082
8.5	EC-EARTH	SMHI-RCA4	2012-2041	2027-2056	2052-2081
8.5	EC-EARTH	KNMI-RACMO22E	2012-2041	2028-2057	2052-2081
8.5	Had-GEM-ES	SMHI-RCA4	2004-2033	2016-2045	2037-2066

Fuente: adaptado de Donnelly et al. 2017.

### Modelos empleados

Los modelos empleados fueron de dos tipos: modelos climáticos y modelos hidrológicos. Los modelos climáticos utilizados son los detallados en la Tabla 4. Se emplearon combinaciones de modelos de circulación global y modelos regionales. Estos modelos se analizaron para tres escenarios de emisiones: RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5.

Los resultados de escenarios climáticos se tomaron como datos de entrada para los siguientes modelos hidrológicos: E-HYPE (Donnelly et al. 2016), Lisflood (Burek et al. 2013), WBM (Vörösmarty et al. 2000), LPJmL (Schaphoff et al. 2013) y VIC (Liang et al. 1994). Todos los modelos se ejecutaron con paso de tiempo diario, excepto el modelo ViC, que se ejecutó con paso de tiempo de 3 horas, aunque también se agregaron sus resultados a escala diaria para poder generar un conjunto homogéneo de resultados de modelos para su análisis. Los modelos hidrológicos y sus características básicas se detallan en la Tabla 5.

### Variables de salida de la modelización

Las variables analizadas en la modelización climática fueron las siguientes:

- Precipitación (períodos según la Tabla 4).
- Espesor de nieve (como agua equivalente).
- Temperatura (períodos según la Tabla 4).
- Evapotranspiración.



Tabla 5: Características principales de los modelos hidrológicos utilizados.

Modelo	Datos para calibración o validación	Método de parametrización	Cuencas no aforadas	Método de validación
E-HYPE	ERA-INTERIM ajustado a climatología del GPC. Sesgo del modelo corregido con la base E-OBS en este estudio	Calibración del tipo "stepwise" en grupos representativos de cuencas aforadas, para cada tipo y uso del suelo	Simulación usando los parámetros calibrados de tipo y uso del suelo	Modelo evaluado en 181 estaciones de aforo usando percent bias (PBIAS) y Nash Sutcliffe Efficiency (NSE)
Lisflood	EFAS-Meteo: Base de datos en cuadrícula para Europa de información meteorológica y resolución 5 x 5 km (Thielen et al. 2013)	Set de parámetros calibrados independientemente en 693 cuencas aforadas	Simulación usando valores de parámetros basados en la opinión de expertos	Modelo evaluado en 594 cuencas usando NSE
LPJml	Base de datos de la Water Framework Directive (WFD)	Proceso de parametrización "a priori"	Simulación usando los parámetros definidos a priori	Validación de escorrentía en 213 cuencas variando la precipitación (Biemans et al. 2009)
VIC	WFD	Seis parámetros de suelo y asumiendo no variación en los diferentes tipos de usos de suelo	Simulación usando regionalización de tipos de suelo	Contrastado con los servicios europeos de información climática (Van Vliet et al. 2015)
WBM	WFD	Proceso de parametrización "a priori"	Simulación usando los parámetros definidos a priori	Comparado con las funciones de evaporación potencial de cuencas en USA (Vörösmarty et al. 1998)

Fuente: adaptado de Donnelly et al. 2017.

Para cada variable, se obtuvieron 55 series diarias de 30 años para cada uno de los tres escenarios de calentamiento analizados (11 proyecciones climáticas y 5 modelos hidrológicos globales).

Los modelos hidrológicos proporcionaron series de aportaciones diarias distribuidas (cuadrícula de 0.5° x 0.5°), tanto para el escenario actual como para las diferentes proyecciones futuras. Con estos resultados se cuantificaron indicadores que muestran cómo el desarrollo del clima en el tiempo y el espacio influye en aspectos relevantes del ciclo hidrológico para los diferentes sectores: navegabilidad, riego, abastecimiento de agua, ecología, producción de energía hidroeléctrica y agua para sistemas de refrigeración. Los indicadores analizados fueron los siguientes:





- *Evapotranspiración*: evapotranspiración media anual.
- *Escorrentía*: escorrentía media anual.
- *Escorrentías altas*: media de la escorrentía máxima anual.
- *Escorrentías bajas*: escorrentía media anual correspondiente al percentil 10, o sea la escorrentía media que se supera el 90 % de los años analizados.
- *Espesor de nieve*: espesor de nieve medio anual (expresado como agua equivalente).

Cabe señalar que, aunque las resoluciones espaciales originales de las celdas de los modelos hidrológicos globales varían entre 5 km y 0.5° (56 x 56 km en el Ecuador) y que la topología del modelo E-HYPE se basa en subcuencas (y no celdas), todos los resultados se homogeneizaron para poder procesarlos en un tamaño de celda común de 0.5°. Con estos valores se construyó un conjunto representativo ("ensemble") de los resultados de los modelos.

### **Principales incertidumbres de los modelos utilizados**

Los modelos empleados en este análisis son de tres tipos: modelos globales de clima, modelos regionales de clima y modelos hidrológicos globales. Todos ellos están sujetos a distintos tipos de incertidumbre, que se debe tener en cuenta a la hora de valorar los resultados obtenidos.

En primer lugar, cabe destacar las incertidumbres asociadas al sistema climático. Siguiendo el esquema propuesto por Foley (2010), se pueden citar las siguientes fuentes de incertidumbre.

- *Escenarios de emisión* de gas invernadero y su concentración en la atmósfera.
- *Sensibilidad climática*, entendida como una medida de la capacidad de respuesta del sistema climático a un cambio en los forzamientos.
- *Variabilidad natural*. Aunque exista alguna idea de cuán sensible es el sistema climático al aumento de gases de efecto invernadero, existen limitaciones de conocimiento para comprender cómo responderá el clima en última instancia. El sistema climático es un sistema dinámico, no lineal y complejo, por lo que comprender los comportamientos de varios componentes del sistema no implica comprender el comportamiento general.
- *Retroalimentación y respuesta del clima*. Existen mecanismos de retroalimentación climática que pueden amplificar o disminuir los efectos de un cambio en el forzamiento. Por ejemplo, es posible que el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero interfiera con los modos y procesos climáticos naturales.
- *Forzamientos externos*. El forzamiento externo futuro puede provenir de una variabilidad solar inesperada o erupciones volcánicas, que pueden tener un impacto significativo en el clima.

La formulación y ejecución de las simulaciones en los modelos climáticos da lugar a fuentes de incertidumbre adicionales:

- *Incetidumbre epistemológica*, relacionada con el imperfecto conocimiento de los fenómenos o de su representación. Por ejemplo: la incertidumbre asociada a la nubosidad. La capacidad de cálculo limitada obliga a simular procesos con menor resolución que la deseada. Esto obliga a la parametrización del proceso, en lugar de representarlo mediante sus ecuaciones reales de comportamiento. Las diferentes parametrizaciones elegidas producen resultados diferentes. En ausencia de datos empíricos para la comparación, todos los resultados deben tratarse como proyecciones plausibles del clima futuro.
- *Incetidumbre ontológica*, relacionada con variabilidad y aleatoriedad del sistema climático. Incluye la sensibilidad del clima a las condiciones iniciales o la influencia que tienen las condiciones iniciales o de contorno utilizadas en la simulación.



- *Variabilidad entre modelos.* El diseño del modelo en todos los niveles es un proceso subjetivo. Se deben tomar decisiones sobre qué incluir en un modelo climático, qué excluir, qué parametrizar y cómo, y cada decisión introduce incertidumbre.

Finalmente, los modelos hidrológicos globales están sujetos a las dos fuentes principales de incertidumbre (Loucks et al. 2005):

- Incertidumbre epistemológica, asociada a la falta de conocimiento o de precisión para la modelación de algunos procesos físicos y sus interacciones. Esta incertidumbre es especialmente acusada en los modelos globales, puesto que su resolución es muy grosera. Por ejemplo, la red de drenaje que resulta de una cuadrícula a resolución de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  es una cruda representación de la red de drenaje real.
- Incertidumbre asociada a la variabilidad natural (espacial y temporal) de los procesos que se representan. Los periodos de análisis sobre los que se obtienen valores representativos son siempre insuficientes para la plena caracterización de todas las propiedades estadísticas del proceso.

#### 4.1.1.4 Características destacadas

Las características que justifican que este estudio sea considerado una buena práctica en el sector son las siguientes:

- Se trata de un ejemplo riguroso, donde se muestra cómo debe hacerse el estudio del impacto del cambio climático sobre los fenómenos hidrológicos extremos fijando un valor de calentamiento global.
- Los resultados que se obtienen caracterizan el comportamiento hidrológico esperado en todo el continente y se pueden utilizar como punto de partida para análisis posteriores.
- El trabajo enlaza adecuadamente modelos de análisis de resoluciones diferentes: modelos globales de clima, modelos regionales de clima y modelos hidrológicos globales. Esta cadena de modelación se aplica a un ámbito territorial extenso, que permite obtener resultados para España y encuadrarlos en su contexto regional.
- En el trabajo se emplean datos y se proporcionan resultados de modelos cuya disponibilidad es global y libre. Entre los resultados de los modelos se incluyen proyecciones de escorrentía con paso de tiempo diario.
- A partir de los resultados obtenidos en este estudio se pueden realizar elaboraciones adicionales de los fenómenos hidrológicos. Por ejemplo, Neumman et al. (2018) estimaron los períodos de retorno de las sequías en diferentes macro-regiones que se asocian a valores específicos de calentamiento global.
- También se pueden analizar factores de tipo socioeconómico. Por ejemplo, Arnell et al. (2019) construyeron funciones de daño por inundación derivadas del impacto del cambio climático y asociadas a valores específicos de calentamiento global.

#### 4.1.1.5 Descripción de técnicas específicas

*Método para definir umbrales de incremento específico de temperatura global (basado en Vautard et al. 2014)*

El método seguido en el trabajo de referencia para definir umbrales de calentamiento en modelos climáticos sigue la propuesta de Vautard et al. (2014), en la que los escenarios que superan el nivel propuesto de calentamiento se utilizan como instantáneas en el tiempo, representando dicho nivel de calentamiento. Esto resulta necesario, porque todavía no se dispone de un conjunto suficientemente representativo de modelos climáticos que se hayan estabilizado en los niveles de calentamiento analizados. Los impactos del cambio climático correspondiente a unos niveles determinados de calentamiento se evalúan tomando la ventana de tiempo de 30 años centrada en el instante en que cada modelo alcanza el nivel de calentamiento establecido. Otro procedimiento



alternativo, empleado por ejemplo por Heinke et al. (2013), consiste en escalar los patrones de los modelos globales de clima para que todos alcancen el mismo nivel de calentamiento en el mismo instante de tiempo.

*Métodos para identificar las respuestas climáticas regionales a un incremento específico de temperatura global (basado en James et al. 2017)*

El objetivo de limitar el incremento de la temperatura global a largo plazo del Acuerdo de París (2016) se refiere a dos niveles de calentamiento global respecto a los niveles pre industriales, de 1.5 y 2 °C. Para identificar señales climáticas regionales asociadas con los límites de temperatura global, y partiendo de las proyecciones climáticas actualmente disponibles, se han desarrollado diferentes métodos que incluyen la comparación de datos de diferentes escenarios de gases de efecto invernadero, la selección de modelos climáticos basados en la respuesta de temperatura global, la escala de patrones y la extracción de anomalías en el momento de cada incremento de temperatura global. No obstante, existen aún desafíos metodológicos asociados con el uso de simulaciones de modelos climáticos existentes, que generalmente están diseñados para modelar respuestas a diferentes niveles de forzamiento de gases de efecto invernadero, en lugar de modelar respuestas climáticas a un nivel específico de forzamiento que apunte a un nivel predeterminado de incremento global de temperatura. En la publicación de referencia, para evaluar los impactos del cambio climático ante un incremento medio global de temperatura de 1.5 y 2 °C respecto a los niveles preindustriales (período 1881-1910), se consideran períodos de 30 años de análisis donde el año central de cada período corresponde al año donde se alcanza el incremento de temperatura considerado. James et al. (2017) presenta otros tres métodos para identificar los períodos a analizar y describe las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

## 4.1.2 Estudios de impacto a partir de modelos globales de clima

### 4.1.2.1 Planteamiento general

Son estudios que están basados en un conjunto de escenarios hidrológicos representativos, derivados de los resultados de los modelos climáticos. Se aplica un esquema metodológico basado en el encadenamiento de modelos en cascada. Se comienza con la consideración de proyecciones climáticas derivadas de modelos globales o regionales de clima, tanto para el escenario de control como para el futuro. Luego se acopla uno o varios modelos hidrológicos (por ejemplo, SWAT, SIMPA, Lisflood) para obtener las series de variables hidrológicas (evapotranspiración, escorrentía, infiltración, humedad del suelo, caudal, recarga, etc.) en distintos puntos y en diferentes ventanas temporales (por ejemplo: series de 30 años para el futuro cercano, medio y largo plazo). A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones se realizan análisis posteriores centrados en los procesos hidrológicos de interés. Se pueden estudiar variables específicas vinculadas a fenómenos extremos, como los caudales máximos o mínimos anuales, la duración de los periodos secos, leyes de frecuencia de caudales máximos, o variables de interés para otro tipo de fenómenos, como por ejemplo, la erosión o el transporte de sedimentos. El análisis de resultados se suele basar en la evaluación de la tendencia de las series obtenidas o en la comparación de sus valores medios en distintos horizontes temporales. En el proceso suelen aplicarse técnicas específicas, como reducción de escala, análisis de incertidumbre o corrección del sesgo, que son objeto de análisis en otras buenas prácticas.

Esta metodología de trabajo es la más habitual en evaluación de impactos del cambio climático en el ciclo hidrológico. Hay un gran número de trabajos representativos de gran calidad, que podrían tomarse como referencia para ilustrar estas tareas. En este caso, se ha seleccionado el trabajo "Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España", realizado por el Centro de Estudios Hidrográficos de CEDEX en 2017. Este trabajo se ha seleccionado por su rigor metodológico y por la relevancia de sus resultados en España. Las características básicas del trabajo se resumen en la Tabla 6.

### 4.1.2.2 Resumen del trabajo

El objetivo de este trabajo es evaluar el impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural y en el régimen de sequías en España. Dado que el trabajo está redactado



originalmente en castellano, se reproducen aquí fragmentos de su introducción, que describe con fidelidad su contenido.

*“Los valores climáticos de partida de este trabajo proceden de modelos climáticos globales y de escenarios de emisiones utilizados en el 5º Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Este trabajo constituye una actualización de otro anterior ya realizado en el CEDEX (CEDEX 2010; Álvarez-Rodríguez et al. 2012, Barranco et al. 2014) que usaba un conjunto de proyecciones climáticas regionalizadas para España a partir de resultados de simulaciones con modelos climáticos del 3er informe del IPCC.*

*Se ha evaluado el impacto de 12 proyecciones climáticas con objeto de recoger la incertidumbre asociada a las simulaciones climáticas y, por lo tanto, de expresar de manera más completa el impacto del cambio climático. El ámbito del trabajo es el territorio de España.*

*La base del estudio es cada una de las celdas en las que se ha compartimentado el territorio español. El tamaño de celda donde se realizan los cálculos básicos es de 1 km x 1 km, si bien los cálculos de acumulación hídrica se realizaron en celdas de 0,5 km x 0,5 km. De ese modo, el análisis básico se hace de manera distribuida en cada una de las aproximadamente 500.000 celdas de 1 km<sup>2</sup> en las que se discretiza España.*

*El impacto sobre los RRHH se presenta también agregado para el conjunto de España y para cada Demarcación Hidrográfica (DH), habida cuenta de que la cuenca hidrográfica es la unidad física integral del ciclo hidrológico donde, salvo excepciones, se encuadran los procesos de transferencia de agua en la fase terrestre. Para este trabajo, las islas Canarias se han agrupado en una única DH. Ceuta y Melilla, aunque dependen formalmente de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, se han integrado en la DH de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas por su proximidad geográfica y mayor similitud de resultados.*

*Este informe contiene la descripción y resultados de los trabajos llevados a cabo. El capítulo 2 es una introducción a las proyecciones climáticas, haciendo referencia a las del 5º informe de evaluación del IPCC (AR5, 5º Assessment Report). En el capítulo 3 se comentan los antecedentes principales. El capítulo 4 describe la metodología del trabajo. En el capítulo 5 se analizan las proyecciones climáticas seleccionadas, así como los resultados del contraste con los datos observados. El capítulo 6 trata la obtención de mapas de las variables climáticas, incluyendo la interpolación de los valores en estaciones, el cálculo de la evapotranspiración potencial y la estimación del cambio en la precipitación y la evapotranspiración potencial. El capítulo 7 describe los resultados de aplicar la simulación hidrológica a las proyecciones climáticas y del impacto sobre los RRHH. En el capítulo 8 se resumen y discuten los resultados del impacto en los RRHH. El capítulo 9 trata el impacto sobre el régimen de sequías. El capítulo 10 contiene las conclusiones del trabajo. Se incluye además un DVD con el informe digital y los anexos, incluyendo el atlas cartográfico y la aplicación informática para la visualización y análisis de los mapas”.*

El esquema metodológico seguido en este tipo de trabajos se representa en la Ilustración 2. El punto de partida son las proyecciones climáticas que se piensa analizar y la aplicación de un método de reducción de escala para su empleo en los análisis hidrológicos. En el trabajo del CEDEX se partió de las proyecciones climáticas regionalizadas elaboradas por la Agencia Estatal de Meteorología. Estas proyecciones se realizaron para emplazamientos de estaciones de medida mediante el método de análogos, empleando técnicas de reducción de escala estadísticas y dinámicas. Los datos puntuales de precipitación y temperatura se procesaron para obtener mapas mensuales con la resolución espacial de trabajo de 1 km<sup>2</sup> y se obtuvieron las variables climáticas derivadas, como la evapotranspiración potencial.

El segundo bloque de tareas es el análisis y contraste de las proyecciones mediante la comparación con las series para observadas, para identificar sus características básicas, precisar su grado de fiabilidad y determinar la conveniencia de abordar tareas de análisis de incertidumbre o de corrección de sesgo. En el caso del trabajo del CEDEX, no se aplicó un método específico de corrección de sesgo, sino que se aplicó el método “delta” para atenuar el sesgo.



En la tercera fase se procede a la modelación hidrológica a partir de los escenarios climáticos caracterizados en la fase anterior. El trabajo puede realizarse con un único modelo o emplear varios modelos en paralelo para obtener una estimación de la incertidumbre asociada a la modelación hidrológica. Dada la naturaleza de la modelación hidrológica, que se basa en procesos con un fuerte grado de parametrización, resulta imprescindible que estos modelos estén correctamente calibrados en todas las cuencas que se piensa analizar. A partir de las simulaciones realizadas se extraen las series temporales de las variables hidrológicas básicas en cada escenario simulado.

En la fase final se realiza el análisis del impacto del cambio climático en los procesos hidrológicos de interés mediante el estudio de las variables derivadas que describen el fenómeno que se analiza. En el caso de estudios de inundaciones, se analiza el régimen de caudales máximos mediante el estudio de las leyes de frecuencia. En el caso de sequías, se analizan los ciclos en los que se presentan caudales inferiores por debajo de un umbral, caracterizando su duración, intensidad y magnitud. En todos los casos se procede a comparar los valores obtenidos en los escenarios climáticos con los valores obtenidos en un periodo de control o de referencia actual. En esta última fase es importante realizar un estudio de incertidumbre, comparando las soluciones obtenidas a partir de los distintos escenarios de emisiones, modelos climáticos y modelos hidrológicos.





Ilustración 2: Esquema metodológico de la buena práctica

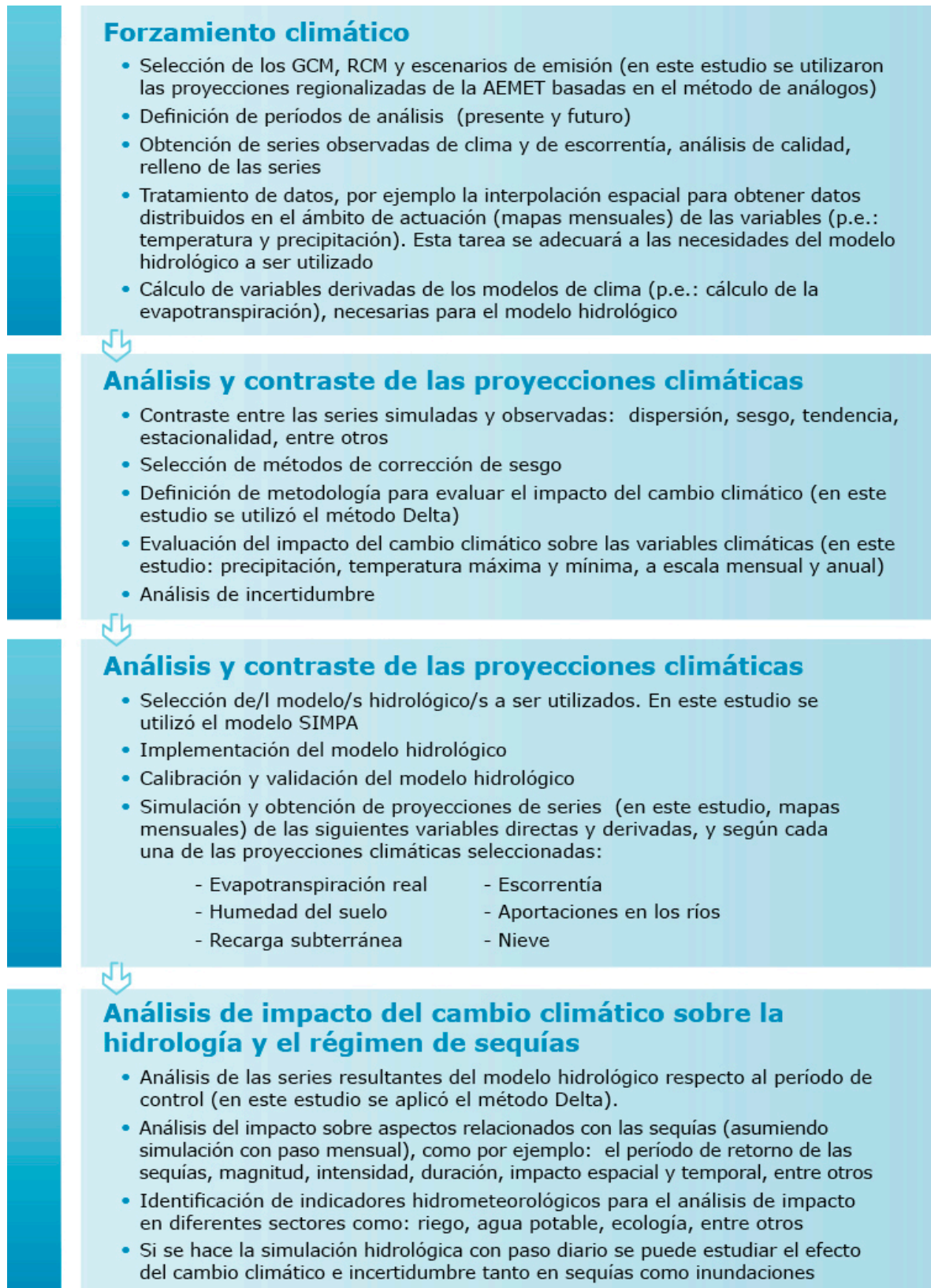




Tabla 6: Ficha de características básicas de la buena práctica

Concepto	Información básica
Título de la publicación	Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España
Autores	Centro de Estudios Hidrográficos, del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Director del trabajo: Luis Miguel Barranco Sanz
Año del estudio	2017
Publicación	Clave CEDEX: 42-415-0-001.
Enlace web	<a href="http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/3B08CCC1-C252-4AC0-BAF7-1BC27266534B/145732/2017_07_424150001_Evaluaci%C3%B3n_cambio_clim%C3%A1tico_recu.pdf">http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/3B08CCC1-C252-4AC0-BAF7-1BC27266534B/145732/2017_07_424150001_Evaluaci%C3%B3n_cambio_clim%C3%A1tico_recu.pdf</a> Documento de acceso gratuito
Alcance geográfico	España, con análisis detallado de todas las demarcaciones hidrográficas e islas
Tipo de evento extremo	Sequías (en el estudio similar publicado en 2012 se analizaron también inundaciones)
Enfoque	Basado en simulaciones de modelos
Otros trabajos similares o complementarios	Alfieri, L., Burek, P., Feyen, L., Forzieri, G. (2015): Global warming increases the frequency of river floods in Europe, <i>Hydrol. Earth Syst. Sci.</i> , 19, 2247–2260  Krysanova V., Vetter T. et al. (2017): Intercomparison of regional-scale hydrological models and climate change impacts projected for 12 large river basins worldwide - A synthesis. <i>Environmental Research Letters</i> 12(10)  Alfieri, L., Bisselink B. et al. (2017): Global projections of river flood risk in a warmer world. <i>Earth's Future</i> 5(2) 171-182.

#### 4.1.2.3 Datos y modelos empleados en el trabajo

##### Datos empleados

Los datos históricos utilizados en la investigación se tomaron de la propia base de datos HIDRO del CEDEX y de AEMET. Los datos analizados fueron los siguientes:

- *Precipitación*: 1961–2000 (datos mensuales). Se seleccionaron aquellas estaciones que tienen al menos 35 años completos de datos observados (PRE), siendo un total de 621 estaciones pluviométricas distribuidas en España. Fuente: Base de datos HIDRO del CEDEX (Quintas 1996) y la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).
- *Temperatura*: 1961–2000 (datos mensuales: mínima y máxima). La temperatura mínima mensual (TMN) se consideró como la media de las temperaturas mínimas diarias (°C). La temperatura máxima mensual (TMX) se consideró como la media de las temperaturas máximas diarias (°C). Se seleccionaron aquellas estaciones que tienen al menos 35 años completos de datos observados, siendo un total de 229 estaciones. Cabe señalar que las series de TMN y TMX





de la base de datos HIDRO se completaron previamente mediante un modelo de regresión bivariado con estacionarización previa.

Se calcularon las series mensuales y anuales de PRE, TMN y TMX promediando los valores de las estaciones de cada una de las principales Demarcaciones Hidrográficas de España. También se calculó el valor medio y la desviación típica mensual y anual de cada serie.

La selección de las proyecciones climáticas utilizadas en este estudio se basó en las recomendaciones y criterios de la AEMET y la Oficina Española de Cambio Climático (OECC). La AEMET recomendó que se utilizaran aquellas proyecciones climáticas regionalizadas según el método estadístico de regionalización basado en análogos. En el sitio web de la AEMET se puede consultar la descripción detallada del método de análogos aplicado a la temperatura y la precipitación. Por su parte, la OECC recomendó el uso de las proyecciones correspondientes a los escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5. De esta forma, se utilizaron 12 proyecciones climáticas compuestas por 6 modelos globales de clima y los escenarios de emisión mencionados. Las proyecciones se resumen en la Tabla 7.

Se simularon dos períodos de análisis: un período de control (1961-2000) y un período futuro (2006-2100). El período futuro se dividió en tres horizontes de análisis: 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100. Los resultados de cada proyección climática se obtuvieron en 2321 puntos (estaciones existentes de la AEMET) para la variable precipitación y en 374 puntos para la variable temperatura.

Tabla 7: Resumen de las 12 proyecciones climáticas analizadas.

Escenario RCP	Denominación	Modelo GCM	Regionalización
4.5	F4A	CRNM-CM5	Análogos AEMET
8.5	F8A	CRNM-CM5	Análogos AEMET
4.5	M4A	MPI.ESM.MR	Análogos AEMET
8.5	M8A	MPI.ESM.MR	Análogos AEMET
4.5	N4A	INMCM4	Análogos AEMET
8.5	N8A	INMCM4	Análogos AEMET
4.5	Q4A	BCC-CSM1-1	Análogos AEMET
8.5	Q8A	BCC-CSM1-1	Análogos AEMET
4.5	R4A	MIROC.ESM	Análogos AEMET
8.5	R8A	MIROC.ESM	Análogos AEMET
4.5	U4A	MRI.CGCM3	Análogos AEMET
8.5	U8A	MRI.CGCM3	Análogos AEMET

Fuente: adaptado de CEDEX, 2017.

### Modelos empleados

Los modelos empleados fueron de dos tipos: modelos climáticos y modelos hidrológicos. A continuación, se reseñan brevemente los seis modelos globales de clima utilizados:

- *BCC-CSM1-1* (Beijing Climate Center-Climate System, model version 1.1). El modelo es un sistema climático que acopla la atmósfera, el océano, la superficie terrestre y el hielo marino e incorpora el ciclo global del carbono y la cubierta vegetal (<http://forecast.bccscm.ncc-cma.net/web/channel-11.htm>).



- *CNRM-CM5* (Centre National de Recherches Meteorologiques – Coupled Model 5). Es un modelo del sistema terrestre (ESM) y consiste en el acoplamiento (mediante el software OASIS) de varios modelos existentes diseñados independientemente. Los modelos que acoplan son: atmósfera (ARPEGE), océano (NEMO), hielo marino (GELATO), superficie terrestre (SURFEX) y escorrentía (TRIP) (<http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article126&lang=en>).
- *INMCM4* (Institute of Numerical Mathematics Climate, model version 4). Es un modelo acoplado atmósfera-océano que consiste en dos modelos principales: el modelo atmosférico y el modelo oceánico (Volodin et al. 2010).
- *MIROC.ESM* (Model for Interdisciplinary Research on Climate Institute – Earth System Model). Es un modelo que acopla la atmósfera, el océano y la superficie terrestre, mediante el intercambio de energía, momento, agua y el CO<sub>2</sub> (Watanabe et al. 2011).
- *MPI.ESM.MR* (Max Planck Institute – Earth System Model – Medium Resolution). Es un modelo que acopla la atmósfera, el océano y la superficie terrestre, mediante el intercambio de energía, momento, agua y el CO<sub>2</sub> (<https://www.mpimet.mpg.de/en/science/models/mpi-esm/>).
- *MRI.CGCM3* (Meteorological Research Institute (MRI) – Coupled General Circulation Model versión 3). Es un modelo acoplado atmósfera – océano, mediante el intercambio de energía entre ambos (Yukimoto et al. 2011).

Se utilizó como método de regionalización el método estadístico basado en análogos ([http://www.aemet.es/es/idi/clima/escenarios\\_CC](http://www.aemet.es/es/idi/clima/escenarios_CC)). Estos modelos se analizaron para dos escenarios de emisiones: RCP4.5 y RCP8.5.

El modelo hidrológico aplicado se denomina SIMPA: Sistema Integrado de Modelación Precipitación-Aportación (Estrela y Quintas 1996, Álvarez-Rodríguez et al. 2005). Es un modelo hidrológico cuasi-distribuido (celdas de 1 km x 1 km) utilizado para la evaluación de los recursos hídricos en régimen natural. Lleva a cabo una modelación distribuida de los componentes básicos del ciclo hidrológico con paso de tiempo mensual y cubre todo el territorio español. El proceso de generación de la escorrentía se simula a partir de información meteorológica y de las características de las cuencas, permitiendo estimar los caudales medios mensuales en régimen natural en cualquier punto de la red hidrográfica de una cuenca. A partir de la precipitación, la evapotranspiración potencial y los parámetros hidrológicos, el modelo obtiene los mapas de los distintos almacenamientos, humedad en el suelo y volumen de acuífero, y de las variables de salida del ciclo hidrológico, evapotranspiración real y escorrentía total, obtenida esta última como suma de la escorrentía superficial y la subterránea. Las aportaciones mensuales, en cada intervalo de tiempo, se obtienen integrando la escorrentía total en las cuencas vertientes a los puntos de simulación.

#### **Variables de salida de la modelización**

Las variables analizadas en la modelación climática fueron las siguientes:

- *Precipitación*: Períodos 1961-2000 y 2006-2100. Series diarias de precipitación para cada una de las 12 proyecciones climáticas en 2321 puntos distribuidos en España.
- *Temperatura*: Períodos 1961-2000 y 2006-2100. Series diarias de TMN y TMX para cada una de las 12 proyecciones climáticas en 374 puntos distribuidos en España.
- *Evapotranspiración Potencial (ETP)*: Períodos 1961-2000 y 2006-2100. A partir de los resultados de la modelización climática se calcularon las series mensuales de ETP por el método de Hargreaves (Hargreaves y Allen 2003) y se validaron con el método de Penman Monteith (Allen et al. 2006) a partir de la información de 125 estaciones meteorológicas distribuidas en España.

Cabe señalar que en este estudio no se realiza la simulación climática, sino que se analizan los resultados de las proyecciones climáticas antes mencionadas en los puntos geográficos mencionados.

Las proyecciones climáticas presentan valores de precipitación, TMN y TMX en una serie de estaciones. Para utilizar el modelo hidrológico de evaluación de recursos hídricos se interpolan esos



valores para obtener valores mensuales distribuidos en celdas de 1 km<sup>2</sup> (resolución de trabajo del modelo SIMPA). Para ello la interpolación se realizó por el método de residuos basados en patrones mensuales de precipitación y temperaturas (Álvarez-Rodríguez 2011). Asimismo, para cada mes y celda, se obtienen series distribuidas de temperatura media mensual (TEM) como la semisuma de los valores mensuales de TNM y TMX

El modelo hidrológico SIMPA da como resultado mapas mensuales distribuidos (en cuadrícula) tanto para el periodo de control (1961-2000) como para el período futuro (2006-2100), de las siguientes variables:

- Evapotranspiración real
- Humedad del suelo
- Recarga subterránea
- Escorrentía

Acumulando la escorrentía de todas las celdas de la cuenca vertiente se obtienen los mapas mensuales de aportaciones, y a partir de ellos, se construyen las series mensuales de aportaciones en los puntos seleccionados.

El análisis del impacto climático en el régimen de las sequías se basó en el estudio del cambio en el periodo de retorno de las sequías en cada uno de los períodos futuros respecto al período de control. Para la definición del período de retorno de las sequías se aplicó la metodología propuesta por Salas et al. (2005), a partir de estudios previos de Fernández y Salas (1999a, 1999b) y de Shiau y Shen (2001) que desarrollan la teoría de rachas propuesta por Yevjevich (1967).

Los resultados hidrológicos se obtuvieron para cada una de las 12 proyecciones climáticas analizadas y posteriormente se analizaron mediante el método "delta".

### ***Principales incertidumbres de los modelos utilizados***

Este estudio se basa en los escenarios climáticos generados por la Agencia Estatal de Meteorología. Dichos escenarios están sujetos a las incertidumbres propias de la modelación del sistema climático, ya detallados en la práctica anterior. Junto a ello, existen algunos aspectos del manejo de información climática que constituyen fuentes de incertidumbre.

- Se observa un sesgo importante entre la precipitación simulada y observada. Mientras que la mayoría de las proyecciones climáticas sobrevaloran la precipitación en las demarcaciones hidrográficas del oeste peninsular, la infravaloran en las del este peninsular y en los archipiélagos.
- Existen diferentes métodos de corrección del sesgo de las series de temperatura y precipitación, dando resultados diferentes según se aplique uno u otro. Por tanto, la necesidad de corregir este sesgo incorpora otra fuente de incertidumbre. Asimismo, no se puede afirmar que los métodos de corrección del sesgo sean estacionarios en el tiempo al cambiar las condiciones climáticas (Ehret et al. 2012). En el estudio de referencia se decidió no aplicar un método específico de corrección de sesgo, trabajando con el método "delta", basado en los cambios relativos entre cada periodo futuro y el periodo de control.
- Existe incertidumbre sobre la representatividad de los valores simulados en el período de control. Los porcentajes de cambio por efecto del cambio climático se refieren a cambios sobre ese período de control. Sin embargo, las series simuladas en ese período difieren considerablemente respecto a las observadas, fundamentalmente para la variable precipitación. En particular, las series simuladas no recogen las tendencias negativas de la precipitación observada ni tampoco los ciclos secos-húmedos.
- Incertidumbre asociada al período de análisis considerado. Los cambios climáticos futuros respecto a la serie de control serán diferentes en función de los períodos considerados. Es



aconsejable realizar análisis de sensibilidad de los resultados según este aspecto, por ejemplo, utilizando períodos móviles de 30 años.

- La incertidumbre asociada a la variabilidad de resultados entre modelos climáticos. A priori, no se puede afirmar que haya modelos mejores que otros por lo que dichas proyecciones se consideran equiprobables. En algunos casos se suele utilizar la media aritmética para evaluar el impacto del conjunto de proyecciones, ya que es más sencillo utilizar un único valor y, suele suceder, que los errores de los diferentes modelos se compensan. No obstante, este procedimiento no asegura una disminución de la incertidumbre asociada a la variabilidad de resultados según el modelo aplicado.
- Las variaciones de las variables debido al cambio climático se estimaron utilizando valores simulados en el periodo de control, por lo que los valores estadísticos medios para el período de control difieren de una proyección climática a otra y también con los valores medidos. Aunque el hecho de que un modelo simule bien los datos observados en el período de control no asegura la bondad de los resultados de las proyecciones futuras, sí da robustez al modelo climático y elimina uno de los argumentos más comunes para invalidar las proyecciones.
- Incertidumbre asociada a la escala de trabajo y alcance del estudio. En este caso, se trata de un estudio a escala nacional y los resultados se presentan agregados. Tanto los valores de precipitación como temperatura se presentan promediando los valores de las estaciones de medida de cada uno de los principales ámbitos hidrográficos. Lo anterior imposibilita obtener conclusiones sobre fenómenos locales a escala de cuenca.

La simulación hidrológica se realizó mediante el modelo SIMPA, que comparte las fuentes principales de incertidumbre de los modelos hidrológicos:

- Incertidumbre asociada a la falta de capacidad para la modelación de algunos procesos físicos y sus interacciones. El modelo SIMPA es relativamente sencillo en cuanto a la representación de los procesos simulados y su escala de trabajo mensual no permite simular en detalle la dinámica de los procesos hidrológicos. Sin embargo, tiene la fortaleza de que ha sido calibrado en cientos de puntos de España, lo que le da robustez en el ámbito español.
- Incertidumbre asociada a la utilización de datos de entrada al modelo sin corrección del sesgo. El método utilizado para evaluar el efecto del cambio climático según las diferentes variables ha sido el denominado método "delta". Este método no corrige el sesgo de las variables de entrada al modelo hidrológico, en particular de la precipitación. Los procesos asociados a la transformación lluvia-escorrentía no son lineales. Por tanto, el efecto del impacto del cambio climático de la variable escorrentía podrá estar amplificado o atenuado de una forma no lineal y dependerá de las series de entrada al modelo. La utilización de series de entrada al modelo con sesgo podría dar como resultado variaciones en la escorrentía diferentes (y no linealmente proporcionales) respecto de las que se obtendrían si se hubiera corregido el sesgo en las series de entrada al modelo. Este aspecto metodológico introduce una fuente de incertidumbre en la estimación del impacto climático.

#### **4.1.2.4 Características destacadas**

Este estudio es el punto de partida para muchos trabajos de análisis de impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos en España. Las características que justifican su selección como buena práctica son las siguientes:

- Estudia el impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos a escala nacional. Los resultados presentados permiten a los diferentes organismos de cuenca incorporar el análisis del impacto del cambio climático a los planes hidrológicos de cuenca y cumplir con la legislación nacional y de la Unión Europea.
- Realiza un análisis de todo el territorio nacional con una metodología única, lo que proporciona uniformidad de criterio en el análisis del cambio climático en las diferentes Demarcaciones Hidrográficas.



- El trabajo incluye diferentes combinaciones de modelos de clima global y escenarios de emisión, desarrollando los escenarios oficiales establecidos por la Agencia Estatal de Meteorología.
- La alta resolución espacial del análisis permite el análisis a escala de cuenca. Aunque los resultados se presentan de forma agregada para las demarcaciones hidrográficas, la modelación es distribuida en celdas de 1km<sup>2</sup>, lo que permite una mayor resolución espacial. Recientemente, se ha incorporado el análisis por sistema de explotación en los Esquemas Provisionales de Temas Importantes de algunos planes hidrológicos de cuenca del tercer ciclo de planificación (2021-2027).
- Los resultados obtenidos con el modelo SIMPA en el período histórico constituyen una referencia de los recursos hídricos en régimen natural en todo el territorio español. Esto permitirá realizar estudios complementarios por diversos actores (organismos públicos, académicos, empresas de servicios, etc.).
- Los resultados generados en el estudio de referencia posibilitan el análisis de muchas cuestiones relacionadas con el impacto del cambio climático, como por ejemplo: otros aspectos relacionados con las sequías, determinación de funciones de daño, diseño y evaluación de medidas de adaptación y mitigación.

#### **4.1.2.5 Descripción de técnicas específicas**

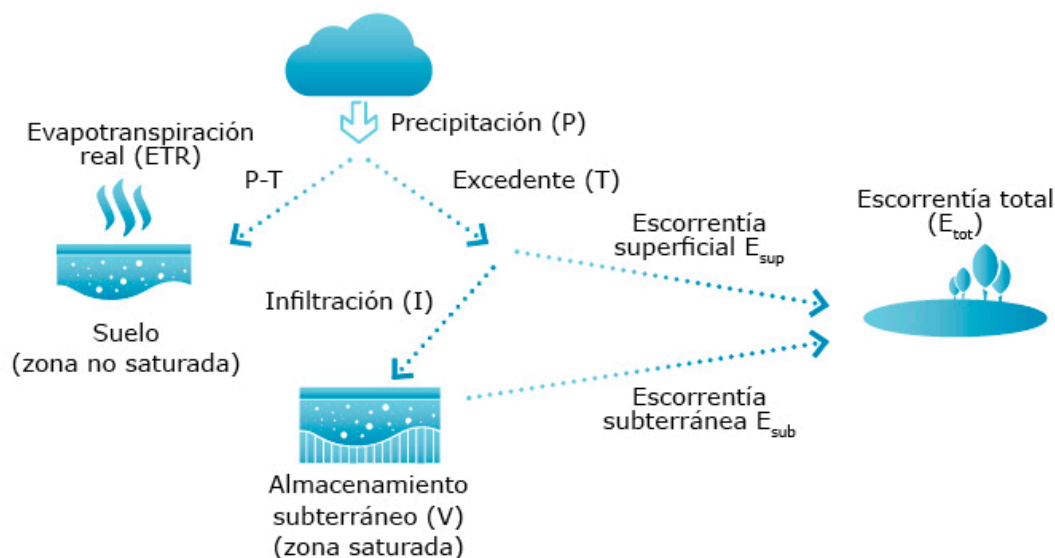
##### *Características del modelo SIMPA (adaptado de: CEDEX 2017)*

El modelo SIMPA (Simulación Precipitación-Aportación) es un modelo hidrológico cuasi-distribuido (1 km x 1 km) utilizado para la evaluación de los recursos hídricos en régimen natural (Estrela y Quintas 1996, Álvarez-Rodríguez et al. 2005). Fue desarrollado por el Centro de Estudios Hidrográficos (CEH) del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) durante la elaboración del Libro Blanco del Agua en España (año 2000). Se simula el proceso de generación de la escorrentía a partir de información meteorológica y de las características de las cuencas, permitiendo estimar los caudales medios mensuales en régimen natural en cualquier punto de la red hidrográfica de una cuenca. A partir de la precipitación, la evapotranspiración potencial y los parámetros hidrológicos, el modelo obtiene los mapas de los distintos almacenamientos, humedad en el suelo, volumen de agua en el acuífero, y de las variables de salida del ciclo hidrológico, evapotranspiración real y escorrentía total, obtenida esta última como suma de la escorrentía superficial y la subterránea. Las aportaciones mensuales, en cada intervalo de tiempo, se obtienen integrando la escorrentía total en las cuencas vertientes a los puntos de simulación.

El modelo SIMPA realiza balances hídricos con paso mensual en cada celda en las que se divide el territorio. La fase subterránea se simula en las denominadas unidades acuíferas mediante un modelo agregado de tanque. Este es el único proceso que se realiza de manera agregada, y de ahí la denominación de modelo cuasi-distribuido. Conceptualmente, se basa en el modelo agregado de Témez (Témez 1977) que se aplica a cada celda. En el estudio de referencia (CEDEX 2017), el territorio de España se dividió en una cuadrícula (celdas de 1 km x 1 km), por lo que se realizaron balances hídricos en cada una de las aproximadamente 500.000 celdas resultantes. En la Ilustración 3 se resume el esquema conceptual del balance hídrico del modelo SIMPA.

Ilustración 3: Esquema conceptual del balance hídrico del modelo SIMPA

### Simulación del ciclo hidrológico: estructura del modelo de Tézmez



El balance hídrico se lleva a cabo mediante ecuaciones que de modo progresivo modelizan los procesos que tienen lugar en una cuenca. Los datos de entrada al modelo son las series de precipitación ( $P$ ) y evapotranspiración potencial ( $ETP$ ) a escala mensual durante el período de simulación. A continuación, se presenta los pasos de cálculo para la modelación de los diferentes procesos.

- 1) Cálculo del Excedente ( $T$ ). Es el agua de la precipitación que no podrá evapotranspirar. Su cálculo se realiza mediante las fórmulas empíricas propuestas por Tézmez (1977):

$$\forall P_i \leq P_{oi} \rightarrow T_i = 0 \quad \text{Ec.1}$$

$$\forall P_i > P_{oi} \rightarrow T_i = \frac{(P_i - P_{oi})^2}{P_i + \delta_i - 2P_{oi}} \quad \text{Ec.2}$$

$$\delta_i = H_{max} - H_i + ETP_i \quad \text{Ec.3}$$

$$P_{oi} = C \cdot (H_{max} - H_{i-1}) \quad \text{Ec.4}$$

siendo,

$P_i$  = precipitación en el mes  $i$  [mm]

$P_{oi}$  = umbral de escorrentía [mm]

$T_i$  = excedente en el mes  $i$  [mm]

$\delta_i$  = máxima cantidad de agua que puede no participar del escurrimiento en el mes  $i$  [mm]

$H_{max}$  = humedad máxima en el suelo (parámetro del modelo) [mm]

$H_{i-1}$  = almacenamiento en el suelo al final del mes  $i-1$  [mm]

$ETP_i$  = evapotranspiración potencial en el mes  $i$  [mm]

$C$  = parámetro de excedente (parámetro del modelo) [-]



En el modelo SIMPA se añade un elemento más respecto al modelo de Témez, que se refiere al almacenamiento de nieve. Un modelo simplificado almacena la lluvia en forma de nieve cuando la temperatura media mensual desciende por debajo de un umbral ( $0^{\circ}\text{C}$ ) y se fusiona cuando lo supera, siguiendo una ley de recesión equivalente a un tiempo de semi vaciado de 90 días, modificándose así el valor de la precipitación del mes.

El parámetro  $H_{max}$  podría interpretarse como el máximo volumen de agua que puede contener el suelo y que podría evapotranspirarse en la zona no saturada del suelo, parte en el mes de cálculo y el resto de manera diferida en los meses siguientes. Depende de la textura, porosidad, pendiente y uso de suelo. El parámetro  $C$  está relacionado con la facilidad de llenado del suelo y depende de la pendiente y del uso y la textura del suelo.

En cada mes  $i$  se asume que se puede evapotranspirar toda el agua disponible en el suelo con el límite superior de la  $ETP_i$ . El agua disponible en el suelo con posibilidad de ser evapotranspirada es:

$$H_{i-1} + P_i - T_i \quad \text{Ec.5}$$

Por tanto, la evapotranspiración real (ETR) en el mes  $i$  es:

$$ETR_i = \min(H_{i-1} + P_i - T_i, ETP_i) \quad \text{Ec.6}$$

El balance de agua en el suelo al final del mes  $i$  es:

$$H_i = \max(0, H_{i-1} + P_i - T_i - ETP_i) \quad \text{Ec.7}$$

- 2) Cálculo de la infiltración ( $I$ ) a la zona saturada. La infiltración dependerá del excedente y de la infiltración máxima,  $I_{max}$ . El modelo asume que la infiltración es igual a la recarga a los acuíferos (REC) y que ésta ocurre dentro del paso de simulación mensual, independientemente de las características hidrogeológicas del subsuelo. La infiltración en cada mes  $i$  es:

$$I_i = I_{max} \cdot \frac{T_i}{I_{max} + T_i} \quad \text{Ec.8}$$

El parámetro  $I_{max}$  es función de las características del subsuelo (geología, edafología), del relieve y de la concentración temporal de las precipitaciones.

- 3) Cálculo de la escorrentía superficial ( $ESC_{sup}$ ). El excedente que no se infiltra constituirá la escorrentía superficial:

$$ESC_{sup_i} = T_i - I_i \quad \text{Ec.9}$$

- 4) Cálculo de la escorrentía subterránea ( $ESC_{sub}$ ). El modelo asume que el agua de la recarga (e igual a  $I$ ) se almacena en el acuífero, y aportará a la red hidrográfica de manera diferida en el mes de cálculo y en los meses siguientes, en una proporción que dependerá del coeficiente de agotamiento del acuífero alfa ( $\alpha$ ). La aportación subterránea en el mes de cálculo  $i$  es:

$$ESC_{sub_i} = \left(\frac{Q_{i-1}}{\alpha}\right)(1 - e^{-\alpha t}) + \frac{I_i}{\alpha}(1 - e^{-\alpha t}) \quad \text{Ec.10}$$

siendo,  $Q_{i-1}$  el caudal base antecedente. La fase subterránea se simula en las denominadas unidades acuíferas mediante un modelo agregado de tanque, de manera que se calcula la descarga en toda la extensión del acuífero y luego se divide ese valor entre todas las celdas donde se proyecta superficialmente.

- 5) Cálculo de la escorrentía total ( $ESC_{tot}$ ). Se obtiene como la suma de la escorrentía superficial y subterránea:

$$ESC_{tot} = ESC_{sup} + ESC_{sub} \quad \text{Ec.11}$$





- 6) Cálculo de los caudales circulantes por cada celda del área de estudio. El modelo SIMPA estima los caudales circulantes en cada celda del área de estudio integrando los valores de aquellas celdas que vierten a ella. Para ello, se utiliza un mapa de direcciones de flujo generado a partir del modelo digital del terreno. Cada celda transfiere toda el agua a aquella celda vecina con mayor pendiente, obteniéndose caudales ( $m^3/s$ ) medios mensuales o aportaciones hídricas ( $hm^3/mes$ ) que pasan por cada celda en cada intervalo de cálculo.

El modelo SIMPA tiene cuatro parámetros ( $H_{max}$ ,  $C$ ,  $I_{max}$  y  $\alpha$ ) que deben ser calibrados. En la Tabla 8 se presenta un rango de valores orientativo de los mismos.

Tabla 8: Rango orientativo de valores de los parámetros del modelo SIMPA

Parámetro	Rango
$H_{max}$	50 – 400 [mm]
$C$	0.2 – 1 [-]
$I_{max}$	10 – 1000 [mm]
$\alpha$	0.001 – 0.9 [meses <sup>-1</sup> ]

*Método "Delta" para atenuar el sesgo existente en las proyecciones climáticas e hidrológicas.*

Es habitual encontrar sesgos en las proyecciones climáticas, especialmente en el caso de la precipitación (los modelos globales de clima suelen simular bien la variable temperatura), y que tiene una influencia muy importante en el posterior análisis de los recursos hídricos. La existencia de sesgo en las series simuladas comparada con los datos observados suele invalidar el uso del método directo de análisis de impacto hidrológico, que consiste en comparar los resultados de alimentar el modelo hidrológico con valores climáticos futuros simulados y con datos climáticos observados.

Con objeto de evitar los problemas hidrológicos derivados de utilizar los valores de la simulación, se han propuesto diferentes métodos para corregir ese sesgo, desde simples correcciones lineales a otras más sofisticadas que están basadas en las distribuciones de frecuencias (Leander et al. 2008, Berg et al. 2012, Teutschbein y Seibert 2012). Asimismo, no se puede asegurar, que el sesgo sea estacionario, esto es, que el sesgo detectado y corregido para la serie histórica sea similar al de las series proyectadas (Ehret et al. 2012). Por tanto, no hay un consenso sobre la elección del método o procedimiento más apropiado para resolver este problema. En la buena práctica dedicada a la corrección de sesgo se presenta una visión más detallada de este tema.

La alternativa utilizada en el estudio de referencia es la aplicación del método "delta" o escalado directo. El mismo consiste en no realizar modificación alguna a los valores simulados, tanto del período de control como de los períodos futuros. De esta forma, el impacto del cambio climático en los recursos hídricos se calcula evaluando los cambios (de aquí el nombre de "delta") entre los resultados de alimentar el modelo hidrológico con valores climáticos simulados en los períodos futuros y con valores climáticos simulados en el período de control (que presenta sesgo respecto a los valores observados). El método asume que el sesgo de la simulación climática es similar tanto en el período de control como en los períodos futuros, y por tanto al comparar ambos períodos, estos se compensan. De este modo, las diferencias entre el período futuro y el de control serían atribuibles a la señal de cambio climático y no a las técnicas de corrección del sesgo. Más allá de la suposición del carácter estacionario del sesgo, que no es necesariamente cierta, este método agrega otras fuentes de incertidumbre al análisis. Este método ha sido utilizado en numerosos estudios de evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos (Milly et al. 2005, Gardner 2009, CEDEX 2010, Álvarez-Rodríguez et al. 2012, Barranco et al. 2014, Alfieri et al. 2015).



*Estimación del impacto del cambio climático sobre inundaciones (adaptado de: DEFRA 2009a, 2009b)*

Aunque existe un amplio espectro de metodologías que analizan el impacto del cambio climático sobre las inundaciones a partir de modelos globales de clima, en general podemos identificar dos grandes grupos de estudios. Por un lado, están los que analizan directamente a la precipitación, ya que, en la mayor parte de los casos es la variable con mayor incidencia en las inundaciones. Por otro lado, están aquellos estudios que se basan en el acoplamiento de modelos en cascada, comenzando por considerar las proyecciones climáticas derivadas de modelos globales o regionales de clima, luego se aplican técnicas de reducción de escala y corrección de sesgo, y finalmente se acopla uno o varios modelos hidrológicos para obtener las series de caudales en distintos puntos y en diferentes ventanas temporales.

Un ejemplo del primer grupo de estudio y aplicado a España, es el trabajo realizado por el CEDEX (2010): "Ficha 1: Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural". El estudio parte de escenarios climáticos regionalizados elaborados por la AEMET. Estas proyecciones combinan los resultados de modelos de simulación del comportamiento de la atmósfera y el océano (modelos de circulación global) realizados por diversos organismos internacionales, y para los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero A2 y B2 (establecidos por el IPCC (2000)). Luego se aplican técnicas de regionalización estadísticas (análogos FIC y SDSM) y dinámicas (PROMES-UCM y RAO-SMHI) para mejorar su precisión a escala local. Para este estudio, la AEMET (2008), basada en los resultados del estudio "Generación de escenarios climáticos regionalizados de cambio climático para España" seleccionó doce de estas proyecciones, representativas de la variabilidad del conjunto de proyecciones, obtenidas como combinación de seis modelos regionalizados (ECHAM4-FIC, CGCM2-FIC, HadCM3-SDSM, HadAM3-FIC, ECHAM4-RAO y HadCM3-PROMES) y los dos escenarios de emisión mencionados.

Las proyecciones climáticas están compuestas por datos diarios de precipitación y temperatura en cuatro periodos temporales: 1961-1990 (periodo de control), 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100. Las proyecciones estadísticas FIC y SDSM son series climáticas en estaciones meteorológicas mientras que las proyecciones dinámicas son series de rejillas de unos 50 km<sup>2</sup> de resolución. La metodología aplicada al estudio del impacto del cambio climático sobre fenómenos extremos como las crecidas se basó en extraer aspectos descriptivos de las series de datos de precipitaciones diarias y en la aplicación del modelo del mapa de precipitaciones en la España Peninsular para la obtención de precipitaciones de diseño asociadas a diversos periodos de retorno. En particular se utiliza el período de retorno de 100 años para obtener un índice de impacto respecto a las máximas precipitaciones diarias derivadas de las series diarias del periodo de control.

Un enfoque interesante que se basa en cadenas de modelos es el presentado por el "Department for Environment, Food & Rural Affairs" del gobierno de Reino Unido (DEFRA 2009a, 2009b), y titulado "Regionalised Impacts of Climate Change on Floods Flows". La mayoría de los análisis de impacto del cambio climático se basan en la generación de proyecciones utilizando los resultados de uno o más modelos climáticos globales (GCM) o regionales (RCM). Hay dos debilidades principales de este enfoque. Primero, no se puede obtener una comprensión completa de las interrelaciones entre el cambio climático, las propiedades de la cuenca y los cambios en los caudales de crecidas. En segundo lugar, no se obtiene una idea de lo que podría ocurrir si sucede algo diferente a las proyecciones de escenarios específicos seleccionados, de modo que cuando se ponen a disposición de la comunidad científica nuevos escenarios, se deben realizar nuevos estudios de impacto. Esto implica que cualquier política derivada de esta evidencia basada en escenarios es igualmente limitada en el tiempo. Para superar este problema, este estudio adoptó un enfoque diferente, basando la metodología en un análisis de sensibilidad de amplio alcance y, como tal, es neutral y no depende de conjuntos específicos de escenarios de cambio climático. El enfoque investiga la respuesta de la cuenca hidrográfica a los cambios climáticos al imponer los mismos cambios a un conjunto de cuencas hidrográficas en Gran Bretaña. Esto permite que las cuencas que responden de manera similar se agrupen o "regionalicen" en tipos de respuesta a inundaciones. Para garantizar que los resultados sean sólidos y duraderos, el marco ha sido diseñado para investigar cambios en el clima que abarque el conocimiento actual (a la fecha de publicación del documento) sobre el cambio climático futuro disponible de los GCM del Cuarto Informe de Evaluación del IPCC y RCM utilizados para derivar el conjunto de productos UKCP09. El método permite que cualquier cuenca hidrográfica, incluidas las no modeladas como parte de este



estudio, se asigne a un tipo de respuesta a inundaciones de acuerdo con sus propiedades y, por lo tanto, su vulnerabilidad al cambio climático puede ser evaluada.

Se analizaron las proyecciones de 17 GCM para tres escenarios de emisión (SRA1B, SRA2 y SRB1 obtenidos del IPCC-AR4). Se descubrió que es posible describir el patrón estacional de los factores de cambio mensuales utilizando una única función armónica definida en términos del cambio anual promedio, el cambio mensual máximo y del mes en que ocurre este máximo. En este estudio, los cambios mensuales en la precipitación casi siempre muestran un máximo en invierno, mientras que para la temperatura el máximo puede ocurrir en cualquier momento del año. Para las precipitaciones, el mes de cambio máximo se fija en enero, de modo que el marco de sensibilidad se puede reducir a un espacio bidimensional definido por los cambios en la precipitación media anual (de una reducción anual del 40% a un aumento anual del 60%) combinado con cambios en la estacionalidad de las mismas (del 0% al 120%). Usando la formulación armónica, esto representó 525 escenarios de precipitación mensual (permitiendo incrementos de 5% de cambio tanto en la precipitación media anual como en la estacionalidad), de forma de abarcar las variaciones de todas las proyecciones del clima futuro para cualquier ubicación en Gran Bretaña. Estos escenarios se utilizaron para alimentar a los modelos hidrológicos en cada una de las cuencas analizadas.

Las tareas de modelación hidrológica dentro de este estudio proporcionan una base fundamental para el análisis posterior de las posibles implicaciones del cambio climático en los caudales de inundación y la regionalización de esos impactos. Es esencial que los modelos hidrológicos se configuren y calibren de la manera más sólida y rigurosa posible. En particular, la inclusión del deshielo en los modelos hidrológicos se consideró crucial, ya que el régimen de caudales invernal de las cuencas altas puede verse considerablemente afectado por las nevadas y el deshielo, incluso en el Reino Unido. Asimismo, se espera que en el futuro los cambios en la temperatura alterarán el equilibrio entre nevadas y procesos de lluvia. Se modelaron 154 cuencas: 120 con el modelo PDM (un modelo hidrológico conceptual agregado y continuo; Moore 1985, 1999, 2007) y 35 cuencas (generalmente las de mayor tamaño) con el modelo CLASSIC (un modelo hidrológico conceptual semi-distribuido y continuo; Crooks y Naden 2007). En general el paso de cálculo adoptado fue el diario, aunque en algunos casos se realizaron simulaciones con paso horario.

Un criterio importante en la calibración de los modelos hidrológicos fue lograr un buen ajuste entre la ley de frecuencia de los caudales máximos observados y la ley de frecuencia de los simulados. En este estudio se utilizó el método de máximo sobre umbral (en inglés POT, "Peak Over Threshold"; Naden 1993). El período de datos para la comparación entre caudales observados y simulados para cada cuenca varió desde series horarias de 9 años (1993-2001) hasta series diarias de 41 años (1961-2001). La serie de eventos de crecidas se generó con todos los caudales diarios por encima de un umbral, y con criterios de tiempo mínimo entre máximos (determinados a partir del tiempo de respuesta de la cuenca), para garantizar que todos los valores seleccionados fueran independientes (Bayliss y Jones 1993). El umbral se estableció para asegurar que las series tuvieran un número mínimo promedio de caudales máximos por año. En este estudio, se utilizó un promedio de 2 valores por año (POT2) para proporcionar una imagen más completa del historial de inundaciones que la que se lograría considerando un solo máximo por año. Contar con máximos suficientes para definir adecuadamente el patrón de frecuencia de inundación fue particularmente importante para muchas de las cuencas con series de datos horarios y longitud menor a 20 años. Para generar las leyes de frecuencia de caudales máximos diarios se ajustó una Distribución de Pareto Generalizada a cada serie POT2 utilizando el método de momentos ponderados probabilísticamente (Naden 1993). Para la mayoría de las cuencas se obtuvo un buen ajuste entre las leyes de frecuencia de inundación observadas y simuladas. Los conjuntos de parámetros calibrados se utilizaron para su aplicación a un amplio conjunto (y regularmente espaciado) de perturbaciones de las series temporales de precipitación observadas, junto con un conjunto menor de perturbaciones (vinculadas) a series temporales de evaporación potencial y temperatura, para investigar la sensibilidad relativa de diferentes cuencas al rango esperado de cambio climático (Prudhomme y Reynard 2009). Se observó que existe una fuerte evidencia de que la respuesta de las cuencas al cambio climático (en términos de cambio en los caudales de inundación) está muy influenciada por las propiedades de las mismas, esto es, solicitaciones climáticas similares dieron lugar a respuestas de caudales máximos diferentes. Esto implica que una asignación nacional única para el cambio climático podría no ser apropiada y se deberían desarrollar asignaciones más "regionalizadas" y dependiendo del tipo de cuenca.



## 4.2 Técnicas basadas en observaciones

### 4.2.1 Análisis de tendencias de valores extremos en un ámbito local

#### 4.2.1.1 Planteamiento general

En la práctica habitual, tanto los estudios de análisis de frecuencia de avenidas para el diseño de infraestructuras hidráulicas como los estudios de aprovechamiento de recursos hídricos, generalmente suponen que los eventos extremos (inundaciones y sequías) son estacionarios, esto es, suponen homogeneidad, independencia y estacionariedad de las series observadas.

Sin embargo, muchos estudios en las últimas décadas han demostrado que los registros hidrológicos exhiben algún tipo de no estacionariedad, tendencias y cambios. Se ha sugerido que puede ser debido a múltiples factores como: el efecto de la variabilidad climática de baja frecuencia (por ejemplo: la Oscilación Decenal del Pacífico), intervención humana (urbanización, cambio usos del suelo), fenómenos naturales (erupciones volcánicas) y el efecto del cambio climático. Para abordar la no estacionariedad en extremos hidrológicos, se han propuesto varios enfoques en la literatura, como el análisis de frecuencia en el que los parámetros de un modelo dado varían de acuerdo con el tiempo u otras covariables como la "North Atlantic Oscillation", "Arctic Oscillation index", "Mediterranean Oscillation index", "Western Mediterranean Oscillation index", o variables antropogénicas como podría ser el grado de regulación de una cuenca.

Uno de los objetivos principales en este tipo de estudios es la determinación del período de retorno de los caudales máximos anuales o de los episodios de sequía teniendo en cuenta la no estacionariedad de las series. En esta buena práctica se analizan las técnicas que se emplean para detectar y, si es posible, modelar la presencia de tendencias en las series hidrológicas observadas. El trabajo se basa en el análisis de series observadas, por ejemplo, series de caudales máximos anuales, de la mayor longitud posible. Una vez asegurada la calidad de las series extremas, éstas se ajustan de acuerdo con diferentes funciones de distribución, en el que los parámetros varían solo en función del tiempo o incorporan otras covariables externas. Respecto al estudio de sequías, metodológicamente el tratamiento de información y los procesos son similares al estudio de avenidas. Suele utilizarse como variable la mínima aportación mensual en cada año. Las covariables utilizadas suelen ser meteorológicas como la temperatura media de cada año, precipitación anual, temperatura media en invierno o precipitación en invierno, entre otras.

Dado que existen diferencias metodológicas importantes entre el tipo de trabajo que se realiza con caudales máximos y caudales mínimos, se han seleccionado dos trabajos como referencia de esta práctica. El trabajo correspondiente a crecidas es "Análisis de frecuencia no estacionario en ríos de la España continental utilizando índices climáticos y de embalse como covariables externas", elaborado por Jesús López y Félix Francés en el año 2013 y publicado en la revista *Hydrology and Earth System Sciences*. Las características básicas de este trabajo se resumen en la Tabla 9. El trabajo correspondiente a sequías es "Periodo de retorno y análisis de riesgo de series no estacionarias de caudales bajos bajo cambio climático", realizado por Du Tao, Xiong Lihua, Xu Chong-Yu, Gippel Christopher J., Guo Shenglian y Liu Pan en el año 2015 y publicado en la revista *Journal of Hydrology*. Las características básicas de este trabajo se resumen en la Tabla 10.

#### 4.2.1.2 Resumen de los trabajos Trabajo de crecidas

Las recientes evidencias del impacto de los modos persistentes de variabilidad climática regional, junto con la intensificación de las actividades humanas, han llevado a los hidrólogos a estudiar el régimen de inundaciones sin aplicar la hipótesis de estacionariedad. En este estudio se desarrolla un marco para el análisis de frecuencia de inundación sobre la base de una herramienta que nos permite abordar el modelado de series de tiempo no estacionarias: los "modelos aditivos generalizados para ubicación, escala y forma" (GAMLSS). Se aplicaron dos enfoques para el modelado no estacionario en GAMLSS a los registros de inundación máxima anual de 20 ríos continentales españoles. Los resultados del primer enfoque, en el que los parámetros de las distribuciones seleccionadas se



modelaron solo en función del tiempo, muestran la presencia de una clara no estacionariedad en el régimen de inundaciones. En un segundo enfoque, los parámetros de las distribuciones de inundaciones se modelan como funciones de los índices climáticos (Oscilación del Ártico, Oscilación del Atlántico Norte, Oscilación del Mediterráneo y Oscilación del Mediterráneo Occidental) y un índice de embalse que se propone en este estudio. Los resultados al incorporar covariables externas en el estudio destacan el importante papel de la variabilidad interanual en los forzamientos climáticos de baja frecuencia al modelar el régimen de inundación en los ríos continentales españoles. Además, con este enfoque es posible introducir adecuadamente el impacto de las estrategias de regulación de reservorios en el régimen de crecidas. La inclusión de covariables externas permite el uso de estos modelos como herramientas predictivas. Finalmente, la aplicación del análisis no estacionario muestra que las diferencias entre los cuantiles no estacionarios y sus equivalentes estacionarios pueden ser importantes.

### **Trabajo de sequías**

El período de retorno y el riesgo de eventos hidrológicos extremos son consideraciones críticas en la gestión de los recursos hídricos. El supuesto de estacionariedad está puesto en duda debido al cambio climático. En la literatura, se destacan dos interpretaciones del período de retorno para considerar la no estacionariedad en el período de retorno y el análisis de riesgos: el tiempo de recurrencia esperado (EWT) y el número de excedencias esperado (ENE) (Salas y Obeysekera 2014). El trabajo de referencia tiene como objetivo mejorar la caracterización del período de retorno no estacionario y el riesgo bajo la interpretación ENE mediante el uso de covariables meteorológicas en el análisis de frecuencia no estacionaria. La ventaja del método es que las variables meteorológicas reducidas a escala de los modelos globales de clima se pueden usar para calcular los parámetros estadísticos no estacionarios y las probabilidades de excedencia para los años futuros y, por lo tanto, el período de retorno y el riesgo correspondiente. El enfoque tradicional que usa el tiempo como la única covariable bajo las interpretaciones EWT y ENE también se aplica para la comparación. Ambos enfoques se aplican a series de aportaciones mensuales mínimas anuales de dos estaciones en el río Wei, China, y dan estimaciones del período de retorno no estacionario y del riesgo que resultan significativamente diferentes del caso estacionario. Se concluye que el período de retorno no estacionario y el riesgo bajo la interpretación ENE usando covariables meteorológicas podría ser conveniente y más recomendable que los de los casos EWT y ENE usando el tiempo como única variable.

El esquema metodológico seguido en este tipo de trabajos se representa en la Ilustración 4. El punto de partida es la recopilación de la información disponible. Es necesario que las series hidrológicas sean lo suficientemente largas como para poder establecer las tendencias a pesar de la variabilidad. Al tratarse de fenómenos extremos, las series analizadas se obtienen a partir de las series medidas extrayendo sus valores máximos o mínimos en periodos de tiempo especificados, normalmente anuales. También es necesario recopilar información sobre covariables que se piense emplear en el análisis. En la segunda fase se define el entorno de modelación: se especifican los criterios de definición de los periodos de retorno, se plantean las funciones de distribución de probabilidad que se ajustarán en el análisis y se especifica qué parámetros de las funciones de distribución se supondrán variables y cómo se considerará que varían en función de las covariables. La tercera fase del trabajo consiste en la modelación estadística de las series en las distintas hipótesis: estacionariedad, variación únicamente con el tiempo e incorporación de otras covariables. La comparación de las leyes de frecuencia de caudales máximos o mínimos en las distintas hipótesis permite determinar si el proceso puede considerarse estacionario o no, y, en ese caso, de qué variables depende.





Ilustración 4: Esquema metodológico de la buena práctica

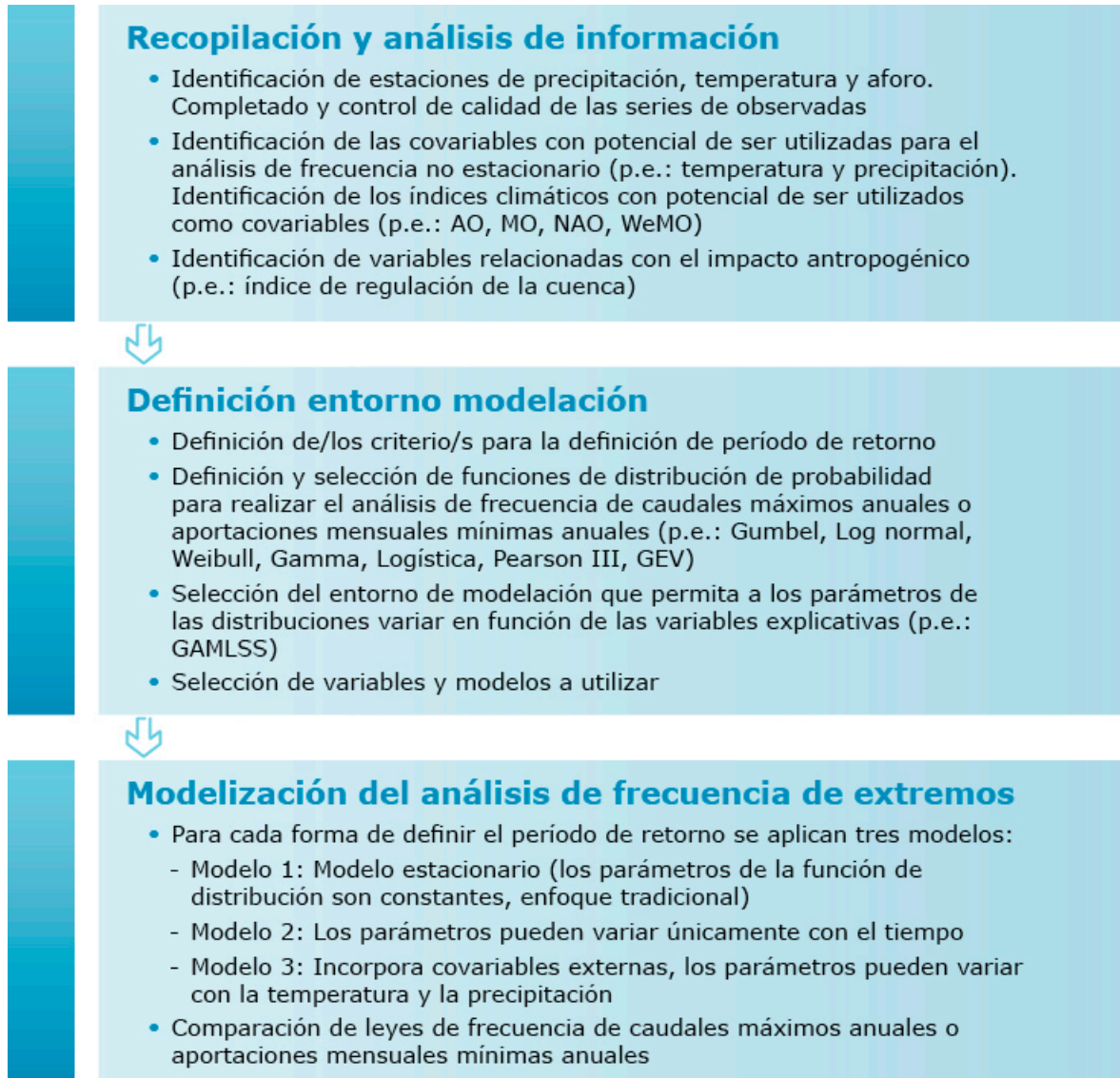




Tabla 9: Ficha de características básicas de la buena práctica de caudales máximos

Concepto	Información básica
Título de la publicación	Non-stationary flood frequency analysis in continental Spanish rivers, using climate and reservoir indices as external covariates
Autores	Jesús López y Félix Francés
Año del estudio	2013
Publicación	Hydrology and Earth System Sciences 17(8) 3189-3203. DOI: 10.5194/hess-17-3189-2013.
Enlace web	<a href="https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/17/3189/2013/">https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/17/3189/2013/</a> Artículo de acceso gratuito
Alcance geográfico	España continental (en 20 estaciones de aforo)
Tipo de evento extremo	Inundaciones
Enfoque	Basado en análisis estadísticos de observaciones
Otros trabajos similares o complementarios	Clarke, R. T. (2013), How should trends in hydrological extremes be estimated?, Water Resour. Res., 49, 6756–6764.

Tabla 10: Ficha de características básicas de la buena práctica de caudales mínimos

Concepto	Información básica
Título de la publicación	Return period and risk analysis of nonstationary low-flow series under climate change.
Autores	Du Tao, Xiong Lihua, Xu Chong-Yu, Gippel Christopher, Guo Shenglian y Liu Pan.
Año del estudio	2015
Publicación	Journal of Hydrology 527 (2015) 234–250. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.04.041
Enlace web	<a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415003005">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415003005</a>
Alcance geográfico	Cuenca del río Wei (134.800 km <sup>2</sup> ), China
Tipo de evento extremo	Sequías
Enfoque	Basado en análisis estadísticos de observaciones
Otros trabajos similares o complementarios	Salas, J., Obeysekera, J. (2014): Revisiting the concepts of return period and risk for nonstationary hydrologic extreme events. J Hydrol Eng 19:554–568.





#### 4.2.1.3 Datos y modelos empleados en el trabajo

##### Datos empleados

En el estudio de caudales máximos se emplearon los siguientes datos:

- *Caudal diario*: 1950–2007 (datos diarios). 20 estaciones de aforo distribuidas en España continental. Ocho de las estaciones están en régimen natural y doce tienen su régimen alterado ya que aguas arriba existen embalses que potencialmente podrían afectar el régimen y magnitud de las avenidas observadas. En cada estación se identificó la serie de caudales máximos diarios anuales, el coeficiente de variación de dicha serie y la aportación media anual en cada estación de aforo. Fuente de la información: Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, España.
- *Índices climáticos*: 1950–2007. Este estudio se centra en cuatro índices climáticos: “North Atlantic Oscillation index” (<http://www.cru.uea.ac.uk/>), “Arctic Oscillation index” (<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/>), “Mediterranean Oscillation index” (<http://www.cru.uea.ac.uk/>), y el “Western Mediterranean Oscillation index” (<http://www.ub.edu/gc/wemo/>).
- *Otros datos*: características de cada estación de aforo (por ejemplo, área de la cuenca de aporte ( $A_T$ ) y características de los embalses existentes dentro de las cuencas de aporte a las estaciones de aforo (por ejemplo, área de aporte a cada embalse ( $A_i$ ), capacidad de cada embalse ( $C_i$ ), aportación media anual a cada embalse ( $C_T$ )). Con la información anterior, este estudio propone un índice denominado índice de embalse (RI) que mide el impacto potencial de la regulación de los embalses en el régimen de crecidas:

$$RI = \sum_{i=1}^N \left( \frac{A_i}{A_T} \right) \left( \frac{C_i}{C_T} \right)$$

donde N es el número de embalses ubicados aguas arriba de la estación de aforos. Fuente de la información: Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, España.

En el trabajo de caudales mínimos se utilizaron las siguientes fuentes de datos:

- *Caudal diario*: 1954–2009 (datos diarios). 2 estaciones de aforo, Huaxian y Xianyang, con una cuenca de 106500 km<sup>2</sup> y 46480 km<sup>2</sup> respectivamente. A partir de estas series se obtienen las series de aportaciones mensuales mínimas anuales. Fuente de la información: Hydrology Bureau of the Yellow River Conservancy Commission (China).
- *Temperatura y precipitación*: 1954–2009 (datos diarios). 22 estaciones en la cuenca. Ambas variables se utilizaron como covariables para el análisis de frecuencia no estacionario de aportaciones mínimas. A partir de estas series se obtienen los valores medios areales (correspondientes a cada cuenca de aporte de las estaciones de aforo) aplicando el método de Polígonos de Thiessen y finalmente se calculan las series anuales de temperatura media y precipitación total. Fuente de la información: National Climate Center of the China Meteorological.
- *Temperatura y precipitación*: 1954–2009 (datos diarios). Se utilizaron datos diarios de reanálisis de la NOAA National Centres for Environmental Prediction (NCEP) y de modelos globales de clima para calibrar el modelo estadístico de reducción de escala. Fuente de información: Earth System Research Laboratories (NOAA, USA) y CMIP5.

El trabajo de crecidas no analiza proyecciones futuras, sino que analiza el impacto del cambio climático identificando tendencias basadas en el análisis de datos históricos de caudales. No obstante, los índices climáticos analizados se incorporan al forzamiento climático para una modelación no estacionaria del análisis de frecuencia de crecidas en la España continental, por lo que dichos índices pueden actuar como variables predictivas potenciales.

En el trabajo de sequías se utilizaron proyecciones futuras de las variables de temperatura y precipitación para el período 2010-2099. Únicamente se analizó el escenario de emisiones RCP8.5.



### **Modelos empleados**

En los trabajos no se aplican modelos climáticos ni modelos hidrológicos. El análisis se basa en técnicas estadísticas. El modelado de series de tiempo, para el cual la hipótesis de estacionariedad no se puede garantizar, requiere un marco de modelado en el que los parámetros de las distribuciones seleccionadas puedan variar en función de variables explicativas. Por tanto, en este estudio, se utiliza "modelos aditivos generalizados para localización, escala y forma" (denominados GAMLSS), propuesto por Rigby y Stasinopoulos (2005). En GAMLSS, la variable aleatoria de respuesta (caudales máximos anuales en este estudio) tiene una función de distribución paramétrica y sus parámetros pueden modelarse como función de covariables seleccionadas, en este caso, el tiempo o los cuatro índices climáticos mencionados y el índice de embalse (propuesto en este estudio). GAMLSS involucra varios modelos, en este estudio se utilizó una formulación aditiva semi-paramétrica. La plataforma R (R Development Core Team 2008), dispone gratuitamente del paquete "GAMLSS".

En el trabajo de sequías, las proyecciones climáticas se tomaron de los resultados de siete modelos utilizados en el Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5): CanESM2, CNRM-CM5, GFDL-ESM2M, NorESM1-M, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM y CCSM4. Todos ellos son modelos de simulación del sistema terrestre (ESM).

### **Variables de salida de la modelización**

En el estudio de crecidas se obtuvieron los caudales máximos anuales en cada sitio de estudio a partir de tres modelos para el análisis de frecuencia de crecidas: un modelo estacionario, en el que los parámetros de distribución no dependen de covariables (son constantes en el tiempo), un modelo donde los parámetros de la distribución varían solo en función del tiempo y un modelo que incorpora covariables externas, donde los parámetros de distribución pueden variar en función de los índices climáticos y el índice de embalse (RI).

En el estudio de sequías se aplicaron modelos estadísticos a las series de aportaciones mensuales mínimas anuales en las dos estaciones de aforo consideradas y a las proyecciones futuras de temperatura y precipitación (resultado de modelos climáticos). Por tanto, se obtuvieron resultados a partir de dos interpretaciones diferentes de período de retorno (ENE y EWT) y los tres modelos para el análisis de frecuencia no estacionaria de sequías: un modelo estacionario, en el que los parámetros de distribución no dependen de covariables, un modelo donde los parámetros de la distribución varían solo en función del tiempo y un modelo que incorpora covariables externas, donde los parámetros de distribución pueden variar en función de la temperatura y la precipitación.

### **Principales incertidumbres de los análisis realizados**

Las principales fuentes de incertidumbre de los análisis realizados son las siguientes:

- Incertidumbre asociada a la medición de caudales en las estaciones de aforo, fundamentalmente las asociadas a la medida de niveles y a la curva de aforo definida en cada estación, y a la medición de temperatura y precipitación en las estaciones meteorológicas.
- Incertidumbre asociada a la selección y ajuste de la función de distribución de probabilidad y análisis de frecuencia.
- Incertidumbre asociada a las covariables predictivas seleccionadas.
- Incertidumbre asociada al modelo GAMLSS.
- En el caso del trabajo de sequías, incertidumbre asociada a los modelos climáticos para estimar las proyecciones futuras de temperatura y precipitación. También se genera incertidumbre porque se analiza un único escenario de emisiones. Finalmente, existe incertidumbre asociada a los métodos de reducción de escala de las variables procedentes de los modelos de clima global.



#### 4.2.1.4 Características destacadas

Los trabajos presentados son dos buenos ejemplos de análisis no estacionario de eventos extremos. Las características que justifican su selección como buena práctica son las siguientes:

- Presentan procedimientos que permiten tener en cuenta la potencial no estacionariedad de la serie de caudales extremos, máximos y mínimos anuales, mientras que en la práctica habitual suele asumirse que esas series son estacionarias.
- En el caso del estudio de sequías, se proponen dos formas de definir el período de retorno no estacionario: el tiempo de recurrencia esperado y el número de excedencias esperado.
- Utilizan tres modelos de ajuste estadístico de las series que permiten comparar las diferencias en el análisis de frecuencia de extremos: un modelo estacionario, un modelo donde los parámetros de la distribución varían solo en función del tiempo, y un modelo que incorpora covariables externas.
- Para el análisis no estacionario, propone la utilización de modelos del tipo GAMLSS que están disponibles en la plataforma R, de acceso libre y gratuito.

#### 4.2.1.5 Descripción de técnicas específicas

*Metodología para la modelación de series temporales no estacionarias (adaptado de López y Francés 2013)*

La modelación de series temporales, en los casos en los que no se puede asumir la hipótesis de estacionariedad, requiere un marco de modelado en el que los parámetros de las distribuciones de probabilidad seleccionadas para caracterizar el comportamiento de la variable analizada ( $Y$ , en el estudio de referencia es el caudal máximo anual) pueden variar en función de ciertas variables explicativas (covariables). Para incorporar las covariables externas, en la publicación de referencia se utilizaron los "modelos aditivos generalizados para ubicación, escala y forma" (GAMLSS), propuestos por Rigby y Stasinopoulos (2005). GAMLSS han sido utilizados con éxito en estudios hidrológicos por Villarini et al. (2009, 2010a,b, 2011).

En GAMLSS, la variable aleatoria de respuesta  $Y$  (caudal máximo anual) tiene una función de distribución paramétrica y sus parámetros se pueden modelar como función de covariables seleccionadas, en este caso, el tiempo ( $t_i$ ) o los índices climáticos ( $AO_i$ ,  $MO_i$ ,  $NAO_i$  y  $WeMO_i$ ) y el índice de embalse ( $Ri_i$ ). En este estudio se utilizaron tres modelos diferentes para el análisis de frecuencia de crecidas en los sitios de estudio: el modelo estacionario (modelo 0), en el que los parámetros de distribución no dependen de covariables, es decir, los parámetros son constantes en el tiempo (Ilustración 5a); el modelo que varía con el tiempo (modelo 1), donde los parámetros de distribución varían solo en función del tiempo (Ilustración 5b); y el modelo (modelo 2) que incorpora covariables externas, donde los parámetros de distribución pueden variar en función de los índices climáticos y el de embalse.

En condiciones estacionarias, la función de distribución de la variable  $Y$  es  $F_Y(Y, \theta)$  (Ilustración 5a), donde  $\theta$  es un conjunto de parámetros estadísticos constantes. La probabilidad de excedencia de  $F_Y$  es:

$$p_t = 1 - F_Y(Y_{p_0}, \theta) = p_0, \quad t = 1, 2, \dots, \infty \quad \text{Ec.1}$$

En condiciones no estacionarias, la función de distribución de la variable  $Y$  es  $F_Y(Y, \theta_t)$  (Ilustración 5b), donde  $\theta_t$  varía con el tiempo o con las covariables seleccionadas. El cuantil de diseño correspondiente a la probabilidad de excedencia inicial  $p_0$  se obtiene como:

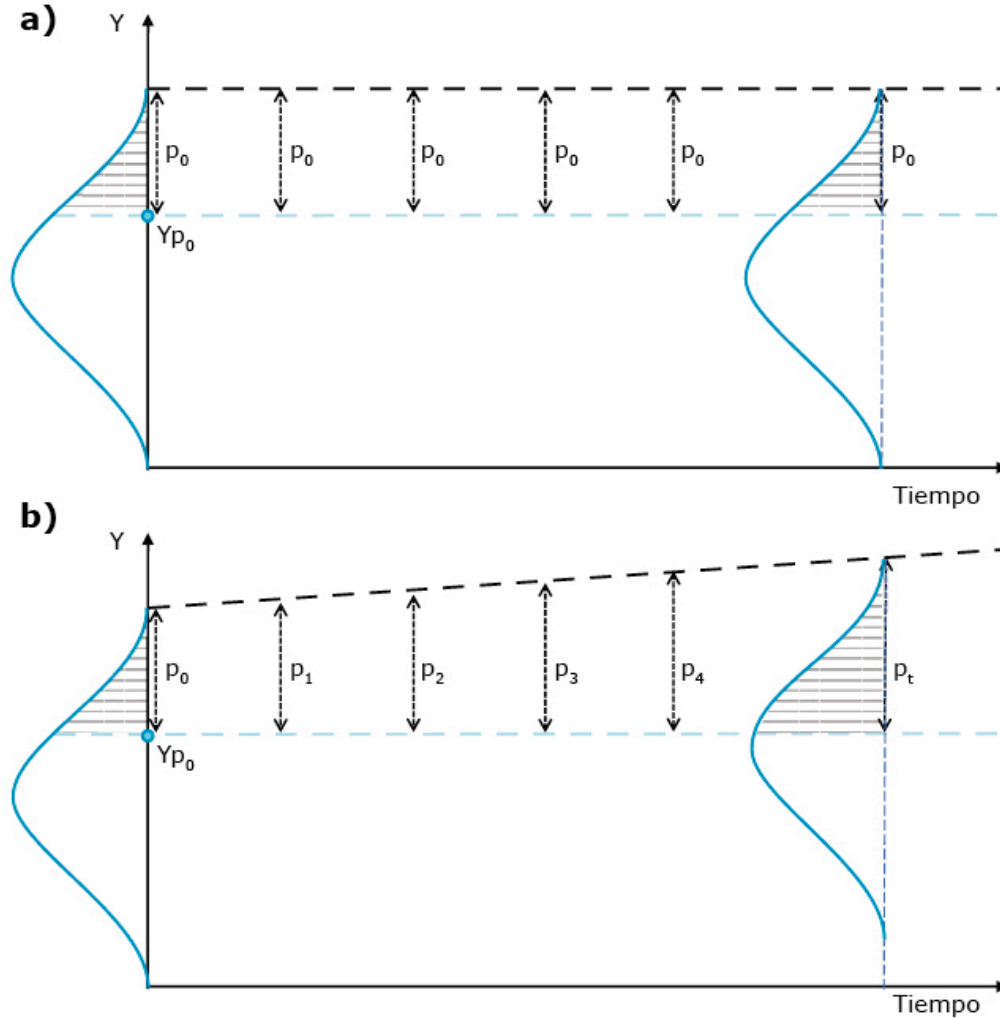
$$Y_{p_0} = F_Y^{-1}(p_0, \theta_0) \quad \text{Ec.2}$$

donde,  $\theta_0$  es el set de parámetros estadísticos en el año inicial,  $t = 0$ . Los parámetros estadísticos ahora varían en el tiempo por lo que la probabilidad de excedencia futura correspondiente a  $Y_{p_0}$  ya no es constante (Ilustración 5b). La probabilidad de excedencia para cada año futuro se obtiene como:

$$p_t = 1 - F_Y(Y_{p_0}, \theta_t), \quad t = 1, 2, \dots, \infty \quad \text{Ec.3}$$



Ilustración 5: Representación esquemática del cuantil de diseño  $Y_{p_0}$  con: a) probabilidad de excedencia constante  $p_0$ , y b) probabilidad de excedencia variable en el tiempo  $p_t$ ,  $t = 1, 2, \dots, \infty$ .



Un modelo GAMLSS supone que las observaciones independientes  $y_i$  para  $i = 1, 2, \dots, n$  tienen la función de distribución  $F_y(Y_i, \theta_i)$  donde  $\theta_i = (\theta_{i1}, \theta_{i2}, \dots, \theta_{is})$  es un vector de  $s$  parámetros que caracterizan la ubicación, escala y forma. Por lo general,  $s$  es menor o igual a cuatro, ya que uno, dos, tres y cuatro parámetros garantizan suficiente flexibilidad para la mayoría de las aplicaciones en hidrología. Los parámetros están relacionados con covariables mediante funciones de enlace ("link functions") monótonas  $g_k(\cdot)$  para  $k = 1, 2, \dots, s$  donde los parámetros se modelan mediante las funciones de enlace adecuadas. GAMLSS contiene varios modelos, en particular este estudio utilizó la formulación aditiva semi-paramétrica:

$$g_k(\theta_k) = \phi_k \beta_k + \sum_{j=1}^m h_{jk}(x_{jk}) \tag{Ec.4}$$

donde,  $\theta_k$  son vectores de longitud  $n$ ,  $\phi_k$  es una matriz de variables explicativas (covariables) de orden  $n \times m$ ,  $\beta_k$  es un vector de parámetros de longitud  $m$  y  $h_{jk}(\cdot)$  representa la dependencia funcional de los parámetros de las variables explicativas  $x_{jk}$ . Esta dependencia puede ser lineal o suavizada mediante términos de suavizado. En este estudio, la dependencia suavizada se basó en funciones cúbicas "spline". La adición de términos de suavizado en la Ec.4 tiene ventajas, como identificar la dependencia no lineal en el modelado de los parámetros de las distribuciones paramétricas en



variables explicativas. Cuando se incorpora una dependencia suavizada para describir la relación entre los parámetros y las covariables seleccionadas, esta dependencia tiende a aumentar la complejidad del modelo. Para evitar la sobre-parametrización del modelo, los grados de libertad de los splines cúbicos se optimizan utilizando el Criterio de Información de Akaike y el Criterio Bayesiano de Schwarz (Rigby y Stasinopoulos 2005, Stasinopoulos y Rigby 2007). Con estos criterios, los modelos finales cuentan con un equilibrio entre precisión y complejidad.

Una vez definida la dependencia funcional entre los parámetros y cada covariable seleccionada, y los grados efectivos de libertad para el spline cúbico, se selecciona la función de distribución  $F_y(Y_i, \theta_i)$  según el valor máximo de la máxima verosimilitud. En el trabajo de referencia, se consideraron cinco funciones de distribución como candidatas para modelar las series de caudales máximos anuales: Gumbel, Log normal, Weibull, Gamma, y la Gamma generalizada. Las primeras cuatro tienen dos parámetros y la última tres. En los trabajos de Rigby y Stasinopoulos (2005), Stasinopoulos y Rigby (2007) y Villarini et al. (2009) se puede encontrar una discusión detallada sobre la teoría y la capacidad de ajuste de los modelos. En ausencia de una estadística para evaluar la bondad de ajuste de los modelos seleccionados en su conjunto, la verificación se realizó de acuerdo con las recomendaciones de Rigby y Stasinopoulos (2005) mediante el análisis de la normalidad e independencia de los residuos de cada modelo. Se examinaron los primeros cuatro momentos estadísticos de los residuos y los coeficientes de correlación de Filliben, y se realizó una inspección visual de los gráficos de los residuos. Todos los cálculos se realizaron en la plataforma R (R Development Core Team 2008), utilizando el paquete GAMLSS disponible de forma gratuita.

## 4.2.2 Análisis de tendencias de valores extremos en un ámbito regional

### 4.2.2.1 Planteamiento general

Al examinar los resultados de los análisis de tendencias específicos de los sitios a escala regional, puede resultar difícil extraer una señal de cambio o tendencia. En lugar de analizar un solo registro de inundación o sequía, un análisis de un conjunto de registros de diferentes estaciones puede aumentar el poder de detección al reducir la incertidumbre del muestreo. El primer paso de este enfoque es analizar los resultados en las pruebas de tendencia de las estaciones individuales en un mapa para identificar patrones espaciales coherentes entre registros de diferentes estaciones. Con base en estos patrones, se estiman tendencias regionales por interpolación espacial. También es importante tener en cuenta las correlaciones espaciales de las variables analizadas. Por ejemplo, los caudales máximos suelen estar correlacionados en función de la distancia y esta correlación también depende de los mecanismos de generación de las crecidas. Varios métodos explican la dependencia espacial y estiman el número de estaciones que pueden exhibir tendencias significativas para un nivel de significación dado.

Dado que existen diferencias metodológicas importantes entre el tipo de trabajo que se realiza con caudales máximos y caudales mínimos, se han seleccionado dos trabajos como referencia de esta práctica. El trabajo correspondiente a crecidas es "El clima cambiante altera el momento de ocurrencia de las crecidas europeas", elaborado por Günter Blöschl y otros 46 autores en el año 2017 y publicado en la revista *Science*. Las características básicas de este trabajo se resumen en la Tabla 11. El trabajo correspondiente a sequías es "Sequías meteorológicas en Europa: Episodios e impactos - Tendencias pasadas y proyecciones futuras", informe elaborado por Jonathan Spinoni, Gustavo Naumann, Jürgen Vogt y Paulo Barbosa en el año 2016 y publicado por el *Joint Research Centre* de Ispra. Las características básicas de este trabajo se resumen en la Tabla 12.

### 4.2.2.2 Resumen de los trabajos Trabajo de crecidas

Las proyecciones climáticas en Europa estiman un aumento de temperatura. Se espera que esta circunstancia tenga un impacto en la magnitud y en el momento de ocurrencia de crecidas en los ríos; sin embargo, hasta ahora no se ha identificado una señal constante de cambio climático a gran escala en las magnitudes de avenidas observadas. En este estudio se analiza el momento de



ocurrencia de las crecidas en los ríos de Europa durante las últimas cinco décadas (1960-2010), utilizando una base de datos paneuropea de 4262 estaciones hidrométricas ubicadas en 38 países. Los resultados muestran patrones claros de cambio en el momento de ocurrencia de las avenidas. Las temperaturas más cálidas han provocado inundaciones debidas al deshielo en primavera en todo el noreste de Europa; las tormentas invernales retrasadas asociadas con el calentamiento polar han provocado inundaciones más tardías en el invierno en la zona del Mar del Norte y algunos sectores de la costa mediterránea; y el adelanto de los máximos de humedad del suelo ha provocado inundaciones de invierno más tempranas en Europa occidental. Los resultados destacan la existencia de una señal climática clara en las observaciones de avenidas a escala continental.

### **Trabajo de sequías**

En el pasado, el área mediterránea era una región de gran preocupación en Europa con respecto a las sequías. En las últimas décadas, Europa Central y Oriental y la región de los Cárpatos también se han convertido en puntos críticos de sequía. Los impactos de la sequía probablemente serán más severos en el futuro debido al cambio climático y las crecientes presiones sobre los recursos hídricos. Por lo tanto, se requerirá un monitoreo, evaluación y adaptación constantes. En el estudio de referencia, los eventos de sequía se analizaron a diferentes escalas espaciales (país, región) utilizando datos climáticos distribuidos y tres indicadores de sequía diferentes: el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) dependiente de la precipitación, el Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizado (SPEI) y el Indicador de Reconocimiento de Sequía (RDI). El primero depende únicamente de la precipitación, mientras que los dos últimos dependen de la precipitación y la evapotranspiración potencial. Los tres indicadores se fusionaron en dos indicadores compuestos para derivar características clave de las sequías durante el período analizado (1950-2012). Se construyó una nueva base de datos de eventos de sequía meteorológica basada en el análisis de los indicadores compuestos. Esta base de datos también muestra las características de 21 grandes sequías que azotaron Europa desde 1950 hasta 2012, seis de las cuales ocurrieron después del año 2000. A cada evento de sequía meteorológica se le asignó un conjunto de parámetros estadísticos, que incluyen inicio, fin, máximo, duración, gravedad, intensidad y área afectada por las sequías. Para calcular las tendencias de las sequías en cada celda de la cuadrícula, se adoptó un enfoque similar al aplicado en Spinoni et al. (2014). La tendencia de la frecuencia de sequía (FS), la gravedad (GS) y la duración (DS) para el período 1951-2012 se calculó dividiendo el período histórico de análisis en nueve intervalos de siete años, calculando FS, GS y DS para cada intervalo. Posteriormente se realizó un análisis de tendencia lineal. Se comprobó la significancia de tendencias con una prueba t de Student (Wilks 2011). Se analizaron sequías de diferente duración, distinguiendo entre eventos que duran dos o más meses y eventos de sequía prolongada que duran al menos seis meses.

Los resultados del estudio muestran que las décadas de 1950 y 1960 presentan puntos críticos de sequía en Escandinavia y Rusia. Las décadas de 1970 y 1980 no muestran un patrón espacial sobresaliente. Las décadas de 1990 y 2000 se caracterizan por puntos críticos de sequía en el Mediterráneo y la Región de los Cárpatos. El análisis de tendencia lineal para las tres características clave de sequía muestra que, durante todo el período de 1951 a 2010, Europa se puede dividir en dos grandes áreas: el noreste, que experimentó tendencias decrecientes, y el suroeste, que experimentó tendencias crecientes. La frecuencia de sequías aumentó en la Península Ibérica, el sur de Francia, las Islas Británicas, el norte de Alemania, Austria, Hungría, la República Checa, Eslovaquia, los Urales y Chipre. Se observó una disminución en Islandia, Escandinavia, Europa del Este y Rusia. En cuanto a los eventos largos de sequías (mayor o igual a seis meses), se observó un aumento mayor en la Península Ibérica e Italia, y una disminución más evidente en Ucrania. La severidad de las sequías aumentó en el área mediterránea, la región de los Cárpatos, Irlanda, la costa del Mar Negro y el Cáucaso. La severidad disminuyó en Islandia, Escandinavia, Bielorrusia, Ucrania y Rusia.

El esquema metodológico seguido en este tipo de trabajos se representa en la Ilustración 6. Se parte de la recopilación de la información disponible. En estudios de crecidas suele ser suficiente recopilar datos de caudales en estaciones de aforo. En estudios de sequías interesan otras variables climáticas hidrológicas, como temperatura, precipitación, evapotranspiración o humedad del suelo. Es necesario determinar si las series han experimentado algún tipo de alteración antrópica. En algunos casos se





realizan estudios de regionalización para mejorar la estimación de algunas características de las series, como el coeficiente de sesgo o de curtosis. En el segundo bloque de actividades se definen las variables a analizar y se analizan sus tendencias locales, en cada punto de análisis. En estudios de crecidas, las variables analizadas pueden ser, por ejemplo: los caudales máximos anuales, los caudales que superan un umbral, los valores estacionales o los momentos de ocurrencia de las crecidas. En estudios de sequías se suele trabajar con índices o indicadores de sequía con diferente resolución espacial o temporal. Para el análisis de tendencias locales se pueden aplicar los métodos presentados en el apartado anterior. La parte final del análisis consiste en el estudio de las tendencias regionales. En este caso, se utilizan herramientas de análisis espacial para identificar regiones de comportamiento homogéneo.

Ilustración 6: Esquema metodológico de la buena práctica

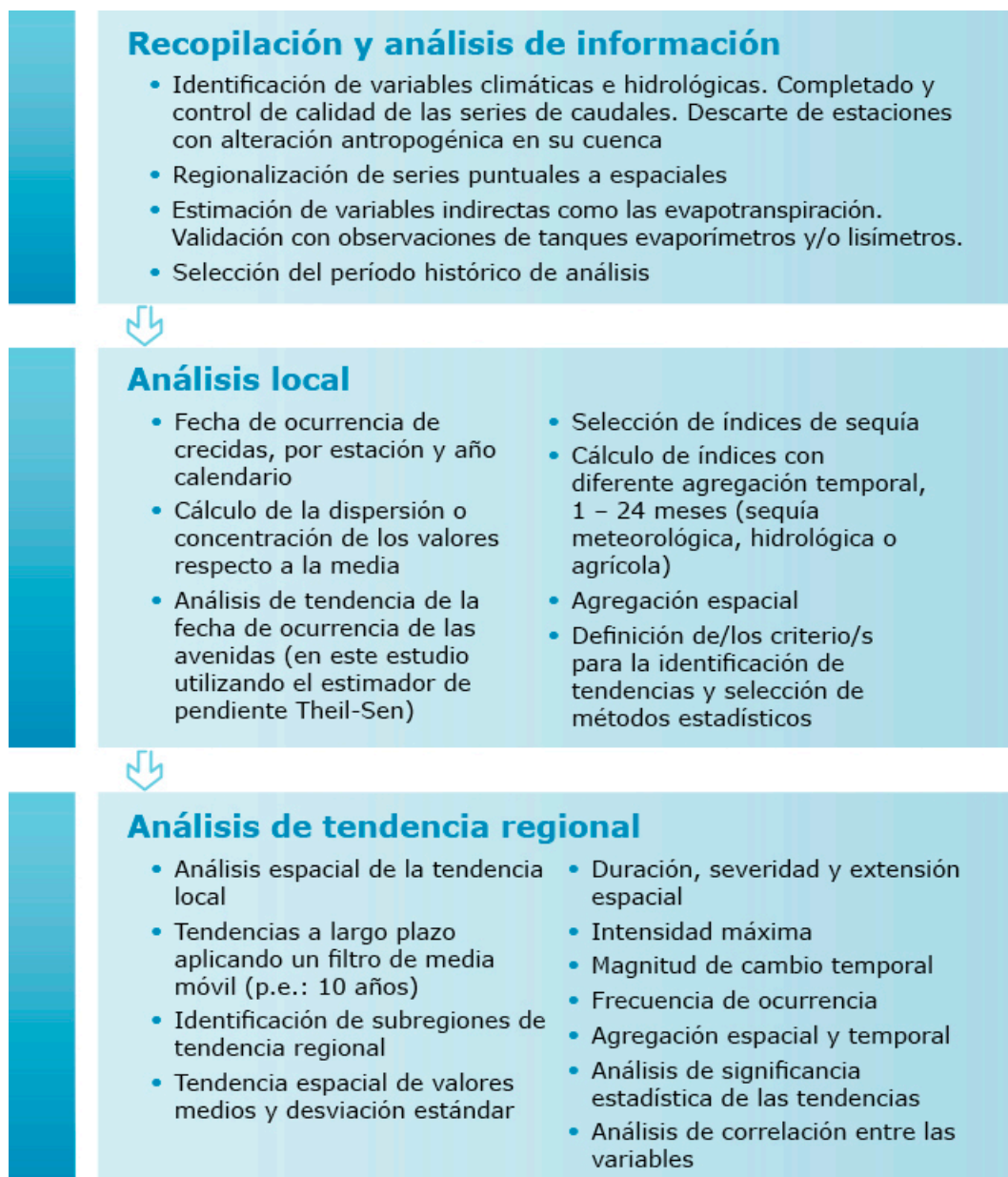






Tabla 11: Ficha de características básicas de la buena práctica de caudales máximos

Concepto	Información básica
Título de la publicación	Changing climate shifts timing of European floods.
Autores	Blöschl G., Hall J., Parajka J., Perdigão R.A.P., Merz B. et al.
Año del estudio	2017
Publicación	Science 357(6351) 588-590. DOI: 10.1126/science.aan2506
Enlace web	<a href="https://science.sciencemag.org/content/357/6351/588">https://science.sciencemag.org/content/357/6351/588</a> Artículo de acceso gratuito
Alcance geográfico	Europa, 4262 estaciones de aforo ubicadas en 38 países
Tipo de evento extremo	Inundaciones
Enfoque	Basado en análisis estadísticos de observaciones
Otros trabajos similares o complementarios	Mediero L., Santillán D., Garrote L. y Granados A. (2014): Detection and attribution of trends in magnitude, frequency and timing of floods in Spain. Journal of Hydrology, 517, 1072–1088.

Tabla 12: Ficha de características básicas de la buena práctica de caudales mínimos

Concepto	Información básica
Título de la publicación	Meteorological Droughts in Europe: Events and Impacts – Past Trends and Future Projections
Autores	Jonathan Spinoni, Gustavo Naumann, Jürgen Vogt y Paulo Barbosa
Año del estudio	2016
Publicación	Joint Research Centre Technical Reports, Publications Office of the European Union, Luxembourg, EUR 27748 EN. DOI: 10.2788/450449
Enlace web	<a href="https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/meteorological-droughts-europe-events-and-impacts-past-trends-and-future-projections">https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/meteorological-droughts-europe-events-and-impacts-past-trends-and-future-projections</a> Publicación de acceso gratuito
Alcance geográfico	Europa
Tipo de evento extremo	Sequías
Enfoque	Basado en análisis estadísticos de observaciones
Otros trabajos similares o complementarios	Vicente-Serrano S.M. et al. (2014): Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. Environmental Research Letters, 9(4).



#### 4.2.2.3 Datos y modelos empleados en el trabajo

##### Datos empleados

En el estudio de caudales máximos se emplearon los siguientes datos:

- *Caudal diario*: 1960–2010 (datos diarios). 4262 estaciones de aforo distribuidas en Europa (región delimitada por las latitudes 34° N - 71° N y las longitudes 22° W - 52° E). El área de las cuencas de aporte varía entre 5 y 100000 km<sup>2</sup>. En cada estación, se utilizan series que muestran la fecha de ocurrencia del máximo caudal de cada año. El momento medio de ocurrencia de las inundaciones se define como la fecha promedio en la que ocurren las avenidas durante el período observado. Las estaciones cuyos datos están alterados por la intervención humana se excluyeron del estudio. Para la estimación del momento de ocurrencia de las avenidas se utilizaron estaciones con al menos 35 años de datos (3298 estaciones). Fuente de la información: 64 agencias e instituciones de los 38 países participantes del estudio. En España, la información fue proporcionada por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX.
- *Precipitación y temperatura media*: 1960-2010 (datos diarios). Base de datos en cuadrícula de toda Europa, con tamaño de celda 0.25° latitud/longitud. Fuente de la información: E-OBS (versión 14.0, Haylock et al. 2008), (<http://www.ecad.eu/download/ensembles/ensembles.php>).
- *Humedad del suelo*: 1960-2010 (datos mensuales). Base de datos en cuadrícula, con tamaño de celda 0.5°. Fuente de información: CPC Soil Moisture data set (<http://www.esrl.noaa.gov/psd>).
- *Mapa de elevaciones* del terreno en Europa (<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/digital-elevation-model-of-europe/>).
- *Área de aporte* a cada estación de aforo. Se obtiene a partir de la base de datos CCM River and Catchment Database ([http://www.bafg.de/GRDC/EN/01\\_GRDC/13\\_dtbse/database\\_node.html](http://www.bafg.de/GRDC/EN/01_GRDC/13_dtbse/database_node.html)).

En el trabajo de caudales mínimos se utilizaron las siguientes fuentes de datos:

*Precipitación, temperatura mínima y temperatura máxima*: 1950–2012 (datos diarios). Base de datos en cuadrícula con una resolución espacial de 0.25°. Fuente de información: E-OBS (versión 10) del European Climate Assessment and Dataset project (<http://eca.knmi.nl/>; Haylock et al. 2008) del Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI). La temperatura media se calculó como el promedio de la temperatura máxima y mínima. Posteriormente, tanto la temperatura como precipitación diaria se transformaron en valores mensuales. Se realizó un control de calidad de los datos utilizando el software "Multiple Analysis of Series for Homogenization software" (MASHv3.02; Szentimrey 1999).

*Evapotranspiración potencial*: 1950–2012 (datos mensuales). Se calculó a partir de los valores de temperatura media mensual según el método de Thornthwaite (van der Schrier et al. 2011, Thornthwaite 1948). Se realizó el mismo análisis de calidad para evitar posibles sesgos introducidos por la metodología de cálculo.

El trabajo de crecidas no analiza proyecciones futuras, sino que analiza el impacto del cambio climático identificando tendencias basadas en el análisis de datos históricos de caudales. En el estudio de sequías también se analizaron proyecciones futuras de sequías, así como sus impactos y daños esperados. Sin embargo, en este apartado se analizan solamente los aspectos relacionados a la caracterización de las sequías y al análisis de tendencia de datos históricos a escala regional, puesto que las proyecciones se analizan en otra buena práctica.

##### Modelos empleados

En los trabajos no se aplican modelos climáticos ni modelos hidrológicos. El análisis se basa en técnicas estadísticas. En el trabajo de crecidas se aplican diversos procedimientos, pruebas y métodos, relacionados con técnicas de análisis estadístico:

- *Prueba de Kuiper* (Mardía y Jupp 2008): Se utiliza para tener en cuenta el hecho de que podrían ocurrir avenidas durante todo el año y se aplica a cada una de las estaciones analizadas. Sólo se



utilizan aquellas estaciones para las cuales se rechaza la hipótesis nula de uniformidad circular (nivel de significancia  $\alpha = 0.1$ ).

- *Estimador de pendiente Theil-Sen* (Sen 1968, Theil 1950): Se utiliza para estimar la tendencia del momento de ocurrencia de las avenidas en el año.
- *Función "autoKrige"* del módulo "automap" del software R (Hiemstra et al. 2009): Se utiliza para identificar los patrones espaciales a gran escala dentro de Europa.
- *Prueba Regional Mann-Kendall* (Helsel y Frans 2006): Se utiliza para identificar evidencia de una tendencia regional significativa del momento de ocurrencia de las avenidas.
- *Otros paquetes de soporte de R* (R Core Team 2016) utilizados para el análisis de datos en la publicación de referencia: "lattice" (Sarkar 2008), "maptools" (Bivand R. y Lewin-Koh 2016), "ncdf4" (Pierce 2015), "plyr" (Wickham 2011), "raster" (Hijmans 2016), "RColorBrewer" (Neuwirth 2014), "rgdal" (Bivand y Keitt 2016) y "rworldmap" (South 2011).

### **Variables de salida de la modelización**

En el estudio de crecidas se obtuvieron, para cada estación y subregión, el momento promedio en que se producen los caudales máximos anuales, el período de 7 días con mayor precipitación, el primer período del año de 7 días con temperaturas mayores a 0 °C y el mes promedio con mayor humedad del suelo.

En el estudio de sequías se obtuvieron inicialmente los tres indicadores de sequía en el periodo 1950–2012, con agregación temporal de 3 y 12 meses:

- *SPI* (Standardized Precipitation Index, McKee et al. 1993). Utiliza datos de precipitación.
- *SPEI* (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index, Vicente-Serrano et al. 2010). Utiliza datos de precipitación y evapotranspiración.
- *RDI* (Reconnaissance Drought Indicator, Tsakiris y Vangelis 2005). Se basa en la ratio entre precipitación y evapotranspiración.

Los tres índices se calcularon para dos períodos de agregación temporal: 3 meses, que se relaciona con los impactos en los ecosistemas y la agricultura, y 12 meses, que se relaciona con impactos hidrológicos de largo plazo (por ejemplo, régimen hidrológico y recarga de aguas subterráneas).

A partir de los tres indicadores convencionales se obtuvieron dos indicadores compuestos de sequía, también en el periodo 1950–2012 y con agregación temporal de 3 y 12 meses. Los indicadores compuestos se propusieron combinando los tres índices anteriores para identificar y caracterizar mejor los eventos de sequías:

- *Índice combinado 1*. Este índice se usó para construir una base de datos de eventos de sequías históricas en Europa. Es el promedio de los índices SPI, SPEI y RDI.
- *Índice combinado 2*. Para el análisis de tendencia de las sequías se definió un índice que está estructurado para favorecer las condiciones de sequía sobre las otras condiciones posibles. Si dos o más índices sugieren condiciones de sequía (valores menores a -1), entonces el indicador combinado también sugiere condiciones de sequía; a la inversa, si dos o más indicadores no sugieren sequía, entonces el indicador combinado también sugiere que no hay sequía. El índice combinado toma valores de 0, -1 o -2 según la condición combinada sea húmeda/normal, de sequía o sequía severa, respectivamente.

Para cada sequía identificada se calcularon los siguientes parámetros estadísticos:

- *Inicio*: primer mes para el cual el índice es menor que el umbral.
- *Fin*: último mes para el que el índice pasa a ser positivo.



- *Duración*: número de meses del evento.
- *Severidad*: es la suma de las diferencias, en valores absolutos, entre los valores del índice y el umbral (si el valor está por encima del umbral, pero por debajo de la media, no se considera).
- *Intensidad*: ratio entre severidad y duración.
- *Mes máximo*: mes con el valor más bajo del índice durante el evento de sequía.
- *Área afectada por la sequía*: porcentaje de la región (o país) con valores inferiores a -1 calculados sobre los puntos de la cuadrícula.
- *Frecuencia de sequía*: número de eventos de sequía durante un cierto intervalo (generalmente se toman 10 años).
- *Severidad total de las sequías*: suma de la severidad de los eventos de sequía que ocurren en un período (generalmente calculados sobre períodos de 20 años).
- *Duración total de las sequías*: número total de meses bajo condiciones de sequía en un período determinado (generalmente se expresa en número de meses por década).

Se calcularon todos los índices y estadísticos para cada celda de la cuadrícula, cada país (promediando los valores de las celdas incluidas en el país) y cada región (se definieron 13 macro-regiones según límites políticos, características físicas y patrones climáticos).

- *Tendencias de las sequías*. Se adoptó un enfoque similar al aplicado en Spinoni et al. (2014). La tendencia de la frecuencia de sequía (FS), la gravedad (GS) y la duración (DS) para el período 1951-2012 se calculó dividiendo el período histórico de análisis en nueve intervalos de siete años, calculando FS, GS y DS para cada intervalo. Posteriormente se realizó un análisis de tendencia lineal. Se comprobó la significancia de tendencias con una prueba T de Student (Wilks 2011). Se analizaron sequías de diferente duración, distinguiendo entre eventos que duran dos o más meses y eventos de sequía prolongada que duran al menos seis meses.
- *Tendencias de la precipitación y evapotranspiración*: Para determinar qué factores (precipitación, evapotranspiración o ambas) han condicionado las sequías en el período histórico, se analizó la relación entre las tendencias lineales de precipitación (P), la evapotranspiración potencial (PET) y la gravedad de la sequía (GS) en el período 1950-2012. Este análisis se realizó para cada país promediando todos los valores de P, PET y GS dentro de las fronteras del país y luego analizando la tendencia lineal para cada variable y país durante todo el período de tiempo. La tendencia resultante puede ser positiva, negativa o no mostrar ninguna dirección. La interpretación combinada de las pendientes (positivas, negativas, neutrales) de estas líneas de tendencia proporciona una idea de los principales impulsores de la sequía en los diferentes países y regiones de Europa.

### **Principales incertidumbres de los análisis realizados**

Las principales fuentes de incertidumbre de los análisis realizados son las siguientes:

- Incertidumbre asociada a la medición de caudales en las estaciones de aforo, fundamentalmente las asociadas a la medida de niveles y a la curva de aforo definida en cada estación, y a la medición de temperatura y precipitación en las estaciones meteorológicas.
- Incertidumbre asociada al proceso de la información meteorológica básica: proceso de rellenado de las series observadas, representación espacial a partir de datos puntuales en la generación de variables en cuadrícula, regionalización de los valores climáticos para obtener las cuadrículas de la base de datos E-OBS.
- Incertidumbre asociada a la estimación de la evapotranspiración potencial. Se utilizó el método de Thornthwaite que utiliza solamente la variable temperatura.



- Incertidumbre asociada a la representatividad de los índices de sequía para la identificación y caracterización de las sequías, tanto temporal como espacial.
- Incertidumbre asociada a la elección de los métodos, pruebas y procedimientos estadísticos utilizados. La elección de unos u otros puede dar lugar a resultados diferentes.
- Incertidumbre asociada a la representatividad del período temporal seleccionado para el análisis de tendencias.
- Incertidumbre asociada al método aplicado para la estimación de tendencias. La elección de unos u otros puede dar lugar a resultados diferentes.
- Incertidumbre asociada a los criterios de definición de las subregiones homogéneas.
- Incertidumbre asociada a los factores condicionantes de las tendencias de las sequías. Además de la variabilidad climática general, otros factores como el cambio en los patrones de circulación atmosférica expresados en la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), posibles cambios en los mecanismos de retroalimentación entre la superficie terrestre y la atmósfera, entre otros, podrían ayudar a explicar las tendencias de las sequías. Por ejemplo, Hoerling et al. (2012) muestran que los gases antropogénicos de efecto invernadero y el forzamiento de aerosoles son factores clave atribuibles para este aumento de sequías en el área mediterránea. Asimismo, la influencia de la temperatura de la superficie del mar (TSM) durante el siglo XX probablemente jugó un papel importante en las sequías observadas.

#### 4.2.2.4 Características destacadas

Los trabajos presentados son dos buenos ejemplos de análisis regional de eventos extremos. Las características que justifican su selección como buena práctica son las siguientes:

- En el trabajo de crecidas se recopiló un número muy importante de series de caudales distribuida por todo el territorio de Europa. Se utilizaron 3298 estaciones con al menos 35 años de datos, provenientes de 64 fuentes de información, que se unificaron para su utilización combinada.
- Es el resultado del trabajo en colaboración de un gran número de investigadores de muchos países, que ha sido publicado en una de las revistas científicas más prestigiosas del mundo: *Science*
- El desarrollo de la buena práctica se basó en la aplicación de paquetes estadísticos disponibles en la plataforma R, de acceso libre y gratuito, lo que facilita su replicabilidad.
- El estudio de sequías ha sido realizado por una prestigiosa institución europea de investigación: Joint Research Centre de Ispra (Italia).
- El alcance geográfico del estudio abarca toda Europa, lo que permite hacer análisis comparados de la evolución de las sequías en cada región. La información de base ha sido contrastada y es ampliamente utilizada en diversos estudios.
- Se aplicaron diferentes índices de sequía por separado y en combinación, lo que permitió identificar y caracterizar de una manera más robusta las sequías registradas.
- La metodología planteada es simple, fácilmente replicable y utiliza herramientas informáticas disponibles de forma gratuita.

#### 4.2.2.5 Descripción de técnicas específicas

*Método para el análisis regional de tendencias (basado en Blöschl et al. 2017)*

En primer lugar, para cada estación, se calcula, para cada año del período de observación, el día promedio (del año calendario) en que ocurre la máxima crecida anual. Para tener en cuenta el hecho de que podrían ocurrir inundaciones durante todo el año, los cálculos se realizaron utilizando estadísticas circulares (Bayliss y Jones 1993, Mardia 1972). Sólo se utilizaron aquellas estaciones para las cuales se rechazó la hipótesis nula de uniformidad circular (prueba de Kuiper (Mardia y Jupp



2008)) (nivel de significancia,  $\alpha = 0.1$ ). Como resultado, se identificaron 4062 estaciones para utilizarlas en el análisis del tiempo promedio y 3184 estaciones para utilizarlas en el análisis de tendencias. La no uniformidad circular se considera necesaria para un análisis de tendencia circular. La fecha de ocurrencia  $D_i$  de una crecida en el año  $i$  se transformó en un valor angular  $\theta_i$  según:

$$\theta_i = D_i * \frac{2\pi}{m_i}, \text{ siendo } 0 \leq \theta_i \leq 2\pi \quad \text{Ec.1}$$

donde  $D_i=1$  corresponde al 1 de enero,  $D_i = m_i$  al 31 de diciembre, y  $m_i$  es el número de días que tiene el año en estudio. La fecha media de ocurrencia  $\bar{D}$  en una estación, está definida por Bayliss y Jones (1993) y Mardia (1972):

$$\bar{D} = \begin{cases} \tan^{-1}\left(\frac{\bar{y}}{\bar{x}}\right) * \frac{\bar{m}}{2\pi}, & \bar{x} > 0, \bar{y} \geq 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{\bar{y}}{\bar{x}}\right) * \frac{\bar{m}}{2\pi} + \pi, & \bar{x} \leq 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{\bar{y}}{\bar{x}}\right) * \frac{\bar{m}}{2\pi} + 2\pi, & \bar{x} > 0, \bar{y} < 0 \end{cases} \quad \text{Ec.2}$$

siendo,

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(\theta_i) \quad \text{Ec.3}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{sen}(\theta_i) \quad \text{Ec.4}$$

$$\bar{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i \quad \text{Ec.5}$$

donde,  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  son los componentes seno y coseno de la fecha promedio, respectivamente. El valor  $\bar{m}$  es el promedio de los días de un año en el período de estudio (365.25 para la publicación de referencia). El valor  $n$  es el total de caudales máximos en cada estación. La concentración  $R$  de la fecha de ocurrencia alrededor de la media es:

$$R = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}, \quad 0 \leq R \leq 1 \quad \text{Ec.6}$$

siendo  $R = 0$  no concentración (avenidas dispersas a lo largo del año) y  $R = 1$  concentración total (todas las avenidas en una estación ocurren el mismo día del año).

En segundo lugar, se estimó la tendencia del momento de ocurrencia aplicando el estimador de pendiente Theil-Sen (Sen 1968, Theil 1950). Este es un estimador no paramétrico y fue elegido por su robustez e insensibilidad a los datos no disponibles y a los datos anómalos. El estimador de tendencia  $\beta$  es la mediana de la diferencia de las fechas de todos los posibles pares de años ( $i$  y  $j$ ) dentro de la serie de análisis:

$$\beta = \text{mediana}\left(\frac{D_j - D_i + k}{j - i}\right) \text{ con } k = \begin{cases} -\bar{m} \text{ si } D_j - D_i > \bar{m}/2 \\ \bar{m} \text{ si } D_j - D_i < -\bar{m}/2 \\ 0 \text{ en el resto de casos} \end{cases} \quad \text{Ec.7}$$

donde,  $k$  hace el ajuste de la naturaleza circular de los datos y  $\beta$  tiene unidades de días por año. El valor de  $\beta$  se representa en la ubicación de cada estación de aforos. Para identificar los patrones espaciales a gran escala dentro de Europa,  $\beta$  se interpola espacialmente utilizando la función "autoKrige" (kriging automático) incluida en el módulo "automap" del software R (Hiemstra et al. 2009). Esta función ajusta automáticamente el variograma de la información espacial.

En tercer lugar, se estima la evolución a largo plazo del momento de ocurrencia del máximo caudal diario anual utilizando un filtro de media móvil centrado de 10 años, usando las Ec.2 a 6 (con  $n=10$ ) con la finalidad de reducir la variabilidad a corto plazo (año a año) y para poder centrarse en el largo plazo, como las fluctuaciones decadales. Cabe señalar que los períodos 1960-1965 y 2005-2010 tienen menos de 10 años disponibles para calcular el promedio. Las series filtradas se agrupan dentro de subregiones (subregiones rectangulares) que se seleccionan en función de la similitud del momento promedio de ocurrencia de la avenida y de sus tendencias. Las series de momento de





ocurrencia de la avenida de cada subregión se analizan en busca de evidencia de una tendencia regional significativa consistente. Para ello se utilizó el test regional de Mann-Kendall (Helsel y Frans 2006). Todas las tendencias regionales fueron estadísticamente significativas en el nivel  $\alpha = 0.05$ . Para cada subregión, el momento promedio en cada año se calculó utilizando los datos de las estaciones situadas dentro de la subregión. Luego se aplicó un filtro de promedio móvil de 10 años a la mediana del momento de ocurrencia anual para obtener la evolución a más largo plazo dentro de cada subregión. Además, se puede estudiar la evolución a largo plazo de la desviación estándar circular  $\sigma$ , como una medida de la dispersión del momento de ocurrencia de la avenida en el año de todas las estaciones de cada subregión:

$$\sigma = \sqrt{-2 \ln(R)} \quad \text{Ec.8}$$

Para investigar los efectos inducidos por la lluvia sobre el momento en que ocurre la avenida, para cada punto de la cuadrícula de la base de datos E-OBS, se identifica el período de 7 días con la precipitación máxima de los años observados (con al menos el 70% de los datos anuales disponibles). La fecha de cada período se considera como el punto medio del período de la precipitación máxima de 7 días, y se repiten los análisis de momento de ocurrencia y cambios, de forma análoga a lo descrito con anterioridad. Se asume que siete días de lluvia son representativos de la generación de avenidas en grandes cuencas (Blöschl et al. 2013). En cuencas más pequeñas, pueden ser más relevantes las tormentas más cortas (por ejemplo, de 1 a 3 días). Para analizar este aspecto se empleó el conjunto de datos E-OBS. Se encontró que el momento promedio de ocurrencia de las tormentas de 1 y 3 días en Europa es muy similar al momento de ocurrencia promedio de la precipitación máxima de 7 días (coeficiente de correlación circular de Pearson  $r=0.91$  y  $r=0.95$ , respectivamente). Por lo tanto, también se considera que la precipitación máxima de 7 días puede ser representativa en cuencas más pequeñas.

Para comprender el efecto de los procesos de nieve en el tiempo de avenidas, se define un indicador de momento de ocurrencia del deshielo, como los primeros siete días completos en un año en los que la temperatura del aire en la superficie excede los  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Solo se incluyen aquellos puntos de la cuadrícula en los que se puede identificar dicha fecha en al menos el 70% de los años analizados, es decir, donde se identificaron 7 días consecutivos con temperaturas menores a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  antes de que las temperaturas comenzaran a subir, generalmente en primavera. El indicador de deshielo se considera un indicador tanto de la temporada de deshielo como de la transición de la precipitación en forma de nieve a lluvia líquida. Todos los análisis de momento y cambio (Ec.1 a Ec.8) se repiten para la precipitación máxima y el indicador de deshielo.

Cuando la humedad del suelo es alta las avenidas se pueden producir incluso con tormentas de menor intensidad. Para comprender el efecto que puede tener una humedad del suelo alta sobre las avenidas, se identifica, para cada punto de cuadrícula del conjunto de datos de humedad del suelo de la base de datos CPC, el mes de mayor humedad del suelo. Asignamos el punto medio del mes como la fecha de máxima humedad del suelo y se repiten todos los análisis de momento de ocurrencia y cambio (Ec. 1 a Ec. 8). Solo se utilizaron los datos de los puntos de la cuadrícula para los cuales se pudo rechazar la hipótesis nula de uniformidad circular ( $\alpha = 0.1$ ). Todos los análisis de datos mencionados anteriormente se realizan en R (R Core Team 2016) utilizando los paquetes de soporte "lattice" (Sarkar 2008), "maptools" (Bivand y Lewin-Koh 2016), "ncdf4" (Pierce 2015), "plyr" (Wickham 2011), "raster" (Hijmans 2016), "RColorBrewer" (Neuwirth 2014), "rgdal" (Bivand y Keitt 2016) y "rworldmap" (South 2011).

## 4.3 Técnicas específicas

### 4.3.1 Métodos de reducción de escala

#### 4.3.1.1 Planteamiento general

El escalado de las proyecciones climáticas es necesario porque la escala espacial y temporal de los resultados de los modelos climáticos no se corresponde con las necesidades de los modelos hidrológicos utilizados en los análisis de impacto. Hay una gran variedad de métodos de escalado,



bien basados en el empleo de modelos regionales de clima, en métodos estadísticos o en una combinación de ambos. En la práctica, el problema no es tanto la falta de una metodología o una herramienta adecuada para abordarlo, sino precisamente la abundancia de opciones en un contexto en el que se debate con una cierta intensidad acerca de la superioridad de un enfoque sobre otro. En realidad, no hay consenso sobre el mejor desempeño de unos modelos sobre otros. Por este motivo, en esta buena práctica se ha preferido no desarrollar una metodología en concreto, sino presentar las diferentes técnicas y métodos de reducción de escala. La buena práctica seleccionada corresponde al trabajo "Relacionando la modelación de cambio climático con los estudios de impacto: Avances recientes en técnicas de reducción de escala para modelación hidrológica", publicado por Hayley J. Fowler, Stephen Blenkinsop y Claudia Tebaldi en 2007 en la revista *Internacional Journal of Climatology*. Las características básicas del trabajo se resumen en la Tabla 13. En esta buena práctica se presentan los métodos de escalado que mejor resultado han ofrecido en estudios de impacto relacionados con extremos hidrológicos, a partir de las evaluaciones realizadas por distintos autores.

#### 4.3.1.2 Resumen del trabajo

Actualmente, existe abundante literatura publicada sobre las fortalezas y debilidades de los métodos de reducción de escala para diferentes variables climáticas, en diferentes regiones y estaciones. Sin embargo, se presta poca atención a la elección del método de reducción de escala cuando se examinan los impactos del cambio climático en los sistemas hidrológicos. La reducción de escala puede abordarse mediante distintos enfoques, que pueden conducir a resultados dispares. Esta situación es relevante en análisis de impacto, que normalmente requieren información climática con mayor grado de detalle que la proporcionada por los modelos de clima global. Es necesario informarse sobre el planteamiento de los distintos métodos de reducción de escala para elegir el que mejor se adapte a las necesidades. El trabajo de referencia es un documento de revisión que evalúa la literatura existente de reducción de escala, examinando nuevos desarrollos en el campo de reducción de escala, y específicamente aquellos focalizados en impactos hidrológicos. La publicación se centra en el concepto de reducción de escala: nuevos métodos, estudios metodológicos comparativos, el modelado de extremos y la aplicación a impactos hidrológicos. Se consideran los nuevos desarrollos en la construcción de escenarios climáticos que pueden ofrecer el mayor potencial de avance dentro de la comunidad de reducción de escala para impactos hidrológicos, tales como: modelado probabilístico, escala de patrones y reducción de escala de múltiples variables. Se sugieren formas en que pueden fusionarse en un marco de escenario probabilístico de cambio climático para evaluar las incertidumbres asociadas con las proyecciones futuras. Como conclusión, se sugiere que es conveniente tomar distancia de los estudios de comparación para centrarse en aquellos que puedan proporcionar herramientas de toma de decisiones para la planificación y la gestión, evaluando y comprendiendo las limitaciones e incertidumbres dentro del sistema de modelado.

El esquema metodológico del trabajo se resume en la Ilustración 7. Se analiza el concepto de escalado y se clasifican los métodos disponibles en dos grandes grupos: los métodos dinámicos, basados en el anidamiento de los modelos globales y regionales de clima, y los métodos estadísticos, basados en la correlación de los resultados de los modelos de clima con las variables observadas locales. En la segunda fase se analizan los métodos disponibles, su efecto en los extremos hidrológicos y su aplicación en los estudios de impacto hidrológico. En la tercera parte se realiza una valoración y comparación de métodos. El resultado del análisis es una propuesta de método de escalado en función de los datos disponibles, de la entidad del estudio y del tipo de problema que se quiera analizar.



Ilustración 7: Esquema metodológico de la buena práctica

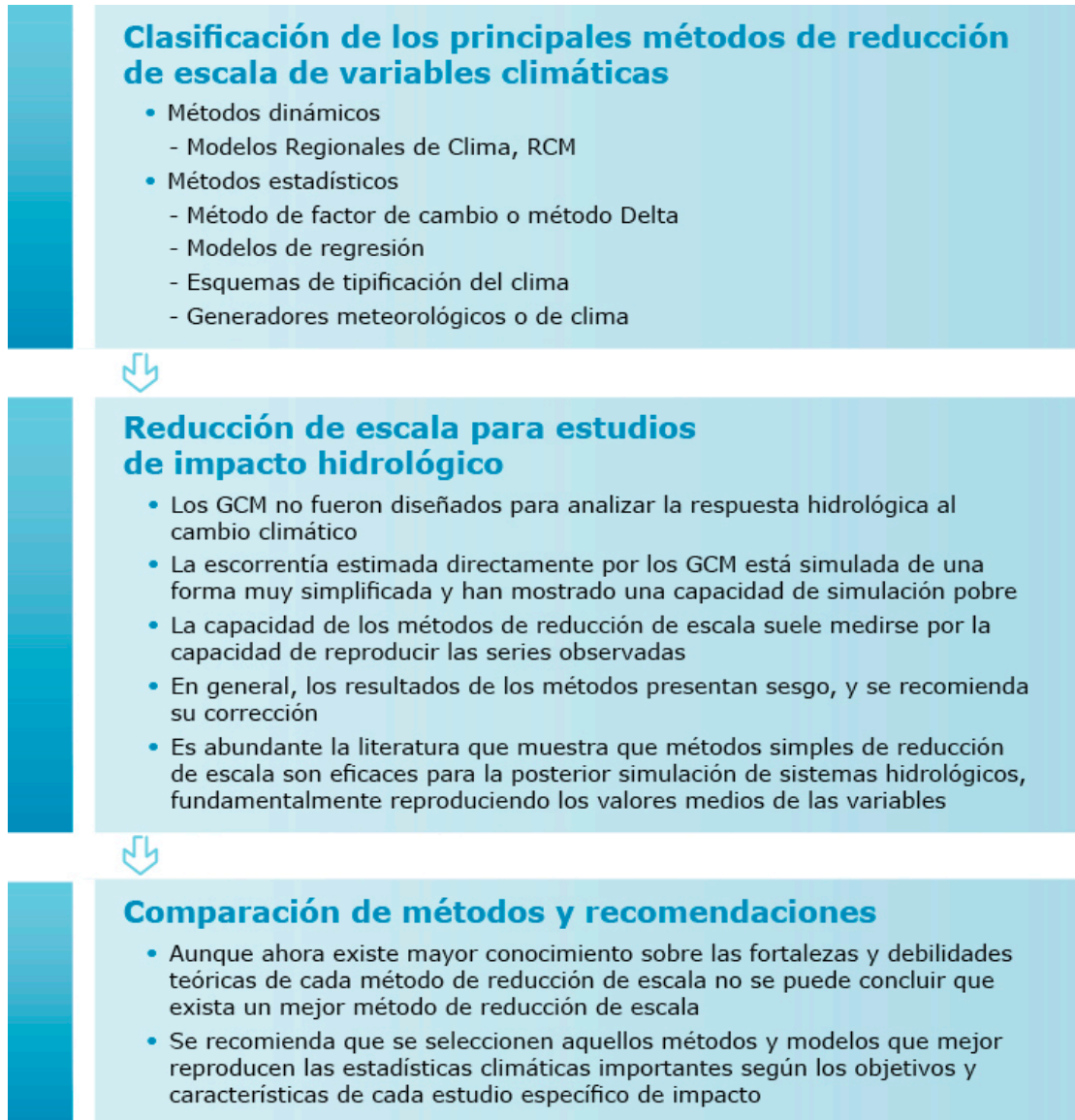




Tabla 13: Ficha de características básicas de la buena práctica

Concepto	Información básica
Título de la publicación	Linking climate change modelling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling
Autores	Hayley J. Fowler, Stephen Blenkinsop y Claudia Tebaldi
Año del estudio	2007
Publicación	International Journal of Climatology, 27, 1547–1578. DOI: 10.1002/joc.1556
Enlace web	<a href="https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/joc.1556">https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/joc.1556</a>
Alcance geográfico	Este estudio analiza diferentes métodos y las fortalezas y debilidades para diferentes variables climáticas, en diferentes regiones y estaciones, por lo que el alcance geográfico de este estudio no es sobre una ubicación concreta, pudiendo aplicarse diferentes métodos según la región específica de análisis.
Tipo de evento extremo	Sequías e inundaciones
Enfoque	Basado en simulaciones de modelos. Cabe señalar que los métodos de reducción escala estadísticos también utilizan técnicas estadísticas para vincular los resultados de los modelos globales de clima con el clima local
Otros trabajos similares o complementarios	<p><i>Schmidli, J., Goodess, C.M., Frei, C., Haylock, M.R., Hurrell, Y., Ribalaygua, J., Schmith, T. (2007): Statistical and dynamical downscaling of precipitation: An evaluation and comparison of scenarios for the European Alps. Journal of Geophysical Research Atmospheres 112(4)</i></p> <p><i>San-Martín, D., Manzanar, R., Brands, S., Herrera, S., M. Gutiérrez, J. (2017): Reassessing model uncertainty for regional projections of precipitation with an ensemble of statistical downscaling methods. Journal of Climate 30(1) 203-223</i></p>

#### 4.3.1.3 Datos y modelos empleados en el trabajo

##### Datos empleados

El trabajo de referencia no realiza ningún análisis sobre un caso de estudio específico, sino que compara métodos. La referencia a datos es, por tanto, genérica. Los datos que se consideran necesarios son los siguientes:

- *Precipitación, temperatura*: Datos mensuales. En estudios orientados a analizar el impacto sobre la hidrología, las principales variables utilizadas para verificar la capacidad de reproducir el clima de los modelos climáticos y métodos de reducción de escala son la precipitación y temperatura. Aunque los modelos de clima suelen simular con paso diario, el contraste se suele hacer con valores observados mensuales o anuales.
- *Escorrentía*: Datos mensuales. En general, la escorrentía mensual observada suele compararse con los resultados de los modelos hidrológicos (en el período de control) alimentado por las salidas de los modelos climáticos (y luego de una reducción de escala y corrección del sesgo de las variables climáticas).



### **Modelos empleados**

Los modelos que intervienen en la reducción de escala son de tres tipos. En el primer nivel se encuentran los modelos globales de clima y modelos del sistema terrestre, cuyos resultados deben ser objeto de reducción de escala para poder utilizarlos en análisis de impacto. En un nivel intermedio se encuentran los modelos regionales de clima, que son desarrollados para la reducción de escala global a regional y se encuadran dentro de los métodos dinámicos de reducción de escala. Finalmente, los modelos hidrológicos son los destinatarios de la reducción de escala, ya que son los utilizados en los análisis de impacto. Hay modelos hidrológicos globales que se alimentan directamente de los resultados de los modelos climáticos, sin necesidad de reducción de escala, aunque generalmente sí necesitan una corrección de sesgo. Los modelos hidrológicos regionales o de cuenca sí requieren de los métodos de reducción de escala, puesto que su resolución es mucho mayor de la que proporcionan los modelos climáticos. En general, estos modelos se utilizan “fuera de línea”, es decir, no están acoplados ni se retroalimentan de los modelos climáticos durante la simulación.

### **Variables de salida de la modelización**

Las variables que se producen como resultado de la reducción de escala son las variables de entrada a los modelos hidrológicos. Se pueden citar las siguientes:

- Temperatura, precipitación y otras variables climáticas: En general, los modelos climáticos estiman la mayor parte de las variables meteorológicas, aunque con diferente capacidad de reproducción de los datos observados. Para aplicaciones hidrológicas, las variables más importantes son la temperatura y la precipitación. En general los modelos climáticos muestran mejor desempeño en la simulación de la temperatura que en la precipitación.
- Aportaciones de caudales o escorrentía: Los modelos regionales de clima suelen estimar la escorrentía, pero en general la capacidad de reproducir la realidad es pobre. Para ello se suelen aplicar modelos hidrológicos alimentados por las salidas de los modelos climáticos.

### **Principales incertidumbres de los modelos utilizados:**

Del análisis de los métodos de reducción de escala realizado en el trabajo de referencia se pueden deducir los siguientes factores relacionados con la incertidumbre:

- La mayor fuente de incertidumbre en el proceso de reducción de escala procede de la elección del modelo global, y es consecuencia de la estructura y la física de la formulación de estos modelos.
- El uso de modelos regionales agrega incertidumbre adicional a la incertidumbre inherente a los modelos globales. La incertidumbre asociada a la formulación de los modelos regionales tiene un impacto variable, pero rara vez es despreciable.
- La elección de las variables predictoras en esquemas estadísticos es una fuente considerable de incertidumbre, particularmente para el escalado de la precipitación. Si no se incorporan predictores que tengan en cuenta las interacciones físicas en el sistema climático, se producirá un escalado pobre del clima, cualquiera que sea el método empleado.
- También se produce incertidumbre como consecuencia de la falta de previsibilidad de los fenómenos climáticos, que hace que algunos climas sean difíciles de escalar. Esto no se debe necesariamente a la aplicabilidad de los métodos estadísticos, sino a la falta de datos adecuados.
- La contribución de las diferentes fuentes de incertidumbre puede variar dependiendo del dominio espacial, la región y estación del año.
- Los métodos probabilísticos ofrecen una posibilidad de considerar las incertidumbres en el marco de modelación para evaluar los impactos del cambio climático. Permiten la inclusión de estimaciones de incertidumbre utilizando un enfoque multi-modelo que potencialmente se puede utilizar en la planificación de medidas de adaptación.



- El análisis del impacto hidrológico se suele realizar utilizando enfoques de modelado fuera de línea. Los resultados de los modelos climáticos se utilizan para alimentar modelos hidrológicos y así estimar los impactos del cambio climático, pero no se suelen tener en cuenta los efectos de retroalimentación que pueden ser una fuente importante de incertidumbre.

#### 4.3.1.4 *Características destacadas*

Las características que justifican que este estudio sea considerado una buena práctica en el sector son las siguientes:

- Se trata de una revisión general de los métodos de escalado, orientada específicamente a su aplicación en análisis hidrológicos. Explica con gran claridad en qué consisten los distintos métodos de reducción de escala y proporciona una clasificación que es fácil de comprender. El acceso a estos temas directamente a partir de la literatura científica exigiría una gran inversión de tiempo.
- Aunque el trabajo es algo antiguo, está muy bien documentado y no sólo proporciona acceso a numerosas fuentes bibliográficas, sino que elabora numerosos temas de interés, como la comparación entre los distintos métodos, ventajas y desventajas, fuentes de incertidumbre, limitaciones en la aplicación o necesidades de investigación.
- Incluye numerosos consejos de aplicación práctica, sobre la elección del método más apropiado en cada caso y la conveniencia de aplicar varios métodos en paralelo para comparar los resultados obtenidos en las proyecciones futuras.

#### 4.3.1.5 *Descripción de técnicas específicas*

*Clasificación de métodos de reducción de escala (adaptado de Fowler et al. 2007)*

A grandes rasgos, los métodos de reducción de escala de las salidas de los modelos globales de clima pueden clasificarse en métodos dinámicos y métodos estadísticos. Las principales características, ventajas y limitaciones de ambos enfoques se presentan a continuación y se resumen en la Tabla 14.

#### **Reducción de escala dinámica**

La reducción de escala dinámica se refiere al uso de modelos regionales de clima o modelos de área limitada para mejorar la resolución alcanzada con los modelos globales. Los modelos regionales tienen una cobertura territorial parcial y su resolución es más fina que la de los modelos globales. Utilizan condiciones de contorno a gran escala provenientes de los modelos globales. Los modelos regionales generalmente tienen una resolución de aproximadamente 0.5° de latitud y longitud y tienen parametrizaciones más ajustadas de los procesos físicos atmosféricos. Son capaces de simular de manera más o menos realista las características climáticas regionales, como la precipitación orográfica (Frei et al. 2003), eventos climáticos extremos (Fowler et al. 2005a, Frei et al. 2006) y anomalías climáticas a escala regional o efectos no lineales, como los asociados con la Oscilación del Sur del Niño (Leung et al. 2003a). Sin embargo, la bondad del modelo depende en gran medida de los posibles sesgos heredados del modelo global y de la presencia y magnitud de los forzamientos a escala regional, como la orografía, contraste tierra-mar y cubierta vegetal, entre otros. Los estudios realizados en zonas donde los efectos orográficos sobre la temperatura y la precipitación son importantes suelen confirmar que los métodos dinámicos de reducción de escala tienen mayor habilidad para reproducir la realidad que aquellos casos donde los forzamientos regionales son más débiles. La parametrización interna de los modelos regionales es otra fuente importante de incertidumbre. Por este motivo, se sugiere emplear un conjunto de modelos regionales en estudios de evaluación de cambio climático.

Dado que la reducción de escala dinámica es computacionalmente costosa, inicialmente las integraciones de modelos se restringieron a períodos concretos de tiempo, del orden de 30 años, tanto para el período histórico o de control como para un período futuro. Esta limitación condicionaba el rango de análisis del impacto del cambio climático en otros períodos. La producción de otros escenarios para otros períodos se abordaba usando un "patrón de escalado" (Pattern scaling), donde





los cambios se escalan según la señal modelada de la temperatura, suponiendo un patrón lineal de cambio (Prudhomme et al. 2002). En la actualidad esta limitación está ya superada y están disponibles simulaciones de modelos regionales para periodos largos de tiempo (por ejemplo, de 1950 a 2100).

Recientemente, se han realizados numerosos estudios para evaluar la capacidad de los modelos regionales para simular variables climáticas. Varios estudios (por ejemplo, Leung et al. 2004) destacan que la reducción de escala dinámica puede "agregar valor" para el estudio del cambio climático y sus posibles impactos, ya que la consideración de señales de clima regional (como la orografía) pueden ser significativamente diferentes que las proyectadas por los modelos globales. La reducción de escala dinámica también puede proporcionar una simulación mejorada de los procesos de precipitación a mesoescala y escenarios climáticos más plausibles para el análisis de eventos extremos y variabilidad climática a escala regional.

### **Reducción de escala estadística**

Este enfoque utiliza métodos estadísticos para establecer relaciones empíricas entre las variables climáticas con la resolución de los modelos globales y el clima local. El método más simple es aplicar las proyecciones de los modelos globales en forma de factores de cambio, denominados "métodos de perturbación" (Prudhomme et al. 2002) o "método delta". Las diferencias entre el período de control y el período futuro simulado por los modelos globales se aplican a las series observadas, simplemente agregando o escalando las mismas con el factor de cambio medio. Este método puede aplicarse rápidamente a varios modelos globales para producir una variedad de escenarios climáticos. En primer lugar, el método supone que los modelos globales simulan con mayor precisión los cambios relativos (entre futuro y presente) que los valores absolutos en cada escenario, o sea, supone un sesgo constante a través del tiempo. En segundo lugar, los factores de cambio sólo escalan la media, máximo y mínimo de las variables climáticas, ignorando el cambio en la variabilidad y asumiendo que el patrón espacial del clima se mantendrá constante (Díaz-Nieto y Wilby 2005). Finalmente, para la variable precipitación, la secuencia temporal de días húmedos no cambia, cuando la alteración de períodos húmedos y secos puede ser un componente importante del cambio climático.

Otros métodos estadísticos más complejos se pueden clasificar en: 1) Modelos de regresión, 2) Esquemas de tipificación del clima, y 3) Generadores meteorológicos o de clima. En los modelos de regresión se utiliza el término "función de transferencia" (Giorgi y Hewitson 2001) para describir métodos que cuantifican directamente una relación entre la predicción y un conjunto de variables predictoras. En su forma más simple, los modelos de regresión múltiple se crean utilizando valores espaciales (en cada celda) de variables atmosféricas como predictores de temperatura de superficie y precipitación (p.e.: Hellström et al. 2001). Otros más complejos incluyen el uso de los componentes principales de campos de presión o alturas geopotenciales (p.e.: Cubasch et al. 1996, Hanssen-Bauer et al. 2003). Entre los métodos más sofisticados se encuentran las redes neuronales artificiales (Zorita y von Storch 1999), el análisis de correlación canónica (Karl et al. 1990, Busuioc et al. 2001) y la descomposición de valores singulares (Huth 1999).

Los esquemas de tipificación del clima relacionan la ocurrencia de una "clase de clima" específica y el clima local. Las clases de clima se pueden definir desde un punto de vista sinóptico (Goodess y Palutikof 1998), por índices de datos de presión a nivel del mar (Conway et al. 1996), aplicando análisis clúster (Fowler et al. 2000, 2005b) o reglas difusas (Bárdossy et al. 2002, 2005) a los campos de presión atmosférica. Las variables locales de superficie como la precipitación son condicionadas por el patrón de clima diario derivando las distribuciones de probabilidad condicional para las estadísticas observadas, o la humedad media diaria asociada con un patrón de circulación atmosférica dada (Bellone et al. 2000). El cambio climático se estima evaluando el cambio en la frecuencia de las clases de clima simuladas por el modelo global.

Los generadores meteorológicos o de clima, en su forma más simple, son modelos estocásticos basados en la precipitación diaria con una cadena de Markov para simular la ocurrencia de precipitación y una distribución gamma para simular la magnitud de la precipitación (p.e.: WGEN; Wilks 1992, Dubrovsky et al. 2004).



Tabla 14: Resumen de las cualidades relativas de las técnicas estadísticas y dinámicas de reducción de escala.

	<b>Escalado estadístico</b>	<b>Escalado dinámico</b>
Ventajas	Comparativamente barato y computacionalmente eficiente	Produce respuestas basadas en procesos físicos consistentes
	Puede obtener variables climáticas a escala puntual a partir de salidas de modelos globales	Produce información con resolución más detallada que los modelos globales y permite resolver procesos atmosféricos a menor escala
	Puede usarse para obtener variables no disponibles en modelos regionales	
	Fácilmente transferible a otras regiones	
	Basado en procedimientos estadísticos estándar y aceptados	
	Permite incorporar observaciones en el método de forma directa	
Desventajas	Requiere series largas y fiables de datos observados para calibración	Computacionalmente intensivo
	Depende de la elección de los predictores	Disponibilidad limitada de conjuntos de escenarios
	La relación predictor-predicción es no estacionaria	Muy dependiente del forzamiento de las condiciones de frontera de los modelos globales
	No incluye retroalimentación del sistema climático	
	Depende del forzamiento de las condiciones de frontera de los modelos globales (afectado por sesgo)	
	La bondad del escalado queda afectada por el tamaño del dominio, la región climática y la estación del año.	

Fuente: Fowler et al. 2007.

*Reducción de escala para estudios de impacto hidrológico (adaptado de Fowler et al. 2007)*

Los modelos globales no se diseñaron para analizar la respuesta hidrológica al cambio climático. La escorrentía estimada por los modelos globales suele representarse de forma muy simplificada y no se considera la transferencia lateral de agua en la fase terrestre entre celdas de la cuadrícula. Asimismo, los modelos hidrológicos que se alimentan directamente de las salidas de los modelos globales han mostrado una capacidad de simulación pobre, limitando su uso directo para acometer estudios de impacto hidrológico (Prudhomme et al. 2002). Se suele observar un claro desajuste entre el clima y el modelado hidrológico en términos de escalas espaciales y temporales, y entre la precisión del modelo global y la importancia hidrológica de las variables. En particular, está muy limitada la capacidad para simular los patrones espaciales observados de precipitación (Salathé 2003) y la



variabilidad de la precipitación diaria (Bürger y Chen 2005). Se pueden obtener mejores resultados a partir de la aplicación de métodos simples de reducción de escala (Wilby et al. 1999).

Actualmente, es común aplicar la reducción de escala de los resultados del modelo climático para estudiar las consecuencias hidrológicas del cambio climático. En general, un requisito mínimo para poder utilizar cualquier procedimiento de reducción de escala en aplicaciones hidrológicas es que se debe poder reproducir la serie observada histórica (Wood et al. 2004). Los métodos más simples examinan los hipotéticos escenarios de cambio climático modificando las series temporales de variables meteorológicas por un factor de escala (o "método delta") y de acuerdo con los resultados del modelo global, a menudo con un paso de cálculo mensual (Arnell y Reynard 1996). Sin embargo, estos métodos no permiten el análisis del cambio en la variabilidad temporal (Kilsby et al. 1998). Por tanto, estudios más recientes tienden a utilizar métodos más sofisticados.

En la práctica, los estudios de impacto del cambio climático sobre la hidrología utilizan gran variedad de métodos de reducción de escala: aplicación de los resultados de los métodos dinámicos de reducción de escala de forma directa o con corrección de sesgo (Wood et al. 2004, Graham et al. 2007a,b, Fowler y Kilsby 2007), enfoques estadísticos simples como regresión múltiple (Wilby y Wigley 2000, Jasper et al. 2004), reducción de escala ampliada (Müller-Wohlfeil et al. 2000), generadores estocásticos (Evans y Schreider 2002), métodos de tipificación de clima e índices de circulación del clima (Pilling y Jones 2002). Existen diversos estudios que muestran que los métodos simples de reducción de escala pueden ser eficaces para la posterior simulación de sistemas hidrológicos (Wood et al. 2004). Sin embargo, si existe un cambio significativo en la circulación futura, la escala local puede no capturar los efectos relacionados con dicho cambio. Respecto a la comparación de los enfoques de reducción de escala, no hay consenso sobre el mejor desempeño de unos modelos sobre otros.

#### *Recomendaciones sobre reducción de escala (adaptado de Fowler et al. 2007)*

A partir de una extensa revisión bibliográfica relacionada con los métodos de reducción de escala y en particular con su aplicación a estudios de impacto de cambio climático sobre la hidrología, se pueden extraer recomendaciones y conclusiones interesantes.

Los esfuerzos sistemáticos de investigación desde mediados de la década de 1990 han proporcionado una gran cantidad de información sobre las ventajas y desventajas de los diferentes métodos de reducción de escala. Esto permite hacer afirmaciones con cierta certeza sobre la capacidad para la reducción de escala de diferentes variables climáticas. En general, existe mayor capacidad de reducir la temperatura que la precipitación, el clima de invierno puede reproducirse mejor que el de verano debido a la existencia de relaciones más fuertes con circulación a gran escala, y los climas más húmedos pueden reducirse con más precisión que los climas más secos. Sin embargo, la comparación directa del desempeño de los diferentes métodos sigue siendo difícil debido al rango de estadísticas climáticas que se han evaluado en la literatura, el amplio rango de predictores utilizados y las diferentes formas de evaluar el desempeño de cada modelo. Aunque ahora existe mayor conocimiento sobre las fortalezas y debilidades teóricas de cada método de reducción de escala no se puede concluir que exista un mejor método de reducción de escala.

Se comprueba que los métodos simples de reducción de escala estadística funcionan aceptablemente igual que métodos más sofisticados, pero sólo en la reproducción de características climáticas medias. Si el objetivo principal es la reducción de escala del clima medio, entonces probablemente no se justifique el esfuerzo requerido para usar técnicas más sofisticadas por la escasa capacidad adicional que puedan proporcionar. Sin embargo, la importancia de reproducir las características climáticas medias depende del impacto que se investigue. En el caso que nos ocupa en este informe, se trata de reproducir estadísticas climáticas extremas. Para el análisis de crecidas y sequías se deberían utilizar varios métodos de reducción de escala en paralelo, ya que, si bien los distintos métodos pueden reducir la escala del clima observado con cierto grado de ajuste, las proyecciones futuras pueden resultar muy diferentes.

La elección del modelo global generalmente proporciona la mayor fuente de incertidumbre en los escenarios reducidos (modelos regionales). Quizás tan importante como la elección del método de



reducción de escala es la elección de variables predictoras en esquemas estadísticos, particularmente para la reducción de la precipitación. Si no se incorporan predictores que tengan en cuenta las interacciones físicas en el sistema climático, se producirá un clima pobremente reducido, cualquiera que sea el método empleado. Además, la falta de previsibilidad hace que algunos climas sean difíciles de reducir. Esto no se debe necesariamente a la aplicabilidad de los métodos estadísticos, sino a la falta de datos de observación de buena calidad o la pobre parametrización del modelo climático, posiblemente debido al predominio de los procesos convectivos en estas áreas.

Por otra parte, existe una heterogeneidad importante en la distribución global de los estudios de reducción de escala, donde la mayoría de los estudios están concentrados en latitudes medias. Las regiones tropicales y de alta latitud han sido relativamente poco estudiadas hasta la fecha.

En cuanto a las necesidades prioritarias de investigación, los esfuerzos deberían concentrarse en definir con mayor precisión las variables climáticas que son necesarias reducir para cada estudio de impacto. Las necesidades de los estudios de impacto hidrológico difieren considerablemente y en general se han aplicado reducciones de escala estándar prestando poca atención al método de reducción de escala más apropiado para usar en una aplicación en particular. Los diferentes climas, diferentes estaciones y diferentes variables climáticas pueden reducirse con mayor precisión si se utilizan en cada caso los métodos de reducción de escala más apropiados. Por lo tanto, es recomendable incorporar al análisis una fase de análisis de sensibilidad, donde primero se identifiquen las variables climáticas que tienen el mayor impacto en el sistema hidrológico, y luego se determine el método de reducción de escala más apropiado.

Sobre las posibles ventajas comparativas que podrían tener los dos grandes grupos de métodos también se pueden extraer conclusiones y recomendaciones. Las aplicaciones de reducción de escala dinámica presentes en la literatura muestran de forma consistente que no conviene utilizar los resultados de los modelos regionales en estudios de impacto sin aplicar previamente una corrección de sesgo respecto a las observaciones. Sin embargo, a pesar de esta necesidad de corrección adicional previa, varios estudios han mostrado que la reducción de escala dinámica puede proporcionar "valor añadido" para el estudio del cambio climático y sus posibles impactos. Las señales regionales de cambio climático pueden ser significativamente diferentes de las proyectadas por los modelos globales, particularmente en regiones con orografía compleja que no se puede detectar a la escala de los modelos globales. Los modelos regionales pueden capturar mejor los efectos del forzamiento orográfico y los efectos locales de la lluvia, proporcionando así escenarios de cambio climático más plausibles para eventos extremos y variabilidad climática a escala regional. A pesar de esto, todavía se necesita más investigación (Leung et al. 2003b) para examinar las estructuras estadísticas de las señales climáticas a diferentes escalas espaciales y así evaluar si la previsibilidad del sistema climático se mejora mediante el modelado regional.

Por otra parte, para realizar estudios plausibles de impacto del cambio climático numerosos estudios (Leung et al. 2003b, Sordo-Ward et al. 2019a,b) sugieren la alternativa de utilizar múltiples modelos globales y forzar múltiples modelos regionales. Esto permite en algunos casos mejoras en el realismo de las simulaciones en el periodo de control y el estudio de cambios futuros en eventos extremos. El uso de un conjunto de simulaciones ha mostrado su utilidad para establecer la significación estadística de los cambios asociados con eventos que tienen baja probabilidad de ocurrencia. Sin embargo, no existe consenso sobre el número necesario de integraciones de modelos para cuantificar estas incertidumbres. Asimismo, existen numerosos estudios que evalúan la incertidumbre asociada con los cambios de las condiciones iniciales y parámetros de los modelos. Esto permite evaluar las incertidumbres derivadas de diversas fuentes. Las aplicaciones a regiones geográficamente diversas y los estudios de inter-comparación de modelos (PRUDENCE, ENSEMBLES, CMIP5) han permitido comprender mejor las fortalezas y debilidades de la reducción de escala dinámica y ha fomentado su uso en estudios de impacto.

Parece que los métodos probabilísticos ofrecen una forma más sólida de evaluar los impactos del cambio climático por la consideración de las incertidumbres en el marco de modelación. Estos métodos permiten la inclusión de estimaciones de incertidumbre utilizando un enfoque multi-modelo que potencialmente se puede utilizar en la planificación de medidas de adaptación. No obstante,



existen líneas de investigación aún en desarrollo que intentan responder a las siguientes cuestiones: 1) ¿Cómo se deben utilizar los resultados de múltiples modelos globales y modelos regionales – qué métodos de ponderación se deben aplicar?; 2) ¿Qué enfoques son más adecuados para la construcción de funciones de distribución de probabilidad para estudios regionales?; 3) ¿Cómo se pueden aplicar las funciones de distribución de probabilidad para evaluar los impactos?; 4) ¿Cómo se pueden vincular las funciones de distribución de probabilidad a los métodos de reducción de escala?.

La fiabilidad o credibilidad del modelo se suele basar en la capacidad de reproducir las condiciones observadas en el período de control, al carecer de la posibilidad de conocer la respuesta futura. Se han utilizado muchos métodos para evaluar los resultados del modelo frente a las observaciones. Entre los más comunes está el evaluar el promedio regional de los valores medios del período, o la media estacional para diferentes variables climáticas. Luego, la ponderación de cada modelo puede determinarse en función de la capacidad de reproducir el clima medio observado. Sin embargo, no existe consenso sobre si la capacidad de reproducir condiciones medias observadas asegura la misma capacidad en predicciones futuras. En general, se opta por dar igual ponderación a todos los modelos y, por lo tanto, a todos los resultados posibles.

Para los estudios de impacto de fenómenos hidrológicos extremos, la reproducción de la variabilidad diaria e interanual puede ser más importante que la reproducción de los valores medios. Un modelo de análisis que se utilice para estudios de cambio climático debería poder diferenciar entre años secos y húmedos. La evaluación de la capacidad de los modelos para reproducir la situación observada debería plantearse sobre estadísticos basados en variabilidad en lugar de estadísticos medios. Existe consenso que es extremadamente complejo identificar un "mejor modelo" ya que su habilidad de simulación para estadísticas clave varía entre, e incluso dentro de, las variables climáticas tanto temporal como espacialmente. Aquellos modelos que reproducen bien las estadísticas medias observadas del clima a escala regional pueden no reproducir bien la variabilidad espacial en la misma región. Por tanto, se recomienda que se elijan modelos que reproduzcan mejor las estadísticas climáticas importantes para cada estudio específico de impacto.

En lo que respecta a la aplicación de métodos de reducción de escala con el objetivo específico de la evaluación del impacto hidrológico, en general, se realizan utilizando enfoques de modelado fuera de línea, esto es, los resultados de las integraciones de modelos climáticos se utilizan para alimentar modelos hidrológicos y así estimar los impactos del cambio climático. Sin embargo, con este enfoque, no se tienen en cuenta los efectos de retroalimentación que pueden ser importantes. Los sistemas de modelado regional acoplados (clima-hidrología) pueden proporcionar predicciones más útiles de los impactos climáticos, y en particular con el aumento reciente de la resolución espacial de trabajo de los modelos regionales que la hacen compatible y más apropiada para el modelado hidrológico. Sin embargo, este enfoque integral con alta resolución espacial está aún en desarrollo.

Por otro lado, los modelos hidrológicos normalmente están diseñados para su uso en condiciones estacionarias. De la misma manera que la capacidad del modelo climático para reproducir observaciones no asegura su capacidad de predecir el clima futuro, lo mismo se aplica a los modelos hidrológicos. La suposición principal de que los parámetros hidrológicos seguirán siendo los mismos, simplemente puede no ser cierta bajo condiciones de cambio climático.

En conclusión, desde la década de 1990 ha habido una exploración exhaustiva de las fortalezas y debilidades de diferentes métodos de reducción de escala. Dentro de los estudios que consideran los impactos hidrológicos, todavía no se ha desarrollado lo suficiente la investigación aplicada, esto es, cómo se pueden utilizar mejor los resultados para permitir a las partes interesadas e instituciones tomar decisiones fundadas y sólidas sobre estrategias de adaptación y mitigación frente al clima cambiante futuro. Los métodos probabilísticos parecen ofrecer una forma más sólida de evaluar los impactos del cambio climático, pero aún se necesita mucha investigación sobre la mejor manera de aplicar dichos métodos para diferentes impactos y en diferentes lugares.

*Resumen de necesidades de investigación para la mejora de técnicas de reducción de escala en estudios regionales de cambio climático (adaptado de Leung et al. 2003a)*



A continuación, se presenta un resumen de necesidades de investigación para la mejora de técnicas de reducción de escala aplicadas a estudios de cambio climático. Aunque desde la fecha de publicación del trabajo de referencia se ha avanzado en aspectos específicos, conceptualmente sigue teniendo plena vigencia.

#### *Reducción de escala:*

- Necesidad de desarrollar parametrizaciones físicas para modelos climáticos globales o regionales con mayor resolución espacial. Dichas parametrizaciones pueden ser escalables para aplicaciones con diferentes resoluciones espaciales. Los modelos climáticos regionales pueden usarse como bancos de pruebas para tal desarrollo.
- Necesidad de profundizar en la realización de inter-comparaciones y diagnósticos coordinados de modelos (GCM, RCM y escalado estadístico). Esto requiere de una infraestructura para protocolos experimentales y participación comunitaria.
- Necesidad de mejorar la capacidad de proyección a escala regional. La variabilidad climática aumenta con la resolución espacial, pero tal vez solo hasta cierto punto. La capacidad de proyección regional debería aumentar o al menos ser similar a la capacidad de proyección a mayor escala en una determinada resolución regional.
- Necesidad de explorar diferentes formas de generar simulaciones de conjuntos de modelos regionales para mejorar la estimación de la incertidumbre.

#### *Evaluación y diagnóstico:*

- Necesidad de desarrollar más bases de datos observados regionales. La reducción de escala puede ser útil para llenar períodos de datos faltantes. Debe mejorarse la comunicación entre las comunidades centradas en el modelado y aquellas centradas en los datos.
- Las relaciones inter-variables, las estadísticas de orden superior (por ejemplo: frecuencia de extremos y variabilidad) y las tele-conexiones (relaciones y restricciones integrales entre escalas regionales y de gran escala) deben usarse con más frecuencia para medir la habilidad de las técnicas de reducción de escala.
- Evaluar la circulación es una forma alternativa de evaluar las variables de superficie. El clima a escala reducida en los modelos de proceso (p.e.: modelos hidrológicos) y las variables secundarias deben usarse con más frecuencia al evaluar las técnicas y el valor de reducción de escala.
- Se necesita documentar salidas con mayor frecuencia temporal para realizar una evaluación más detallada.

#### *Aplicaciones:*

- La información climática regional debe ser fácil de obtener, usar y validar.
- Para producir escenarios climáticos futuros más realistas para la evaluación de impacto, se necesita el uso de forzamientos realistas y una representación más completa de los componentes climáticos. La proyección regional de sistemas físicos y socioeconómicos complejos también es necesaria para una evaluación integrada.
- Necesidad de involucrar a las partes interesadas en la determinación de la resolución de la información climática regional requerida en diferentes evaluaciones de impacto.





#### Generalidades:

- Las evaluaciones de impacto en el pasado requerían acoplar modelos individuales, diagnósticos, análisis y estudios de evaluación con objetivos dispares. Es necesario sistemas coordinados de pronóstico de extremo a extremo para estudiar de forma integrada la evaluación de impacto.
- El pronóstico estacional es un marco útil para evaluar el valor agregado de la reducción de escala porque los resultados se pueden evaluar con observaciones. Los proyectos que utilizan varios enfoques para el pronóstico estacional pueden mostrar si la reducción de escala puede mejorar la precisión además de proporcionar un mayor detalle espacial. Tales experimentos podrían conducir a pronósticos estacionales para diversas aplicaciones. Las mejoras en los pronósticos estacionales utilizando el enfoque de super-ensemble demuestran el valor de utilizar tantos modelos como estén disponibles.
- Las agencias de financiación tienden a apoyar aplicaciones o proyectos piloto que producen pronósticos más que el desarrollo o la evaluación de modelos que se utilizan para hacer pronósticos. Se debería abordar este problema.
- Se ha demostrado que todas las técnicas de reducción de escala son válidas y producen resultados útiles. La investigación sobre los diversos métodos de reducción de escala debe continuar por caminos paralelos hasta el límite de disponibilidad de recursos.

### 4.3.2 Selección de métodos de reducción de escala

#### 4.3.2.1 Planteamiento general

Esta buena práctica se centra en la elección del método de escalado más apropiado para el análisis de impacto climático. Algunos autores mencionan que la principal dificultad del escalado no consiste en la ausencia de un método apropiado, sino más bien en el exceso de métodos. La elección del método de escalado puede modificar sustancialmente los resultados de los estudios de impacto, puesto que los métodos pueden dar valores inciertos e incluso contradictorios. La buena práctica seleccionada corresponde al trabajo "VALUE: Un marco de validación de los esquemas de reducción de escala para estudios de cambio climático", publicado por Douglas Maraun, Martin Widmann, José Manuel Gutiérrez, Sven Kotlarski, Richard E. Chandler, Elke Hertig, Joanna Wibig, Radan Huth y Renate A.I. Wilcke en 2015 en la revista *Earth's Future*. Las características básicas del trabajo se resumen en la

Tabla 15. En la buena práctica propuesta se analiza la metodología para comparar los distintos métodos de escalado que se pueden emplear en un estudio. En la metodología se sigue una línea de razonamiento centrada en el usuario que permite orientar el análisis según el tipo de problema de que se trate. Se emplea un árbol de validación que permite seleccionar un conjunto de índices y metodologías de validación. Se emplea una gran gama de índices que permiten valorar la distribución marginal y los aspectos espacial y temporal del escalado.

#### 4.3.2.2 Resumen del trabajo

VALUE es una red europea para validar y comparar métodos de reducción de escala aplicados a la investigación del cambio climático. VALUE tiene como objetivo fomentar la colaboración y el intercambio de conocimientos entre climatólogos, programadores de modelos de impacto climático, estadísticos y otras partes interesadas para establecer una comunidad multidisciplinaria que estudie los temas relacionados con la reducción de escala. Un producto clave de VALUE es el desarrollo de un marco de validación sistemático para permitir la evaluación y comparación de métodos de reducción de escala tanto dinámicos como estadísticos. En el trabajo de referencia se presentan los ingredientes clave de este marco. El enfoque principal de VALUE para la validación se centra en el usuario: a partir de un problema específico del usuario, un árbol de validación guía la selección de índices de validación relevantes y formas de cuantificar su rendimiento. Se han diseñado varios experimentos para estudiar puntos específicos en el procedimiento de reducción de escala donde pueden ocurrir problemas como: ¿Cuál es la habilidad de reducción de escala aislada? ¿Cómo se comparan los métodos estadísticos y dinámicos? ¿Cómo funcionan los métodos a diferentes escalas



espaciales? ¿Los métodos fallan al representar el cambio climático regional? ¿Cómo es la representación general del clima regional, incluidos los errores heredados de los modelos climáticos globales? El marco es la base para un estudio abierto e integral de inter-comparación de reducción de escala llevado a cabo por la comunidad, pero también pretende proporcionar una guía general para otros estudios de validación.

El esquema metodológico del trabajo se resume en la Ilustración 8. El punto de partida es el problema de análisis de impacto que pretende abordar el usuario. A partir del problema, se identifican los fenómenos climáticos que son relevantes para su estudio. Los aspectos relevantes de los fenómenos climáticos se clasifican en cuatro grandes grupos: marginal, temporal, espacial y multi-variable. Para cada grupo de aspectos se identifican los índices de comparación más apropiados. VALUE ofrece un amplio catálogo, que está abierto a nuevas contribuciones de usuarios. Finalmente, se seleccionan las medidas de desempeño que se emplearán para comparar los resultados del método de reducción de escala con las observaciones.

Ilustración 8: Esquema metodológico de la buena práctica





Tabla 15: Ficha de características básicas de la buena práctica

Concepto	Información básica
Título de la publicación	VALUE: A framework to validate downscaling approaches for climate change studies
Autores	Douglas Maraun, Martin Widmann, José Manuel Gutiérrez, Sven Kotlarski, Richard E. Chandler, Elke Hertig, Joanna Wibig, Radan Huth y Renate A.I. Wilcke
Año del estudio	2015
Publicación	Earth's Future, 3(1), 1-14. DOI:10.1002/2014EF000259
Enlace web	<a href="https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2014EF000259">https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2014EF000259</a> Artículo de acceso gratuito.
Alcance geográfico	Regiones de Europa que incluye: Noruega, España, Austria, Francia, Emilia-Romagna, y Polonia. Este estudio es resultado del proyecto europeo VALUE. No obstante, el enfoque presentado para la selección de métodos de reducción de escala es aplicable a cualquier región en el mundo, variando las fuentes de información disponibles.
Tipo de evento extremo	Sequías e inundaciones
Enfoque	Basado en simulaciones de modelos. Cabe señalar que los métodos de reducción de escala estadísticos también utilizan técnicas estadísticas para vincular los resultados de los modelos globales de clima con el clima local
Otros trabajos similares o complementarios	<i>Hertig, E., Maraun, D., Bartholy, J., Pongracz, R., Vrac, M., Mares, I., Gutiérrez, J.M., Wibig, J., Casanueva, A., Soares, P.M.M. (2019): Comparison of statistical downscaling methods with respect to extreme events over Europe: Validation results from the perfect predictor experiment of the COST Action VALUE. International Journal of Climatology 39(9) 3846-3867.</i> <i>Casanueva, A., Herrera, S., Fernández, J., Gutiérrez, J.M. (2016): Towards a fair comparison of statistical and dynamical downscaling in the framework of the EURO-CORDEX initiative. Climatic Change 137(43558) 411-426.</i>

#### 4.3.2.3 Datos y modelos empleados en el trabajo Datos empleados

Los datos empleados en las actividades de validación y comparación de métodos de escalado en el proyecto VALUE son los siguientes:

- *Precipitación y temperatura* (media, máxima y mínima): 1979-2008 (datos diarios). La base de datos European Climate Assessment-ECA (Klein Tank et al. 2002) proporciona una serie de observaciones diarias en estaciones meteorológicas en toda Europa y el Mediterráneo para una serie de variables. Los datos están disponibles gratuitamente para la investigación no comercial en miles de estaciones de precipitación y temperatura, con densidad variable según los países.



El número de estaciones para variables alternativas (por ejemplo, viento y cobertura de nubes) es bajo y la información está restringida a unos pocos países. En el estudio de referencia solo se utilizaron los datos de los países seleccionados que cubren el período 1979-2008 con menos del 5% de huecos. Se eligieron 85 series temporales de estaciones de alta calidad.

- *Precipitación y temperatura* (media, máxima y mínima): 1979-2008 (datos diarios). Datos en cuadrícula (resolución de 0.11°, aproximadamente 12 km). Disponible para las regiones de: Noruega, España, Austria, Francia, Emilia-Romagna, y Polonia. Fuente de información: base de datos E-OBS (Haylock et al. 2008). Esta fuente de datos está disponible en <http://www.value-cost.eu/data>.
- *Precipitación y temperatura* (media, máxima y mínima): 1979-2008 (datos diarios). Datos en cuadrícula (resolución de 0.11°, aproximadamente 12 km). Disponible para las regiones de: Noruega, España, Austria, Francia, Emilia-Romagna, y Polonia. Fuente de información: reanálisis ERA-Interim de un ensemble de modelos regionales de la iniciativa EURO-CORDEX (Kotlarski et al. 2014). Esta fuente de datos está disponible en <http://www.value-cost.eu/WG2/stationdataformat>.
- *Precipitación y temperatura*: 1979-2008 (sub-diaria). En este estudio sólo se utilizaron datos a escala sub-diaria en una estación disponible para Emilia-Romagna.

### **Modelos empleados**

Los modelos que se emplearon en el proyecto VALUE son de dos tipos: globales y regionales. Se utilizó un sub-set de conjuntos de modelos regionales de clima anidados en modelos globales. Los datos se tomaron de la iniciativa EURO-CORDEX con resolución espacial de aproximadamente 12 y 50 km (Jacob et al. 2014). Los experimentos de la iniciativa incluyen 45 simulaciones con una resolución de 12 km y 70 simulaciones con resolución 50 km. Un tercio del total está disponible en la Earth System Grid Federation archive, <http://esgf-data.dkrz.de>.

### **Variables de salida de la modelización**

Las variables que se producen como resultado de la reducción de escala en el proyecto VALUE son las siguientes:

*Precipitación y temperatura*: Series diarias de precipitación y temperatura en el período 1979-2008, en las 85 estaciones climáticas distribuidas por Europa.

### **Principales incertidumbres de los modelos utilizados:**

Del análisis de los métodos de reducción de escala realizado en el trabajo de referencia se pueden deducir los siguientes factores relacionados con la incertidumbre:

- *Incertidumbre epistemológica*, relacionada con el imperfecto conocimiento de los fenómenos o de su representación. Por ejemplo: la incertidumbre asociada a la nubosidad. La capacidad de cálculo limitada obliga a simular procesos con menor resolución que la deseada. Esto obliga a la parametrización del proceso, en lugar de representarlo mediante sus ecuaciones reales de comportamiento. Las diferentes parametrizaciones elegidas producen resultados diferentes. En ausencia de datos empíricos para la comparación, todos los resultados deben tratarse como proyecciones plausibles del clima futuro.
- *Incertidumbre ontológica*, relacionada con variabilidad y aleatoriedad del sistema climático. Incluye la sensibilidad del clima a las condiciones iniciales o la influencia que tienen las condiciones iniciales o de contorno utilizadas en la simulación.
- *Variabilidad entre modelos*. El diseño del modelo en todos los niveles es un proceso subjetivo. Se deben tomar decisiones sobre qué incluir en un modelo climático, qué excluir, qué parametrizar y cómo, y cada decisión introduce incertidumbre.



#### 4.3.2.4 Características destacadas

Las características que justifican que este estudio sea considerado una buena práctica en el sector son las siguientes:

- Este estudio se deriva de la cooperación de instituciones de toda Europa y utiliza protocolos de comparación y validación comunes, lo que permite la comparación de la aplicación de diferentes métodos de reducción de escala.
- Se materializa en un marco de validación sistemático para permitir la evaluación y comparación de métodos de reducción de escala tanto dinámicos como estadísticos.

#### 4.3.2.5 Descripción de técnicas específicas

*Procedimiento propuesto para la selección de los métodos de reducción de escala (basado en Maraun et al. 2015)*

El sistema climático es muy complejo y los modelos o métodos de reducción de escala, como representaciones simplificadas de la realidad, no son capaces de reproducir todos los aspectos del sistema a la perfección. Un enfoque de validación centrado en el usuario debe comenzar por identificar los fenómenos y las escalas de interés: La validación pretende identificar las fortalezas y debilidades clave de cada método. Para una aplicación dada, tiene que aconsejar si un método funciona bien o incluso mejor que otros métodos, y dónde es probable que falle. De esta manera, los usuarios pueden determinar si un método en particular es apropiado para su aplicación, y pueden comparar métodos.

Los detalles dependerán de la aplicación y el enfoque de validación más útil para los fines del usuario. No obstante, se pueden formular algunos requisitos generales para una comparación integral centrada en el usuario de los métodos de reducción de escala para estudios de cambio climático. Por lo tanto, el marco de validación debe: (1) Ser transparente y proporcionar orientación relevante y defendible para los usuarios; (2) Evaluar el desempeño del método en un entorno de cambio climático; (3) Permitir, en principio, una comparación de todos los tipos diferentes de métodos dinámicos y estadísticos de reducción de escala.

El primer requisito implica que los cálculos realizados sean lo más simples posible, con una documentación clara del modelo considerado y del procedimiento de validación. Además, exige datos de referencia de observación fácilmente disponibles y de alta calidad. El segundo requisito implica una evaluación de si un método captura correctamente la variabilidad a largo plazo, en particular la respuesta a los cambios en el forzamiento externo. El tercer requisito tiene básicamente dos implicaciones. La primera es que no todos los fenómenos simulados por modelos regionales se pueden validar. La segunda es que la validación está restringida a los fenómenos que se representan por modelos estadísticos típicos de reducción de escala. Por lo tanto, aunque es muy importante para mejorar nuestra comprensión y desarrollar modelos climáticos mejorados, la validación de procesos físicos específicos dentro de los modelos regionales de clima no forma parte del marco de validación de VALUE. Además, restringe la elección de medidas de rendimiento de los métodos. Por ejemplo, muchos métodos de reducción de escala estocásticos proporcionan funciones de densidad de probabilidad variables en el tiempo de un pronóstico local; estos archivos podrían validarse utilizando medidas sofisticadas que se han desarrollado para evaluar la habilidad de los pronósticos meteorológicos probabilísticos (Jolliffe y Stephenson 2003). Sin embargo, estas medidas no son fácilmente aplicables a los modelos regionales y los métodos deterministas de reducción de escala estadística, que proporcionan un solo campo o secuencia a escala reducida para una ejecución de modelo global dada. Los métodos estocásticos permiten el muestreo aleatorio de múltiples series de tiempo, que pueden manejarse como un conjunto de campos con reducción de escala determinística. El enfoque de VALUE se basa únicamente en medidas que son aplicables a la producción determinista.

El marco de validación tiene dos propósitos. Primero, VALUE lo plantea para llevar a cabo un estudio integral de comparación. Este ejercicio está abierto a la comunidad científica. Cada desarrollador y usuario de un método de reducción de escala puede contribuir al estudio siguiendo el procedimiento que se detalla a continuación y poniendo a disposición los resultados del ejercicio de reducción de escala en la página web de VALUE. Sin embargo, independientemente de la implementación



específica de VALUE, el alcance de VALUE pretende ser también una guía para otros estudios de validación, por ejemplo, en regiones y para variables diferentes a las consideradas por VALUE. Como el marco completo es bastante complejo, la implementación se divide en tres niveles que se llevan a cabo sucesivamente.

- El Nivel I comprende los experimentos y aspectos esenciales de la validación que deben considerarse en cualquier ejercicio de validación.
- El Nivel II aborda escalas de tiempo sub-diarias, así como la dependencia espacial y otros aspectos inter-variables. Estos pueden ser necesarios en aplicaciones más específicas, y no todos los métodos de reducción de escala están diseñados para reproducirlos. Además, el nivel II cubre la validación en una pseudo realidad: Las futuras simulaciones del modelo climático se utilizan como banco de pruebas para los métodos de reducción de escala.
- El Nivel III evalúa el rendimiento general, incluidos los errores de modelos globales de clima.

El núcleo del enfoque de este procedimiento de validación centrado en el usuario es un árbol de validación para seleccionar los índices de validación apropiados. La validación en sí está organizada en experimentos específicos para aislar diferentes aspectos de la representación del clima regional. Las observaciones de referencia cubren tanto datos en la estación de medición como datos de cuadrícula en diferentes climas europeos. Los datos diarios se complementan con una selección de datos sub-diarios para validar métodos de reducción de escala sub-diarios. Se utilizan datos de pseudo-realidad para evaluar el desempeño de métodos estadísticos en diferentes climas.

### Árbol de validación

En última instancia, la validación consiste en derivar índices climáticos del resultado del modelo, comparar estos índices con índices de referencia calculados a partir de datos de observación y cuantificar las diferencias a través de la medición del rendimiento (se utiliza el término "índice" de una manera muy general, que incluye no solo números individuales, sino también vectores como son las series de tiempo). A menudo, a pesar de aplicar un modelo de reducción de escala atendiendo a la solución de un problema específico del usuario, se han validado aspectos poco relevantes del mismo de cara al problema planteado. Por ejemplo, en ocasiones se ha utilizado el percentil 95 de precipitación diaria como índice de frecuencia de precipitación extrema, a pesar de que los eventos correspondientes a dicho percentil ocurren cada 20 días húmedos y no representan en absoluto las precipitaciones extraordinarias que dan lugar a las inundaciones.

Para guiar la selección de índices relevantes para diferentes problemas del usuario, VALUE ha desarrollado un árbol de decisión para la selección de índices relevantes y medidas de desempeño o rendimiento. Desde la perspectiva del usuario, se comenzaría eligiendo fenómenos relevantes para el problema en consideración. Los fenómenos pueden ser, por ejemplo, eventos de lluvia extrema, periodo de crecimiento de la vegetación u olas de calor. Se debe tener en cuenta que estos fenómenos pueden ser compuestos. En el siguiente paso, se consideraría el sistema climático como una distribución multivariada que tiene aspectos marginales, temporales, espaciales e inter-variables. Entonces se preguntaría cuáles de estos aspectos están involucrados en los fenómenos considerados. Por ejemplo, la validación de extremos puede involucrar aspectos marginales como la intensidad, aspectos temporales como la estacionalidad o la longitud de los periodos extremos, o aspectos espaciales como la extensión de un evento. En el tercer paso, se seleccionarían índices para cuantificar los aspectos considerados. Finalmente, se seleccionarían medidas de rendimiento apropiadas, como sesgos o puntuación por habilidad ("*skill scores*"), para comparar los índices derivados de los datos del modelo con los de las observaciones.

Como ejemplo de problema definido por el usuario, se podría considerar la construcción de una nueva presa hidroeléctrica. Para informar en la etapa de diseño del aprovechamiento sobre posibles condiciones climáticas futuras, la salida escalada del modelo climático se utilizaría como entrada a un modelo hidrológico que simule las aportaciones al embalse. El fenómeno meteorológico de interés para la estimación del potencial de energía promedio generado por el aprovechamiento sería la precipitación. Para diseñar el aliviadero, no solo son relevantes las precipitaciones medias sino





también los eventos extremos de precipitación y sus condiciones antecedentes. Finalmente, el riesgo de que el embalse se vacíe es relevante, lo que índice a estudiar el riesgo de sequía. En consecuencia, los aspectos marginales relevantes son la precipitación media y extrema.

El desempeño de un modelo para representar estos índices se mediría según el sesgo o errores relativos entre índices simulados y observados. En el sitio web de VALUE ([www.value-cost.eu/indices](http://www.value-cost.eu/indices)) está disponible una lista de índices y sus correspondientes medidas de rendimiento. Esta lista se actualiza continuamente. La Tabla 16 muestra una lista con ejemplos de índices.

Tabla 16: Ejemplos de índices con su correspondiente medida para evaluar la habilidad de simulación.

Aspecto	Índice	Medida de rendimiento/bondad
Marginal	Media	Sesgo/Error relativo
	Varianza	Error relativo
	Período de retorno de 20 años	Sesgo/Error relativo
	Números de valores que exceden un umbral	Sesgo
Temporal	Series temporales	Error cuadrático medio/Correlación
	Mediana de la distribución de la longitud del período	Sesgo
	Percentil 90% de la distribución de la longitud del período	Sesgo
	Mínimo/Máximo del ciclo anual	Sesgo/Error relativo
Espacial	Longitud de la correlación	Error relativo
	Rango del variograma	Error relativo
	Longitud de decaimiento de la dependencia marginal	Error relativo
Multi-variable	Correlación de Pearson/Rank	No aplica
	Probabilidad conjunta de excedencias	No aplica
	Índices condicionados de (no) excedencia	Sesgo/Error relativo

Fuente: Maraun et al. 2015.

### 4.3.3 Técnicas de corrección de sesgo

#### 4.3.3.1 Planteamiento general

El sesgo es la discrepancia sistemática entre las observaciones y los resultados de los modelos climáticos aplicados al periodo histórico. La mayor parte de los modelos climáticos presentan un sesgo muy importante, que dificulta singularmente el análisis de los impactos a partir de las proyecciones. En el caso de los modelos hidrológicos, las variables básicas de partida son la precipitación y la temperatura. La naturaleza no lineal del proceso de transformación de lluvia en escorrentía hace que el sesgo de la variable de partida se pueda amplificar cuando se analizan caudales. La precipitación suele presentar un sesgo mayor que la temperatura, por lo que los estudios de corrección de sesgo de precipitaciones resultan muy interesantes. Se han propuesto varios métodos de corrección de sesgo, que van desde un simple escalado de las variables hasta enfoques muy sofisticados. Todos ellos resultan efectivos para corregir la media de las variables. La clave para la elección del método más apropiado en el estudio de extremos hidrológicos es el análisis de otras características observadas en las series de precipitación y temperatura, como la desviación típica o los percentiles.



La buena práctica seleccionada corresponde al trabajo “Mejora de la simulación de fenómenos hidrológicos extremos en Europa mediante corrección estadística de sesgo en simulaciones climáticas de modelos regionales de clima”, publicado por Rodrigo Rojas, Luc Feyen, Alessandro Dosio y Davide Bavera en 2011 en la revista *Hydrology and Earth System Sciences*. Las características básicas del trabajo se resumen en la Tabla 17. En esta buena práctica se describe cómo debe abordarse la tarea de corrección del sesgo de precipitación y temperatura para su aplicación en modelos hidrológicos de impacto. En la práctica se desarrolla el método de “ecualización del histograma”, en el que se plantea que la variable corregida es función de la variable original. La función de transferencia se define de forma que se ajusten los histogramas de frecuencias de las variables observada y corregida.

#### 4.3.3.2 Resumen del trabajo

En el trabajo de referencia se evalúa el beneficio de eliminar el sesgo en los datos de forzamiento climático utilizados para la evaluación del impacto del cambio climático en la hidrología a escala paneuropea, con énfasis en las inundaciones. Se corrige el sesgo presente en las simulaciones climáticas del modelo regional de clima HIRHAM5 forzado por el modelo global de clima ECHAM5 bajo el escenario de emisiones SRES-A1B, utilizando un método de ecualización de histograma. Para la corrección del sesgo, se emplean las observaciones interpoladas en cuadrícula de precipitación, temperatura media, mínima y máxima obtenidas de la base de datos E-OBS. Las funciones de transferencia para la eliminación del sesgo se obtienen para el período de control 1961–1990. Posteriormente, se utilizan para corregir las simulaciones climáticas para el período de control y, bajo el supuesto de un modelo de error estacionario, para el periodo futuro 2071–2100. La validación se ha realizado en 554 estaciones de aforo distribuidas en Europa, y muestra que, comparando las simulaciones con la climatología de E-OBS en el período de control, el método de corrección funciona adecuadamente al eliminar el sesgo en las estadísticas medias y extremas relevantes para la simulación de inundaciones. Las probabilidades de ocurrencia de eventos extremos derivados del empleo de técnicas de valores extremos también se reproducen con mayor exactitud. Los resultados indican que las proyecciones de riesgos futuros de inundación en Europa basadas en simulaciones climáticas no corregidas, tanto en términos de su magnitud como del intervalo de recurrencia, probablemente estén sujetas a grandes errores. A pesar de las limitaciones inherentes al enfoque a gran escala utilizado en este trabajo, se recomienda la eliminación del sesgo en las simulaciones climáticas antes de su uso en la evaluación del impacto hidrológico.

La metodología de trabajo que se sigue en esta buena práctica se representa esquemáticamente en la Ilustración 9. En primer lugar, se recopila la información que se analizará. En el estudio de referencia, se trabaja con las simulaciones del modelo HIRHAM5-ECHAM5, con datos de precipitación, temperatura, caudales, evapotranspiración y espesor de nieve. El bloque central consiste en la corrección del sesgo, que se puede aplicar a las variables climáticas (precipitación y temperatura) o directamente a la escorrentía (caudal). En el primer caso, las variables climáticas con el sesgo corregido se emplean posteriormente como dato de entrada para un modelo hidrológico, que proporciona los valores de caudal sobre los que se analizan los extremos. En el segundo caso, el análisis se realiza directamente sobre los resultados de escorrentía de los modelos climáticos. En ambos casos se sigue el mismo procedimiento general: se determina el procedimiento de corrección de sesgo a emplear y se definen los estadísticos sobre los que se aplica la corrección de sesgo. Estos estadísticos deben ser apropiados para el análisis de impacto que se piensa realizar. En el caso de eventos hidrológicos extremos, el interés se centra en las colas de las leyes de distribución. El ajuste de los estadísticos sobre las series observadas permite estimar los parámetros del método de corrección de sesgo, que luego se aplica a las series proyectadas. A continuación, se realiza el análisis de impacto sobre el sector de interés mediante el modelo apropiado. En el trabajo de referencia, el impacto sobre las crecidas se analiza mediante un modelo hidrológico de gran escala. Una vez obtenidas las series hidrológicas, se pueden extraer conclusiones relevantes para el estudio.



Ilustración 9: Esquema metodológico de la buena práctica

## Recopilación y análisis de información

- Identificación de información climática y de aforos histórica. Completado y control de calidad de las series recopiladas
- Recopilación y análisis de modelos GCM y RCM
- Selección de los periodos de análisis
- Recopilación de información necesaria para los modelos hidrológicos



### Corrección del sesgo de variables climáticas

- Selección del procedimiento de corrección de sesgo
- En general se corrige la variable de precipitación y temperatura en el período histórico
- Se suele corregir algunos estadísticos de las series a escala anual, estacional o mensual, por ejemplo:
  - Precipitación media anual
  - Coeficiente de variación de las series
  - Máxima precipitación anual de 3 días, 5 días y 7 días
  - Percentil 99% de precipitación
  - Precipitación y temperatura media (máxima, mínima) estacional
  - Número de días sin precipitación
- Asumiendo el sesgo invariante en el tiempo, se corrigen las proyecciones climáticas aplicando las mismas funciones de transformación que se obtuvieron para corregir el sesgo de las series simuladas respecto a las observadas en el período histórico o de control



### Corrección del sesgo de series de caudales

- Selección del procedimiento de corrección de sesgo
- En general se corrige las series de caudales simuladas en el período histórico
- Se suele corregir algunos estadísticos de las series a escala anual, estacional o mensual, por ejemplo:
  - Valores medios de escorrentía de las series
  - Coeficiente de variación de las series
  - Variabilidad estacional de las series
- Asumiendo el sesgo invariante en el tiempo, se corrigen las proyecciones de caudales aplicando la mismas correcciones de sesgo (p.e.: método delta) que se obtuvieron para corregir el sesgo de las series simuladas respecto a las observadas en el período histórico o de control



### Modelación Hidrológica

- Selección de modelo/s hidrológico/s en base al objetivo e información disponible
- Calibración del modelo hidrológico en el período histórico utilizando los datos climáticos con su sesgo ya corregido
- Estimación de series de aportaciones futuras utilizando el modelo hidrológico calibrado y las proyecciones climáticas con la corrección de sesgo utilizada para la serie histórica. Estudio de alternativas de mitigación y adaptación al cambio climático



Tabla 17: Ficha de características básicas de la buena práctica

Concepto	Información básica
Título de la publicación	Improving pan-European hydrological simulation of extreme events through statistical bias correction of RCM-driven climate simulations
Autores	Rodrigo Rojas, Luc Feyen, Alessandro Dosio, Davide Bavera
Año del estudio	2011
Publicación	Hydrology and Earth System Sciences, 15(8), 2599-2620. DOI: <a href="https://doi.org/10.5194/hess-15-2599-2011">https://doi.org/10.5194/hess-15-2599-2011</a> .
Enlace web	<a href="https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/15/2599/2011/hess-15-2599-2011.html">https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/15/2599/2011/hess-15-2599-2011.html</a> Artículo de acceso gratuito.
Alcance geográfico	Europa. Incluye leyes de frecuencia para 20 estaciones de aforo.
Tipo de evento extremo	El trabajo está orientado a inundaciones. No obstante, el planteamiento metodológico es aplicable también a sequías
Enfoque	Basado en análisis de las simulaciones de modelos
Otros trabajos similares o complementarios	Piani, C., Weedon, G., Best, M., Gomes, S., Viterbo, P., Hagemann, S., Haerter, J. (2010): Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models, J. Hydrol., 395, 199–215.  Teutschbein, C., Seibert, J. (2012): Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. Journal of Hydrology 456–457, 12–29.

#### 4.3.3.3 Datos y modelos empleados en el trabajo Datos empleados

Los datos históricos utilizados se obtuvieron de distintas fuentes de información. Los datos analizados fueron los siguientes:

- *Precipitación*: 1950–2006 (datos diarios). Fuente de la información: base de datos E-OBS (Haylock et al. 2008), que contiene datos en cuadrícula de todo el territorio europeo, con un tamaño de celda de 0.25°.
- *Temperatura*: 1950–2006 (datos mensuales: mínima, máxima y media). Fuente de la información: E-OBS.
- *Información meteorológica*: 1961-1990 (datos diarios). Incluye radiación solar, albedo, punto de rocío, humedad, velocidad de viento. Fuente de información: base de datos MARS-Meteorological Archiving and Retrieving System (Rijks et al. 1998), con tamaño de celda de 5 km.
- *Caudales*: Series de al menos 24 años en el periodo 1961-1990 (datos diarios), en 554 estaciones de aforo distribuidas por Europa.



- *Propiedades del suelo*: Fuente de información: European Soil Geographical Database (King et al. 1994). Porosidad, conductividad hidráulica en suelo saturado y capacidad de almacenamiento del suelo para diferentes clases texturales se obtuvo de la base de datos HYPRES (Wösten et al. 1999).
- *Propiedades de la vegetación y cobertura de suelo*: Fuente de información: Base de datos CORINE2000 (EEA 2002).
- *Información topográfica y propiedades de los cursos de agua*: Fuente de información: Catchment Information System (Hiederer y de Roo 2003).

En el horizonte futuro se analizaron proyecciones de precipitación y temperatura en el periodo 1961-1990 y 2071-2100. Proyecciones tomadas del proyecto FP6 ENSEMBLES (<http://ensemblesrt3.dmi.dk/>). Se combina el modelo global de clima ECHAM5 con el modelo regional de clima HIRHAM5 con una resolución de 0.25°. Se aplicó el escenario de emisión SRES-A1B del "Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)" (Nakicenovic y Swart 2000).

### **Modelos empleados**

Los modelos climáticos empleados fueron el modelo global de clima ECHAM5 y el modelo regional de clima HIRHAM5. Estos modelos se analizaron en el escenario de emisiones SRES-A1B. Este es un escenario relativamente antiguo. En estudios futuros es aconsejable el uso de escenarios climáticos más recientes. Por ejemplo, los de la familia RCP. El modelo hidrológico empleado fue LISFLOOD (Van der Knijff et al. 2010), con un tamaño de celda de 5 km. Para la corrección de sesgo se aplicó el método estadístico denominado "ecualización del histograma" (Piani et al. 2010b).

### **Variables de salida de la modelización**

Las variables analizadas en la modelación climática fueron la precipitación y la temperatura. A continuación, se detallan los estadísticos procesados.

Para la precipitación se consideraron series de 30 años con paso diario (presente y futuro). Se compararon diferentes estadísticos entre las series observadas, las series originales del modelo regional de clima y las series con la corrección de sesgo realizada. Los estadísticos comparados son:

- Precipitación media anual
- Media de la precipitación máxima anual
- Máxima precipitación anual de 3 días, 5 días y 7 días
- Percentil 99% de precipitación
- Precipitación media estacional (4 estaciones)
- Promedio anual de días húmedos (precipitación  $\geq 1$  mm/día)

Para la temperatura se consideraron series de 30 años con paso diario (presente y futuro). Se empleó el mismo procedimiento que para precipitación. Los estadísticos comparados son:

- Temperatura media diaria
- Media de la temperatura máxima diaria
- Media de la temperatura máxima en cada estación (4 estaciones)
- Media de la temperatura mínima en cada estación (4 estaciones)

El modelo hidrológico LISFLOOD obtiene series de escorrentía diaria distribuida (cuadrícula de 5 x 5 km) tanto para el escenario de control (1961-1990) como para el escenario futuro analizado (2071-2100). Al igual que para las variables climáticas, se comparan diferentes estadísticos, resultado de



los modelos hidrológicos forzados según las series observadas, las series originales del modelo regional de clima y las series con la corrección de sesgo realizada. Los estadísticos comparados son:

- Caudal medio (se compara en 554 estaciones de aforos)
- Media del caudal máximo anual (554 estaciones)
- Ley de frecuencia de caudales máximos anuales (ajustadas según la función de distribución de Gumbel)

Asimismo, se calcularon otras variables hidrometeorológicas derivadas, como la evapotranspiración, el espesor de nieve y días con nieve en superficie.

#### ***Principales incertidumbres de los modelos utilizados:***

El análisis se basó en los resultados de dos modelos climáticos, uno global y otro regional, y un modelo hidrológico de gran escala. Por tanto, está sujeto a las fuentes de incertidumbre ya enunciadas al tratar las anteriores prácticas relacionadas con la modelación climática e hidrológica. Entre las fuentes de incertidumbre asociadas a las operaciones de corrección de sesgo se pueden citar las siguientes:

- Se asume estacionariedad en el sesgo, esto es, que la forma de la función de transferencia y sus parámetros asociados son invariables con el tiempo. Como resultado, se supone que la función de transferencia estimada para las condiciones climáticas actuales sigue siendo válida para corregir sesgos en simulaciones climáticas futuras. Como lo destaca Christensen et al. (2008), el supuesto de estacionariedad podría violarse ya que los sesgos pueden crecer en condiciones de cambio climático y dependen de los valores de las variables a corregir.
- Aunque las simulaciones se realizan a escala diaria, la evaluación de la corrección del sesgo se suele realizar en base a estadísticos agregados mensuales o anuales. Existe una incertidumbre sobre el error o incertidumbre asociados al sesgo que se puede producir a escala diaria.
- La corrección de sesgo se realiza ajustando un conjunto de parámetros mediante la comparación de los resultados de simulación con las observaciones. Es una técnica que depende de un elevado número de parámetros, especialmente si se admite una variación espacial de parámetros para ajustarse a condiciones locales. Por este motivo, muchos investigadores cuestionan que pueda tener capacidad predictiva, por estar sobre-parametrizada.
- Existen muchos métodos de corrección de sesgo y el resultado depende del método seleccionado.

#### ***4.3.3.4 Características destacadas***

Las características que justifican que este estudio sea considerado una buena práctica en el sector son las siguientes:

- Se presenta un procedimiento completo para la obtención de series diarias de caudales a partir de modelos climáticos. Se trata de un trabajo que ilustra muy bien la secuencia de operaciones necesaria para enlazar un modelo global, uno regional y un modelo hidrológico de gran escala para realizar un estudio de impacto. Esta cadena de modelación se aplica a un ámbito territorial extenso, que permite obtener resultados para España y encuadrarlos en su contexto regional.
- Ilustra el empleo de una técnica de corrección de sesgo, basada en la comparación de histogramas, que está específicamente concebida para el análisis de extremos. Se realiza una aplicación al caso de las crecidas, donde se estudian distintos aspectos del régimen de caudales máximos.
- Se presentan mapas europeos de resultados de distintos estadísticos relacionados con las crecidas: precipitación media estacional, frecuencia de días húmedos, precipitación correspondiente al percentil 99, precipitación de los 5 días más húmedos, temperatura media, temperatura máxima y mínima, evapotranspiración, espesor de nieve, caudal de 100 años de periodo de retorno y leyes de frecuencia en 20 estaciones de aforo.





- Realiza una comparación muy ilustrativa de los errores que se pueden cometer si no se realiza la operación de corrección de sesgo, en particular con relación al caudal de 100 años de periodo de retorno.
- La metodología de corrección de sesgo expuesta, además de ser útil para estimar el impacto del cambio climático en crecidas, es aplicable para la estimación del impacto en las sequías, calculando períodos de retorno de las sequías en diferentes regiones, como se ilustra en Naumann et al. (2018).

#### 4.3.3.5 Descripción de técnicas específicas

*Procedimiento estadístico para corrección del sesgo de precipitación y temperatura: método de "ecualización de histograma" (basado en Piani et al. 2010a, b)*

El método de corrección de sesgo empleado en la publicación de referencia se denomina "ecualización de histograma" y se describe en detalle en Piani et al. (2010a, b). En esta técnica, la variable corregida ( $x_{cor}$ ) es una función de su correspondiente simulada ( $x_{sim}$ ) y viene dada por  $x_{cor} = f(x_{sim})$ . La función  $f$ , denominada "función de transferencia", se define de manera tal que coincidan los histogramas de intensidad de las variables corregidas ( $x_{cor}$ ) y observadas ( $x_{obs}$ ). La función  $f$  se obtiene estimando el valor acumulado de las funciones de distribución de probabilidad ( $cdf$ ) de  $x_{obs}$  y  $x_{sim}$  y, posteriormente, asociando a cada valor de  $x_{sim}$  el valor de  $x_{obs}$  tal que  $cdf_{sim}(x_{sim}) = cdf_{obs}(x_{obs})$  (Piani et al. 2010a). Según Piani et al. (2010b), se utilizan dos formas funcionales para realizar la corrección de sesgo de precipitación a nivel de celda de cuadrícula,

$$x_{cor} = a + bx_{sim} \quad \text{Ec.1}$$

$$x_{cor} = (a + bx_{sim}) * \left(1 - e^{-\frac{(x_{sim}-x_0)}{\tau}}\right) \quad \text{Ec.2}$$

donde  $a$ ,  $b$ ,  $x_0$  y  $\tau$  son parámetros de la función que se va a ajustar. En la Ec.1 (caso lineal),  $a$  corresponde a un factor de corrección aditivo mientras que  $b$  es un factor multiplicativo. Piani et al. (2010b) sugieren que en algunas regiones la función de transferencia está bien aproximada por una función lineal para intensidades de valores elevados, pero se produce un cambio sistemático de pendiente para valores de intensidad más bajos. Por ello, sugieren la Ec.2, que representa una tendencia exponencial a una asíntota. Aquí, la asíntota está dada por el factor lineal ( $a + bx_{sim}$ ), mientras que  $\tau$  define la velocidad a la que se acerca a la asíntota y  $x_0$  es el valor del factor de "corrección del día seco" (valor de precipitación por debajo del cual  $x_{sim}$  se considera 0), definido aquí como  $-a/b$ . Además de las Ecs.1 y 2, Piani et al. (2010b) también propuso un ajuste logarítmico, que sin embargo resultó ser menos adecuado debido a errores de ajuste. De un análisis global, Piani et al. (2010b) concluyó que estas dos funciones podrían resolver de forma razonable la corrección de las simulaciones climáticas; y por lo general se observa poca mejora al pasar de una función de dos parámetros (Ec.1) a una función de cuatro parámetros (Ec.2). Sin embargo, se observó que cuando los errores de ajuste eran altos aplicando la Ec.1, la Ec.2 se comportó mejor. Como consecuencia, en la mayoría de los casos se usa el modelo lineal, recurriendo a la Ec.2 cuando el rendimiento del modelo lineal no es satisfactorio.

Para realizar la corrección de sesgo de precipitación, se seleccionan series de valores diarios simulados y observados dentro de un "período de construcción" ( $Y$ ), de longitud  $n$  años para cada mes  $m$  para cada celda de la cuadrícula. Es decir,  $x_{sim}^m(x_{obs}^m)$  para el mes  $m$  ( $m = 1 \dots 12$ ) está dado por  $\{x_{sim}^m(x_{obs}^m): x \in Y_{i,m}; i = 1, \dots, n\}$  (en aras de la claridad, se ha ignorado el índice espacial). Posteriormente, la Ec.1 o la Ec.2 se ajusta usando  $x_{sim}^m$  y  $x_{obs}^m$  y se obtienen funciones de transferencia de corrección mensuales para cada celda de la cuadrícula.

Los valores de precipitación diaria se obtienen al interpolar las funciones de transferencia mensual en funciones de transferencia diaria, utilizando como punto de referencia el día medio de cada mes. Cuando las funciones de transferencia estimadas para dos meses consecutivos son de tipo lineal o exponencial, las funciones de transferencia diaria se obtienen mediante una interpolación lineal de los parámetros de ambas funciones de transferencia mensuales. Por el contrario, cuando las funciones de transferencia mensuales son de un tipo diferente, se implementa un esquema de



interpolación que conserva las características de las funciones de transferencia de tipo lineal y exponencial. Una descripción detallada de este esquema de interpolación se presenta en Piani et al. (2010b). Siguiendo a Piani et al. (2010b), sólo se consideran los días húmedos (días con más de 1 mm de precipitación) para realizar el ajuste de una de las dos funciones de transferencia propuestas. El ajuste se realiza aplicando el procedimiento ordinario de mínimos cuadrados (OLS) o mínimos cuadrados no lineales (NLS), respectivamente. Si el número de días húmedos es inferior a 20 en el registro observado, o si el valor medio de precipitación observado es inferior a 0.01 mm/día, se aplica un factor de corrección aditivo simple igual a la diferencia en las medias entre las series simuladas y observadas. A su vez, si el número de días húmedos es mayor que 20, y el valor medio de precipitación observado es mayor que 0.01 mm/día, se ajusta con la función de transferencia lineal (Ec.1). La función de transferencia de tipo exponencial (Ec.2) se selecciona para realizar la corrección de sesgo en dos supuestos. Primero, si para el ajuste lineal se obtiene  $a > 0$ . Esto se interpreta como que la precipitación corregida es siempre mayor o igual que cero ( $x_{cor} \geq 0$ ), o sea, ignorando completamente los días secos. Segundo, cuando para el factor multiplicativo (pendiente de la Ec.1) resulta un valor extremo, con valores que arbitrariamente se definen en el rango:  $b < 0.2$  o  $b > 5$ .

Para ajustar las funciones de transferencia lineal mensuales de la temperatura, se emplean series de temperaturas diarias observadas y simuladas (media, máxima y mínima) dentro de un "período de construcción" para cada mes. Piani et al. (2010b) sugieren que la corrección independiente de la temperatura media, máxima y mínima da como resultado grandes errores relativos en el rango de temperatura diaria ( $T_{max} - T_{min}$ ) y en la asimetría  $(T_{med} - T_{min}) / (T_{max} - T_{min})$  de las series corregidas. Por esa razón, el ajuste de las funciones de transferencia lineal mensuales se realiza en la media ( $T_{med}$ ), el rango de temperatura ( $T_{rg}$ ) y el sesgo de temperatura ( $T_{sk}$ ). Posteriormente, las funciones de transferencia diaria se obtienen mediante una interpolación lineal ponderada de los parámetros de las funciones de transferencia lineal mensual contribuyentes para cada variable  $T_{med}$ ,  $T_{rg}$  y  $T_{sk}$ . Usando las funciones de transferencia diaria, la temperatura media corregida (media de  $T_{mean}^c$ ) se obtiene directamente, mientras que las temperaturas mínimas y máximas se obtienen de los valores corregidos diariamente de  $T_{rg}^c$  y  $T_{sk}^c$  como:  $T_{min}^c = T_{med}^c - T_{rg}^c * T_{sk}^c$  y  $T_{max}^c = T_{med}^c + T_{rg}^c * (1 - T_{sk}^c)$ , respectivamente.

En la publicación de referencia (Rojas et al. 2011), dada la disponibilidad de datos observados (distribuidos en cuadrícula) para la precipitación diaria, temperatura promedio, máxima y mínima en el conjunto de datos E-OBS, la corrección de sesgo se realizó para estas cuatro variables. Como "período de construcción" para construir las funciones de transferencia, se seleccionó el período de control 1961–1990, es decir, 30 años de datos diarios. Se emplearon dos series para cada mes, los valores observados del conjunto de datos E-OBS y los valores simulados del modelo climático HIRHAM5-ECHAM5. Las funciones de transferencia obtenidas en este período se aplicaron a las simulaciones climáticas de control (1961–1990) y futuro (2071–2100) del modelo HIRHAM5-ECHAM5. Cabe señalar que se asume la estacionariedad, lo que significa que la forma correspondiente de la función de transferencia y sus parámetros asociados son invariables con el tiempo. Como resultado, se supone que la función de transferencia estimada para las condiciones climáticas actuales sigue siendo válida para corregir sesgos en simulaciones de clima futuro. Sin embargo, Christensen et al. (2008) destaca que el supuesto de estacionariedad podría no cumplirse ya que los sesgos pueden crecer en condiciones de cambio climático y dependen de los valores de las variables a corregir.

#### 4.3.4 Caracterización de la incertidumbre de los conjuntos de simulaciones

##### 4.3.4.1 Planteamiento general

Los estudios de impacto climático se basan en una cadena de modelación en la que se va acumulando la incertidumbre. Al menos, se consideran tres pasos: (1) los escenarios de emisiones, que determinan el ritmo de acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera; (2) los modelos globales del clima, que calculan el efecto de la concentración de dichos gases sobre la circulación atmosférica y el clima; y (3) los modelos hidrológicos, que traducen las variables climáticas a variables hidrológicas. Cada uno de estos pasos introduce incertidumbre en el análisis. Inicialmente,



los estudios de impacto climático se basaban en un número reducido de opciones, debido a las limitaciones computacionales. Recientemente se ha generalizado la práctica de modelar exhaustivamente todo el conjunto de opciones, facilitado por la automatización de los procesos y por la mejora significativa en la capacidad de cálculo. Si se consideran conjuntamente todas las opciones analizadas, se obtiene una gran variedad de resultados. Esto dificulta la toma de decisión y requiere de la aplicación de procedimientos que permitan caracterizar la incertidumbre asociada a cada uno de los pasos. La buena práctica seleccionada corresponde al trabajo "Evaluación de fuentes de incertidumbre en los cambios hidrológicos proyectados bajo cambio climático en 12 cuencas fluviales de gran tamaño", publicado por Tobias Vetter, Julia Reinhardt, Martina Flörke, Ann van Griensven, Fred Hattermann, Shaochun Huang, Hagen Koch, Ilias G. Pechlivanidis, Stefan Plötner, Ousmane Seidou, Buda Su, R. Willem Vervoort y Valentina Krysanova en 2017 en la revista *Climatic Change*. Las características básicas del trabajo se resumen en la Tabla 18. En la buena práctica propuesta se describe un procedimiento para caracterizar las fuentes de incertidumbre en un conjunto grande de hipótesis de cálculo. Se emplea el análisis de la varianza para cuantificar las incertidumbres procedentes de distintas fuentes y sus interacciones recíprocas. Se analizan varios modelos globales del clima, varios escenarios de emisiones y varios modelos hidrológicos regionales en cuencas hidrográficas con climas diferentes. El estudio se centró en el análisis de los caudales medios y extremos. Los resultados se presentan en forma de diagramas ternarios, que ponen de manifiesto el peso de la incertidumbre de los tres pasos analizados.

#### 4.3.4.2 Resumen del trabajo

El trabajo de referencia tiene como objetivo evaluar las fuentes de incertidumbre de las potenciales alteraciones hidrológicas debido a escenarios futuros de cambio climático (período 2008-2099) en doce grandes cuencas. Se analiza la escorrentía media anual, los caudales altos a través del cuantil anual del 10 % y los caudales bajos con el cuantil anual del 90 %. Los cambios en la escorrentía se evalúan utilizando los resultados de 9 modelos hidrológicos y un enfoque de escenarios climáticos múltiples (4 escenarios de emisiones y 5 modelos globales de clima derivados del proyecto CMIP5). Luego se analizan tres fuentes principales de incertidumbre (de escenarios de emisiones, modelos globales de clima y modelos hidrológicos) utilizando el método ANOVA (análisis de varianza), que permite descomponer las variaciones e identificar las principales fuentes de incertidumbre a lo largo de la secuencia de modelación escenario de emisiones - modelo global de clima - modelo hidrológico. El análisis de incertidumbre muestra que, en general, el mayor grado de incertidumbre se asocia a los modelos globales de clima, seguido de los escenarios de emisiones y el menor grado de incertidumbre se asigna a la modelación hidrológica. Aunque los modelos hidrológicos contribuyen en menor medida a la incertidumbre de los caudales altos y medios, su contribución aumenta para los caudales bajos.

La metodología de trabajo que se sigue en esta buena práctica se representa esquemáticamente en la Ilustración 10. En primer lugar, se recopila la información que se analizará. En el estudio de referencia, se trabaja con 4 escenarios de emisiones y 5 modelos climáticos, con datos de precipitación, temperatura, velocidad de viento y radiación solar. Es necesario proceder también a la corrección del sesgo de la modelación climática. En el segundo bloque se emplean los 9 modelos hidrológicos, alimentados con los resultados de la modelación climática. Se debe recopilar la información fisiográfica para construir los modelos hidrológicos y la información hidrológica para proceder a su calibración. Cuando los modelos están correctamente calibrados, se realiza el conjunto de simulaciones en todos los escenarios y se procesa la información correspondiente a sus resultados. Se analizan los estadísticos de interés y se determinan las ventanas temporales de análisis para su cálculo. Estos estadísticos deben ser apropiados para el análisis de impacto que se piensa realizar. En el caso de eventos hidrológicos extremos, el interés se centra en las colas de las leyes de distribución y por ello deben seleccionarse percentiles extremos. El tercer bloque del trabajo consiste en el análisis de la incertidumbre. Para ello se comparan los resultados obtenidos en cada indicador para los distintos componentes: escenarios de emisiones, modelos climáticos y modelos hidrológicos. En el trabajo de referencia, este estudio se realizó aplicando la técnica ANOVA.



Ilustración 10: Esquema metodológico de la buena práctica

### Recopilación y análisis de información

- Identificación de información climática y de aforos histórica. Completado y control de calidad de las series recopiladas
- Recopilación y análisis de modelos GCM y RCM
- Selección de los períodos de análisis (presente y futuro)
- Selección de series climáticas históricas y futuras simuladas por los GCM y RCM
- Corrección del sesgo de las series climáticas históricas simuladas por los GCM y RCM
- Recopilación información física de cuencas analizadas (p.e.: topografía, tipos, usos y cobertura del suelo, etc.)



### Estimación y análisis de series históricas y futuras de caudales

- Selección de modelos hidrológicos a ser utilizados. En este estudio se seleccionaron 9
- Implementación de los modelos hidrológicos
- Calibración y validación de los modelos hidrológicos
- Simulación y obtención de proyecciones de series de caudales (en este estudio series diarias) en base a las proyecciones climáticas seleccionadas
- Análisis del cambio de caudales futuros respecto al período de control. Por ejemplo, se puede analizar las diferencias en:
  - Escorrentía media anual
  - Cuantil del 10 y 90 % de la escorrentía anual
  - Varianza de la series
  - Estacionalidad
  - Variabilidad
  - Análisis de m períodos móviles de n años (en este estudio m = 63 y n= 30 años)
  - Si se hace la simulación con paso diario se puede estudiar el efecto del cambio climático e incertidumbre tanto en sequías como inundaciones



### Modelación hidrológica

- Selección de los procesos/elementos que se analizan. En este estudio se analiza la incertidumbre asociada a los GCM, los escenarios climáticos RCP y a los modelos hidrológicos (HM)
- Análisis de la dirección y significancia de los cambios futuros simulados
- Análisis del grado de acuerdo o no entre los cambios hidrológicos y los GCM, RCP y HM
- Análisis de la incertidumbre total y la contribución de la incertidumbre según la fuente (GCM, RCP, HM). En este estudio se caracterizó y descompuso la incertidumbre aplicando el método ANOVA



Tabla 18: Ficha de características básicas de la buena práctica

Concepto	Información básica
Título de la publicación	Evaluation of sources of uncertainty in projected hydrological changes under climate change in 12 large-scale river basins
Autores	Tobias Vetter, Julia Reinhardt, Martina Flörke, Ann van Griensven, Fred Hattermann, Shaochun Huang, Hagen Koch, Ilias G. Pechlivanidis, Stefan Plötner, Ousmane Seidou, Buda Su, R. Willem Vervoort y Valentina Krysanova
Año del estudio	2017
Publicación	Climatic Change, 141, 419 – 433. DOI: <a href="https://doi.org/10.1007/s10584-016-1794-y">https://doi.org/10.1007/s10584-016-1794-y</a>
Enlace web	<a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-016-1794-y">https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-016-1794-y</a>
Alcance geográfico	Se analizaron 12 grandes cuencas (rango de áreas: entre 67.000 km <sup>2</sup> y 2.500.000 km <sup>2</sup> ) en 6 continentes: en Europa: cuencas del río Rin y río Tajo; en África: cuencas del río Nilo Azul y río Níger; en Asia: cuenca del río Lena, cuenca alta del río Amarillo, cuenca alta del río Yangtze y río Ganges; en Australia la cuenca del río Darling; en Norte América: cuenca alta del río Mississippi y río Mackenzie; y en Sud América la cuenca alta del río Amazonas.
Tipo de evento extremo	Inundaciones y sequías
Enfoque	Basado en análisis de las simulaciones de modelos
Otros trabajos similares o complementarios	<i>Velázquez J.A., Schmid J., Ricard S., Muerth M.J., Gauvin St-Denis B., Minville M., Chaumont D., Caya D., Ludwig R., Turcotte R. (2013): An ensemble approach to assess hydrological models' contribution to uncertainties in the analysis of climate change impact on water resources. Hydrol Earth Syst Sci 17:565–578.</i>

#### 4.3.4.3 Datos y modelos empleados en el trabajo

##### Datos empleados

Los datos históricos utilizados se obtuvieron de distintas fuentes de información. Los datos analizados fueron los siguientes:

- *Precipitación, temperatura, velocidad del viento y radiación solar*: 1975–2004 (datos diarios). Información distribuida con resolución de 0.5°. Fuente de la información: base de datos "WATCH Era 40" (Weedon et al. 2011).
- *Otros datos*, como entradas en los diferentes modelos hidrológicos: Se utilizaron bases de datos globales de topografía, tipos, usos y cobertura del suelo, y glaciares. La gestión de embalses se incluyó en el modelo HYPE en 5 cuencas, en el modelo SIM para la cuenca del río Tajo y en el modelo SWAT para la cuenca alta del río Níger. Fuente de la información: se remite al Special Issue de la revista Climatic Change (2017) "Hydrological Model Intercomparison for Climate Impact Assessment" editada por Valentina Krysanova y Fred Hattermann (ISSN: 0165-0009 (Impreso), 1573-1480 (Online)).





Se utilizaron escenarios climáticos derivados de 5 modelos globales de clima (proyecto CMIP5): GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSLCM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM y NorESM1-M. Se consideraron 4 escenarios de emisiones: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5. Las salidas de los modelos globales de clima se interpolaron en una cuadrícula de 0.5° y luego se corrigió el sesgo para la mayoría de las variables climatológicas como la precipitación, la temperatura, la velocidad del viento y la radiación solar, utilizando como referencia los datos de la base WATCH Era 40 (período 1975-2004) y un algoritmo de preservación de tendencias (Hempel et al. 2013). El análisis del impacto climático sobre los cambios en la escorrentía y las fuentes de incertidumbre relacionadas se realizó para el período futuro desde el año 2008 al 2099.

### Modelos empleados

Los modelos climáticos empleados fueron extraídos de la iniciativa Coupled Model Intercomparison Project 5-CMIP5: los modelos GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSLCM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM y NorESM1-M. Estos modelos se analizaron en los escenarios de emisiones Representative Concentration Pathways-RCP: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5. Se utilizaron 9 modelos hidrológicos. La Tabla 19 muestra los modelos utilizados y las cuencas en los que se aplicaron.

Se aplica el método ANOVA para identificar y cuantificar la incertidumbre asociada a las tres fuentes analizadas (escenarios de emisiones, modelos globales de clima y modelos hidrológicos). Para evaluar la significancia estadística de los cambios hidrológicos detectados se aplica la prueba "Wilcoxon-signed-rank", que está disponible en el software de libre disposición R.

Tabla 19: Modelos hidrológicos aplicados a cada una de las cuencas analizadas.

Cuenca/ Modelo	Rin	Tajo	Niger	Nilo Azul	Ganges	Amarillo	Yangtze	Lena	Darling	Mackenzie	Misisipi	Amazonas
ECOMAG								X		X		
HBV	X	X	X	X	X	X	X				X	X
HYMOD	X		X	X	X	X			X		X	X
HYPE	X	X	X		X			X		X		
mHM	X		X	X	X	X			X		X	X
SWAT			X	X			X		X		X	X
SWIM	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X
VIC	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
WaterGAP3	X	X	X	X	X	X		X			X	X

La "X" indica que esa cuenca ha sido modelada con el modelo hidrológico correspondiente. Fuente: Vetter et al. 2017.

### Variables de salida de la modelización

Las variables de salida sobre las que se hizo la caracterización de incertidumbre son las siguientes:

- Aportaciones de caudales: Series de caudales diarios (para período de control y futuro) a la salida de cada cuenca analizada.





- Escorrentía media anual, cuantiles del 10 % y 90% de la escorrentía anual. Los cambios se evalúan entre la mediana de los 30 valores medios anuales de escorrentía en el período de control (1975-2004) y cada mediana de períodos móviles de 30 años de duración, comenzando en el año 2008 (en total 63 períodos futuros).

A partir de las salidas de cada uno de los modelos, se analiza la incertidumbre asociada a cada una de las 3 fuentes analizadas (escenarios de emisiones, modelos globales de clima y modelos hidrológicos).

#### **Principales incertidumbres de los modelos utilizados:**

La buena práctica trata precisamente del análisis de incertidumbre. En el análisis se engloban todas las fuentes de incertidumbre ya mencionadas para los escenarios de emisiones, modelos climáticos y modelos hidrológicos. Además de ellas, debe considerarse la incertidumbre asociada al sistema climático. El objeto de la buena práctica es realizar una comparación cuantitativa de la importancia relativa de estas tres fuentes de incertidumbre.

- *Los escenarios de emisión* de gases de efecto invernadero y la evolución de su concentración en la atmósfera. Las simulaciones de los modelos de clima se suelen realizar bajo una determinada hipótesis de evolución de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Los valores que se consideran en el conjunto de escenarios denominado RCP-Representative Concentration Pathways corresponden a distintos niveles de valores de forzamiento radiactivo en el año 2100. Los más característicos son: 2.6, 4.5, 6 y 8.5 W/m<sup>2</sup>, que se identifican como RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, respectivamente. Desde el 5º informe IPCC, estos niveles de forzamiento radiactivo se asocian a determinadas trayectorias de evolución socioeconómica, que son descripciones del posible futuro de las relaciones socioeconómicas en el planeta. Los escenarios de emisiones son consistentes con un amplio rango de emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero que podrían producir concentraciones similares en la atmósfera. Obviamente, se desconoce con precisión cuál será el futuro de las emisiones antropogénicas de gases, su efecto sobre el ciclo de carbono, la evolución de su concentración en la atmósfera y las relaciones socioeconómicas que podrían dar lugar a dichas emisiones. Por este motivo, los estudios de cambio climático se plantean en una gama de situaciones hipotéticas, denominadas "escenarios". Estos escenarios no son en realidad predicciones de futuro, sino situaciones que podrían darse y deben ser contemplados en la toma de decisiones. La consideración de los distintos escenarios ilustra sobre el posible efecto que pueden tener estos factores en los impactos que se analicen. La elección del escenario sobre el que calcular impactos es una fuente evidente de incertidumbre.
- *Los modelos climáticos*, tanto globales como regionales, son representaciones imperfectas de la realidad, bien por falta de un conocimiento adecuado de los fenómenos que se pretende reproducir o por falta de capacidad para su representación computacional (incertidumbre epistemológica). También existe una fuerte componente de incertidumbre ontológica, debida a la propia variabilidad y aleatoriedad del sistema climático. En realidad, el clima observado es una secuencia temporal de fenómenos de las muchas que se podrían producir bajo condiciones equivalentes. Estas dos características son fuentes evidentes de incertidumbre. En el diseño de cada modelo climático se deben tomar decisiones sobre qué procesos incluir o excluir, qué parametrizar y mediante qué formulaciones y cómo abordar la resolución numérica de las ecuaciones. Las diferentes decisiones adoptadas producen resultados diferentes, lo que supone una fuente considerable de incertidumbre.
- *Los modelos hidrológicos* están sujetos a fuentes de incertidumbre similares a las de los modelos climáticos. De hecho, la variabilidad en la estructura topológica, los procesos simulados y sus parametrizaciones suele ser mayor entre los modelos hidrológicos que entre los modelos climáticos, lo que sugiere que su incertidumbre epistemológica es mayor. Sin embargo, la dispersión de comportamientos observados en sus resultados suele ser menor, lo que es una consecuencia de que la variabilidad de los procesos hidrológicos, aun siendo considerable, es menor que la de los procesos climáticos. El cualquier caso, el paso de modelación hidrológica introduce incertidumbre adicional en el análisis.



- El resultado de los análisis comparativos de incertidumbre suele poner de manifiesto que los modelos hidrológicos son los que producen una menor variabilidad. Normalmente, la variabilidad observada entre los distintos modelos climáticos es incluso mayor que la asociada a los distintos escenarios de emisiones. Esta circunstancia plantea dudas sobre la efectividad de las simulaciones climáticas, ya que, en teoría, están diseñadas para evaluar las consecuencias de los distintos escenarios de emisiones.

#### 4.3.4.4 Características destacadas

Las características que justifican que este estudio sea considerado una buena práctica en el sector son las siguientes:

- Se trata de un ejemplo riguroso, donde se muestra cómo debe hacerse el análisis de incertidumbre en el estudio del impacto del cambio climático sobre los fenómenos hidrológicos extremos. Incluye el análisis de valores medios y percentiles altos y bajos de caudal.
- Resume los resultados de un proyecto de comparación de los resultados de modelos hidrológicos en la evaluación de los impactos del cambio climático, en el que intervienen 9 instituciones.
- Los resultados que se obtienen caracterizan el comportamiento esperado de fenómenos hidrológicos extremos en 12 cuencas de los cinco continentes, incluyendo la cuenca del Tajo en la Península Ibérica.
- El trabajo enlaza adecuadamente 4 escenarios de emisiones, 5 modelos climáticos y 9 modelos hidrológicos para realizar un análisis de la incertidumbre mediante la comparación de los resultados.
- Los resultados se analizan en 63 períodos de 30 años (ventana móvil desde el año 2008 al 2099), lo que permite ver la evolución en el tiempo de cada una de las fuentes de incertidumbre analizadas.
- Se propone una metodología concreta para el estudio de la incertidumbre: el análisis ANOVA. Esta técnica permite cuantificar las distintas fuentes de incertidumbre y compararlas entre sí. La presentación de resultados en diagramas triangulares es muy ilustrativa.

#### 4.3.4.5 Descripción de técnicas específicas

*Análisis de la significancia estadística de los cambios hidrológicos (basado en Vetter et al. 2017)*

El análisis de la significancia estadística de los cambios hidrológicos se realizó aplicando la prueba "Wilcoxon-signed-rank-test". Es una prueba estadística no paramétrica utilizada para comparar dos muestras relacionadas y para evaluar si sus rangos medios de población difieren (prueba de diferencia pareada). Se puede usar como una alternativa a la prueba pareada t de Student (t-test) para muestras dependientes sin asumir el supuesto de que las poblaciones se comportan según una distribución normal. La hipótesis nula es que los datos de los dos conjuntos de muestras son poblaciones idénticas. En un nivel de significancia de 0.05 (5%), rechazamos la hipótesis nula si los valores de p (p-values) son menores a 0.05. Esta prueba está disponible en el software de libre disposición R.

*Método ANOVA para cuantificación de la incertidumbre (basado en Vetter et al. 2017)*

En el trabajo de referencia se aplicó el método ANOVA para analizar las tres principales fuentes de incertidumbre: escenarios de emisiones (RCP), modelos globales de clima (GCM) y modelos hidrológicos (HM). El método se basa en estudiar la variabilidad de los resultados que se obtienen y analizarla en función de los factores que intervienen en el análisis. La variable básica es la suma total (SST) del cuadrado de las diferencias de escorrentía con relación al valor medio, para cada una de las 3 características analizadas. Su cálculo se realiza mediante la siguiente expresión:

$$SST = \sum_{i=1}^{N_{HM}} \sum_{j=1}^{N_{GCM}} \sum_{k=1}^{N_{RCP}} (Y_{ijk} - \bar{Y}_{000})^2 \quad \text{Ec.1}$$



donde,  $Y_{ijk}$  corresponde al cambio de las características analizadas del modelo hidrológico  $i$ , modelo global  $j$  y escenario de emisiones  $k$ , e  $\bar{Y}_{000}$  representa el valor medio global. La  $SST$  puede descomponerse en 7 sumandos:

$$SST = SS_{GCM} + SS_{RCP} + SS_{HM} + SS_{GCM*RCP} + SS_{GCM*HM} + SS_{RCP*HM} + SS_{GCM*RCP*HM} \quad \text{Ec.2}$$

Mediante este análisis, se puede descomponer la variabilidad (representada por la  $SST$ ) en los tres efectos principales ( $SS_{GCM}$ ,  $SS_{RCP}$ ,  $SS_{HM}$ ) y las cuatro interacciones. Tres de las interacciones se producen entre pares de factores ( $SS_{GCM*RCP}$ ,  $SS_{GCM*HM}$ ,  $SS_{RCP*HM}$ ) y una corresponde a los tres factores considerados simultáneamente ( $SS_{GCM*RCP*HM}$ ). Los términos de interacción tienen en cuenta los efectos no lineales y no aditivos de los tres principales efectos. Este tipo de análisis suele poner de manifiesto que la variabilidad asociada a los distintos modelos climáticos es incluso mayor que la asociada a los distintos escenarios de emisiones, lo que arroja serias dudas sobre la validez de los análisis basados en modelos. En el artículo de Bosshard et al. (2013) se puede consultar una descripción más detallada del método ANOVA.

### 4.3.5 Análisis de riesgo en sistemas hidráulicos

#### 4.3.5.1 Planteamiento general

La incertidumbre que se deriva de los análisis de escenarios de cambio climático dificulta la toma de decisiones. Las decisiones de gestión o planificación de sistemas hidráulicos suelen basarse en análisis de riesgo utilizando índices de desempeño que se deducen mediante la simulación del comportamiento del sistema frente a una solicitación hidrológica, incorporando unas reglas o criterios de operación. En muchos casos, la incertidumbre sobre la solicitación hidrológica se propaga a lo largo de la simulación de los sistemas hidráulicos hasta llegar a los valores que se suelen utilizar como fundamento de la toma de decisiones. Este proceso de propagación de información es complejo y conviene analizarlo con cuidado, para valorar su influencia sobre la toma de decisiones. Por este motivo, se han planteado estudios que analizan la incertidumbre asociada a cada una de las variables y procesos hidrológicos y determinan cómo se transforma al reproducir el manejo de sistemas hidráulicos para obtener los indicadores de riesgo. Como es habitual en análisis de riesgo, se intenta representar explícitamente el carácter estocástico de cada una de las variables o procesos, representándolos a través de funciones de probabilidad de ocurrencia. En el análisis se suele aplicar la técnica de simulación de Monte Carlo, generando series estocásticas que conservan los estadísticos fundamentales de las series observadas. Una vez generadas las series de las variables hidrometeorológicas (como la precipitación, temperatura y evapotranspiración), su efecto se caracteriza mediante el análisis de la propagación de la incertidumbre en un modelo estocástico de lluvia-escorrentía, donde los parámetros del mismo también tienen carácter estocástico. Posteriormente la incertidumbre sobre las aportaciones se propaga a través de modelos de simulación de gestión de sistemas hidráulicos. Finalmente, el sistema se evalúa de acuerdo con indicadores de desempeño. En el caso de crecidas, suele utilizarse el daño medio anual esperado. En el caso de sequías, es frecuente evaluar el sistema en términos de garantía de suministro, vulnerabilidad y resiliencia. El análisis de riesgo permite obtener resultados probabilísticos e intervalos de confianza para la descripción de los indicadores de desempeño, lo que favorece la información para una mejor toma de decisiones.

Dado que existen algunas diferencias metodológicas entre el tipo de trabajo que se realiza con caudales máximos y caudales mínimos, se han seleccionado dos trabajos como referencia de esta práctica. El trabajo correspondiente a crecidas es "Los efectos integrados de las incertidumbres climática e hidrológica sobre las evaluaciones del riesgo futuro de inundación", publicado por Scott Steinschneider, Sungwook Wi y Casey Brown en 2014 en la revista *Hydrological Processes*. Las características básicas del trabajo se resumen en la Tabla 20. En la buena práctica propuesta se describe un procedimiento para realizar el análisis de riesgo cuando se estudian sistemas hidráulicos. Se parte de la incertidumbre climática y se analiza su propagación a través de una cadena de simulación integrada por un generador estocástico de clima, un modelo hidrológico y un modelo de gestión de un embalse. El foco del trabajo son las crecidas, por lo que se concluye con la estimación de cómo puede variar el daño medio anual esperado aguas abajo de la presa. El trabajo



correspondiente a sequías es "Impacto de la incertidumbre hidrológica en las decisiones de gestión del agua", publicado por Álvaro Sordo-Ward, Alfredo Granados, Francisco Martín Carrasco y Luis Garrote en 2016 en la revista *Water Resources Management*. Las características básicas del trabajo se resumen en la Tabla 21. Este trabajo sigue una metodología similar al detallado en el caso de crecidas, pero centrado en la gestión de sistemas de recursos hídricos, por lo que los indicadores de riesgo que se emplean son los propios de evaluación de la garantía de suministro.

#### **4.3.5.2 Resumen del trabajo** **Trabajo de crecidas**

El trabajo de referencia examina el riesgo futuro de crecidas integrando la incertidumbre asociada a la modelación climática e hidrológica. Este estudio responde a cuestiones que se plantean con frecuencia, como si la aleatoriedad hidrológica es una fuente de incertidumbre importante en relación con otras fuentes, como la variabilidad y el cambio climático, y si es suficiente una caracterización estadística de la incertidumbre a partir de un modelo hidrológico conceptual agregado para cuantificar las incertidumbres hidrológicas en el proceso de modelado. El estudio se basa en la propagación de un conjunto de simulaciones climáticas a través de modelos hidrológicos y luego a través de un modelo de simulación de embalse para definir el rango de seguridad hidrológica de una presa ante crecidas en una amplia gama de condiciones climáticas. La incertidumbre en los cambios climáticos medios y la variabilidad climática interna se enmarcan utilizando una metodología basada en el riesgo y se exploran utilizando un generador de clima estocástico. Para cuantificar la incertidumbre hidrológica, se consideran dos modelos hidrológicos, un modelo conceptual agregado y un modelo distribuido físicamente basado. En el modelo agregado, la incertidumbre del error residual y de los parámetros se cuantifican y propagan utilizando un marco de modelado bayesiano. La metodología se aplica en la presa de Coralville en el río Iowa (Iowa, USA). Los resultados indican que la incertidumbre asociada al modelado hidrológico y la variabilidad climática interna puede ser del mismo orden de magnitud que el cambio climático.

#### **Trabajo de sequías**

En el trabajo de sequías se sigue un enfoque similar al del trabajo de crecidas, pero centrado en el análisis de tres sistemas de recursos hídricos en la cuenca del Duero (España). Se aplica un método de simulación de Monte Carlo para generar series mensuales de aportaciones mediante un modelo estocástico de precipitación-escorrentía. Este modelo se puede ejecutar a partir de perturbaciones en la media o coeficiente de variación de la precipitación, obtenidas a partir de escenarios de cambio climático. Los sistemas de explotación de recursos se simulan empleando las series estocásticas, y se analizan sus indicadores de desempeño, relacionados con el déficit en la atención a las demandas. Los resultados muestran una gran sensibilidad de los indicadores basados en el déficit y que su comportamiento es asimétrico, resultando mucho más sensibles frente a las reducciones en las aportaciones que frente a los incrementos.

El esquema metodológico que se sigue en este tipo de trabajo se representa esquemáticamente en la Ilustración 11. En primer lugar, se analiza la incertidumbre climática futura, como resultado agregado de las simulaciones climáticas en la zona en estudio. En los trabajos de referencia, la caracterización se realiza mediante rangos de variación de las variables meteorológicas. En el trabajo de crecidas las variables meteorológicas se incorporan a un generador estocástico de clima para generar un número elevado de realizaciones en cada escenario. En el caso de sequías, se emplea un modelo estocástico, más simple, perturbando la media y la varianza de la función e distribución marginal de la precipitación. El segundo paso es la simulación hidrológica. Una vez calibrados los modelos, se estudia su incertidumbre a través de la comparación de estadísticos apropiados para el fenómeno de interés. El tercer bloque del trabajo consiste en el análisis del efecto que tiene la incertidumbre sobre los indicadores de riesgo del sistema hidráulico. Para ello debe emplearse un simulador del sistema hidráulico, que se ejecuta con las series de caudal producidas con los modelos hidrológicos. Una vez simulado el comportamiento, se estudia el desempeño del sistema. En el trabajo de referencia de crecidas, el estudio se centra en el riesgo de inundación. El modelo de simulación es el de la laminación de la avenida mediante la operación de los órganos de desagüe de la presa y los indicadores de desempeño que se adoptaron fueron las leyes de frecuencia de caudales



punta de entrada al embalse y el daño anual esperado por inundación aguas abajo de la presa. En el trabajo de sequías el estudio se centra en la garantía de suministro de los sistemas. El modelo de simulación es la gestión del sistema de recursos hídricos y los indicadores de riesgo que se adoptaron fueron las garantías en tiempo, garantías en volumen y una función objetivo relacionada con el déficit de las demandas de abastecimiento y regadío en cada sistema.

Ilustración 11: Esquema metodológico de la buena práctica

### Incertidumbre climática futura

- Utilización de un modelo estocástico de clima para generar series climáticas futuras. Calibración del modelo en el período histórico
- Basado en las proyecciones climáticas en la región de estudio (derivadas de los modelos GCM y RCM) se definen los rangos de variación de las principales variables afectadas por el cambio climático (en este estudio: precipitación media y su coeficiente de variación, y temperatura). En este estudio se definieron 105 escenarios climáticos diferentes como combinaciones de tres variables)
- Atendiendo a esos escenarios, se generan series climáticas futuras que serán las entradas a los modelos hidrológicos
- Se realizan numerosas simulaciones con el generador estocástico de clima para cada escenario climático (en este estudio 500 simulaciones)



### Incertidumbre en los modelos hidrológicos

- Calibración de los modelos hidrológicos en el período histórico
- Aplicación del o los modelos hidrológicos. El resultado serán las series de caudales de entrada al modelo de embalse en estudio
- Hay numerosas fuentes de incertidumbre en los modelos hidrológicos (p.e.: estructura del modelo, parametrización, calidad de datos climáticos y de aforos)
- En este estudio se analiza la incertidumbre derivada de la estructura de los modelos, comparando dos modelos hidrológicos, uno agregado y otro distribuido (no suele ser suficiente para capturar todo el rango de incertidumbre asociado a la estructura de los modelos)
- Se analiza el efecto de la parametrización de los modelos en este estudio a través de un análisis estadísticos de los resultados (análisis de desviación estándar, autocorrelación lag-1 y análisis de sesgo y colas de las distribución)



### Efecto sobre los indicadores de riesgo del sistema

- Se relaciona el análisis de frecuencia (p.e.: caudal máximo de entrada al embalse para un período de retorno) o daños (daño anual esperado aguas abajo de la presa) con un rango de condiciones climáticas futuras (p.e.: cambio en la temperatura o cambio en la precipitación futura)
- Se repite el proceso de modelación hidrológica y se comparan los resultados entre escenarios climáticos y así ver el efecto de la variabilidad climática interna en el riesgo de crecidas





Tabla 20: Ficha de características básicas de la buena práctica de inundaciones

Concepto	Información básica
Título de la publicación	The integrated effects of climate and hydrologic uncertainty on future flood risk assessments
Autores	Scott Steinschneider, Sungwook Wi y Casey Brown
Año del estudio	2014
Publicación	Hydrological Processes, 29(12), 2823-2839. DOI: 10.1002/hyp.10409.
Enlace web	<a href="https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.10409">https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.10409</a>
Alcance geográfico	Coralville Dam, río Iowa, Iowa, Estados Unidos de América
Tipo de evento extremo	Inundaciones.
Enfoque	Basado en simulaciones de modelos
Otros trabajos similares o complementarios	<i>Dittes, B., Špacková, O., Schoppa, L., Straub, D. (2018): Managing uncertainty in flood protection planning with climate projections. Hydrology and Earth System Sciences, 22, 2511–2526.</i>

Tabla 21: Ficha de características básicas de la buena práctica de sequías

Concepto	Información básica
Título de la publicación	Impact of Hydrological Uncertainty on Water Management Decisions
Autores	Álvaro Sordo Ward, Alfredo Granados, Francisco Martín Carrasco y Luis Garrote.
Año del estudio	2016
Publicación	Water Resources Management, 30: 5535-5551. DOI: 10.1007/s11269-016-1505-5
Enlace web	<a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-016-1505-5">https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-016-1505-5</a>
Alcance geográfico	Tres sistemas hidráulicos de la cuenca del Duero: Adaja-Cega, Pisuerga-Carrión y Tormes
Tipo de evento extremo	Sequías
Enfoque	Basado en simulaciones de modelos
Otros trabajos similares o complementarios	<i>Ajami, N.K., Hornberger, G.M., Sunding, D.L. (2008): Sustainable water resource management under hydrological uncertainty. Water Resources Research, 44(11).</i>





#### 4.3.5.3 Datos y modelos empleados en el trabajo Datos empleados

Los datos históricos utilizados en el trabajo de crecidas son los siguientes:

- *Precipitación, temperatura y velocidad del viento*: 1949–2010 (datos diarios). Información distribuida con resolución de 1/8° (aproximadamente 140 km<sup>2</sup>). Fuente de la información: base de datos producida por Maurer et al. (2002).
- *Caudales naturales*: 1958–2010 (datos diarios). Serie temporal de caudales diarios en la estación de aforo (ID# 05453100) ubicada aguas arriba de la presa en estudio. Fuente de la información: United States Geological Survey Iowa River.
- *Caudales vertidos por la presa*: 1992–2010 (datos diarios). Fuente de la información: USACE.
- *Otros datos*: información de tipos de suelo (USDA-NRCS 2000); cobertura vegetal (Hansen et al. 1998); características de la presa y la cuenca asociada; reglas de operación del embalse (USACE).

Este estudio utiliza un generador estocástico de clima (Steinschneider y Brown 2013) para producir numerosas series temporales de clima sobre las que realizar el análisis de vulnerabilidad climática. El generador meteorológico combina un modelo de Markov y técnicas de remuestreo “K-nearest-neighbour” para generar series de variables climáticas diarias en múltiples sitios y adecuadamente correlacionadas (Apipattanavis et al. 2007), con un marco de modelado del tipo “Wavelet Autoregressive Modelling” para preservar la variabilidad de baja frecuencia a escala anual (Kwon et al. 2007). Para cada escenario climático futuro, se realizan 500 simulaciones de 62 años del clima (con paso diario) con el generador estocástico (se eligieron 62 años para que coincidan con el período histórico de observaciones).

En el trabajo de sequías se utilizaron los siguientes datos:

- *Datos hidrometeorológicos*: Precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial y real, humedad del suelo y escorrentía: 1940–2011 (datos mensuales). Datos de simulación de la cuenca del Duero generados mediante el modelo SIMPA por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, disponible en el Sistema de Información del Agua de España.
- *Datos de los sistemas de explotación Adaja-Cea, Pisuerga-Carrión y Tormes*: topología, datos de los embalses, demandas de abastecimiento y riego y caudales ecológicos, tomados del Plan Hidrológico de la Cuenca del Duero, España.

La incertidumbre climática se representó mediante un modelo estocástico de precipitación-aportación construido a escala anual sobre las series simuladas de SIMPA para la cuenca del Duero, perturbadas por factores aleatorios descritos a través de distribuciones de probabilidad paramétricas. Para los sistemas de explotación de recursos se empleó un modelo de desagregación espacio-temporal, que generó series mensuales en los puntos de interés para la simulación de los sistemas. Se compararon cuatro alternativas: (1) simulación con el forzamiento observado, (2) simulación con forzamiento aleatorio y parámetros determinísticos, (3) simulación con forzamiento aleatorio y parámetros aleatorios y (4) simulación con forzamiento aleatorio, parámetros aleatorios y modelo aleatorio.

#### Modelos empleados

Los modelos climáticos no se aplican de forma directa. Se utilizaron los resultados conjuntos de los modelos climáticos incluidos en “World Climate Research Programme’s Coupled Model Intercomparison Project” Fase 3 (CMIP3) y Fase 5 (CMIP5). Basados en el rango de proyecciones climáticas (para el año 2050) en la región de estudio se examinaron tres tipos de cambio climático: las alteraciones de la media de precipitación diaria ( $\pm 30\%$  con variaciones de 10%, 7 escenarios), su coeficiente de variación ( $\pm 30\%$  con variaciones de 15%, 5 escenarios), y cambios de temperatura



variando entre 0 y 4 °C (tres incrementos en total). Se consideraron todas las combinaciones posibles de estos cambios, analizando un total de 105 (7×5×3) diferentes escenarios de cambio climático.

Para la simulación lluvia-escorrentía, en el trabajo de crecidas se emplearon dos modelos hidrológicos:

- Modelo hidrológico conceptual del tipo agregado: HYMOD (Boyle et al. 2000, Kollat et al. 2012).
- Modelo hidrológico físicamente basado y distribuido: VIC (Liang et al. 1994).

También se aplicó un generador estocástico de clima (Steinschneider y Brown 2013) y un modelo de gestión del embalse, que incorporaba las reglas de operación empleadas en la gestión de crecidas.

En el trabajo de sequías, para la simulación lluvia-escorrentía se empleó un modelo estocástico de balance de agua a escala anual, que se desagregó a escala mensual a partir de los patrones observados en SIMPA. Para la gestión de los sistemas de recursos hidráulicos se empleó el modelo WAAPA (Garrote et al. 2015).

### **Variables de salida de la modelización**

Las variables de salida de la modelización del trabajo de crecidas son las siguientes:

- *Generador estocástico de clima*: series de 62 años de clima diario (precipitación, temperatura y velocidad del aire), tanto para el escenario actual (histórico) como para las proyecciones futuras.
- *Modelos hidrológicos*: series de 62 años de caudales diarios a la entrada del embalse de la presa en estudio.
- *Caudales vertidos por la presa*: series de 62 años de caudales diarios vertidos por la presa.

Las variables de salida de la modelización del trabajo de sequías son las siguientes:

- *Modelo estocástico de precipitación-aportación*: series de 70 años de clima mensual (precipitación, evapotranspiración real, humedad del suelo y escorrentía).
- *Modelo hidrológico*: series de 56 años de caudales mensuales de aportación en los puntos relevantes de cada sistema de recursos hídricos (7 puntos en total), para cada escenario (1000 series en cada uno de los 4 experimentos).
- *Suministros a las demandas*: series de 56 años de caudales mensuales suministrados a las demandas de cada sistema (11 puntos en total), para cada escenario (1000 series en cada uno de los 4 experimentos).

A partir de las salidas de cada uno de los modelos, se analiza la incertidumbre asociada a cada uno de los procesos simulados.

### **Principales incertidumbres de los modelos utilizados:**

La buena práctica trata precisamente del análisis de incertidumbre. A diferencia de la anterior, que centraba en comparar la importancia relativa de las incertidumbres generadas por los escenarios de emisiones, los modelos climáticos y los modelos hidrológicos, en ese caso el foco de atención es la propagación de dicha incertidumbre cuando se analizan sistemas hidráulicos. Se parte de la incertidumbre climática y se analiza su propagación a través de una cadena de simulación integrada por un generador estocástico de clima, un modelo hidrológico y un modelo de gestión de un embalse. El objeto de la buena práctica es realizar una comparación cuantitativa de la importancia relativa de estas tres fuentes de incertidumbre.

- *Incertidumbre asociada a la generación estocástica de clima*. En este estudio se muestra la habilidad de este tipo de modelos para reproducir, de forma razonable, las características estadísticas de las series observadas, aunque con errores e incertidumbre. La incertidumbre de este tipo de modelos se debe a la simplificación de los procesos naturales, que son



determinísticos, para su tratamiento mediante procesos estocásticos, que tienen una base aleatoria.

- *Incertidumbre asociada a los modelos hidrológicos.* Cada modelo simula de una forma simplificada la realidad. En el trabajo de referencia, el estudio se focaliza en el análisis de incertidumbre relacionado con la estructura del modelo y la parametrización de cada modelo
- *Incertidumbre asociada a los modelos de gestión.* Los modelos de gestión de sistemas hidráulicos incorporan reglas de operación que son aproximaciones a la realidad. En la práctica, los sistemas nunca se operan de acuerdo con algoritmos o reglas matemáticas, sino que sus responsables tienen un amplio margen de discrecionalidad para la toma de decisiones. En el caso de emplear estos modelos con un conjunto de solicitaciones hidrológicas, es posible que las reglas de operación, diseñadas para una situación en concreto, no resulten adecuadas para todos los escenarios hidrológicos analizados. Esto es especialmente importante en el caso de resguardos de laminación o reglas de operación de sistemas complejos de gestión de recursos hídricos.
- *Incertidumbre asociada a los indicadores de desempeño.* Los indicadores de desempeño son simplificaciones de una realidad mucho más compleja. En el caso de crecidas, se suelen utilizar estimaciones del daño económico causado por las inundaciones. En el caso de sequías, es frecuente utilizar indicadores derivados del déficit en la atención de las demandas o de la garantía de suministro. En ambos casos, el resultado del análisis puede variar en función del tipo de indicador que se seleccione y cómo se realice su cálculo, constituyendo a sí una fuente de incertidumbre.

#### 4.3.5.4 Características destacadas

Las características que justifican que estos estudios sean considerados una buena práctica en el sector son las siguientes:

- Los trabajos presentan metodologías que permite evaluar la sensibilidad y vulnerabilidad de sistemas hidráulicos a las diferentes situaciones que se pueden derivar del cambio climático: cambios en la precipitación, en la temperatura o en su variabilidad (analizada mediante el coeficiente de variación).
- El trabajo de crecidas presenta una cadena de análisis que, partiendo de una situación de incertidumbre climática, permite trasladar dicha incertidumbre a valores relevantes para la gestión del riesgo de inundación, como la estimación de los daños medios anuales que se pueden producir aguas abajo de una presa.
- El trabajo de sequías presenta una cadena de análisis que, partiendo de una situación de incertidumbre climática, permite trasladar dicha incertidumbre a valores relevantes para la gestión de sistemas de recursos hídricos, como el riesgo de déficit de suministro a las demandas.
- Los trabajos obtienen conclusiones de interés relativas a cómo debe abordarse la toma de decisiones en gestión de sistemas hidráulicos bajo incertidumbre climática. Este tipo de análisis permite planificar escenarios de contingencia y reducir la vulnerabilidad ante los potenciales cambios climáticos.
- En el trabajo de crecidas se emplea la técnica de "Decision Scaling" para analizar cómo la incertidumbre climática o hidrológica puede afectar el desempeño de un sistema hidráulico.
- El estudio de crecidas se aplica a un caso real de una presa existente y el estudio de sequías a tres sistemas de explotación de la cuenca del Duero, por lo que el enfoque metodológico podría ser replicado en otros casos y pasar de una práctica aplicada en el ámbito científico a una herramienta viable en la práctica profesional habitual.
- En ambos estudios se utilizan modelos estocásticos de clima para reproducir numerosos escenarios climáticos potenciales, lo que permite abarcar un amplio rango de proyecciones de clima futuro.



#### 4.3.5.5 Descripción de técnicas específicas

"Decision Scaling": Metodología para el uso de proyecciones de cambio climático en los procesos de toma de decisiones o evaluación de riesgos (adaptado de Brown et al. 2012).

La aplicación de la metodología "Decision Scaling" invierte el proceso comúnmente utilizado en el análisis del cambio climático que suele comenzar con el análisis de las proyecciones de los modelos globales de clima, la propagación de las mismas a través de modelos de simulación, para luego producir una estimación de los impactos de esas proyecciones en los sistemas de recursos hídricos. Aquí se cambia la pregunta que se intenta responder. En lugar de plantearse: "¿cuál será el clima futuro?", la pregunta que se responde es: "¿es más o menos probable el clima que favorece la acción A que el clima que favorece la acción B?". La metodología consta de las tres etapas que se desarrollan a continuación.

##### 1) Identificación de las condiciones climáticas que generan riesgo y definición de umbrales.

La primera etapa del análisis identifica las condiciones climáticas que causan riesgos o favorecen que se prefiera una decisión particular sobre otra. La parte inicial del proceso se lleva a cabo a través de una discusión con las partes interesadas y los tomadores de decisión para identificar las condiciones climáticas que han causado problemas en el pasado o que, de un modo u otro, son motivo de preocupación. El registro histórico es un punto de partida útil para identificar cómo el clima ha impactado el sistema en el pasado e identificar los episodios climáticos específicos que puedan poner en riesgo el sistema (Wilby y Dessai 2010). Los resúmenes de las proyecciones del cambio climático de la literatura o los informes del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) sobre los impactos regionales también son guías útiles para esta discusión. Un objetivo adicional de las discusiones es identificar los indicadores de desempeño adecuados para el sistema y los umbrales que, cuando se exceden, implican la necesidad de acciones adaptativas. Por ejemplo, en el caso de sistemas de suministro de agua potable, ese umbral podría ser el nivel mínimo aceptable de garantía de suministro del sistema. En otros casos, los umbrales de decisión se pueden especificar mediante el análisis de costo-beneficio esperado. Por ejemplo, se podría plantear acometer un proyecto cuando su relación costo beneficio fuera igual o superior a uno. Para valores inferiores a uno el proyecto propuesto resultaría inaceptable.

La comprensión de la decisión y el contexto se formaliza mediante la creación de un entorno integrado de sistema de decisión que simula el rendimiento del sistema en función de los inputs climáticos. El entorno generalmente se compone de modelos de apoyo: modelos hidrológicos, modelos de operación de embalses o modelos de planificación y gestión de sistemas de recursos hídricos. En este enfoque, los modelos se utilizan para caracterizar la respuesta del sistema a los cambios climáticos. Las entradas relacionadas con el clima dependen de los modelos que se piense utilizar, pero generalmente incluyen precipitación y temperatura.

##### 2) Identificación de riesgos climáticos y desarrollo de una función de respuesta climática

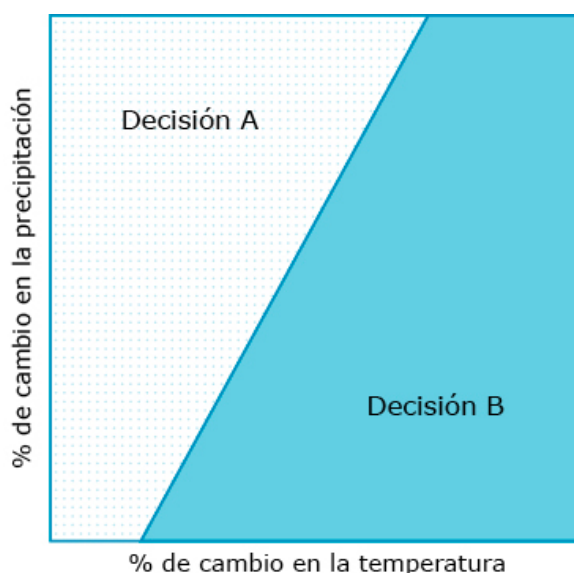
En esta etapa se utiliza el modelo del sistema de decisión para identificar y caracterizar los estados climáticos relacionados con los resultados de la decisión. El paso de identificación de riesgos consta de tres aspectos: un análisis clásico de sensibilidad para identificar condiciones climáticas adversas, el análisis del rango climático posible y el desarrollo de una "función de respuesta climática". La identificación de riesgos comienza con un análisis de sensibilidad del sistema de recursos hídricos. Esto se puede realizar generando un conjunto arbitrariamente grande de series estocásticas de la longitud necesaria que represente una amplia variedad de posibles condiciones climáticas. También se podrían aplicar otros métodos, como la variación paramétrica del estado climático de los inputs (Sordo-Ward et al. 2016). El aspecto clave es que el rango climático futuro sea lo suficientemente amplio como para evaluar el resultado de la decisión en todas las condiciones climáticas plausibles, aunque su probabilidad sea remota. El resultado es un conjunto de variables atmosféricas o hidrológicas, ( $X_t$ ) e indicadores de rendimiento del sistema ( $Y_T$ ), que caracterizan estadísticamente el rendimiento del sistema durante un período  $T$ . Como el enfoque de este análisis son los impactos relacionados con el clima, es un problema a largo plazo (30 años o más), y las estadísticas de  $X_t$  se combinan con estadísticas de  $Y_T$ , durante un período concurrente. De este conjunto, se puede derivar una relación entre el clima y el rendimiento del sistema. El grado en que el clima puede explicar las

métricas de rendimiento se evalúa para determinar el subconjunto de las estadísticas climáticas,  $v_T$ , siendo  $v_T = f(X_t)$ , que más influyen en los indicadores de rendimiento,  $Y_T$ .

En muchos casos, es posible y útil construir una "función de respuesta climática"  $g(v_T)$ , donde  $Y_T = g(v_T)$ . La función de respuesta climática actúa como un modelo sustituto, representando los resultados de una serie de modelos en una forma computacionalmente eficiente que vincula las variables climáticas directamente a los indicadores de desempeño. En Shao y Krishnamurty (2008) se presenta una revisión de desarrollo de modelos sustitutos. La función de respuesta climática permite que los indicadores de rendimiento sean estimados a partir de una gran cantidad de simulaciones de modelos de clima globales. Esto permite superar la limitación del coste computacional en el análisis de impacto climático. En el análisis de sistemas de recursos hídricos, la función de respuesta climática puede consistir en acoplar un modelo hidrológico a un modelo de sistema de distribución agua. La función de respuesta climática muestra en qué medida los valores del indicador de rendimiento pueden explicarse en términos de variables climáticas. Para un sistema en el que la función de respuesta climática proporciona un buen ajuste, se deduce que el clima tiene una gran influencia en el rendimiento.

Con este conjunto de condiciones y respuestas climáticas se utiliza un marco analítico de decisión definiendo estados climáticos. Los estados que se identifican corresponden a la decisión que se considera óptima sobre esas condiciones climáticas. La formulación de un mapa de decisión muestra esta representación discreta de los  $N$  estados del clima futuro que corresponden a las  $N$  decisiones óptimas (Ilustración 12). La estimación de las probabilidades se aborda en la etapa 3. El análisis del rango climático en estados tiene varias ventajas. Ayuda a los tomadores de decisión y analistas a identificar qué condiciones climáticas específicas plantean riesgos o favorecen una decisión particular. Si esas condiciones climáticas corresponden cambios en el clima desde la situación actual, los interesados pueden tener una idea intuitiva de lo que representarían para ellos los posibles cambios climáticos. Además, se puede adaptar el análisis del cambio climático para centrarse en la estimación de la probabilidad relativa de estos estados climáticos. Si un estado particular es especialmente amenazante, la investigación puede enfocarse en consecuencia.

Ilustración 12: Ejemplo de decisiones óptimas dadas las diferentes condiciones climáticas.



La regla de decisión crea sectores climáticos para los cuales se pueden estimar probabilidades subjetivas a partir de proyecciones de modelos globales de clima u otras fuentes de información climática (modificado de Brown et al. 2012).



### 3) Adaptación de la información climática para ayudar a la toma de decisión.

La etapa final es el proceso de adaptación de la información climática para ayudar en la toma de decisiones relacionadas con los riesgos climáticos. Con una decisión simple de dos alternativas, como "Tomar medidas" o "No tomar medidas", el espacio climático se divide en dos sectores correspondientes al estado climático para cada alternativa de decisión. "Decision Scaling" consiste en utilizar la información climática para estimar las probabilidades asociadas con cada estado, con el objetivo de estimar qué estados son más probables. Se puede utilizar el término "basada en el clima" para indicar que las probabilidades se basan en proyecciones climáticas. Las proyecciones pueden derivarse de modelos globales de clima o paleodatos, o ser generadas mediante simulaciones estocásticas. En consecuencia, las probabilidades pueden diferir de las indicadas únicamente por el registro histórico. La estimación de la probabilidad que corresponde a cada proyección es una cuestión complicada. En general, se suele suponer que la probabilidad de ocurrencia asignada a cada proyección está relacionada con la habilidad de los distintos modelos climáticos, lo que ayuda a valorar si un estado climático se puede considerar más probable que otro en el futuro. En algunos casos, la probabilidad de las distintas proyecciones puede ser lo suficientemente similar como para no justificar que se considere que una es más probable que otra. En muchos otros casos, la información climática puede proporcionar cierto grado de confianza a favor de un estado climático y, por lo tanto, se favorece una decisión sobre otra. Es importante tener en cuenta que la utilidad del proceso depende de la decisión, así como de la información climática.

*Metodología para la propagación de incertidumbre basada en un entorno simulaciones de Monte Carlo (adaptado de Sordo-Ward et al. 2016).*

La metodología de análisis se basa en un enfoque de simulación de Monte Carlo. El proceso se divide en dos etapas. En la primera, se caracteriza la incertidumbre sobre las variables hidrológicas mediante el análisis de la propagación de la incertidumbre en un modelo estocástico de lluvia-escorrentía de la región bajo análisis. En la segunda etapa, se propaga la incertidumbre de las aportaciones hidrológicas a través de modelos de simulación de recursos hídricos de diferentes sistemas de explotación. A continuación, se desarrollan las etapas mencionadas.

#### 1) Incertidumbre en el modelo Lluvia-Escorrentía

La formulación del modelo estocástico de lluvia-escorrentía se basa en la relación observada entre la precipitación y escorrentía a escala de tiempo anual. El modelo tiene una variable de entrada: precipitación ( $P$ ), una variable de estado: almacenamiento de agua en el suelo ( $S$ ), dos variables de salida: escorrentía ( $R$ ) y evapotranspiración real ( $ETR$ ) y tres variables de forzamiento aleatorio ( $\varepsilon_t$  para la escorrentía,  $\gamma_t$  para la  $ETR$  y  $\delta_t$  para el almacenamiento de agua en el suelo). La serie de precipitación observada se ajusta a una función de distribución paramétrica. Las ecuaciones propuestas para el modelo son:

$$R_t = a \cdot e^{bP_t} + \varepsilon_t \quad \text{Ec.1}$$

$$ETR_t = c(P_t - R_t) + d + \gamma_t \quad \text{Ec.2}$$

$$S_t = S_{t-1} + e(P_t - R_t - ETR_t) + f + \delta_t \quad \text{Ec.3}$$

siendo,  $R_t$  la escorrentía en el año  $t$ ,  $P_t$  la precipitación en el año  $t$ ,  $ETR_t$  la evapotranspiración real en el año  $t$  y  $S_t$  el almacenamiento de agua en el suelo en el año  $t$ . Las variables  $\varepsilon_t$ ,  $\gamma_t$  y  $\delta_t$  representan procesos aleatorios no correlacionados y normalmente distribuidos. Los parámetros del modelo son  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  y  $f$ . Los parámetros del modelo, la media y la varianza de los procesos  $\varepsilon_t$ ,  $\gamma_t$  y  $\delta_t$  se estiman a partir de las observaciones. En el caso de referencia se utilizó la información del modelo SIMPA (Estrela y Quintas 1996, Álvarez-Rodríguez et al. 2005).

Para caracterizar las diferentes fuentes de incertidumbre, su propagación a través del modelo lluvia-escorrentía se analiza bajo cuatro hipótesis:

a) *Datos observados*: En este caso la variabilidad se debe exclusivamente al ruido aleatorio del modelo ( $\varepsilon_t$ ,  $\gamma_t$  y  $\delta_t$ );





b) *Datos aleatorios con parámetros determinísticos*: La propagación de la incertidumbre se analiza considerando el forzamiento de precipitación estocástica con media y desviación estándar constantes, igual a la media y la desviación estándar de las series de precipitación observadas en la cuenca. En este paso se presenta una variabilidad adicional debido a la naturaleza estocástica de la precipitación.

c) *Datos aleatorios con parámetros aleatorios*: En este caso, se considera que la media y la desviación estándar de las series de precipitación son en sí mismas variables aleatorias. En cada realización se obtiene el valor de la media de precipitación y su desviación estándar de sus respectivas distribuciones de probabilidad, t-Student y Chi<sup>2</sup> respectivamente (Knight 1999).

d) *Datos aleatorios con parámetros y modelo aleatorios*: Se considera que los parámetros del modelo (*a, b, c, d, e* y *f*) también son variables aleatorias estimadas a través del ajuste de datos. En el caso de la regresión lineal, las propiedades de la distribución de probabilidad de los parámetros del modelo pueden conocerse a través de la media y la desviación estándar de los residuos, ya que siguen una distribución t-Student (Janke y Tinsley 2005).

En todos los casos se realizan 1000 simulaciones.

## 2) Incertidumbre en el modelo de recursos hídricos

El análisis de la incertidumbre en el modelo de recursos hídricos se realiza mediante la propagación de la incertidumbre obtenida para la variable de escorrentía estimada anteriormente. Las escalas de análisis del modelo de lluvia-escorrentía y el modelo de recursos hídricos son diferentes: el intervalo de tiempo es anual para las cuencas completas (toda la cuenca del Duero en el estudio de referencia) y el intervalo de tiempo es mensual cuando se aplica a los casos de estudio locales (sub-sistemas hidráulicos dentro de la cuenca).

La reducción de escala de la incertidumbre de la escorrentía se realiza perturbando las series de tiempo de escorrentía disponibles (SIMPA) que se introducen en cada modelo de recursos hídricos en los puntos de interés. La perturbación se lleva a cabo alterando la media y el coeficiente de variación de la serie (Chavez et al. 2013).

El análisis de los sistemas de recursos hídricos se realiza aplicando el modelo de Análisis de Política de Adaptación y Disponibilidad de Agua (WAAPA) (Garrote et al. 2015). WAAPA es un modelo que simula la operación de los embalses en un sistema de recursos hídricos. Los componentes básicos de WAAPA son embalses, aportaciones de agua y demandas de agua. Estos componentes están vinculados a los nodos de la red fluvial. WAAPA permite la simulación de la operación de los embalses y el cálculo del suministro a las demandas de un embalse individual o de un sistema de embalses. En el análisis se incluyen los caudales ecológicos y las pérdidas por evaporación en los embalses. La garantía de suministro de agua se puede calcular a partir de las series temporales de volúmenes de suministro, de acuerdo con diferentes criterios. Repitiendo el procedimiento básico de simulación se puede estimar: la curva de demanda-garantía, la demanda máxima satisfecha correspondiente a un almacenamiento dado o el volumen de almacenamiento requerido para satisfacer una demanda dada, todo de acuerdo con diferentes criterios de garantía. Para cada sistema, se realiza un total de 1000 simulaciones, cada una con series de tiempo de entrada perturbadas de acuerdo con la metodología descrita anteriormente. Los resultados del modelo se resumen analizando la variación del almacenamiento de los embalses del sistema y una función objetivo *Z* (Rossi et al. 2011). La función objetivo trata de evitar déficits catastróficos, cuando solo se abastece una pequeña fracción de la demanda, elevando al cuadrado el déficit mensual estandarizado. Además de la función objetivo, se analiza el efecto de la variabilidad de las aportaciones de entrada en varios índices de desempeño: a) Déficit de demanda urbana total, en hm<sup>3</sup>; b) Déficit de demanda de riego total, en hm<sup>3</sup>; c) Garantía de tiempo mensual de la demanda urbana, en %, suponiendo que se considera que un mes falla si la oferta es inferior al 90% de la demanda urbana mensual; y d) Garantía de tiempo de demanda mensual de riego, en %, suponiendo que se considera que un mes falla si el suministro es inferior al 50% de la demanda mensual de riego.



## 4.3.6 Técnicas de perturbación de series hidrológicas

### 4.3.6.1 Planteamiento general

La toma de decisiones en adaptación al cambio climático se realiza a partir de los resultados de los análisis de impacto. En algunos casos, los análisis de impacto producen resultados en forma de series temporales adecuadas para su empleo en modelos de detalle y se pueden utilizar directamente en el estudio de las medidas de adaptación. En otros casos, los resultados de los análisis de impacto se presentan de forma agregada, proporcionando valores medios de variación de las características de las variables en una región, lo que puede resultar inadecuado para el estudio de medidas de adaptación. Por ejemplo, si en una cuenca hidrográfica se espera una determinada reducción de los caudales acompañada de un incremento de su variabilidad, no resulta fácil traducir esta información a indicadores que describan la prestación de los sistemas de explotación de recursos, como, por ejemplo, la garantía de suministro. En estos casos, resulta necesario incorporar estos resultados a las variables con las que se trabaja en los modelos que se pretende emplear en el estudio de medidas de adaptación.

La buena práctica seleccionada corresponde al trabajo "Caracterización de la sensibilidad de los sistemas de recursos hídricos al cambio climático", publicado por Adriadna Chavez-Jimenez, Beatriz de Lama, Luis Garrote, Francisco Martin-Carrasco, Alvaro Sordo-Ward y Luis Mediero en 2013 en la revista *Water Resources Management*. Las características básicas del trabajo se resumen en la Tabla 22. En esta buena práctica se describe un procedimiento para traducir los resultados de estudios regionales de impacto a las series temporales que se emplean en los modelos de gestión de sistemas de recursos hídricos mediante una técnica de perturbación. Se trata de modificar una serie original, correspondiente al periodo de referencia, para conseguir otra serie basada en la primera que presenta un valor diferente de sus parámetros estadísticos, como la media, la varianza o la estacionalidad. Este procedimiento permite incorporar los resultados agregados de los análisis de impacto a los modelos de análisis de medidas de adaptación. El procedimiento se puede generalizar a variables distintas del caudal, como precipitación o temperatura.

### 4.3.6.2 Resumen del trabajo

En el trabajo de referencia se presenta una metodología que permite la caracterización del comportamiento de los sistemas de recursos hídricos bajo el impacto del cambio climático a través de la evaluación de la sensibilidad del sistema a un amplio rango de alteraciones hidrológicas producidas por dicho cambio. El análisis se basa en la aplicación de dos indicadores que, a su vez, se basan en los resultados de un modelo de optimización del sistema. Según esta metodología, se visualiza la sensibilidad potencial de los sistemas de recursos hídricos ante diferentes proyecciones climáticas, lo que permite identificar aquellos sistemas que requieren atención especial en su adaptación al cambio climático.

La metodología de trabajo que se sigue en esta buena práctica se representa esquemáticamente en la Ilustración 13. En primer lugar, se recopila la información necesaria para el estudio. En este caso, consiste en la recopilación de la información climática e hidrológica, la identificación de escenarios climáticos y la selección de los periodos de análisis. El segundo bloque de tareas corresponde a la aplicación del método de perturbación para generar las series hidrológicas correspondientes a los escenarios climáticos. El procedimiento se describe con detalle en la sección de técnicas específicas correspondiente a esta buena práctica. Básicamente, deben determinarse inicialmente los factores que se perturbarán: media, variabilidad o estacionalidad. En función de las necesidades, se procesa cada serie mensual mediante un algoritmo que proporciona una nueva serie basada en la inicial, pero con valores alterados de su media, su coeficiente de variación o su estacionalidad. Este procedimiento se repite para todos los emplazamientos que se desee evaluar y para todos los escenarios climáticos que se consideren. El último bloque depende de la finalidad específica del estudio. Con carácter general, se trata de introducir las series generadas en los modelos de simulación de los sistemas hidráulicos para analizar su comportamiento en los escenarios climáticos considerados. En el estudio de referencia, se planteó el análisis del sistema de explotación de recursos hídricos formado por toda



la cuenca hidrográfica. En el estudio se aplicó el software AQUATOOL. La evaluación del comportamiento del sistema en los escenarios de cambio climático se realizó a través de dos indicadores globales de desempeño que se deducen de la curva de demanda-garantía: el indicador demanda-suministro y el indicador demanda-garantía del sistema. La sensibilidad de los sistemas de explotación se determinó a partir de la dispersión de los valores de estos indicadores en los distintos escenarios de cambio climático analizados. Este análisis permitió identificar las cuencas que resultaban más vulnerables a los escenarios de cambio climático, en función de la fracción de escenarios que producían indicadores de comportamiento inaceptables.

Ilustración 13: Esquema metodológico de la buena práctica

### Recopilación y análisis de información

- Identificación de información climática y de aforos histórica. Completado y control de calidad de las series recopiladas
- Recopilación y análisis de modelos GCM y RCM
- Selección de los períodos de análisis
- Selección de series de aportaciones simuladas por los RCM
- Corrección del sesgo de las series históricas simuladas por los RCM (p.e.: aplicando método delta)



### Formulación de los escenarios de cambio climático

- Los escenarios futuros se formulan a través de técnicas de perturbación de las series de aportaciones observadas. En este estudio se consideran dos tipos de perturbaciones:
  - Alteración de los valores medios de las series
  - Alteración de los valores medios y el coeficiente de variación de las series
 En algunos casos también puede ser necesario alterar la estacionalidad de las series
- La perturbación se obtiene comparando las series de aportaciones de caudales derivadas de los diferentes escenarios de cambio climático y la serie del periodo de control
- El procedimiento se resume en:
 

<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Normalización de la serie de control</li> <li>2) Cambio de la media anual de la serie de control (a media 0)</li> <li>3) Cambio de la desviación estándar de la serie normalizada (alteración de CV futuro)</li> <li>4) Cambio de la media anual de la serie</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>5) Modificación de la media anual (alteración según la media futura)</li> <li>6) Generación de las series mensuales de aportaciones futuras afectadas por el cambio climático</li> </ol>
---	---



### Caracterización del comportamiento del sistema ante el cambio climático

- El Configuración de un modelo de optimización del sistema de recursos hídricos
- Se basa en el análisis de la garantía con la que la demanda es satisfecha
- En este estudio se calculan las curvas Garantía-demanda y se aplican dos indicadores de eficiencia del sistema: el indicador demanda-suministro y el indicador demanda-garantía del sistema
- Análisis del grado de sensibilidad del comportamiento del sistema ante el cambio climático. Se realiza comparando el comportamiento de cada uno de los subsistemas seleccionados ante las diferentes proyecciones climáticas



Tabla 22: Ficha de características básicas de la buena práctica

Concepto	Información básica
Título de la publicación	Characterisation of the Sensitivity of Water Resources Systems to Climate Change
Autores	Adriadna Chavez-Jimenez, Beatriz de Lama, Luis Garrote, Francisco Martin-Carrasco, Alvaro Sordo-Ward, Luis Mediero
Año del estudio	2013
Publicación	Water Resources Management, 27(12), 4237-4258. DOI: 10.1007/s11269-013-0404-2.
Enlace web	<a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-013-0404-2">https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-013-0404-2</a>
Alcance geográfico	España, específicamente las cuencas del río Guadalquivir, río Ebro y la parte española de la cuenca del río Duero.
Tipo de evento extremo	Sequías
Enfoque	Basado en simulaciones de modelos
Otros trabajos similares o complementarios	Ntegeka V., Baguis P., Roulin E., Willems P. (2014): Developing tailored climate change scenarios for hydrological impact assessments. Journal of Hydrology 508 307-321.

#### 4.3.6.3 Datos y modelos empleados en el trabajo

##### Datos empleados

Los datos históricos utilizados en el trabajo de referencia se obtuvieron de distintas fuentes de información. Los datos analizados fueron los siguientes:

- *Caudales naturales*: 1961–1990 (datos mensuales). Las series de aportaciones naturales no son datos observados, sino que provienen de resultados del modelo SIMPA (Estrela y Quintas 1996). Se utilizó una serie temporal para cada uno de los 8 sistemas de recursos hidráulicos analizados. Fuente de la información: Centro de Estudios Hidrográficos del Cedex, España
- *Demanda de agua*: 1961–1990 (datos mensuales). Se utilizó la demanda total, la demanda urbana y la demanda de riego. Fuente de la información: Plan Hidrológico de cada una de las cuencas estudiadas.
- *Otros datos*: características de cada una de las 78 presas analizadas (volumen de embalse) y del sistema asociado (topología de interconexión de la infraestructura hidráulica). Fuente de la información: Plan Hidrológico de cada una de las cuencas estudiadas.

Se analizaron 29 proyecciones hidrológicas (período 2071-2100), 14 provenientes del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (2010) y 15 del proyecto PRUDENCE (2007). En las proyecciones del CEDEX, se alteró la aportación media (7 como respuesta al escenario de emisión A2 y 7 según B2), mientras que en las del proyecto PRUDENCE se alteró tanto la aportación media como el coeficiente de variación correspondiente a cada serie (11 según escenario A2 y 4 según B2). El resumen de las proyecciones analizadas se presenta en la Tabla 23.



Tabla 23: Resumen de las 29 proyecciones climáticas analizadas.

Escenario de emisión	Modelo global	Regionalización	Fuente de información
A2 y B2	CGCM2	Análogos	CEDEX
A2 y B2	ECHAM4	Análogos	CEDEX
A2 y B2	HadAM3	Análogos	CEDEX
A2 y B2	HadAM3	SDSM	CEDEX
A2 y B2	HadCM3	PROMES	CEDEX
A2 y B2	ECHAM4	RCAO	CEDEX
A2	Valor promedio 6 modelos A2	-	CEDEX
B2	Valor promedio 6 modelos B2	-	CEDEX
A2 y B2	HadAM3	SMHI	PRUDENCE
A2 y B2	HadAM3	UCM	PRUDENCE
A2 y B2	HadAM3	DMI1	PRUDENCE
A2	HadAM3	DMI2	PRUDENCE
A2	HadAM3	DMI3	PRUDENCE
A2	HadAM3	ETH	PRUDENCE
A2	HadAM3	GKSS	PRUDENCE
A2	HadAM3	ICTP	PRUDENCE
A2	HadAM3	KNMI	PRUDENCE
A2	HadAM3	MPI	PRUDENCE
A2	HadAM3	Valor promedio 10 modelos A2	PRUDENCE

Fuente: Chávez-Jiménez et al. 2013.

### Modelos empleados

Los modelos climáticos empleados fueron los seleccionados por el CEDEX en su informe de 2010 y los incluidos en el proyecto PRUDENCE. El CEDEX trabajó con 4 modelos globales: CGCM2, ECHAM4, HadAM3, HadCM3. En cuatro de los casos se empleó el escalado estadístico mediante el método de análogos o el método SDSM para la regionalización. En los otros dos casos se empleó el escalado dinámico, con los modelos regionales PROMES y RCAO. Las simulaciones del PRUDENCE se hicieron todas con el modelo global HadAM3 y escalado dinámico, empleando modelos regionales de 8 instituciones (SMHI, UCM, DMI, ETH, GKSS, ICTP, KNMI y MPI). Los escenarios de emisiones se tomaron del conjunto SRES, eligiendo el A2 y el B2. Metodológicamente, se puede realizar el mismo estudio con escenarios climáticos más recientes.

En el estudio de referencia no se aplicaron modelos hidrológicos directamente. En el caso de las proyecciones del CEDEX, los resultados de proyección de cambios en la escorrentía se obtuvieron mediante el análisis de las series de escorrentía natural mensual generadas mediante el modelo hidrológico SIMPA (Estrela y Quintas 1996), forzado con los escenarios climáticos descritos. En el caso de las proyecciones de PRUDENCE, se adoptaron los cambios correspondientes a la variable escorrentía de los modelos regionales de clima considerados.





Con el objetivo de reproducir la gestión del agua en las cuencas analizadas, el estudio utiliza el entorno AQUATOOL (Andreu et al. 1996) y su módulo OPTIGES para la optimización de la gestión de sistemas de recursos hídricos. Este modelo trabaja a escala mensual y permite asignar los recursos en régimen natural a las demandas teniendo en cuenta la topología del sistema, los volúmenes de regulación y las demandas mediante el análisis de una función objetivo. En el modelo se trabaja con criterios de prioridad de acuerdo con el tipo de demanda y se tienen en cuenta las pérdidas por evaporación y las restricciones ambientales.

### **Variables de salida de la modelización**

Las variables analizadas en la modelación climática fueron las siguientes:

- Series mensuales de aportaciones naturales en el periodo de control (1961-1990) y escenarios futuros (2071-2100). Los escenarios futuros para el análisis de los efectos del cambio climático se formulan a través de técnicas de perturbación de series de aportaciones mensuales simuladas en el período de control, y que reproducen el régimen de escurrimiento mensual natural observado.
- Series mensuales de demanda atendida en cada uno de los 8 sistemas analizados (presente y futuro).
- Curvas de garantía-demanda en cada sistema (presente y futuro)
- Indicadores de eficiencia del sistema: el indicador demanda-suministro y el indicador demanda-garantía del sistema (Martin-Carrasco et al. 2012, Martín-Carrasco y Garrote 2007).

### **Principales incertidumbres de los modelos utilizados:**

En el análisis realizado en el trabajo de referencia se manejan múltiples escenarios climáticos, que se procesan a través de sistemas complejos de explotación de recursos, integrados por múltiples componentes, para obtener indicadores agregados de desempeño que son igualmente complejos. Lógicamente, las fuentes de incertidumbre son muy diversas. A continuación, se mencionan brevemente las más significativas:

- *Proyecciones climáticas.* Las proyecciones climáticas se formulan como variación esperada de la escurrimiento media o su coeficiente de variación en las cuencas analizadas. Estos valores resultan de promediar los resultados espaciales obtenidos en los modelos regionales de clima o en el modelo hidrológico SIMPA. Estas proyecciones se consideran homogéneas en toda la cuenca. Esta aproximación es una considerable fuente de incertidumbre.
- *Series de aportaciones de referencia.* Las perturbaciones determinadas por las proyecciones climáticas se aplican a las series de aportaciones mensuales de referencia, que son el resultado de la aplicación del modelo SIMPA en el periodo de control. Aunque este modelo ha sido calibrado con centenas de estaciones hidrométricas y es de uso contrastado, las series generadas indefectiblemente tienen un error asociado.
- *Series de aportaciones futuras.* El procedimiento de generación de series futuras se basa en perturbar las series de referencia, provenientes del modelo SIMPA, tanto en su media como en su coeficiente de variación, siguiendo los resultados medios de los modelos de clima. El procedimiento de perturbación no reproduce necesariamente la serie que se obtendría si se aplicara un modelo hidrológico local en cada punto de generación de series a partir de los valores escalados de las solicitudes climáticas.
- *Topología del sistema de explotación.* La modelación del sistema de explotación es necesariamente una simplificación de la realidad, ya que ha de representarse mediante un número limitado de componentes. Tratándose de un sistema de explotación que representa toda una cuenca hidrográfica, esta simplificación introduce incertidumbre.
- *Configuración actual del sistema de explotación.* Los datos de configuración de los sistemas en su situación actual están sujetos a la incertidumbre que se deriva de la dificultad en la recopilación y mantenimiento de la información relativa a capacidades operativas de los





embalses, tasas de evaporación, caudales ambientales, valor total y reparto mensual de las demandas, etc. Aunque los datos originales, procedentes de los Planes Hidrológicos, fueran correctos, es necesario simplificar y agregar para introducirlos en el sistema.

- *Configuración futura del sistema de explotación.* En la simulación de los sistemas futuros se adoptó la misma configuración que en la situación actual, lo que introduce una incertidumbre considerable. En el estudio no se tuvo en cuenta la posible afección del cambio climático a las demandas de agua y al desarrollo de nueva infraestructura de regulación y transporte en la cuenca.
- *Modelación de la gestión del sistema de recursos hídricos.* Se realizó mediante el software Aquatool. Como todo modelo, se trata de una representación simplificada de la realidad, con limitaciones en cuanto a la definición de la operación óptima del sistema.
- *Indicadores de desempeño.* Los indicadores de desempeño elegidos son comunes para todo el sistema. Dan una visión agregada y simplificada del conjunto de la cuenca, por lo que situaciones de escasez puntuales pueden no verse reflejadas en los resultados a nivel de sistema.

#### 4.3.6.4 Características destacadas

Las características que justifican que este estudio sea considerado una buena práctica en el sector son las siguientes:

- Se describe un procedimiento de perturbación de series que permite trasladar los resultados de estudios regionales de impacto a las series temporales que son necesarias para realizar estudios de gestión de sistemas de recursos hídricos.
- El procedimiento propuesto permite incorporar los resultados agregados de los análisis de cambio climático que produce el Centro de Estudios Hidrográficos para las cuencas o sistemas de explotación de recursos de España a los modelos de análisis que se emplean en los Planes Hidrológicos para analizar medidas de adaptación al cambio climático.
- El procedimiento de perturbación se puede generalizar a variables distintas de caudal, como precipitación o temperatura.
- El estudio realizado en el trabajo de referencia permite la cuantificación del efecto del cambio climático en el desempeño de los sistemas de recursos hídricos, calculando la garantía con que la demanda es satisfecha mediante el uso de indicadores agregados de desempeño.
- La metodología propuesta es adecuada para analizar el efecto que tendrían distintas medidas de adaptación sobre cada sistema analizado. Se podría analizar efectos de medidas como la modificación de las reglas de operación de los sistemas, modificando las prioridades de las demandas o los usos de los embalses, construcción de nueva infraestructura, asignación de recursos a la protección ambiental o gestión de la demanda.
- El estudio se aplica a varios casos reales con situaciones de partida diferentes, por lo que, el enfoque metodológico podría ser replicado en otros casos y pasar de ser una práctica aplicada en el ámbito científico a una herramienta viable en la práctica profesional habitual.

#### 4.3.6.5 Descripción de técnicas específicas

*Procedimiento para la formulación alternativa de los escenarios de cambio climático (basado en Chavez-Jimenez et al. 2013)*

El procedimiento estándar para estudiar el impacto del cambio climático en los recursos hídricos es mediante el uso de series temporales de lluvia y temperatura (a veces también otras variables meteorológicas), que provienen de modelos climáticos regionales (RCM) y de modelos hidrológicos lluvia-escorrentía. En el trabajo de referencia se utilizaron los valores de escorrentía provenientes de modelos regionales de clima. Este procedimiento podría ser muy útil en aquellas regiones donde no se poseen proyecciones climáticas locales basadas en modelos hidrológicos debidamente calibrados. Sin embargo, los resultados derivados de las salidas de los modelos regionales suelen presentar un sesgo que no permite su uso directo como entrada para un modelo de gestión de recursos hídricos.



Por tanto, es necesario corregir ese sesgo con anterioridad a su uso (Christensen et al. 2008, González-Zeas et al. 2012, Sharma et al. 2007). Existen varios métodos de corrección de sesgo, siendo uno de los más utilizados el denominado método delta (Xu y Yang 2012, Buytaert et al. 2009, Graham et al. 2007). Además de la información de los modelos regionales, este estudio toma en cuenta series de aportaciones de caudales observados (realmente son resultados del modelo SIMPA) que caracterizan el comportamiento hidrológico de las cuencas. Esto es un elemento crucial para la elección del método delta para formular los escenarios de cambio climático, ya que utiliza los cambios en las simulaciones de los modelos regionales para perturbar los datos observados en lugar de utilizar directamente las simulaciones futuras de los modelos regionales.

La variabilidad estacional o interanual de las series de aportaciones es relevante para determinar el rendimiento de los sistemas regulados de recursos hídricos. Por este motivo, el análisis del cambio climático no sólo debe incorporar las modificaciones esperables en la media, sino también en la estacionalidad o en la variabilidad interanual. En el trabajo de referencia, los escenarios para el análisis de los efectos del cambio climático se formulan mediante técnicas de perturbación de series simuladas de aportaciones que reproducen el régimen natural observado. En el trabajo original, se realizan dos tipos de perturbaciones, en el primer caso se lleva a cabo una alteración de la media ( $\Delta\mu_f$ , Ec.1) (Graham et al. 2007), y en el segundo una alteración de la media y del coeficiente de variación ( $\Delta\mu_f$ ,  $\Delta CV_f$ , Ec.1 y Ec.2,) (Haerter et al. 2011). En consecuencia, se obtiene un conjunto de valores de series temporales futuras (denominadas proyecciones hidrológicas), que contiene variaciones del pronóstico de aportaciones según diferentes modelos climáticos, y que se adapta a las características hidrológicas reales del área estudiada.

$$\Delta\mu_f = \frac{\mu_f^{CM} - \mu_c^{CM}}{\mu_c^{CM}} \quad \text{Ec.1}$$

$$\Delta CV_f = \frac{CV_f^{CM} - CV_c^{CM}}{CV_c^{CM}} \quad \text{Ec.2}$$

donde  $f$  representa al escenario futuro,  $c$  al periodo de control,  $\mu_f^{CM}$  es la media de las series futuras de aportaciones,  $\mu_c^{CM}$  es la media de las aportaciones en el periodo de control,  $CV_f^{CM}$  es el coeficiente de variación de las series de aportaciones futuras y  $CV_c^{CM}$  es el coeficiente de variación de las series en el periodo de control. Debido al alto grado de regulación de las cuencas (hiper-anual), en el estudio de referencia no se consideró el cambio en la estacionalidad de las series analizadas. En el caso de que se necesite tener en cuenta el cambio en la estacionalidad de las series, ésta se puede representar mediante el "rango estacional", que es la diferencia entre la aportación media en la estación más húmeda,  $\mu_{max}$ , y la aportación media en la estación más seca,  $\mu_{min}$ , dividida por la aportación media anual,  $\mu$ .

$$RE = \frac{\mu_{max} - \mu_{min}}{\mu} \quad \text{Ec.3}$$

Para tener en cuenta el cambio en la estacionalidad, se introduce una tercera perturbación:

$$\Delta RE_f = \frac{RE_f^{CM} - RE_c^{CM}}{RE_c^{CM}} \quad \text{Ec.4}$$

donde  $RE_f^{CM}$  es el rango estacional de las series futuras de aportaciones y  $RE_c^{CM}$  es el rango estacional de las aportaciones en el periodo de control.

El proceso comienza considerando la serie temporal  $x_i$  en el periodo de control (serie de aportación anual), con media  $\mu_c$ , desviación estándar  $\sigma_c$  y rango estacional  $RE_c$ . La aplicación de las alteraciones en la serie de aportaciones se realiza según:

- 1) Normalización de la serie de control de aportaciones (Ec.5):

$$x_i^1 = \frac{x_i}{\mu_c} \quad \text{Ec.5}$$

donde  $i$  representa cada año de la serie analizada y  $x_i^1$  la serie anual normalizada en el periodo de control, Esta serie tiene una media de 1 y desviación estándar  $\sigma_c/\mu_c$ .



2) Cambio de la media de la serie  $x_i^1$  (Ec.6):

$$x_i^2 = x_i^1 - 1 = \frac{x_i}{\mu_c} - 1 \quad \text{Ec.6}$$

Esta nueva serie  $x_i^2$  tiene media 0 y desviación estándar  $\sigma_c/\mu_c$ .

3) Modificación de la desviación estándar de la serie normalizada (Ec.7):

$$x_i^3 = [x_i^2(1 + \Delta CV_f)] = \left[ \left( \frac{x_i}{\mu_c} - 1 \right) (1 + \Delta CV_f) \right] \quad \text{Ec.7}$$

donde,  $\Delta CV_f$  es la variación del CV en el escenario futuro y  $x_i^3$  es la serie anual normalizada con una alteración igual a la desviación estándar. La serie  $x_i^3$  tiene media 0 y desviación estándar  $\sigma_f/\mu_f$ . Si la alteración sólo afecta al valor de la media ( $\Delta CV_f = 0$ ) la serie  $x_i^3 = x_i^2$ .

4) Cambio de la media de la serie  $x_i^3$  (Ec.8):

$$x_i^4 = x_i^3 + 1 = \left[ \left( \frac{x_i}{\mu_c} - 1 \right) (1 + \Delta CV_f) \right] + 1 \quad \text{Ec.8}$$

La serie  $x_i^4$  tiene media 1 y desviación estándar  $\sigma_f/\mu_f$ .

5) Modificación de la media de la serie  $x_i^4$  (Ec.9):

$$x_i^5 = x_i^4 \mu_f (1 + \Delta \mu_f) \quad \text{Ec.9}$$

donde,  $\Delta \mu_f$  es la alteración de la media en el escenario futuro y  $x_i^5$  es la serie anual de aportaciones futuras, con media  $\mu_f$  y desviación estándar  $\sigma_f$ .

6) Si no hay variación estacional, se genera directamente la serie de aportaciones mensuales para escenarios futuros de cambio climático (Ec.10):

$$x_i^{5m} = x_i^m \frac{x_i^5}{x_i^1} \quad \text{Ec.10}$$

donde,  $x_i^{5m}$  es el valor de la aportación en el período futuro del mes  $m$  y año  $i$  y  $x_i^m$  es el valor mensual de la aportación en el período de control en el mes  $m$  y año  $i$ .

7) Si hay variación estacional, el proceso es más laborioso. Se debe trabajar por años. Para cada año  $i$  de la serie, se consideran las fracciones mensuales  $y_i^{m_j}$  y estacionales  $y_i^{e_k}$  de la aportación anual en el periodo de control. Estas fracciones suman la unidad:  $\sum_j y_i^{m_j} = 1$ ,  $\sum_k y_i^{e_k} = 1$ . Se seleccionan la estación  $e_{max}$  que tiene la máxima aportación de ese año y la estación  $e_{min}$  que tiene la mínima aportación ese año. Se consideran la máxima fracción estacional,  $y_{imax} = y_i^{e_{max}} = \sum_{j \in e_{max}} y_i^{m_j}$ , y la mínima fracción estacional,  $y_{imin} = y_i^{e_{min}} = \sum_{j \in e_{min}} y_i^{m_j}$ , y su diferencia, que es igual al rango estacional de ese año:  $RE_i = y_{imax} - y_{imin}$ . El rango estacional modificado para ese año es (Ec.11):

$$RE_{if} = RE_i (1 + \Delta RE_f) \quad \text{Ec.11}$$

8) Se trata de perturbar el reparto mensual para conseguir que el nuevo rango estacional sea el deseado. Para ello, se definen los dos coeficientes,  $k_1$  y  $k_2$ , según la Ec.12 y la Ec.13. Los meses correspondientes a la estación que tiene la máxima aportación ese año se multiplican por el coeficiente  $k_1$  y el resto de los meses se multiplican por el coeficiente  $k_2$ .

$$k_1 = \frac{(1 - y_{imax}) RE_i (1 + \Delta RE_f) + y_{imin}}{y_{imax} [1 - RE_i (1 + \Delta RE_f)]} \quad \text{Ec.12}$$

$$k_2 = \frac{1 - RE_i (1 + \Delta RE_f)}{1 - y_{imax} + y_{imin}} \quad \text{Ec.13}$$



## 4.4 Análisis de efectos en sistemas naturales y sociales

### 4.4.1 Análisis de efectos sobre sequías

#### 4.4.1.1 Planteamiento general

Son estudios que caracterizan las sequías y las evalúan tanto para series históricas como para proyecciones climáticas. Se basan en la aplicación de los llamados “índices de sequía” y utilizan tanto variables meteorológicas (precipitación, temperatura, evapotranspiración) como hidrológicas. Para cuantificar las sequías se utilizan índices como el de precipitación estandarizado (SPI) que se basa en datos de precipitación a largo plazo, o el índice de precipitación y evapotranspiración estandarizada (SPEI), que se basa en la diferencia entre precipitación y evapotranspiración de referencia. Dichos índices se calculan para un periodo de tiempo específico (por ejemplo, 3, 6 o 12 meses). Los resultados puntuales se pueden regionalizar por diversos métodos. Se pueden analizar diferentes aspectos de las sequías como la magnitud, severidad, duración, extensión espacial, entre otros. Si se cuenta con información sobre aportaciones mensuales, también se pueden calcular índices de sequía basados en caudales, como el índice estandarizado de flujo (SSI), en el tiempo y en el espacio. La metodología de caracterización de sequías es similar tanto si parte de observaciones como si se parte de proyecciones de series climáticas.

La buena práctica seleccionada corresponde al trabajo “Evidencia del incremento de la severidad de la sequía causada por el ascenso de temperatura en el sur de Europa”, publicado por Sergio M. Vicente-Serrano, Juan-I López-Moreno, Santiago Beguería, Jorge Lorenzo-Lacruz, Arturo Sánchez-Lorenzo, José M García-Ruiz, Cesar Azorín-Molina, Enrique Morán-Tejeda, Jesús Revuelto, Ricardo Trigo, Fátima Coelho y Francisco Espejo en 2014 en la revista *Environmental Research Letters*. Las características básicas del trabajo se resumen en la Tabla 24. En esta buena práctica se estudia la evolución de las sequías en la Península Ibérica a partir de las observaciones en los últimos cincuenta años. Como este trabajo no incorpora proyecciones climáticas, también se hace referencia a los trabajos citados como contribuciones complementarias en la Tabla 24. Se tratan también los trabajos: “Cambios globales en las condiciones de sequía bajo distintos niveles de calentamiento” y “Análisis de sequías actuales y futuras en la cuenca de La Plata basadas en resultados del modelo climático regional Eta”. En estos dos trabajos se realiza un análisis de caracterización de sequías similar al del trabajo de referencia, pero a partir de las proyecciones climáticas.

#### 4.4.1.2 Resumen del trabajo

En el trabajo de referencia se utilizan datos climáticos de calidad contrastada de estaciones meteorológicas terrestres en la Península Ibérica (España y Portugal) e índices de sequía ampliamente utilizados para confirmar que la severidad de la sequía ha aumentado en las últimas cinco décadas, como consecuencia de una mayor evapotranspiración, resultado del aumento de la temperatura. Se observó que el aumento de la severidad de la sequía es independiente del modelo utilizado para cuantificar la evapotranspiración de referencia. También se analizó el impacto de la sequía climática en los sistemas sensibles, como el régimen hidrológico de los ríos, analizando los datos de aportaciones de caudales en 287 ríos en la Península Ibérica, y se observó que la frecuencia y la severidad de la sequía hidrológica también han aumentado en las últimas cinco décadas en cuencas con condiciones naturales, reguladas y altamente reguladas. La reciente tendencia positiva en la demanda de agua ha tenido una influencia directa en la evolución temporal de los regímenes hidrológicos, claramente identificada durante la estación cálida, en la que se registran tasas de evapotranspiración más altas. Este patrón de aumento de la demanda y una mayor severidad de la sequía probablemente sea aplicable a otras regiones semiáridas del mundo, incluidas otras áreas mediterráneas, el Sahel, el sur de Australia y Sudáfrica, y es esperable que comprometa cada vez más el suministro de agua y cause problemas políticos y sociales, así como tensiones económicas entre regiones en el futuro cercano.

La metodología de trabajo que se sigue en esta buena práctica se representa esquemáticamente en la Ilustración 14. En primer lugar, se recopila la información necesaria para el estudio de caracterización de sequías. Si se trabaja a partir de observaciones, se recopila la información climática e hidrológica y se procesa para generar valores espaciales a partir de los datos puntuales.



Si se trabaja a partir de proyecciones climáticas, se deben identificar los escenarios de emisiones, los modelos climáticos y los periodos de análisis, realizando las operaciones de reducción de escala y corrección del sesgo que se consideren necesarias. El segundo bloque de tareas corresponde al cálculo de los índices de sequía que se hayan seleccionado para el estudio. Normalmente, el cálculo se hace con distintos niveles de agregación temporal y se suele realizar un análisis espacial sobre los resultados. En la tercera parte del análisis se estudia el efecto del cambio climático, bien mediante el análisis de tendencias en los fenómenos observados o mediante el estudio de los valores en las distintas proyecciones climáticas. Los factores que se pueden analizar son la duración, intensidad y severidad de las sequías, su extensión espacial o su frecuencia de ocurrencia. Se analiza la evolución de estos factores a lo largo del tiempo o por comparación con el periodo de control o entre los distintos escenarios climáticos. También se pueden hacer análisis combinados de severidad-área-frecuencia. En algunos casos se emplean herramientas de análisis estadístico para cuantificar el grado de relación entre las variables o su tendencia temporal.

Ilustración 14: Esquema metodológico de la buena práctica

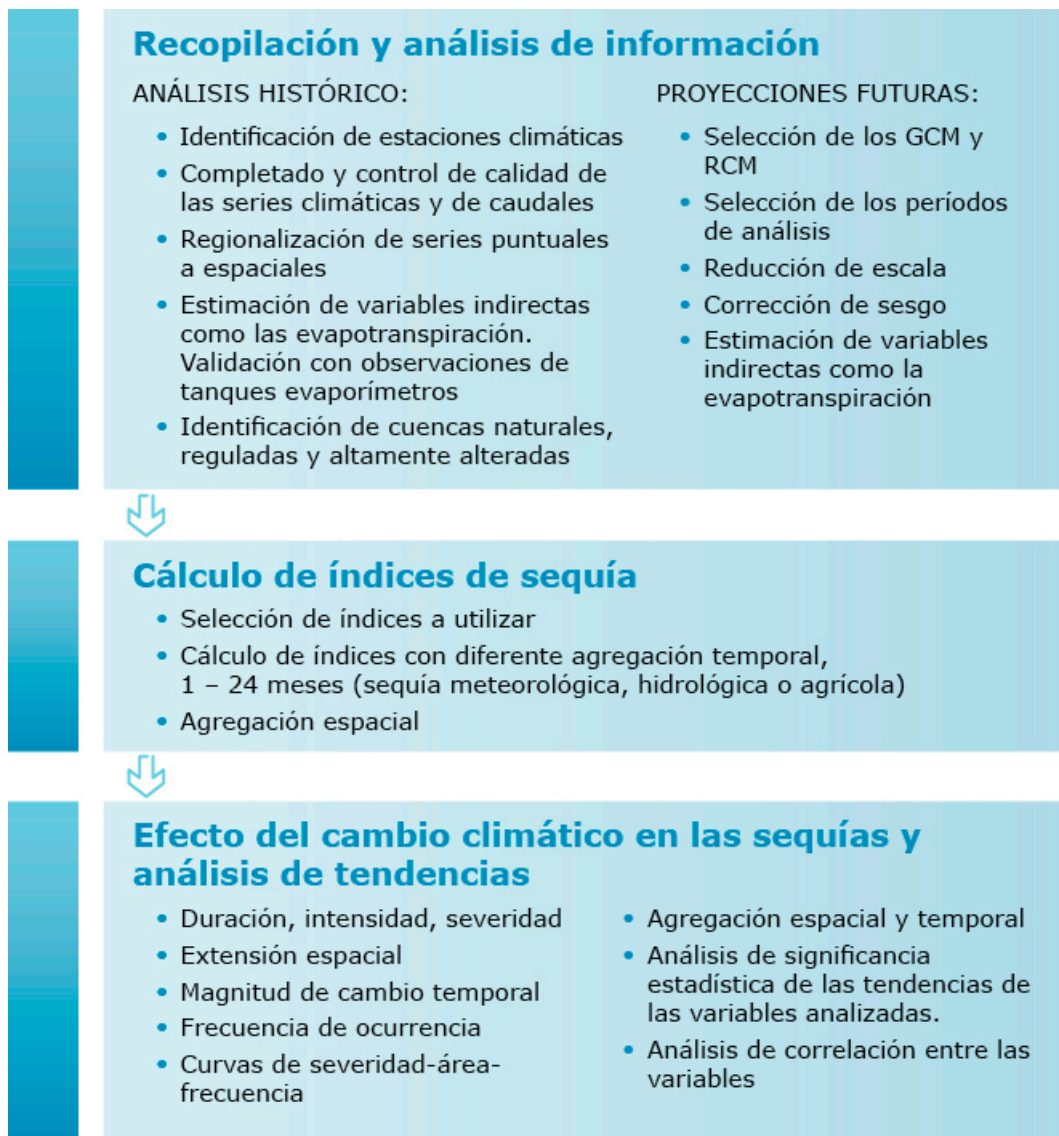




Tabla 24: Ficha de características básicas de la buena práctica

Concepto	Información básica
Título de la publicación	Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe
Autores	Sergio M. Vicente-Serrano, Juan-I Lopez-Moreno, Santiago Beguería, Jorge Lorenzo-Lacruz, Arturo Sanchez-Lorenzo, José M García-Ruiz, Cesar Azorín-Molina, Enrique Morán-Tejeda, Jesús Revuelto, Ricardo Trigo, Fátima Coelho y Francisco Espejo
Año del estudio	2014
Publicación	Environmental Research Letter, 9, 044001, 1-9. DOI: <a href="https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/4/044001">https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/4/044001</a> .
Enlace web	<a href="https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/9/4/044001/meta">https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/9/4/044001/meta</a> Artículo de acceso gratuito
Alcance geográfico	Península Ibérica
Tipo de evento extremo	Sequías
Enfoque	Basado en análisis de datos. La publicación de referencia no analiza proyecciones futuras, pero los trabajos complementarios sí lo hacen, aplicando una metodología similar.
Otros trabajos similares o complementarios	Naumann G., Alfieri L., Wyser K., Mentaschi L., Betts R.A., Carrao H., Spinoni J., Vogt J., Feyen L. (2018): Global Changes in Drought Conditions Under Different Levels of Warming. <i>Geophysical Research Letters</i> , 45(7), 3285-3296  Sordo-Ward A., Bejarano M.D., Iglesias A., Asenjo V., Garrote L. (2017): Analysis of current and future SPEI droughts in the La Plata Basin based on results from the regional Eta Climate Model. <i>Water</i> , 9(11), 1-25

#### 4.4.1.3 Datos y modelos empleados en el trabajo

##### Datos empleados

Los datos históricos utilizados en el trabajo de referencia se obtuvieron de distintas fuentes de información. Los datos analizados fueron los siguientes:

- Precipitación: 1961–2011 (datos mensuales). 54 estaciones meteorológicas seleccionadas en la Península Ibérica. Fuentes: Agencias meteorológicas de España y Portugal ([www.aemet.es](http://www.aemet.es); [www.ipma.pt/](http://www.ipma.pt/)).
- *Datos meteorológicos*: temperatura, humedad relativa, presión del aire en superficie, velocidad del viento y horas de sol: 1961–2011 (datos mensuales: mínima, máxima). Estaciones y fuentes de información similares a la variable precipitación.
- *Evapotranspiración potencial* de referencia (ET<sub>o</sub>): calculada según la ecuación de Penman-Monteith, sugerida por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO; Allen et al. 1998).





- *Caudales*: 1961–2009 (datos mensuales). 287 estaciones de aforo en la IP. Fuentes: España (Centro de Estudios Hidrográficos, Agència Catalana de l'Aigua, Agencia Andaluza del Agua y Aguas de Galicia) y Portugal (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos).

En el trabajo de referencia no se analizan proyecciones futuras, aunque el tratamiento sería similar al de las series históricas. Las series de proyecciones de precipitación, temperatura y demás variables se pueden obtener para Europa del proyecto EURO-CORDEX (Jacob et al. 2014) o en América Latina del proyecto CLARIS (Sánchez et al. 2015). Se combinan modelos globales de clima, con modelos regionales de clima y escenarios de emisión: RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5. En el apartado de técnicas específicas al final de esta sección se presentan dos ejemplos de análisis de sequías con proyecciones futuras.

### **Modelos empleados**

La publicación de referencia analiza el impacto del cambio climático a través de un análisis de la tendencia del clima en las últimas décadas basado directamente en datos históricos. Por tanto, no se emplean modelos de simulación, sino índices derivados de observaciones. Existen trabajos que aplican una metodología similar sobre las proyecciones climáticas en lugar de los datos observados. En este caso, pueden utilizarse modelos climáticos globales o regionales en distintos escenarios de emisiones.

### **Variables de salida de la modelización**

Los resultados del análisis de la información meteorológica se sintetizan en un conjunto de índices de caracterización de la sequía, que se relacionan a continuación:

- *Índice SPI*: Se calculó para cada celda (5 km x 5 km), a partir de las series de valores mensuales de precipitación (1961–2011). La evolución de los valores de SPI se calculó para diferentes agregaciones de tiempo, en particular para 12 meses.
- *Índice SPEI*: tratamiento similar al del SPI, con la diferencia importante de que el índice SPEI incorpora la evapotranspiración.
- *Índice SSI*: calculado a partir de las series de aportaciones mensuales en el período 1961-2009.
- *Área afectada por la sequía*: obtenida asociando los valores de los índices al área de influencia de estos (mediante polígonos de Thiessen).
- *Severidad del cambio de la sequía*: obtenida a partir de la pendiente de regresiones lineales aplicadas a los índices.

La metodología de cálculo de estos índices se detalla en el apartado de técnicas específicas, al final de esta sección.

### **Principales incertidumbres de los modelos utilizados:**

Las incertidumbres del análisis realizado en el trabajo de referencia se deben a los datos de partida y a las limitaciones de la representación de sequías mediante índices. A continuación, se mencionan brevemente las más significativas:

- Incertidumbre asociada a la observación de las variables de precipitación, temperatura, humedad relativa, presión del aire en superficie, velocidad del viento, horas de sol y aportaciones de caudales.
- Incertidumbre asociada a la estimación de la evapotranspiración de referencia, calculada mediante modelos agronómicos.
- Incertidumbre asociada a la regionalización de los valores climáticos para pasar de la información en las estaciones a una cuadrícula de 5 km x 5 km.



- Incertidumbre asociada a la representatividad de los índices de sequía elegidos para la caracterización del fenómeno y a su escala de análisis, tanto temporal como espacial.
- Incertidumbre asociada a los métodos estadísticos aplicados para estimar tendencias.

#### 4.4.1.4 Características destacadas

Las características que justifican que este estudio sea considerado una buena práctica en el sector son las siguientes:

- Estudia el efecto que han tenido los cambios climáticos producidos en los últimos cincuenta años sobre las sequías registradas en la Península Ibérica, realizando un diagnóstico de las causas climatológicas que han modificado los patrones de ocurrencia de sequías.
- El trabajo emplea índices de sequía que son de uso habitual por la comunidad científica y profesional. El significado de estos índices es fácilmente comprensible y su evolución en el tiempo permite detectar cambios significativos en la ocurrencia de sequías.
- La metodología de trabajo es relativamente simple de aplicar, ya que el cálculo de los índices SPI y SPEI requiere pocos datos y su esfuerzo computacional es bajo.
- Emplea el índice SPEI, que incorpora la evapotranspiración junto a la precipitación en la caracterización de la sequía. Esto ha permitido evaluar directamente la influencia que tiene el incremento de temperaturas en las sequías a través del aumento de la demanda evaporativa.
- Proporciona resultados específicos sobre la evolución de las sequías en la Península Ibérica, con importantes consecuencias para la planificación de la gestión de los recursos hídricos en España.

#### 4.4.1.5 Descripción de técnicas específicas

*Procedimientos y métodos utilizados para la estimación de impactos del cambio climático en sequías basada en datos históricos*

La publicación de referencia tiene un enfoque basado en el análisis de datos. No analiza proyecciones futuras, si no que analiza el impacto del cambio climático identificando tendencias basadas en el análisis de datos históricos. La significancia estadística de las tendencias de los valores de la precipitación anual, evapotranspiración de referencia y escorrentía se evaluó aplicando el coeficiente de correlación de rango de Kendall ("Kendall tau"). Las correlaciones entre las series temporales se evaluaron aplicando el coeficiente de correlación de Pearson 's "r". El impacto del cambio climático en las sequías se evaluó aplicando los denominados índices de sequía. En el documento de referencia se aplican los índices SPI (WMO 2012), SPEI (Vicente-Serrano et al. 2010) y el SSI (Vicente-Serrano et al. 2012). En el "Manual de indicadores e índices de sequía", publicado por la Organización Meteorológica Mundial (WMO 2016), se puede encontrar la descripción de 50 índices o indicadores de sequías.

*Procedimiento de cálculo del índice SPEI (adaptado de la página web: <https://spei.csic.es/home.html#p5>)*

El índice SPEI (Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index), propuesto por Vicente-Serrano et al. (2010) tiene un carácter multiescalar al considerar tanto la precipitación como la evapotranspiración. Esto permite ser utilizado por diferentes disciplinas científicas para detectar, monitorear y analizar sequías. Al igual que otros índices como el sc-PDSI y el SPI (WMO 2016), el SPEI puede caracterizar la sequía según su intensidad y duración, y puede identificar el inicio y el final de los episodios de sequía. El SPEI permite la comparación de la severidad de la sequía a través del tiempo y el espacio, ya que puede calcularse en una amplia gama de climas. Una ventaja importante del SPEI sobre otros índices de sequía ampliamente utilizados es que el SPEI considera el efecto de la evapotranspiración sobre la severidad de la sequía, y su característica multiescalar permite la identificación de diferentes tipos de sequía e impactos en el contexto del calentamiento global. El valor medio de la serie de SPEI es 0 y la desviación estándar 1. Por tanto, el valor de SPEI es estandarizado y puede compararse con valores de SPEI de diferentes duraciones (agregaciones) tanto en el tiempo como en el espacio. Por ejemplo, un valor de SPEI de 0 corresponde a una



probabilidad acumulada del 50% de los valores de  $D$  (Ec.1), según una distribución Log-logística de 3 parámetros (Ec.2). Por ejemplo, en Sordo-Ward et al. (2017) se definieron rangos de valores de SPEI asociados a la severidad de las sequías:

- $SPEI < -1.5$  : sequía severa
- $-1.5 \leq SPEI < -1$  : sequía moderada
- $-1 \leq SPEI < 0$  : déficit de agua suave
- $0 \leq SPEI < 1$  : condición húmeda suave
- $SPEI \geq 1$  : condición húmeda moderada a severa

A continuación, se detalla el procedimiento de cálculo del índice SPEI.

*Balance de agua.* Se aplica la ecuación:

$$D_i = P_i - ETP_i \tag{Ec.1}$$

Donde  $D_i$  da la medida de exceso o déficit de agua en el mes  $i$ ,  $P$  es la precipitación y  $ETP$  la evapotranspiración potencial. La evapotranspiración se calcula con el método más adecuado en cada caso en función del grado de información existente en la zona de estudio. Los valores de  $D_i$  se agregan a diferentes escalas temporales (por ejemplo, 1, 3, 6 o 12 meses).

*Estandarización de la variable.* La modelación de las series de la variable  $D$  se ajusta con la distribución log-logística. La función de densidad de probabilidad log-logística de tres parámetros es (Ec.2):

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \left(1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^\beta\right)^{-2} \tag{Ec.2}$$

donde  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  son los parámetros de escala, forma y ubicación (u origen) respectivamente, para valores de  $D$  en el rango:  $\gamma > D < \infty$ .

Los parámetros de la función se pueden obtener según diversos procedimientos. Entre ellos, el de L-momentos suele ser robusto y de fácil implementación (Ahmad et al. 1988). Los parámetros se pueden obtener siguiendo Singh et al. (1993), (Ecs.3, 4 y 5):

$$\beta = \frac{2W_1 - W_0}{6W_1 - W_0 - 6W_2} \tag{Ec.3}$$

$$\alpha = \frac{(W_0 - 2W_1)\beta}{\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})\Gamma(1 - \frac{1}{\beta})} \tag{Ec.4}$$

$$\gamma = W_0 - \alpha\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right) \tag{Ec.5}$$

donde  $\Gamma(\beta)$  es la función Gamma de  $\beta$ .

Para el cálculo de los parámetros se puede utilizar el método de los momentos ponderados por probabilidad (PWMs) sin sesgo. Los PWMs sin sesgo de orden  $s$  se calculan según Hosking (1986) como (Ec.6):

$$W_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\binom{N-i}{s} D_i}{\binom{N-1}{s}} \tag{Ec.6}$$

donde  $N$  es el número de datos y  $D$  la medida de exceso o déficit de agua definida con anterioridad.

La función de distribución de probabilidad de  $D$  según la distribución log-logística de 3 parámetros es (Ec.7):

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma}\right)^\beta\right]^{-1} \tag{Ec.7}$$



Los valores de SPEI se pueden obtener entonces como los valores estandarizados de  $F(x)$ . Siguiendo la aproximación clásica de Abramowitz y Stegun (1965) (Ec.8):

$$SPEI = W - \left( \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \right) \quad \text{Ec.8}$$

donde  $W = -2 \ln(P)$  y  $P$  es la probabilidad de excedencia de un valor determinado  $D$ .

$$\text{Para } P \leq 0.5, P = 1 - F(x) \quad \text{Ec.9}$$

Si  $P \geq 0.5$ , se reemplaza  $P$  por  $1 - P$  y se invierte el signo del resultado de SPEI.

El valor de las constantes es el siguiente:

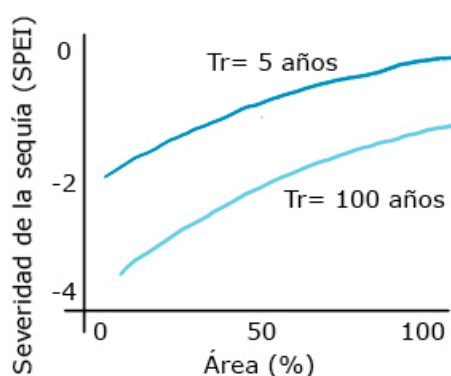
$$C_0 = 2.515517; C_1 = 0.802853; C_2 = 0.010328; d_1 = 1.432788; d_2 = 0.189269; d_3 = 0.001308 \quad \text{Ec.10}$$

*Procedimiento de cálculo de las curvas de área-severidad-frecuencia de sequías (basado en Mishra y Singh 2009)*

Un procedimiento interesante para evaluar la evolución espacio-temporal de las sequías en cuencas o regiones determinadas es relacionar el área afectada por las sequías, con la severidad de estas y su frecuencia de ocurrencia. Dicha relación puede realizarse calculando las denominadas curvas de área-severidad-frecuencia (SAF) propuestas por Mishra y Singh (2009). El procedimiento de cálculo es el siguiente:

- Se calcula la severidad de la sequía para cada año, escenario climático, y en cada celda asociada al área de estudio. Por ejemplo, en Sordo-Ward et al. (2017), cada año, se calculó la severidad de la sequía como el valor de SPEI de 3 meses de duración (SPEI3) correspondiente a los meses de noviembre, diciembre y enero (primavera-verano en el hemisferio sur) por ser estos meses los de mayor necesidad de agua para la agricultura y por tanto determinantes para el ciclo de producción anual.
- En cada año, se estima la severidad de la sequía para diferentes extensiones del territorio (como porcentaje de la superficie del área total bajo análisis), por ejemplo, en intervalos de 5 o 10%.
- Para cada porcentaje analizado, se calcula la función de distribución de probabilidad de ocurrencia de las series de los valores de SPEI3.
- Se realiza un análisis de frecuencia usando las funciones de distribución de probabilidad de la severidad de las sequías según las diferentes extensiones de forma de asociar la severidad de las sequías con los períodos de retorno.
- Finalmente, se construyen las curvas SAF en el área de estudio y para el escenario climático analizado (Ilustración 15).

Ilustración 15: Ejemplo esquemático de curvas severidad-área-frecuencia





*Análisis del impacto del cambio climático sobre las sequías a partir de proyecciones climáticas (basado en Naumann et al. 2018 y Sordo-Ward et al. 2017)*

Se puede aplicar una metodología similar a la del trabajo de referencia para el análisis del impacto futuro del cambio climático sobre las sequías. Se pueden obtener las series de proyecciones climáticas futuras (precipitación y temperatura) de diversas fuentes. En Europa el proyecto EURO-CORDEX (Jacob et al. 2014) y en América Latina el proyecto CLARIS (Sánchez et al. 2015) proporcionan resultados de modelos globales de clima combinados con modelos regionales de clima en los escenarios de emisión: RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5. En lo que respecta a variables hidrológicas como la escorrentía, se pueden tomar de modelos hidrológicos que emplean las proyecciones climáticas como variables de entrada. Cabe señalar que, aunque numerosos modelos globales o regionales realizan una estimación de la escorrentía, ésta suele ser extremadamente simplificada y los resultados no suelen ser aptos para utilizarlos en estudios hidrológicos posteriores. Antes de acometer el análisis de las sequías, debe valorarse el hecho de que, en general, las series de las variables climáticas simuladas (y las hidrológicas derivadas) suelen mostrar sesgo al compararlas con las observadas en el período histórico.

Naumann et al. (2018) evaluaron cómo afecta el cambio climático a las sequías en todo el mundo para un calentamiento global de 1.5, 2 y 3 °C en comparación con las temperaturas pre-industriales. El análisis se basó en un conjunto de siete proyecciones climáticas bajo el escenario de emisiones RCP8.5, generadas con el modelo EC-EARTH3-HR v3.1 (cuadrícula de 0.35°; Alfieri et al. 2017, Hazeleger et al. 2012). La reducción de escala de las proyecciones climáticas se obtuvo forzando el modelo EC-EARTH3-HR a partir de modelos globales producidos dentro del CMIP5: IPSL-CM5A-LR, GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, EC-EARTH, GISS-E2-H, IPSL-CM5A-MR y HadCM3LC. El criterio de selección de los modelos fue intentar cubrir el mayor rango de la respuesta climática en base al CMIP5.

En el estudio se utilizaron los resultados de los modelos de clima (tras la reducción de escala) sin aplicar un método específico de corrección de sesgo. Los motivos aducidos para no corregir el sesgo fueron de dos tipos. Por un lado, se intentó garantizar los principios de conservación y la consistencia física entre las variables atmosféricas, y evitar posibles distorsiones de tendencias relativas de los valores extremos de precipitación introducidos por la corrección de sesgo (Cannon et al. 2015, Ehret et al. 2012). Por otro lado, el procedimiento para calcular el indicador de sequía (SPEI) implica la estandarización de la diferencia entre las series de precipitación y evapotranspiración de referencia. Este procedimiento, por tanto, actúa como una corrección de sesgo indirecta de todas las variables relevantes, ya que los resultados finales se basan en los valores estandarizados y las sequías se determinan mediante umbrales adimensionales que corresponden a valores de probabilidad específicos. El año en el que se alcanza cada uno de los valores objetivo de calentamiento medio global se determinó agregando, al calentamiento global observado hasta el año 2005, el calentamiento global de una media móvil de 21 años desde el año 2005. Finalmente, se consideraron series de 30 años de duración centradas en el año que se alcanza cada uno de los incrementos objetivo de temperatura.

El análisis del efecto futuro del cambio climático sobre las sequías se basó en el índice SPEI (Vicente-Serrano et al. 2010). En el estudio se utilizó el SPEI con período de agregación de 12 meses (SPEI-12) ya que resume adecuadamente las condiciones anuales de sequía. Esta selección implica que el estudio se centró en los déficits hídricos a más largo plazo, lo que representa sequías hidrológicas con impactos no sólo en la agricultura sino también en el caudal de los ríos y la recarga de aguas subterráneas. Se consideró como episodio de sequía un período con valores consecutivos de SPEI-12 menores o iguales a -0.5. Para minimizar una posible distorsión en el análisis de los eventos extremos, se descartaron aquellos episodios de sequía menores a tres meses. Se asumió además que, para que dos eventos consecutivos de sequía se consideren independientes, deben transcurrir al menos tres meses sin sequía entre ambos. De lo contrario, se consideran el mismo evento de sequía (Engeland et al. 2004, Feyen y Dankers 2009).

Las características de las sequías consideradas en este estudio fueron: a) Duración de la sequía, medida como el número de meses de cada evento de sequía; b) Frecuencia, calculada como el



número de eventos de sequía en el período de análisis; c) Magnitud, estimada como la suma en valor absoluto de los valores de SPEI-12 de cada evento de sequía; d) Severidad, medida como la ratio entre la magnitud de la sequía y su duración; e) Período de retorno de las sequías, estimado utilizando un modelo de superación de umbrales, en el que se ajustó la distribución de probabilidad Generalizada de Pareto de tres parámetros a las series de valores que exceden determinado valor (Coles 2001). Los cálculos se realizaron para cada uno de los modelos climáticos y para su promedio, mostrando además la desviación respecto a la mediana y valores medios para estimar el grado de dispersión e incertidumbre entre modelos.

Sordo-Ward et al. (2017) identificaron y analizaron las sequías en la cuenca del Río de La Plata (divididas en siete subcuencas) para el período de referencia (1961–2005) y su evolución esperada bajo proyecciones climáticas futuras en los períodos 2011–2040, 2041–2070 y 2071–2099. Las proyecciones climáticas futuras se analizaron a partir de los resultados del modelo regional ETA (resolución de cuadrícula de aproximadamente 10 km) forzado por el modelo global HadGEM2-ES sobre la cuenca de La Plata, y considerando un escenario de emisión RCP4.5. Dentro de cada subcuenca, se centró el análisis de sequía en áreas de cultivo y pradera, debido a su relevancia económica. El estudio se basó en el índice SPEI con una agregación temporal de 3 meses (SPEI-3). Esta selección se debió a que el SPEI3 da una información estacional. Se consideró como sequía severa los períodos con valores de SPEI3 menores a -1.5, sequía moderada para valores comprendidos entre -1.5 y -1.0, sequía suave entre -1.0 y 0, períodos suavemente húmedos para valores entre 0 y 1, y períodos moderados o altamente húmedos para valores de SPEI3 superiores a 1. En este caso, las sequías se evaluaron en términos de tiempo (porcentaje de tiempo en situación de sequía respecto a la duración total de cada escenario climático), espacio (porcentaje del área total afectada por la sequía) e intensidad (valores SPEI3). Finalmente se calcularon las curvas de severidad-área-frecuencia de sequía (Mishra y Singh 2009) para relacionar cuantitativamente la distribución de frecuencia de ocurrencia de sequía con la severidad de la sequía y el área afectada por la misma

## 4.4.2 Análisis de efectos sobre aguas subterráneas

### 4.4.2.1 Planteamiento general

El impacto del cambio climático en las aguas subterráneas no sólo depende de factores físicos, sino también de la actividad humana. La recarga y el almacenamiento de las aguas subterráneas dependen de factores climáticos, pero también de la intervención humana en el cambio de uso del suelo y las extracciones, que, a su vez, pueden condicionar la calidad del agua. Su correcta evaluación requiere de la puesta en funcionamiento de diversos tipos de modelos, que puedan reproducir el efecto de la alteración del ciclo hidrológico sobre la recarga del acuífero y la respuesta del sistema hidrogeológico a las modificaciones en la recarga. El análisis debe combinarse con la explotación del sistema, que puede ser muy sensible a las modificaciones climáticas a través de cambios en la demanda de agua o en los usos del suelo. La buena práctica seleccionada corresponde al trabajo "Evaluación integrada del impacto del cambio climático y cambio en los usos del suelo en la cantidad y calidad de los recursos de agua subterránea en el sistema de la Mancha Oriental (España)", publicado por Manuel Pulido-Velázquez, Salvador Peña-Haro, Alberto García-Prats, Ana Fe Mocholí-Almudéver, Lenin Henríquez-Dole, Héctor Macian-Sorribes y Antonio López-Nicolás en 2015 en la revista *Hydrology and Earth System Sciences*. Las características básicas del trabajo se resumen en la Tabla 25. En esta buena práctica se presenta una metodología para evaluar los impactos potenciales del cambio climático y los cambios de uso del suelo en un acuífero mediante la integración de varias herramientas de modelación: modelos climáticos, modelos de cambio de uso del suelo, modelos hidrológicos, modelos de flujo de aguas subterráneas y modelos de transporte de contaminantes. Los modelos están adecuadamente acoplados para reflejar, por ejemplo, la interacción río-acuífero o las relaciones entre condiciones hidrológicas y extracciones de agua subterránea. El análisis de resultados a partir del estudio de tendencias de series temporales permite sintetizar las conclusiones más relevantes para la toma de decisión.





#### 4.4.2.2 Resumen del trabajo

Los impactos del cambio climático y del uso del suelo (cambio global) en los sistemas de aguas subterráneas no pueden estudiarse de forma aislada. Los cambios en el uso del suelo y la cobertura del suelo tienen un gran impacto en el ciclo del agua y la producción y transporte de contaminantes. El flujo y el almacenamiento del agua subterránea están cambiando en respuesta no sólo a los cambios climáticos, sino también a los impactos humanos sobre los usos del suelo y las demandas de agua, lo que alterará el ciclo hidrológico y, posteriormente, afectará la cantidad y la calidad de los sistemas regionales de agua. Para realizar una gestión integrada del agua, es esencial predecir las condiciones de recarga y descarga de agua subterránea en futuros escenarios climáticos y de uso del suelo. En el sistema Mancha Oriental, uno de los cuerpos de agua subterránea más grandes de España, la transformación de cultivos de secano a cultivos de regadío mediante bombeo del acuífero durante las últimas décadas ha llevado a un descenso significativo del nivel freático, con el consiguiente efecto sobre la interacción agua superficial – acuífero, estando el río Júcar vinculado al sistema. Para una gestión adecuada del sistema es esencial comprender la distribución espacial y temporal de la cantidad y la calidad del agua. Por un lado, la disminución de los caudales superficiales está comprometiendo los ecosistemas dependientes y el suministro a las demandas aguas abajo, provocando un problema de compleja solución. Por otro lado, el uso intensivo de fertilizantes en la agricultura está llevando a concentraciones localmente altas de nitrato en el agua subterránea. En el estudio de referencia se analizan los posibles impactos del cambio climático y del uso del suelo en el sistema mediante el uso de un entorno de modelación integrado que consiste en acoplar secuencialmente un modelo hidrológico de la cuenca (SWAT), un modelo de agua subterránea desarrollado en MODFLOW, y un modelo de transporte de contaminantes (MT3DMS). Los resultados del modelo SWAT (principalmente recarga y bombeo de agua subterránea, considerando las nuevas demandas de riego bajo cambios de evapotranspiración y precipitación) se utilizan como entradas al MODFLOW para simular cambios en el flujo y almacenamiento de agua subterránea e impactos en la interacción curso de agua - acuífero. Los resultados de SWAT y MODFLOW (cargas de nitrato del SWAT, campo de velocidad del agua subterránea del MODFLOW) se utilizan como entradas al MT3DMS para evaluar el destino y el transporte de nitrato lixiviado de la capa superior del suelo. Se han considerado tres escenarios de cambio climático, correspondientes a tres modelos de circulación global para el escenario de emisión A1B que cubre el período de control y los períodos futuros a corto, mediano y largo plazo. Se llevó a cabo un análisis multitemporal del cambio de usos del suelo, ayudado por el estudio de tendencias históricas (a partir de imágenes de teledetección) y el análisis de los motivos que lo inducen. Se utilizaron cadenas de Markov, escenarios y proyecciones para cuantificar las tendencias en el futuro. Se aplicó la técnica de autómatas celulares para el modelado estocástico de los mapas futuros de uso del suelo. Los valores simulados de descarga de ríos, rendimientos de cultivos, niveles de agua subterránea y concentraciones de nitrato se ajustan bien a los observados. Los resultados muestran la respuesta en cantidad y calidad del agua subterránea (contaminación por nitrato) a los cambios climáticos y de uso del suelo. Se observa una disminución de la recarga de aguas subterráneas y un aumento en las concentraciones de nitrato. La cadena de modelado secuencial ha demostrado ser una valiosa herramienta de evaluación para apoyar el desarrollo de estrategias de gestión sostenible.

La metodología de trabajo que se sigue en esta buena práctica se representa esquemáticamente en la Ilustración 16. En la fase de recopilación de la información se identifican y procesan los datos que sirven de partida al estudio. En el trabajo de referencia, se recopilan los datos necesarios para la construcción y calibración de los modelos empleados y con la selección de los escenarios climáticos futuros a considerar en el análisis. La fase siguiente es la de modelación, donde ejecutan las simulaciones encadenadas en el entorno integrado de modelación para todos los escenarios considerados. Esta fase tiene gran complejidad, derivada del carácter heterogéneo de las herramientas que se combinan, que incluyen modelos convencionales para el análisis de flujos físicos y modelos no convencionales para la proyección de usos del suelo en escenarios futuros. En la última fase se procede al análisis de los resultados para extraer conclusiones relevantes para la gestión del sistema. El análisis se centra en la caracterización de los flujos de agua (recarga, interacción río-acuífero, evolución de niveles piezométricos), la concentración de sustancias contaminantes, los efectos en el medio ambiente y en las actividades productivas y, si es posible, en la identificación y evaluación de las medidas de gestión que resultan convenientes.



Ilustración 16: Esquema metodológico de la buena práctica

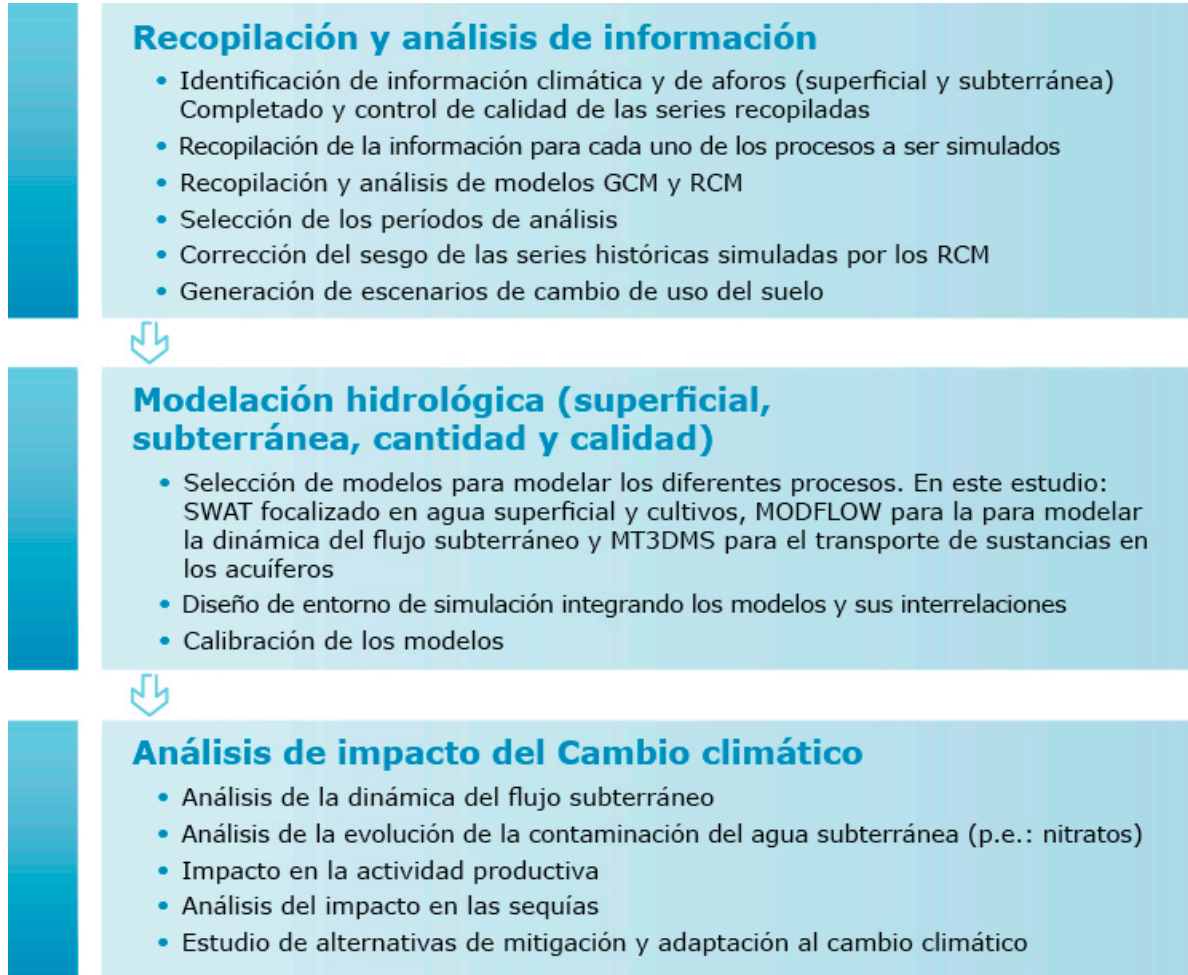




Tabla 25: Ficha de características básicas de la buena práctica

Concepto	Información básica
Título de la publicación	Integrated assessment of the impact of climate and land use changes on groundwater quantity and quality in the Mancha Oriental system (Spain)
Autores	Manuel Pulido-Velázquez, Salvador Peña-Haro, Alberto García-Prats, Ana Fe Mocholí-Almudéver, Lenin Henríquez-Dole, Héctor Macian-Sorribes y Antonio López-Nicolás
Año del estudio	2015
Publicación	Hydrology and Earth System Sciences, 19(4), 1677-1693. DOI: 10.5194/hess-19-1677-2015
Enlace web	<a href="https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/15/2599/2011/hess-15-2599-2011.html">https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/15/2599/2011/hess-15-2599-2011.html</a> Artículo de acceso gratuito.
Alcance geográfico	Sistema de la Mancha Oriental, España.
Tipo de evento extremo	El trabajo se centra en la evolución de la situación de las aguas subterráneas durante un período continuo de simulación que incluye períodos secos, húmedos y eventos extremos.
Enfoque	Basado en simulaciones de modelos
Otros trabajos similares o complementarios	Ali R., McFarlane D., Varma S., Dawes W., Emelyanova I., Hodgson G., Charles S. (2012): Potential climate change impacts on groundwater resources of south-western Australia. Journal of Hydrology 475 456-472

#### 4.4.2.3 Datos y modelos empleados en el trabajo

##### Datos empleados

El trabajo supone un esfuerzo considerable de modelación y requiere una gran variedad de datos de partida. Los datos analizados fueron los siguientes:

- *Precipitación y temperatura*: 1961-2010 (datos diarios). Fuentes: Climatic Research Unit (CRU). Esta fuente está disponible en <http://badc.nerc.ac.uk/data/cru/>.
- *Datos meteorológicos*: Humedad relativa del aire, velocidad de viento y radiación solar. 1961-1990 (datos diarios). La serie completa sólo estaba disponible dentro de la cuenca en una estación meteorológica: Albacete-Llanos. Para completar la falta de información se realizó un análisis de correlación espacial con todas las estaciones meteorológicas disponibles. Fuente: Agencia Estatal de Meteorología.
- *Series de caudales*: 1994-2004 (datos diarios). 2 series observadas en estaciones de aforo dentro de la cuenca (códigos 08036 y 08144). Fuente: Anuario de Aforos.
- *Modelo digital del terreno* (670 m x 670 m). Fuente de la información: Confederación Hidrográfica del Júcar.
- *Tipo de suelo*: obtenido de mapas digitales de suelo de la FAO, escala 1:5 millones, celdas con resolución de 5 minutos latitud/longitud.
- *Uso de suelo*: Obtenido del proyecto Corine Land Cover para el año 2000. Escala 1:100.000, celdas de resolución 100 m x 100 m.



- *Imágenes de cobertura de suelo*: 1996 y 2006 (resolución 100 m). Fuente: Proyecto Corine y Feranec et al. (2010). Esta fuente está disponible en: <https://land.copernicus.eu/global/>.
- *Información hidrogeológica*: Fuente: Sanz et al. 2009, 2011.
- *Información piezométrica*: 1994–2004 (datos diarios). Información de 24 piezómetros distribuidos en la cuenca.
- *Información sobre extracciones*. Ubicación de 1776 pozos de agua con fines de riego. Fuente de la información: Confederación Hidrográfica del río Júcar.
- *Concentración de nitrato*: Fuente de la información: Moratalla et al. 2009.
- *Valores de recarga del acuífero*: Fuente de la información: IGME-DGA 2010 y Sanz et al. 2011.
- *Rendimientos de los cultivos y necesidades de agua*: Fuente de la información: Instituto Técnico Agronómico Provincial (ITAP, López Urrea et al. 2003).

En el horizonte futuro se analizaron proyecciones climáticas y de usos del suelo. Las proyecciones de precipitación, temperatura y otras variables climáticas corresponden a los periodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100 (datos diarios). Se utilizaron 3 proyecciones combinando el escenario de emisión A1B con los siguientes modelos globales: CNRM (National Centre of Meteorological Research), ECHAM5-r3 (European Centre for Medium-Term Weather Forecast) y HADCM3-Q0 (Hadley Centre). Se redujo la escala de estos escenarios climáticos usando el modelo regional SMHIRCA 3.0 del Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI; Kjellstrom et al. 2011, Nikulin et al. 2011). El estudio de referencia es uno de los 16 casos de estudio analizados en el marco del proyecto europeo GENESIS.

Para las proyecciones de uso del suelo se consideraron 4 escenarios:

- No hay cambio de uso del suelo en el futuro
- Cambios en el futuro cercano (2011-2040) calculados a partir de un análisis multitemporal de los cambios de usos de suelo y los factores clave que lo condicionan (Oñate-Valdivieso y Bosque-Sendra 2010). Este análisis se basa en el estudio de tendencias de los patrones de cultivo (derivadas de imágenes de satélite anuales en el área de estudio). Para ello se utilizó el modelo "Land Change Modeler Module" (Eastman 2006). Este modelo se basa en técnicas GIS.
- Escenario de mediano y largo plazo (2041-2070 y 2071-2100) asumiendo un aumento del 10% de área dedicada a los cultivos bajo riego.
- Escenario de mediano y largo plazo (2041-2070 y 2071-2100) asumiendo una disminución del 10% de área dedicada a los cultivos bajo riego.

Además, se consideró el forzamiento futuro de 20 factores biofísicos, sociales, económicos y políticos. Fuente de la información: datos estadísticos y revisión de literatura. En general son valores distribuidos en la cuenca con paso de tiempo anual o en momentos específicos del horizonte temporal.

### **Modelos empleados**

Los modelos climáticos empleados fueron tres modelos globales: CNRM (National Centre of Meteorological Research), ECHAM5-r3 (European Centre for Medium-Term Weather Forecast) y HADCM3-Q0 (Hadley Centre), y un modelo regional: SMHIRCA 3.0 del Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI; Kjellstrom et al. 2011, Nikulin et al. 2011). Se consideró el escenario de emisiones A1B, de la familia SRES. En estudios futuros es aconsejable el uso de escenarios climáticos más recientes, como, por ejemplo, los de la familia RCP.

Se aplicaron tres modelos de tipo hidrológico, en sentido amplio del término: un modelo focalizado en los procesos superficiales y cambio de usos del suelo (modelo SWAT; Gassman et al. 2007, 2014); otro modelo centrado en la dinámica del flujo subterráneo (modelo MODFLOW; McDonald y Harbaugh 1988); un tercer modelo centrado en el transporte de sustancias en el agua subterránea,



fundamentalmente por la presencia de nitratos (modelo MT3DMS; Zheng y Wang 1999). Los tres modelos están interrelacionados y funcionan en un entorno de cálculo integrado, que se detalla en el apartado de técnicas específicas.

### ***Variables de salida de la modelización***

Las variables de salida en las distintas fases de la modelización hidrológica son las siguientes:

- Escorrentía: series diarias de 30 años (período de control y proyecciones) en 35 subcuencas.
- Dinámica de flujo subterráneo: series diarias (período de control y proyecciones) distribuidas en celdas de 1 km x 1 km.
- Valores de recarga al acuífero y bombeo desde el acuífero. Se consideraron 1776 pozos destinados para riego. Se asumió que el agua utilizada es la óptima necesaria por los cultivos presentes en la cuenca.
- Valores de concentración de nitratos. Series diarias (período de control y proyecciones) distribuidas en celdas de 1 km x 1 km.

### ***Principales incertidumbres de los modelos utilizados:***

El análisis se basó en una compleja cadena de modelación, que parte de escenarios climáticos, analiza flujos en los sistemas físicos e incorpora aspectos socioeconómicos para proyectar los cambios en los usos del suelo. La modelación de todos estos procesos está sujeta a fuentes significativas de incertidumbre. Ya se han enunciado varias de ellas al tratar las anteriores prácticas relacionadas con la modelación climática e hidrológica. Entre las fuentes de incertidumbre asociadas a los modelos específicos de esta práctica se pueden citar las siguientes:

- Cada modelo simula la realidad de una forma simplificada. Los modelos físicos utilizados (SWAT, MODFLOW, MT3DMS) tienen asociadas las incertidumbres epistemológica (imperfecto conocimiento o representación de los fenómenos) y ontológica (variabilidad natural de los fenómenos), ya discutidas. Junto a ello, deben considerarse las incertidumbres que afectan a los datos empleados para su construcción y la incertidumbre asociada al proceso de calibración.
- Los modelos que proyectan cambios de uso del suelo tienen una base física, que se fundamenta en las observaciones de la evolución reciente, y una componente socioeconómica, que se modela mediante herramientas simplificadas, como los autómatas celulares. Esta modelación está sujeta a una considerable incertidumbre, ya que los procesos que determinan el cambio del uso del suelo agrícola no se pueden caracterizar con facilidad. En el trabajo de referencia se gestionó dicha incertidumbre de una forma similar a como se suele hacer al tratar escenarios climáticos: mediante la consideración de un conjunto de escenarios de uso del suelo y analizando la dispersión que se obtenía entre ellos.
- Existe también incertidumbre asociada a posible evolución de las necesidades de agua y de la explotación de los acuíferos, ya que dependen de evoluciones tecnológicas, factores socioeconómicos e incluso de aspectos legales que regulan la gestión de acuíferos sobre-explotados.
- El empleo del conjunto de modelos en un entorno integrado introduce una componente adicional de incertidumbre, debida al acoplamiento entre los modelos. Cada modelo trabaja con una resolución espacial y temporal propia y emplea variables cuyo significado está delimitado por la formulación elegida. La transferencia de información de un modelo al siguiente requiere de operaciones para cambiar la resolución y de adaptaciones conceptuales de las variables que introducen incertidumbre.
- Algunos de los aspectos simulados, como el aporte de nitratos al agua subterránea procedente de las explotaciones agrícolas, se pueden describir desde el punto de vista cualitativo, pero su comportamiento cuantitativo no se conoce bien. Requieren de datos locales que no están disponibles, y no existe suficiente información como para poder caracterizar un fenómeno, cuyo comportamiento puede cambiar en escenarios climáticos futuros.



#### 4.4.2.4 Características destacadas

Las características que justifican que este estudio sea considerado una buena práctica en el sector son las siguientes:

- Constituye un buen ejemplo de análisis integrado de un sistema físico en escenarios de cambio climático, en el que se combinan herramientas de modelación heterogéneas para analizar un conjunto de fenómenos complejos de gran trascendencia para la gestión del acuífero.
- En su planteamiento trasciende el mero cambio climático e incorpora el cambio global, mediante el análisis del efecto de la actividad humana en el sistema natural a través del cambio de uso del suelo.
- Analiza el acuífero de la Mancha Oriental, que es un caso de estudio tratado por numerosos investigadores a lo largo del tiempo y destaca por los problemas físicos, químicos, biológicos, sociales y económicos que plantea.
- Utiliza de forma intensiva numerosas fuentes de información disponibles.
- En el trabajo se describe de forma rigurosa cada uno de los procedimientos o modelos utilizados, lo que permite replicarlos en otros casos de estudio.
- La metodología de combinación de modelos para el análisis de un sistema complejo se puede generalizar para estudiar un número importante de sistemas físicos y sociales: humedales, lagos y embalses, tramos de río, zonas regables, etc.

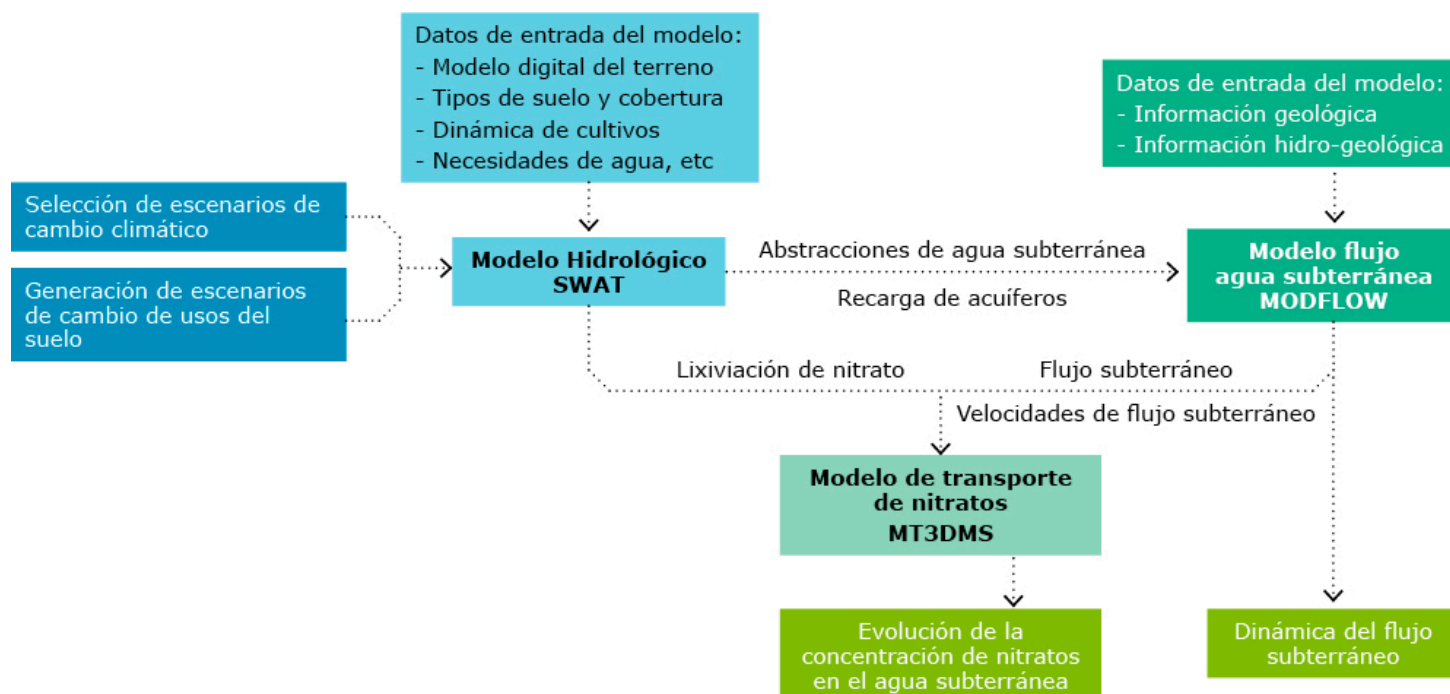
#### 4.4.2.5 Descripción de técnicas específicas

*Diseño de un entorno integrado de modelación (basado en Pulido-Velázquez et al. 2015)*

Para evaluar los impactos futuros en los sistemas de aguas subterráneas (debido a cambios del clima, uso del suelo, demandas de agua, adaptación, etc.), se deben establecer las interrelaciones entre dichos factores y las respuestas del sistema hidrogeológico. Esto requiere la integración práctica de modelos operativos que no solo representen todos los procesos relevantes en el sistema hidrológico de una manera eficiente, sino que también sean lo suficientemente simples como para permitir aplicaciones a gran escala en toda la cuenca (Sophocleous y Perkins 2000). La caracterización de los procesos superficiales es esencial para evaluar los impactos del cambio climático y de uso del suelo en la distribución temporal y espacial de la recarga de aguas subterráneas y la aportación de contaminantes. Además, en las cuencas en las que la agricultura de regadío es el uso dominante del suelo, también es importante incorporar en el cálculo la dinámica del desarrollo de los cultivos y sus rendimientos, la evapotranspiración de los mismos, las necesidades de riego y los cambios de bombeo de aguas subterráneas. Adicionalmente, si se estudian procesos relacionados con la calidad de agua (como en el caso de estudio que se consideraron los nitratos), éstos también deben simularse. Una de las herramientas seleccionadas es el modelo SWAT, un modelo de cuencas hidrográficas muy utilizado en todo el mundo, y ha sido aplicado a un amplio rango de escalas espaciales y condiciones ambientales (Gassman et al. 2007, 2014). Si bien el modelo cuasi distribuido SWAT es capaz de simular adecuadamente la distribución espacio-temporal de las tasas de recarga de agua subterránea (a la resolución espacial dada por sus unidades de respuesta hidrológica, 445 para el estudio de referencia), su módulo de agua subterránea es agregado. Por lo tanto, no se pueden representar de forma distribuida, los parámetros de agua subterránea como las conductividades hidráulicas y los coeficientes de almacenamiento. El alcance del modelo SWAT es muy limitado para expresar la distribución espacial de los niveles piezométricos y la dinámica de flujo del agua subterránea. Para dar solución a este problema, se han propuesto en la literatura diferentes enfoques de integración y acoplamiento de modelos de flujo superficial y subterráneo (Sophocleous y Perkins 2000, Kim et al. 2008). Un posible entorno de simulación (propuesto en la publicación de referencia) sería acoplar secuencialmente el modelo de cuenca SWAT con el modelo de aguas subterráneas totalmente distribuido MODFLOW (McDonald y Harbaugh 1988), y finalmente el modelo de transporte de múltiples sustancias MT3DMS (Zheng y Wang 1999) para simular el transporte del nitrato lixiviado en el sistema acuífero. Con este enfoque, las salidas del modelo SWAT se usan como entradas al modelo MODFLOW, y las salidas SWAT y MODFLOW se usan como entradas al modelo MT3DMS. En la Ilustración 17 se presenta el entorno de simulación propuesto con sus interrelaciones.



Ilustración 17: Esquema propuesto para la modelación integrada



(adaptado de Pulido-Velázquez et al. 2015)

#### Metodologías para la estimación del efecto del cambio climático en la recarga de los acuíferos

El efecto del cambio climático (presente y futuro) en la recarga de los acuíferos depende de una combinación de factores naturales (por ejemplo, cambio en el régimen de precipitación, cambio en la temperatura) y antrópicos (por ejemplo: cambio en el sistema productivo, cambio del uso de la tierra, cambio en las demandas de agua), y están interrelacionados entre sí. En lo que respecta al período histórico, aunque se cuenta con datos de las principales variables hidrológicas y de agua subterránea, no existe una medida directa de la recarga y su estimación indirecta a partir de observaciones es compleja debido a que, en general, las observaciones suelen estar afectadas por la explotación de los acuíferos, y la estimación de los caudales extraídos de los mismos así como la dinámica del uso de la tierra y demandas de agua son una fuente de incertidumbre importante. Por tanto, en la mayor parte de los casos, la estimación de la recarga se apoya en un conocimiento lo más detallado posible de la hidrogeología del sistema acuífero y en el uso de modelos que integren, en la medida de las posibilidades, la mayor cantidad de procesos involucrados (Pulido-Velázquez et al. 2015, Sanz et al. 2011). Un modelo calibrado del acuífero proporciona cierto grado de información detallada sobre el funcionamiento hidrogeológico y establece las relaciones cualitativas y cuantitativas temporales y espaciales de las relaciones agua superficial - agua subterránea y el bombeo de aguas subterráneas (en general, el comportamiento hidrogeológico de los acuíferos está condicionado por el bombeo de agua subterránea). Sanz et al. (2012), con el objetivo de mejorar el conocimiento de la relación río-acuífero para determinar la influencia de las abstracciones de agua subterránea en el río Júcar, realizaron la estimación de la recarga del Sistema de la Mancha Oriental (MOS). En primer lugar se recopiló y analizó la información disponible: estudios y modelos previos, la información hidrometeorológica disponible, valores de infiltración debido a la precipitación, información de aforos, caudales de los canales de riego y niveles piezométricos, la información geológica e hidrogeológica para tener la mejor representación posible de la estructura y características del sistema acuífero, límites y sus interrelaciones con el agua superficial, zonas de recarga y descarga, la información sobre usos de suelo, demanda de agua del acuífero, zonas regables y otros usos antrópicos. Asimismo, se revisó el estado del arte analizando las metodologías,



técnicas y herramientas que mejor se adaptan al caso de estudio. Posteriormente, se implementó el modelo MODFLOW (McDonald and Harbaugh 1988, Harbaugh et al. 2000) que resuelve las ecuaciones de flujo en medio poroso en tres dimensiones usando una aproximación por diferencias finitas. El proceso de calibración consistió en obtener aquellos valores de los parámetros que logran el mejor ajuste entre los niveles piezométricos de agua subterránea modelados y observados. Cabe señalar, que el comportamiento hidrogeológico del MOS está condicionado por un aumento progresivo en el bombeo de agua subterránea durante el período de estudio (1982–2005), situación que se incluyó en el sistema modelado y constituye otra fuente de incertidumbre. En este estudio, la calibración se realizó mediante el método de prueba y error. El modelo se ejecutó con estimaciones iniciales de los valores de los parámetros de entrada (conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y conductancia del lecho del río) y las diferencias entre los valores observados y simulados se relacionaron con el nivel del agua subterránea. Este método de calibración se usa frecuentemente y se obtienen resultados razonablemente buenos en áreas donde hay suficiente información hidrogeológica disponible. Este es el caso en la parte central del MOS (cerca del río Júcar), donde hay suficiente conocimiento espacial de la geología 3D y los parámetros hidráulicos. Sin embargo, en regiones donde el conocimiento del acuífero en términos de parámetros hidrogeológicos no es tan bueno, el método de prueba y error puede ser menos efectivo y más lento, dado que la carga hidráulica es a menudo una función no lineal de varios parámetros (Hamm et al. 2005). En estos casos se recomienda el uso de calibración automática (p.e.: WinPEST, Doherty 2004) para algunos parámetros hidrogeológicos, logrando así una mayor eficiencia al realizar las simulaciones de modelos. En este estudio la calibración se realizó según dos fases: en estado estacionario y transitorio.

Técnicas muy utilizadas en la actualidad para mejorar el conocimiento de las zonas de recarga y su dinámica, es el uso de "remote sensing" y técnicas basadas en sistemas de información geográfica (Khalaf y Donoghue 2012, Batelaan y De Smedt 2007). Asimismo, en acuíferos con bajo grado de explotación, con existencia de datos observados tanto de agua superficial como subterránea, y un buen conocimiento hidrogeológico de la zona, es posible obtener buenos resultados realizando balances hidrológicos más o menos simples. Aún en estos casos, el uso de modelos es generalizado para la validación de las hipótesis de funcionamiento de los sistemas acuíferos (Jodar-Abellan et al. 2018, Batelaan y De Smedt 2007). Un ejemplo de uso de modelos simples para la estimación de la recarga de acuíferos, tanto en el período de control como en escenarios futuros es la aplicación del modelo SIMPA en el trabajo realizado por el CEDEX: "Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España" (CEDEX 2017). En este estudio se estimó, a nivel nacional y de forma cuasi-distribuida, la recarga de los acuíferos. Según sean los datos de entrada al modelo las variables de precipitación y temperatura del período histórico o de escenarios climáticos futuros, se obtiene una estimación de recarga para el período actual o el efecto del cambio climático en la recarga de los acuíferos. Debido a la simplicidad del modelo y al alcance nacional del estudio, los resultados allí obtenidos deben tomarse como valores orientativos y su uso con fines de gestión no son aconsejables sin estudios complementarios específicos en las zonas de interés. Un buen ejemplo de estudio de detalle en un acuífero específico es el presentado (y desarrollado como publicación de referencia) por Pulido-Velázquez et al. (2015) donde incluyen un número importante de factores afectados por el cambio climático (naturales y antrópicos), e integran modelos más o menos complejos de agua superficial y agua subterránea.



## 5 Revisión de literatura

### 5.1 Introducción

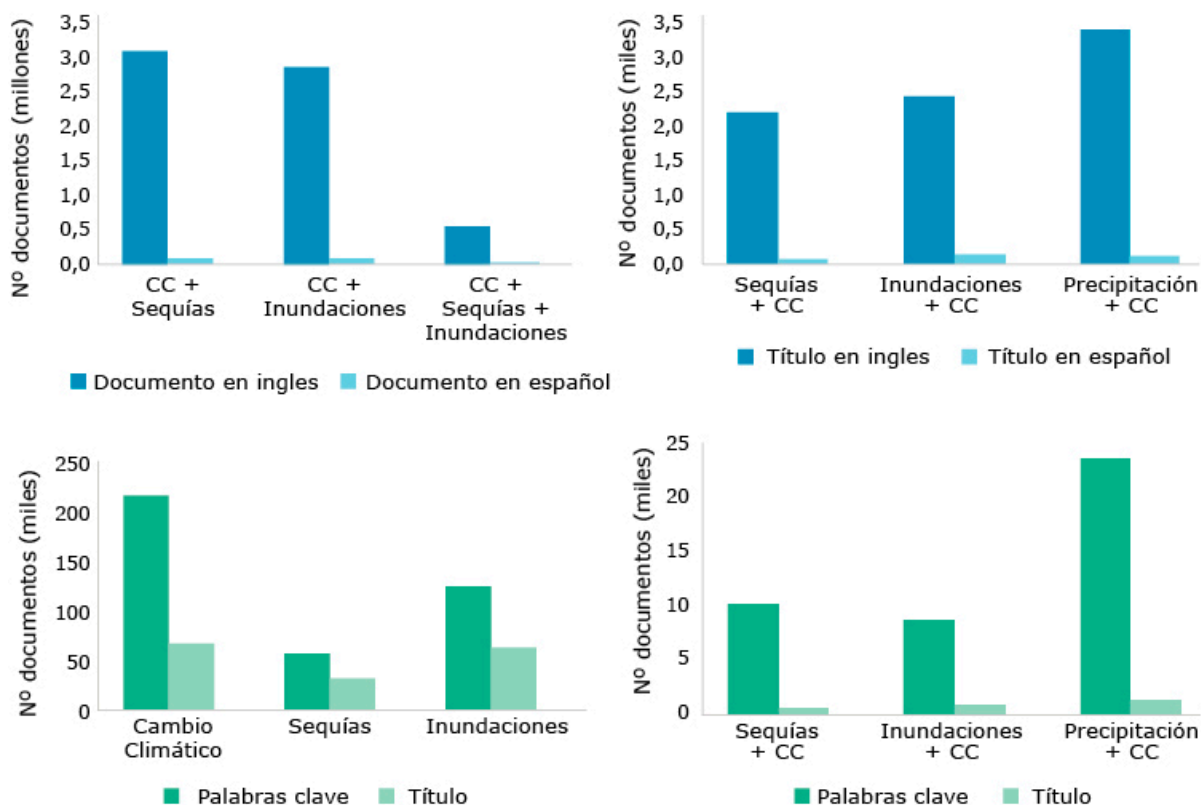
A nivel mundial, es prácticamente inabordable la documentación generada en la temática de sequías e inundaciones en un contexto de cambio climático. Utilizando el motor de búsqueda de Google Académico (<https://scholar.google.com>) se encuentran más de 3.000.000 de documentos relacionados con las sequías y el cambio climático y más de 2.800.000 relacionados con las inundaciones y el cambio climático. Hay más de 500.000 referencias que tratan sequías e inundaciones en el mismo documento. Apenas el 2 % de la literatura identificada son documentos en lengua castellana respecto a los generados en inglés. Restringiendo la búsqueda a documentos cuyo título está relacionado con estos fenómenos, se obtienen más de 2.200 relacionados con sequías y cambio climático y más de 2.500 con inundaciones y cambio climático. Destacan los trabajos relacionados con la variable climática más relevante en el análisis de los fenómenos extremos: la precipitación. Se identificaron más de 3.400 trabajos cuyo título se relaciona con la variable precipitación y el cambio climático. En el caso de la búsqueda restringida al título, los documentos en español representan el 4 % respecto a los realizados en inglés.

En el ámbito científico, la producción literaria relacionada sigue siendo elevada. Tomando como fuente de información la base de datos científica SCOPUS (<https://www.scopus.com>), se identificaron 10.058 documentos científicos cuyas palabras clave se relacionan con la sequía y el cambio climático y en 569 de ellos las palabras clave estaban presente en su título. Se identificaron 8.649 documentos cuyas palabras clave contenían palabras relacionadas con inundaciones y cambio climático, que en 828 casos formaban parte de su título. En 23.420 documentos se relacionaban la precipitación y el cambio climático y en 1.230 de ellos ambos términos estaban incluidos en el título. En la Ilustración 18 se muestra un resumen de las búsquedas bibliográficas realizadas.

Ante un universo tan amplio de literatura académica y científica, la primera fase del trabajo realizado consistió en la identificación y recopilación de la literatura que resulta más relevante. Se consultaron artículos científicos de revistas, comunicaciones a congresos, libros o capítulos de libro, informes técnicos elaborados por organismos de prestigio, tesis doctorales y trabajos profesionales. En estos documentos se identificaron las prácticas seguidas para comprender y modelar los fenómenos hidrológicos extremos, tanto crecidas como sequías, en un contexto de cambio climático. A partir de la documentación recopilada se seleccionó un conjunto de referencias para estudiar con más atención. Las prácticas descritas en estos trabajos se clasificaron en bloques temáticos y categorías generales, para proceder posteriormente a la selección de buenas prácticas, y que se presentan en este trabajo.



Ilustración 18: Documentación identificada a nivel mundial sobre la temática de sequías e inundaciones en un contexto de cambio climático.



En la fila superior se utiliza como fuente de información el motor de búsqueda Google Académico y en la fila inferior la base de datos científica SCOPUS.

## 5.2 Identificación de bloques temáticos y categorías

El análisis de literatura consistió en la recopilación de las referencias más destacadas siguiendo los criterios mencionados en la sección de metodología y realizando un primer análisis para su encuadre. Se recopiló un total aproximado de 400 referencias bibliográficas (29 % relativas a inundaciones, 37 % a sequías y 34 % aplicables a inundaciones y sequías simultáneamente). A continuación, se realizó una valoración global del material recopilado, seleccionando unas 140 referencias para un análisis más detallado. De cada una de estas referencias se realizó una breve reseña, que se presenta en este capítulo. Las referencias seleccionadas se introdujeron en una base de datos, donde se agregaron atributos que permitieron su clasificación y tratamiento para realizar un análisis global. A partir del análisis realizado, se identificaron los temas y técnicas más relevantes, tanto desde el punto de vista científico y metodológico como desde un punto de vista aplicado y operativo. La Ilustración 19 muestra los cuatro bloques temáticos identificados y el número de documentos seleccionados para estudiar con más detalle. En la Tabla 26 se muestran las categorías consideradas en cada bloque temático y el número de referencias seleccionadas para el análisis detallado según categoría y tipo de fenómeno extremo analizado.



Ilustración 19: Definición de bloques temáticos relevantes y número de documentos seleccionados para estudiar con más detalle.

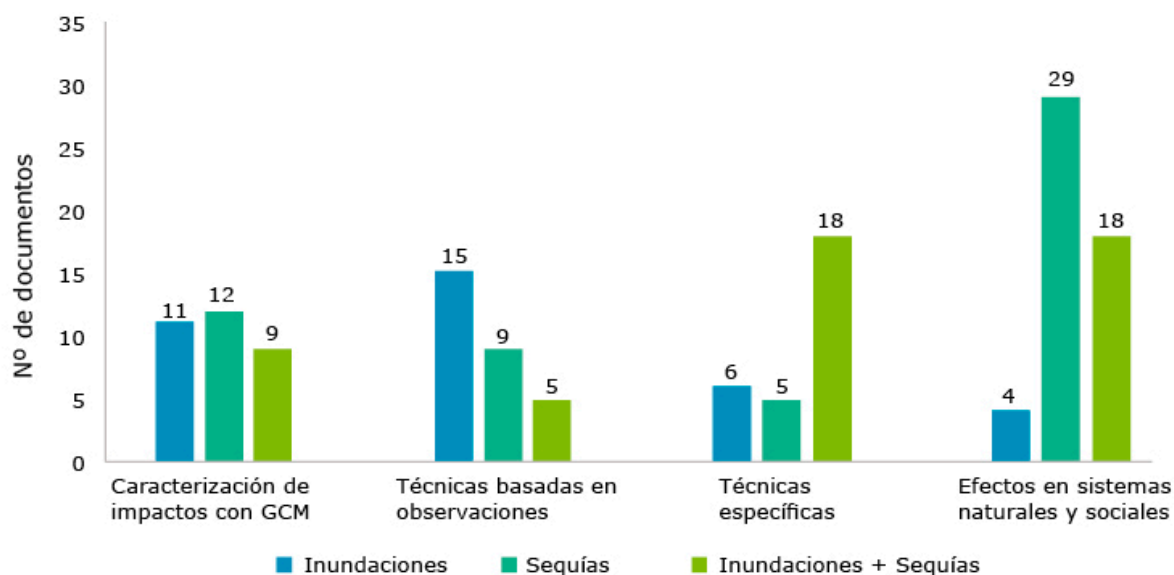


Tabla 26: Bloques temáticos y categorías identificadas.

Bloque	Categorías	I	S	I,S
Caracterización de impactos a partir de GCM	Estudios integrales de inundaciones y sequías	9	8	7
	Impacto de cambio climático fijando un valor de calentamiento global	1	3	1
	Análisis de la evolución de patrones de circulación atmosférica	1	1	1
Técnicas basadas en observaciones	Caracterización de la no estacionariedad de variables observadas	6	1	1
	Análisis de tendencias de extremos de variables observadas	8	6	3
	Análisis de cambios a largo plazo (paleo-hidrología)	1	2	1
Técnicas específicas	Técnicas de reducción de escala	1	1	14
	Técnicas de corrección de sesgo	2	1	1
	Técnicas de análisis de incertidumbre	3	3	3
Análisis de efectos en sistemas naturales y sociales	Técnicas de caracterización y evaluación de fenómenos extremos	-	15	-
	Efecto en la erosión y sedimentación	-	-	2
	Efecto en las aguas subterráneas	-	-	3
	Estudios de impacto, vulnerabilidad y adaptación	-	7	11
	Análisis de disponibilidad de agua	-	7	-
	Efecto sobre la seguridad de infraestructuras	4	-	2

"I" indica el número de documentos que trata sobre inundaciones, "S" sobre sequías, e "I,S" sobre inundaciones y sequías



Las reseñas elaboradas para unas 140 referencias estudiadas se presentan en este capítulo. Los trabajos se identifican por el primer autor y su año de publicación. A continuación, se presenta la referencia bibliográfica. Seguidamente, se presenta un breve texto con las características que han motivado su selección. En cada categoría, los trabajos se han ordenado por orden alfabético.

## 5.3 Caracterización de impactos a partir de modelos globales de clima

### 5.3.1 Estudios integrales de inundaciones y sequías

#### 5.3.1.1 Alfieri et al., 2017

Alfieri, L., Bisselink, B., Dottori, F., Naumann, G., de Roo, A., Salamon, P., Wyser, K., Feyen, L. (2017): *Global projections of river flood risk in a warmer world. Earth's Future 5(2) 171-182. Nº citas: 75*

En este trabajo se presenta un marco para estimar el daño económico y la población afectada por inundaciones de ríos a escala mundial. Se basa en un esquema de modelos en cascada. Involucra simulaciones de impacto hidrológico, hidráulico y socioeconómico, y hace uso de capas globales de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad con una resolución de cuadrícula de 1 km. Se utiliza un conjunto de siete proyecciones climáticas globales de alta resolución basadas RCP8.5 para simular el flujo en el presente y futuro. Se analizó la frecuencia y la magnitud de las inundaciones en los ríos, así como sus impactos bajo escenarios de calentamiento global de 1.5 °C, 2 °C y 4 °C. El modelo hidrológico de paso diario utilizado es el LisFlood model (van der Knijff et al. 2010, Burek et al. 2013). Los resultados muestran una clara correlación positiva entre el calentamiento atmosférico y el riesgo futuro de inundación a escala mundial. Los cambios en el riesgo de inundación se distribuyen de manera desigual, con los mayores incrementos en Asia, América y Europa.

#### 5.3.1.2 Alfieri et al., 2015

Alfieri, L., Burek, P., Feyen, L., Forzieri, G. (2015): *Global warming increases the frequency of river floods in Europe. Hydrology and Earth System Sciences 19(5) 2247-2260. Nº citas: 127*

Este estudio se basa en los resultados de downscaling del proyecto EURO-CORDEX (Coordinated Downscaling Experiment over Europe) bajo el escenario de emisión RCP8.5. Se aplicó el modelo hidrológico LisFlood con paso diario y una cuadrícula de 12 km para ver la proyección de cambios en el peligro de inundación en Europa. Se propone un método "consistente" para evaluar el grado de concordancia del conjunto de proyecciones climáticas. Los resultados indican que el cambio en la frecuencia de caudales extremos será mayor que el cambio en su magnitud. En promedio, en Europa, las proyecciones indican que la frecuencia de caudales máximos con período de retorno superior a 100 años se duplicará en frecuencia en las próximas 3 décadas.

#### 5.3.1.3 Arnell and Gosling, 2016

Arnell, N.W., Gosling, S.N. (2016): *The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. Climatic Change 134(3) 387-401. Nº citas: 178*

Presenta una evaluación de las implicaciones del cambio climático en el riesgo global de inundación en los ríos. Se basa en la estimación de las relaciones de frecuencia de inundación (resolución de 0.5 × 0.5°), utilizando el modelo hidrológico global con paso diario Mac-PDM.09 (Gosling et al. 2010, Gosling y Arnell 2011, Arnell y Gosling 2013) y escenarios climáticos derivados de 21 modelos climáticos, junto con proyecciones de población futura. Se calculan cuatro indicadores del riesgo de inundación: cambio en la magnitud y el período de retorno de los caudales máximos de las inundaciones, la población propensa a las inundaciones y las tierras de cultivo expuestas a cambios sustanciales en la frecuencia de las inundaciones. Además, se realiza una medida generalizada del riesgo de inundación regional basada en la combinación de curvas de frecuencia con funciones genéricas de daños por inundación. Bajo un modelo climático, emisiones y escenario socioeconómico





(HadCM3 y SRES A1B), en 2050 la inundación actual de 100 años ocurriría al menos con el doble de frecuencia en el 40% del mundo. El riesgo de inundación global aumentaría aproximadamente un 187% en 2050 respecto al escenario con ausencia de cambio climático. Se presentan los impactos por continente, y también presenta las relaciones entre el cambio en la temperatura media global de la superficie y los impactos.

#### 5.3.1.4 *Cameron et al., 2000*

*Cameron, D., Beven, K., Naden, P. (2000): Flood frequency estimation by continuous simulation under climate change (with uncertainty). Hydrology and Earth System Sciences 4(3) 393-405. Nº citas: 97*

Estudia el impacto del cambio climático en las leyes de frecuencia de caudales máximos en una cuenca aforada en Gales, UK (cuenca Wye en Plynlimon), y teniendo en cuenta la incertidumbre de la simulación de los procesos lluvia-escorrentía. Se aplica el modelo hidrológico continuo TOPMODEL y un modelo de generación estocástica de lluvia (paso de cálculo horario). Para el cálculo de incertidumbre se utiliza la metodología GLUE (Beven y Binley 1992).

#### 5.3.1.5 *CEDEX, 2017*

*Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España. Centro de Estudios Hidrográficos, del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Director del trabajo: Luis Miguel Barranco Sanz*

El objetivo de este informe es presentar los trabajos realizados para evaluar el impacto del cambio climático en los recursos hídricos (RRHH) en régimen natural y en el régimen de sequías en España. El trabajo es fruto del cumplimiento de la "Encomienda de Gestión de la Oficina Española del Cambio Climático (OECC) al Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) para la Evaluación del Impacto del Cambio Climático en los Recursos Hídricos y Sequías en España (2015)" y de lo especificado en el pliego de prescripciones técnicas que la desarrolla. Los valores climáticos de partida de este trabajo proceden de modelos climáticos globales y de escenarios de emisiones utilizados en el 5º Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Este trabajo constituye una actualización de otro anterior ya realizado en el CEDEX (CEDEX 2010, Álvarez-Rodríguez et al. 2012, Barranco et al. 2014) que usaba un conjunto de proyecciones climáticas regionalizadas para España a partir de resultados de simulaciones con modelos climáticos del 3er informe del IPCC. Se ha evaluado el impacto de 12 proyecciones climáticas con objeto de recoger la incertidumbre asociada a las simulaciones climáticas y, por lo tanto, de expresar de manera más completa el impacto del cambio climático. El ámbito del trabajo es el territorio de España. No obstante, el ámbito se ha ampliado a zonas limítrofes de Portugal y Francia con objeto de simular en aquellas zonas que vierten agua al territorio español y que por lo tanto le aportan RRHH.

Como se mencionó, se partió de 12 proyecciones climáticas regionalizadas elaboradas por la Agencia Estatal de Meteorología. Estas proyecciones se realizaron para emplazamientos de estaciones de medida mediante el método de análogos, empleando técnicas de reducción de escala estadísticas y dinámicas. Los datos puntuales de precipitación y temperatura se procesaron para obtener mapas mensuales con la resolución espacial de trabajo de 1 km<sup>2</sup> y se obtuvieron las variables climáticas derivadas, como la evapotranspiración potencial. Posteriormente, se compararon las proyecciones climáticas con las series para observadas. En este estudio, de forma de mitigar el sesgo detectado en el período de control (fundamentalmente en la variable precipitación) se aplicó el método "delta". Luego se realizó la modelación hidrológica con el modelo SIMPA (modelo continuo cuasi-distribuido) A partir de las simulaciones realizadas se extrajeron las series temporales de las variables hidrológicas básicas en cada escenario simulado. Finalmente, se analizó el impacto del cambio climático en los procesos hidrológicos de interés mediante el estudio del cambio en la escorrentía mensual. También se analizaron otras variables derivadas como la recarga de acuíferos y la evapotranspiración real. En todos los casos se procedió a comparar los valores obtenidos en los escenarios climáticos con los valores obtenidos en el periodo de control.



### 5.3.1.6 Dankers y Feyen, 2009

Dankers, R., Feyen, L. (2009): *Flood hazard in Europe in an ensemble of regional climate scenarios. Journal of Geophysical Research Atmospheres 114(16). Nº citas: 107*

Se analiza el cambio en el riesgo de inundaciones en Europa mediante la simulación de los caudales máximos con el modelo hidrológico diario LISFLOOD (resolución 5 km) a partir de un conjunto (ensemble) de simulaciones climáticas (1961-1990 y 2071-2100). En el noreste de Europa, se observa una disminución general de los caudales extremos en el período 2071-2100, lo que sugiere una reducción en el riesgo de inundaciones extremas debido al deshielo. Se encontró evidencia de una influencia considerable del modelo global que se utiliza para construir los modelos de clima regionales. A escala de cuencas hidrográficas individuales, el uso de una combinación diferente de modelos climáticos o asumir un escenario de emisiones diferente a veces da como resultado una señal de cambio climático muy diferente o incluso opuesta en el riesgo de inundación. Establece que los escenarios probabilísticos que consisten en múltiples realizaciones del estado climático actual y futuro son indispensables para identificar mejor la señal climática.

### 5.3.1.7 Estrela et al., 2010

Estrela, T., Perez-Martin, M. A., Vargas, E. (2010): *Impacts of climate change on water resources in Spain. Hydrological Sciences Journal 57(6): 1154-1167. Nº de citas: 21*

Revisa los recursos hídricos y su variabilidad en España, los recientes estudios de modelado sobre los efectos hidrológicos del cambio climático, los impactos esperados en los recursos hídricos, las implicaciones en las cuencas hidrográficas y las acciones políticas actuales.

### 5.3.1.8 Forzieri et al., 2014

Forzieri, G., Feyen, L., Rojas, R., Flörke, M., Wimmer, F., Bianchi, A. (2014): *Ensemble projections of future streamflow droughts in Europe. Hydrology and Earth System Sciences 18(1) 85-108. Nº citas: 97*

Aborda el problema de las proyecciones futuras de sequía en toda Europa. Mediante el acoplamiento de un modelo hidrológico y un conjunto de simulaciones climáticas con corrección de sesgos (IPCC SRES A1B) y un escenario de uso del agua (Economy First), se generan simulaciones de aportaciones mensuales de caudal a largo plazo (1961-2100) que explican los cambios en el clima, la incertidumbre en el mismo, y en el consumo de agua. Usando el análisis de valor extremo (extreme value), se derivan índices de caudales mínimos y déficit, y se evalúa cómo la magnitud y severidad de las condiciones de caudales mínimos pueden evolucionar a lo largo del siglo XXI. Este análisis muestra que las sequías se volverán más severas y persistentes en muchas partes de Europa debido al cambio climático, excepto en las partes del norte y noreste de Europa. En particular, las regiones del sur enfrentarán fuertes reducciones en los caudales mínimos. El uso futuro del agua agravará la situación en un 10-30% en el sur de Europa. Las proyecciones de conjuntos de modelos (ensemble) indican, de forma significativa, que serán más frecuentes y severas las sequías en el sur y disminuirán en el norte, mientras que los cambios proyectados son más disonantes en una zona de transición intermedia.

### 5.3.1.9 Guan et al., 2019

Guan, X., Zhang, J., Elmahdi, A., Li, X., Liu, J., Liu, Y., Jin, J., Liu, Y., Bao, Z., Liu, C., He, R., Wang, G. (2019): *The capacity of the hydrological modeling for water resource assessment under the changing environment in semi-arid river Basins in China. Water (Switzerland) 11(7). Nº citas: 1*

Evalúa la capacidad y el rendimiento de cuatro modelos hidrológicos para simular los caudales diarios en un entorno cambiante. Se aplica a seis subcuencas del río Amarillo, el segundo río más grande de China, situado en una zona climática semiárida, y se considera los procesos hidrológicos en un período natural (antes de 1970) y bajo disturbios humanos intensos (2000-2013). Los modelos son: el modelo Xin'anjiang (XAJ), el modelo GR4J, el modelo SIMHYD y el RCCC-WBM. Los resultados muestran que (1) la temperatura de superficie anual de todas las subcategorías presentó una tendencia ascendente significativa, y la precipitación anual exhibió una tendencia de disminución insignificante; (2) como resultado del cambio climático y las actividades humanas intensivas, la serie



de escorrentía anual mostró una tendencia descendente con cambios abruptos que ocurrieron principalmente en la década de 1980, con la excepción de la estación Tangnaihai; (3) los cuatro modelos hidrológicos generalmente se desempeñaron bien para la simulación de escorrentía para todas las subcuencas durante el período natural. En términos del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe, el modelo XAJ funcionó mejor en comparación con otros modelos hidrológicos debido a sus representaciones detalladas y mecanismo complejo considerado en la generación de escorrentía y el esquema de tránsito del flujo; (4) los cambios ambientales han impactado el desempeño de los cuatro modelos hidrológicos en todas las subcuencas, en particular la cuenca del río Pianguan, lo que podría atribuirse a las diversas actividades humanas que a su vez representan más complejidad para el ciclo hidrológico regional; (5) el modelo RCCC-WBM, conocido por su estructura y principios simples, se considera aceptable para la simulación de la escorrentía para períodos de perturbación tanto naturales como humanos, y se recomienda para la evaluación de los recursos hídricos en entornos cambiantes para regiones semiáridas.

#### 5.3.1.10 Jiang et al., 2007

*Jiang, T., Chen, Y.D., Xu, C.-y., Chen, X., Chen, X., Singh, V.P. (2007): Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China. Journal of Hydrology 336(43558) 316-333. Nº citas: 235*

Investiga los posibles impactos del cambio climático en la disponibilidad de agua en la cuenca de Dongjiang, en el sur de China, utilizando seis modelos de balance hídrico mensual: Thornthwaite – Mather (TM), Vrije Universitet Brussel (VUB), Xinanjiang (XAJ), Guo (GM), WatBal (WM) y Schaake (SM). El estudio utiliza registros de 29 años de aportaciones mensuales y clima en la cuenca de Dongjiang. Primero se evalúa la capacidad de los seis modelos para simular los componentes actuales del balance hídrico climático y luego se analizan y comparan los resultados de los modelos para simular el impacto del cambio climático proyectado. Los resultados muestran que (1) los seis modelos conceptuales tienen capacidades similares en la reproducción de componentes históricos del balance hídrico; (2) se producen mayores diferencias en los resultados del modelo cuando los modelos se utilizan para simular el impacto hidrológico de los cambios climáticos proyectados; y (3) un modelo sin umbral en la simulación de humedad del suelo da como resultado mayores cambios en la humedad del suelo predicha por el modelo con respecto a climas alternativos que los modelos con un umbral de humedad del suelo.

#### 5.3.1.11 Jodar-Abellan et al., 2018

*Jodar-Abellan, A., Ruiz, M., Melgarejo, J. (2018): Evaluación del impacto del cambio climático sobre una cuenca hidrológica en régimen natural (SE, España) usando un modelo SWAT. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas 35(3) 240-253. Nº citas: 1*

Estima los efectos del cambio climático sobre los principales componentes del balance hídrico en la cuenca alta del río Taibilla (cuenca del río Segura, España) que se encuentra en régimen natural. Se implementa el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) calibrado con el algoritmo SUFI-2, con paso diario. La calibración y validación se realizaron con dos funciones objetivo (NSE y KGE) en el periodo con caudales observados (1996-2012). Las proyecciones de precipitación y temperatura proceden de los modelos climáticos globales (GCM) bcc-csm1-1-m, MPI.ESM.MR y bcc.csm1.1, regionalizados con la técnica de Análogos, bajo los escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5 (período 2010-2050). Los resultados del ajuste mejoran con NSE, con respecto a KGE, en las series de calibración y validación. En las próximas décadas, precipitación, escorrentía superficial y recarga de acuíferos muestran tendencias negativas mientras que la temperatura aumenta entre 1.5 °C y 1.7 °C. Pese a la incertidumbre existente, resulta evidente que las aportaciones disminuirán en la cuenca.

#### 5.3.1.12 JRC, 2018

*Drought Risk Assessment and Management - A Conceptual Framework. Technical Reports EUR 29464*

El riesgo de sequía se define como la probabilidad de incurrir en daños y pérdidas económicas durante y después de una sequía y depende de las interacciones entre tres dimensiones: 1) la severidad y la probabilidad de ocurrencia de un determinado evento de sequía, 2) los activos y / o personas expuestos, y 3) su vulnerabilidad intrínseca o su capacidad para hacer frente al peligro. La



caracterización de estas dimensiones y la representación de sus interacciones en diferentes sectores socioeconómicos plantea varios desafíos. Este documento discute estos desafíos y propone un marco teórico para evaluar el riesgo de sequía a escala global con el fin de proporcionar información relevante para las políticas. Basado en el enfoque conceptual descrito, la Climate Change Initiative (CCI) de la Agencia Espacial Europea (ESA) desarrolló el Observatorio Global de la Sequía (GDO) como el primer monitor dinámico de riesgo de sequía operativo para todo el mundo. El informe está estructurado de la siguiente manera: en primer lugar, las causas y características de los eventos de sequía, así como su relación con el clima. Se discuten la variabilidad y el cambio climático (capítulos 1 y 2). En segundo lugar, se presenta el concepto de riesgo de sequía, incluido un primer enfoque para mapear el riesgo de sequía a escala mundial en función del peligro, la exposición y la vulnerabilidad (capítulo 3). Este marco se vincula luego con los impactos esperados en diferentes sectores económicos y el medio ambiente, incluida la discusión de estudios de caso de Argentina, Sudáfrica, Siria y Estados Unidos (capítulo 4). Finalmente, en los capítulos 5 y 6 se presentan una breve introducción a los aspectos clave de la gestión del riesgo de sequía y una perspectiva de los desafíos y oportunidades futuros.

#### 5.3.1.13 Krysanova et al., 2017

*Krysanova V., Vetter T., Eisner S., Huang S., Pechlivanidis I., Strauch M., Gelfan A., Kumar R., Aich V., Arheimer B., Chamorro A., Van Griensven A., Kundu D., Lobanova A., Mishra V., Plötner S., Reinhardt J., Seidou O., Wang X., Wortmann M., Zeng X., Hattermann F.F. (2017): Intercomparison of regional-scale hydrological models and climate change impacts projected for 12 large river basins worldwide - A synthesis. Environmental Research Letters 12(10). N° citas: 20*

Se realiza una inter-comparación de los impactos del cambio climático proyectados por nueve modelos hidrológicos a escala regional para 12 grandes cuencas fluviales en todos los continentes, y se cuantifican las fuentes de incertidumbre (RCP, GCM y HM) en el marco del proyecto ISIMIP. Los modelos ECOMAG, HBV, HYMOD, HYPE, mHM, SWAT, SWIM, VIC y WaterGAP3 se aplicaron en las siguientes cuencas: Rin y Tajo en Europa, Níger y Nilo Azul en África, Ganges, Lena, Alto Amarillo y Alto Yangtze en Asia, Upper Mississippi, MacKenzie y Upper Amazon en América, y Darling en Australia. La calibración y validación del modelo se realiza utilizando los datos climáticos de WATCH para el período 1971–2000. Los resultados, evaluados con 14 criterios, son en su mayoría satisfactorios, excepto para caudales bajos. Los impactos del cambio climático se analizan usando proyecciones de cinco modelos climáticos globales bajo cuatro RCP. Se evalúa las tendencias en el período 2070–2099 en relación con el período de referencia 1975–2004 para tres variables: el caudal medio anual a largo plazo y los percentiles de caudal alto y bajo Q10 y Q90, así como para los caudales en períodos de caudal alto y bajo de tres meses denotados como HF y LF. Para tres cuencas hidrográficas: Lena, MacKenzie y Tajo muestra fuertes tendencias en las cinco variables (excepto Q10 en MacKenzie); se confirmaron tendencias con grado de confianza moderada para tres a cinco variables para el Rin, el Ganges y el Alto Mississippi; y se encontraron incrementos en HF y LF para el Alto Amazonas, el Alto Yangtze y el Alto Amarillo. El análisis de la estacionalidad proyectada de las aportaciones mostró volúmenes crecientes de caudales durante el período de caudales en cuatro cuencas influenciadas por la precipitación monzónica (Ganges, Alto Amazonas, Alto Yangtze y Alto Amarillo), una amplificación de los picos de crecidas por deshielo en Lena y MacKenzie, y una disminución sustancial de los caudales en el Tajo (todos los meses). El promedio general de fracciones de incertidumbre para las proyecciones de caudal medio anual en el conjunto de modelos aplicados para todas las cuencas fue del 57% para GCM, 27% para RCP y 16% para modelos hidrológicos.

#### 5.3.1.14 Liu et al., 2019

*Liu, L., Ping Xu, Y., Li Pan, S., Xu Bai, Z. (2019): Potential application of hydrological ensemble prediction in forecasting floods and its components over the Yarlung Zangbo River basin, China. Hydrology and Earth System Sciences 23(8) 3335-3352. N° citas: 1*

Estudia el pronóstico de crecidas en la cuenca del río Yarlung Zangbo (YZR,  $2.1 \times 10^5 \text{ km}^2$ ) en China. Utiliza el modelo de capacidad de infiltración variable (VIC) para pronosticar las crecidas máximas anuales y las primeras crecidas anuales en el YZR en función de los datos de precipitación y



temperatura máxima y mínima del Centro Europeo para Pronósticos Meteorológicos de Medio Alcance (ECMWF). Se analiza la incertidumbre de los parámetros del modelo VIC a partir de la realización de numerosas simulaciones. El sistema de pronóstico de crecidas predice las mismas con una antelación mayor a 10 días. La escorrentía superficial inducida por el agua de deshielo es la componente peor capturada por el sistema de pronóstico.

#### **5.3.1.15 Lobanova et al., 2018**

*Lobanova A., Liersch S., Nunes J.P., Didovets I., Stagl J., Huang S., Koch H., Rivas López M.D.R., Maule C.F., Hattermann F., Krysanova V. (2018): Hydrological impacts of moderate and high-end climate change across European river basins. Journal of Hydrology: Regional Studies 18, 15-30. Nº citas: 5*

Se proporciona una imagen del impacto hidrológico del cambio climático en ocho cuencas en Europa: el Tajo en la Península Ibérica; Emån y Lule en Escandinavia; Rin, Danubio y Teteriv en Europa Central y del Este; Tay en la isla de Gran Bretaña y el norte de Dvina, en el noreste de Europa. Se realiza la evaluación de los impactos de los escenarios de cambio climático moderados y de altos sobre los patrones hidrológicos en las cuencas europeas. Para evaluar los cambios proyectados, se crea, calibra y valida el modelo eco-hidrológico SWIM para las cuencas (paso de tiempo diario). El SWIM fue alimentado con las proyecciones climáticas con corrección de sesgos obtenidas de las simulaciones acopladas de los Modelos de circulación global y los Modelos climáticos regionales. Los resultados muestran tendencias decrecientes sólidas en la disponibilidad de agua en la cuenca más meridional (Tajo), un aumento general de la descarga en la cuenca más septentrional (Lule), un aumento en la descarga invernal y un cambio en la estacionalidad en cuencas del norte y centro de Europa. Los impactos del escenario de cambio climático RCP8.5 continúan desarrollándose hasta finales de siglo, mientras que los del cambio climático moderado RCP4.5 se nivelan después de mediados de siglo.

#### **5.3.1.16 Marcos-García et al., 2017**

*Marcos-García, P., Lopez-Nicolas, A., Pulido-Velazquez, M. (2017): Combined use of relative drought indices to analyze climate change impact on meteorological and hydrological droughts in a Mediterranean basin. Journal of Hydrology 554, 292-305. Nº citas: 10*

Se presenta un marco metodológico para analizar el impacto del cambio climático en las sequías meteorológicas e hidrológicas, considerando los cambios en la precipitación y la temperatura, adaptados a una cuenca mediterránea y asumiendo no-estacionariedad. Para este propósito, las sequías se caracterizan por una combinación de índices estandarizados relativos: Índice de precipitación estandarizada (rSPI), Índice de evapotranspiración de precipitación estandarizada (rSPEI) y un Índice de flujo estandarizado (rSFI). La incertidumbre y la estacionariedad de los parámetros de distribución utilizados para calcular los índices de sequía se evalúan mediante técnicas de "bootstrapping resampling" y "overlapping coefficients". Se aplica a la cuenca del río Júcar, modificando el esquema de Thornthwaite para mejorar la representación de la variación intra-anual de la evapotranspiración potencial y se mejoró la simulación de caudales bajos en el modelado hidrológico (modelo de Témez) para una mejor caracterización de sequías hidrológicas. Los resultados para la cuenca del Júcar muestran un aumento general en la intensidad y magnitud de las sequías meteorológicas e hidrológicas en escenarios de cambio climático, debido a los efectos combinados de la reducción de la lluvia y el aumento de la evapotranspiración. Aunque los indicadores muestran valores similares para el período histórico, en escenarios de cambio climático, el rSPI podría subestimar la gravedad de las sequías meteorológicas al ignorar el papel de la temperatura.

#### **5.3.1.17 New Zealand, Ministry for the Environment, 2010**

*Tools for Estimating the Effects of Climate Change on Flood Flow. A Guidance Manual for Local Government in New Zealand.*

El objetivo principal de este manual es ayudar al personal de las autoridades locales, incluidos los administradores de las cuencas, el personal de ingeniería y los administradores de activos, a administrar y minimizar los riesgos que plantea el aumento del riesgo de inundación debido al cambio





climático. Más específicamente, el manual proporciona una guía de buenas prácticas para incorporar los impactos del cambio climático en la estimación del caudal. Lo hace proporcionando: 1) información sobre los efectos clave del cambio climático en el riesgo de inundación, 2) métodos para estimar cambios en la frecuencia y / o magnitud de la lluvia, 3) métodos para convertir los cambios en la lluvia en cambios en el caudal, 4) métodos para convertir los cambios en el caudal en cambios en la inundación, 5) algunos estudios de caso para ilustrar estos métodos. El manual ofrece una lista de opciones, pero no es exhaustivo ni prescriptivo. En otras palabras, no es un manual para la estimación de inundaciones o la gestión del riesgo de inundaciones. Este manual de orientación se ha utilizado como fuente principal de información para el documento de resumen "Preparación para futuras inundaciones: una guía para el gobierno local en Nueva Zelanda".

#### 5.3.1.18 *Sohoulande, 2019*

*Sohoulande Djebou, D.C. (2019): Streamflow Drought Interpreted Using SWAT Model Simulations of Past and Future Hydrologic Scenarios: Application to Neches and Trinity River Basins, Texas. Journal of Hydrologic Engineering 24(9). N° citas: 1*

Se utiliza un enfoque de modelado de cuencas hidrográficas basado en procesos para describir un marco para la proyección del índice de sequía de flujo (SDI). Específicamente, el modelo SWAT se usa para simular dos cuencas ubicadas en el estado de Texas, las cuencas de los ríos Trinity y Neches. El modelo SWAT se calibra con datos de aportación mensual para el período 1990-1995. El modelo se valida para el período 1996-2015. La evaluación del SWAT durante las etapas de calibración y validación muestran valores aceptables de criterios de eficiencia para ambas cuencas (es decir, la eficiencia de Nash-Sutcliffe entre 0.56 a 0.65). El modelo calibrado se utiliza para simular la escorrentía para el período futuro 2041-2070. Sin embargo, el cálculo de SDI requiere el conocimiento de la distribución de probabilidad de los datos de aportaciones acumuladas. Se realiza un análisis de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov para aportaciones acumuladas observadas y simuladas. Se considera una distribución log normal para estimar series de tiempo de SDI. Para el período 1996-2015, los valores SDI de las simulaciones SWAT ajustaron con los derivados de los datos observados ( $0.52 \leq R^2 \leq 0.91$  para el río Neches y  $0.79 \leq R^2 \leq 0.89$  para el río Trinity). Este resultado muestra la capacidad del procedimiento analítico para capturar y proyectar señales SDI realistas.

#### 5.3.1.19 *Sperna et al., 2012*

*Sperna Weiland, F.C., van Beek L.P.H., Weerts A.H. & Bierkens, M.F.P. (2012): Extracting information from an ensemble of GCM to reliably assess future global runoff change. Journal of Hydrology 412-413 66-75. N° de citas: 14*

Se compila la información de múltiples GCM y se combina para evaluar mejor los cambios hidrológicos. Para las proyecciones de precipitación y temperatura, se introdujo el método de promedio de conjunto de confiabilidad (REA) para calcular el cambio promedio ponderado del conjunto con un rango de incertidumbre que lo acompaña. En este estudio, el método REA original se compara con otros tres métodos que calculan el cambio de escorrentía seleccionando o ponderando los GCM en su similitud entre modelos para el clima actual y futuro. Todos los métodos se aplican a campos de escorrentía distribuidos calculados con el modelo hidrológico PCR-GLOBWB forzado con datos meteorológicos de un conjunto de 12 GCM. Las diferencias entre los cambios de escorrentía promedio ponderados y no ponderados para 2100 son pequeños. Dentro del proceso de validación, donde el cambio medio del conjunto GCM se deriva entre los períodos 1961-1975 y 1976-1990, el cambio del conjunto no ponderado se ajusta mejor al cambio observado. Sin embargo, tanto el cambio promedio ponderado como el no ponderado fueron demasiado conservadores. Esto subraya la importancia de considerar un rango de incertidumbre junto con el cambio promedio del conjunto. En este estudio el rango de incertidumbre (o intervalo de confianza del 95%) se define por cuatro veces la diferencia cuadrática media de la raíz alrededor del cambio medio del conjunto. El rango de incertidumbre derivado del método no ponderado es relativamente amplio, los límites de incertidumbre superior e inferior muestran grandes sesgos del cambio observado. Sin embargo, el rango de incertidumbre se redujo de manera confiable mediante el uso de una selección de GCM, aquellos que muestran una mayor similitud entre modelos para el clima actual y futuro.





### 5.3.1.20 Shi et al., 2011

Shi, P., Chen, C., Srinivasan, R., Zhang, X., Cai, T., Fang, X., Qu, S., Chen, X., Li, Q. (2011): *Evaluating the SWAT Model for Hydrological Modeling in the Xixian Watershed and a Comparison with the XAJ Model*. *Water Resources Management* 25(10) 2595-2612. Nº citas: 44

La disminución de la disponibilidad de agua en el río Huaihe, el sexto río más grande de China se ve aún más estresada por el cambio climático y las intensas actividades humanas. En este estudio, se evalúa el rendimiento de SWAT modelando en la cuenca del río Xixian, ubicada en la cabecera del río Huaihe, y compara su desempeño con el modelo Xinanjiang (XAJ) que se ha utilizado ampliamente en China. Debido a la falta de datos disponibles al público, se pone énfasis en la recopilación y procesamiento de datos geospaciales, especialmente en el desarrollo de mapas de cobertura del suelo para el uso del suelo para el área de estudio basados en el muestreo de información tomada sobre el terreno. Se utilizan datos de escorrentía diaria de diez años (1987–1996) de cuatro estaciones de flujo para calibrar SWAT y XAJ. Los datos de la escorrentía diaria de las mismas cuatro estaciones se aplicaron para validar el rendimiento del modelo de 1997 a 2005. Los resultados muestran que tanto SWAT como XAJ funcionan bien en la cuenca del río Xixian, con un porcentaje de sesgo (PBIAS) inferior al 15%, eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE) superior a 0.69 y coeficiente de determinación ( $R^2$ ) superior a 0.72 para los períodos de calibración y validación en las cuatro estaciones de flujo. Tanto SWAT como XAJ pueden simular razonablemente la escorrentía superficial y las contribuciones de flujo base. La comparación entre SWAT y XAJ muestra que los rendimientos del modelo son comparables para el modelado hidrológico. Para el pronóstico de crecidas y la simulación de escorrentía, XAJ requiere una preparación mínima de datos de entrada y se prefiere a SWAT. El SWAT siendo más complejo y basado en procesos puede simular simultáneamente la cantidad y la calidad del agua y evaluar los efectos del cambio en el uso de la tierra y las actividades humanas, lo que lo hace preferible para la gestión sostenible de los recursos hídricos en la cuenca del Xixian, donde las actividades agrícolas son intensivas.

### 5.3.1.21 Terink et al., 2015

Terink, W., Lutz, A.F., Simons, G.W.H., Immerzeel, W.W., Droogers, P. (2015): *SPHY v2.0: Spatial Processes in Hydrology*. *Geoscientific Model Development* 8(7) 2009-2034. Nº citas: 21

Presenta el modelo de Procesos espaciales en hidrología (SPHY v2.0), sus antecedentes de desarrollo, sus conceptos subyacentes y algunas aplicaciones de ejemplo. SPHY se ha desarrollado con el objetivo explícito de simular la hidrología terrestre en escalas flexibles, bajo diversas condiciones fisiográficas e hidroclimáticas, mediante la integración de componentes clave de modelos existentes y bien probados. SPHY es un tipo de modelo de cubeta con fugas distribuido espacialmente, y se aplica celda por celda. El modelo está escrito en el lenguaje de programación Python usando el marco de modelado dinámico PCRaster. SPHY (i) integra la mayoría de los procesos hidrológicos, (ii) tiene la flexibilidad de aplicarse en una amplia gama de aplicaciones hidrológicas, (iii) en varias escalas, y (iv) puede implementarse fácilmente. Los procesos hidrológicos más relevantes que se integran en el modelo SPHY son los procesos de lluvia-escorrentía, los procesos de criósfera, los procesos de evapotranspiración, la evolución dinámica de la cubierta vegetal, la salida del lago/embalse y la simulación de los contenidos de humedad de la zona radicular. Estudios en los que el modelo SPHY se aplicó y probó con éxito se describe en este documento, que incluye (i) predicciones de humedad del suelo en tiempo real para respaldar el manejo del riego en zonas bajas, (ii) estudios de impacto del cambio climático en cuencas fluviales alimentadas por nieve y glaciares, y (iii) pronóstico de flujo operativo en cuencas montañosas.

### 5.3.1.22 Towner et al., 2019

Towner, J., Cloke, H.L., Zsoter, E., Flamig, Z., Hoch, J.M., Bazo, J., De Perez, E.C., Stephens, E.M. (2019): *Assessing the performance of global hydrological models for capturing peak river flows in the Amazon basin*. *Hydrology and Earth System Sciences* 23(7) 3057-3080. Nº citas: 2

Presenta una comparación de ocho Modelos hidrológicos globales (H-TESEL, LisFlood, PCR-GLOBWB, CaMa-Flood, EF5/CREST) que ha facilitado la Global Flood Partnership para simular inundaciones en la cuenca del Amazonas. Para determinar las fortalezas y deficiencias de cada modelo, se evalúa la capacidad para reproducir los caudales diarios máximos anuales en 75



estaciones hidrológicas durante un período de 19 años (1997–2015). Además de resaltar la variabilidad regional del grado de ajuste de los caudales, éstos indican que (a) el componente meteorológico es el dominante en la precisión de los caudales diarios máximos anuales, y (b) el agua subterránea y la calibración del tránsito de LisFlood en los caudales diarios del río no tiene impacto en la capacidad de simular caudales máximos para la cuenca del río elegida.

#### **5.3.1.23 Defra, 2009a**

*Regionalised Impacts of Climate Change on Flood Flows: Hydrological Models, Catchments and Calibration. R&D Milestone Report FD2020/MR1*

El objetivo principal de este proyecto es evaluar la idoneidad de la guía PAG3 que indica un cambio del 20% en los caudales máximos que podrían ocurrir en el período entre 2025 y 2115. Esa guía se estableció como un límite superior de precaución para los cambios en los caudales de los ríos durante los próximos 50 años, y era aplicable a todas las regiones de Gran Bretaña. Desde entonces, esto se ha extendido hasta el período hasta 2115, lo que refleja la falta de evidencia científica para sugerir alguna figura alternativa. Este proyecto ha sido diseñado para proporcionar esta evidencia. Además, la investigación conduce a el desarrollo de directrices regionales, en lugar de nacionales, para los cambios en los caudales máximos debido al cambio climático. Las tareas de modelado hidrológico dentro de este proyecto proporcionan los bloques fundamentales para el análisis posterior de las posibles implicaciones del cambio climático en los caudales de inundación y la regionalización de esos impactos. Esto significa que es esencial que los modelos hidrológicos se configuren y calibren de la manera más sólida posible. En particular, la inclusión del deshielo en los modelos hidrológicos se consideró crucial, dado el objetivo del proyecto de regionalizar los impactos del cambio climático en las inundaciones, ya que el régimen de flujo invernal de las cuencas altas puede verse considerablemente afectado por las nevadas y el deshielo, incluso en el Reino Unido, y los cambios en la temperatura seguramente alterarán el equilibrio entre nevadas y procesos de lluvia en tales cuencas en el futuro. Este informe describe los modelos hidrológicos (su estructura y requisitos de datos), detalla los modelos de 154 cuencas en Gran Bretaña: 120 con el PDM (un modelo hidrológico conceptual agregado) y 35 (generalmente más grandes) cuencas con CLASSIC (un modelo hidrológico semi-distribuido), y presenta sus resultados de calibración. Las calibraciones finales incluyen el uso de un módulo de deshielo, que se aplica (con un conjunto fijo de parámetros del módulo) para todas las cuencas, para evitar una decisión arbitraria sobre las cuencas afectadas. Los modelos hidrológicos con el módulo de deshielo requieren series temporales de precipitación, evaporación potencial y temperatura para simular el caudal medio diario. En general, el rendimiento del modelo mejora cuando se aplica el módulo de deshielo. Los modelos calibrados se utilizaron para simular series de tiempo de referencia de caudales diarios medios de los que se extrajo un conjunto de picos de crecida independientes para cada cuenca. Para la mayoría de las cuencas hay una buena comparación entre las curvas de frecuencia de crecidas ajustadas a los conjuntos de datos de pico máximo de avenida diaria observada y modelada. Los conjuntos de parámetros calibrados finales se utilizan en la siguiente parte del proyecto: la aplicación de un conjunto grande y regular de perturbaciones a series temporales de precipitación observadas, junto con un conjunto menor de perturbaciones (vinculadas) a series temporales de evaporación potencial y temperatura, para investigar la sensibilidad relativa de diferentes cuencas para el rango potencial del cambio climático. El desarrollo de este método de escenario y su aplicación se describe en el informe 2 (Prudhomme y Reynard 2009, denominado en este trabajo como Defra 2009b).

#### **5.3.1.24 Defra, 2009b**

*Regionalised Impacts of Climate Change on Flood Flows. R&D Technical Report FD2020/TR*

El objetivo principal de FD2020 "Impactos regionalizados del cambio climático en los caudales de inundación" fue evaluar la idoneidad de la guía FCDPAG3 de octubre de 2006 sobre el cambio climático. Esta guía requiere que se agregue una asignación del 20% a los caudales máximos para cualquier período entre 2025 y 2115 para cualquier ubicación en Gran Bretaña. Esta guía se consideró precautoria y su derivación reflejó la evidencia disponible en ese momento. FD2020 ha sido diseñado para aumentar esta base de evidencia y los resultados de la investigación sugieren que las pautas regionales, en lugar de nacionales, para los cambios en los flujos máximos debido al cambio climático



podrían ser más apropiadas. La mayoría de los análisis de impacto del cambio climático están guiados por escenarios utilizando los resultados de uno o más modelos climáticos globales (GCM) o regionales (RCM). Hay dos debilidades principales de este enfoque. Primero, no se puede obtener una comprensión completa de las interrelaciones entre los cambios climáticos, las propiedades de las cuencas y los cambios en los caudales de inundación. En segundo lugar, no se obtiene una idea de lo que podría ocurrir si sucede algo más que las proyecciones exactas de los escenarios basados en modelos climáticos, de modo que cuando se lanzan nuevos escenarios, se deben realizar nuevos estudios de impacto. Esto implica que cualquier política derivada de esta evidencia basada en escenarios es igualmente limitada en el tiempo. Para superar este problema, este proyecto adoptó un enfoque diferente, basando la metodología en un análisis de sensibilidad de amplio alcance y, como tal, es neutral y no depende de ningún conjunto de escenarios de cambio climático. El enfoque investiga la respuesta de la cuenca hidrográfica a los cambios climáticos al imponer los mismos cambios a un conjunto de cuencas hidrográficas en toda Gran Bretaña. Esto permite que las cuencas que responden de manera similar se agrupen o "regionalicen" en tipos de respuesta a crecidas. Para garantizar que los resultados sean sólidos, el marco ha sido diseñado para investigar cambios en el clima que incluyan el conocimiento actual sobre el cambio climático futuro disponible de los GCM del Cuarto Informe de Evaluación del IPCC y RCM utilizados para derivar el conjunto de productos UKCP09. El método permite que cualquier cuenca hidrográfica, incluidas las no modeladas como parte de este proyecto, se asigne a un tipo de respuesta a inundaciones de acuerdo con las propiedades de la cuenca y, por lo tanto, se evalúa su vulnerabilidad al cambio climático. La investigación también ha proporcionado una variedad de otras herramientas de cuenca y de escenarios específicos para evaluar el riesgo de cambio en los caudales máximos, y estos se ilustran en este informe. La investigación ha llevado a una serie de hallazgos clave en relación con los objetivos del proyecto. Primero, el análisis basado en la captación sugiere que la asignación actual ya no se puede considerar como precaución ya que un cambio del 20% no abarca la mayoría de los cambios de captación en los caudales de inundación. En segundo lugar, existe una fuerte evidencia de que la respuesta de la cuenca al cambio climático (en términos de cambio en los caudales de inundación) está influenciado por las propiedades de la cuenca. Esto implica que una asignación nacional única para el cambio climático podría no ser apropiada y que podrían desarrollarse asignaciones más "regionalizadas", dependiendo del tipo de cuenca.

### 5.3.2 Impacto de cambio climático fijando un valor de calentamiento global

#### 5.3.2.1 *Abiodun et al., 2019*

*Abiodun, B.J., Makhanya, N., Petja, B., Abatan, A.A., Oguntunde, P.G. (2019): Future projection of droughts over major river basins in Southern Africa at specific global warming levels. Theoretical and Applied Climatology 137(43558) 1785-1799. N° citas: 4*

Muestra que la inclusión de la evapotranspiración (además de la precipitación) puede alterar la magnitud y robustez de las proyecciones de sequía. Utiliza dos índices de sequía (SPEI y SPI) para proyectar los posibles impactos del calentamiento global en el sur de África, y se centra en cuatro cuencas de ríos importantes (Orange, Limpopo, Zambezi y Okavango). Se analiza proyecciones climáticas del experimento CORDEX, según cuatro niveles de calentamiento global (GWL) (1.5 °C, 2.0 °C, 2.5 °C y 3.0 °C). Los resultados muestran que las simulaciones CORDEX brindan una representación realista de todas las variables climáticas necesarias para cuantificar las sequías en el sur de África. Las simulaciones proyectan un aumento en la intensidad y frecuencia de la sequía SPEI sobre África meridional e indican que la magnitud de la proyección aumenta con el aumento de GWL. Por el contrario, proyectan un cambio no significativo en las sequías de SPI en todos los GWL. La mayoría de las simulaciones distinguen claramente entre los patrones de sequía proyectados SPEI y SPI, y la distinción se vuelve más clara con el aumento de GWL.

#### 5.3.2.2 *Arnell et al., 2019*

*Arnell, N.W., Lowe, J.A., Challinor, A.J., Osborn, T.J. (2019): Global and regional impacts of climate change at different levels of global temperature increase. Climatic Change 155(3) 377-391. N° citas: 1*



Proporciona estimaciones consistentes de los impactos y riesgos globales y regionales por el aumento en la temperatura media global de hasta 5 °C por encima de los niveles preindustriales, para más de 30 indicadores que representan temperaturas extremas y olas de calor, cambios hidrológicos, inundaciones y sequías y proxies para los impactos en los rendimientos de los cultivos. A escala global, todos los impactos son adversos, y los impactos y riesgos aumentan con el cambio de temperatura. Por ejemplo, la probabilidad promedio global de una gran ola de calor aumenta de 5% en 1981–2010 a 28% a 1.5 °C y 92% a 4 °C, de una sequía agrícola aumenta de 9 a 24% a 1.5 °C y 61 % a 4 °C, y del período de retorno de 50 años, las crecidas aumentan de 2 a 2.4% a 1.5 °C y 5.4% a 4 °C. La posibilidad de una ola de calor perjudicial para el maíz aumenta del 5 al 50% a 4 °C, mientras que la probabilidad del arroz aumenta del 27 al 46%. Existe una considerable incertidumbre en torno a estas estimaciones centrales, y los impactos y riesgos varían entre las regiones. Algunos impactos, por ejemplo, olas de calor, aumentan rápidamente a medida que aumenta la temperatura, mientras que otros muestran respuestas más lineales.

### 5.3.2.3 Donnelly et al. 2017

*Donnelly, Ch., Greuell, W., Andersson, J., Gerten, D., Pisacane, G., Roudier, P. Ludwig, F. (2017): Impacts of climate change on European hydrology at 1.5, 2 and 3 degrees mean global warming above preindustrial level. Climatic Change, 143, 13–26. Nº citas: 80*

El estudio analiza el impacto del cambio climático sobre la escorrentía y espesor de nieve en Europa para 1.5, 2 y 3 °C de calentamiento global por encima del nivel preindustrial (período 1881-1910). Se acoplan conjuntos de proyecciones climáticas que representan cada uno de los niveles de calentamiento. Estos conjuntos se utilizan para forzar cinco modelos hidrológicos globales y se calculan los cambios en los indicadores hidrológicos. En primer lugar, dependiendo del tipo de impacto que se va a analizar, se determinan las variables climáticas que se analizarán. Se plantea analizar escenarios de calentamiento de 1.5, 2 y 3°C. A partir de las proyecciones climáticas derivadas de la combinación de diferentes escenarios de emisión (RCP2.6 a RCP8.5) con modelos climáticos se identifica el periodo de 30 años para el que se alcanzan los escenarios climáticos formulados. El periodo o ventana de análisis se centra en el año en que se produce el valor de incremento específico. El periodo de tiempo obtenido es variable dependiendo del escenario de emisión y del modelo climático considerado. A continuación, se realiza el análisis de impacto sobre el sector de interés mediante el modelo apropiado. El impacto sobre las variables hidrológicas (lluvia, escorrentía, inundaciones, sequías, etc.) se analiza con modelos hidrológicos globales. Una vez obtenidas las series hidrológicas, se extraen conclusiones relevantes para los distintos sectores: agua potable, riego, hidroelectricidad, ecosistemas, etc.

### 5.3.2.4 Naumman et al., 2018

*Naumann, G., Alfieri, L., Wyser, K., Mentaschi, L., Betts, R.A., Carrao, H., Spinoni, J., Vogt, J., Feyen, L. (2018): Global Changes in Drought Conditions Under Different Levels of Warming. Geophysical Research Letters 45(7) 3285-3296. Nº citas: 36*

Se evalúa cómo se pueden desarrollar las condiciones de sequía en todo el mundo para un calentamiento de 1.5, 2 y 3 °C en comparación con las temperaturas preindustriales. Los resultados muestran que dos tercios de la población mundial experimentarán un aumento progresivo de las condiciones de sequía con el calentamiento. Para las zonas más secas, se proyecta que las duraciones de la sequía aumenten rápidamente con el calentamiento, promediando globalmente una ratio de 2.0 meses/°C por debajo de 1.5 °C a 4.2 meses/°C cuando se acerque a 3 °C. Las magnitudes de sequía podrían duplicarse para el 30 % de la masa terrestre mundial. Si las tasas de calentamiento contemporáneas continúan, los déficits de oferta y demanda de agua podrían multiplicarse por cinco en la mayoría de África, Australia, el sur de Europa, los estados del sur y centro de los Estados Unidos, América Central, el Caribe, el noroeste de China y partes de Sudamérica. En aproximadamente el 20% de la superficie terrestre global, la magnitud de la sequía se reducirá a la mitad con un calentamiento de 1.5 °C y niveles más altos, principalmente la mayoría de las áreas terrestres al norte de la latitud 55° N, pero también partes de Sudamérica y Asia oriental y sudoriental. Se proyecta un aumento progresivo y significativo en la frecuencia de las sequías con el calentamiento en la cuenca mediterránea, la mayor parte de África, Asia occidental y meridional,



América Central y Oceanía, donde se proyecta que las sequías ocurran de 5 a 10 veces más frecuentes incluso bajo objetivos ambiciosos de mitigación y eventos con actual período de retorno de 100 años podrían ocurrir cada dos o cinco años con un calentamiento de 3 °C.

#### 5.3.2.5 *Wei et al., 2019*

*Wei, Y., Yu, H., Huang, J., Zhou, T., Zhang, M., Ren, Y. (2019): Drylands climate response to transient and stabilized 2 °C and 1.5 °C global warming targets. Climate Dynamics 53(43558) 2375-2389. N° citas: 2*

Se evalúan los cambios climáticos en las zonas áridas (en el mundo) asumiendo calentamiento transitorio y estabilizado de 1.5 °C y 2 °C utilizando simulaciones del Modelo del Sistema Terrestre Comunitario. Las proyecciones indican que podría producirse un calentamiento de 2.3 °C sobre las zonas secas en un mundo más cálido estabilizado de 2 °C a fines de este siglo. El calentamiento en las regiones más secas es mayor y las áreas hiper áridas experimentarían un calentamiento de 2.4 °C. Comparando los objetivos de calentamiento de 2 °C a 1.5 °C, el calentamiento adicional de 0.5 °C conducirá a un calentamiento de ~ 1.0 °C en las zonas secas de Eurasia y América del Norte. En respuesta al calentamiento de 2 °C, el aumento de la precipitación (21.8–42.6 mm/año) no es suficiente para compensar el aumento de PET (88.3–101.7 mm/año) sobre las zonas secas, lo que resulta en la expansión de las tierras secas y los 0.5 °C adicionales El calentamiento global agravará la sequía en las tierras secas del sur de América del Norte y África del Norte. En comparación con el objetivo de calentamiento estabilizado de 2 °C, controlar el calentamiento global dentro de 1.5 °C reducirá el calentamiento en las zonas áridas en 0.7 °C, y reducirá la expansión de las zonas áridas en relación con 1961-1990 en ~ 44%. En comparación con los escenarios de calentamiento estabilizado, la respuesta a la temperatura y el aumento de la cobertura del área de las zonas áridas son más altos en los escenarios de calentamiento transitorio, pero la diferencia de temperatura causada por el calentamiento global adicional de 0.5 °C y el aumento de la precipitación en las zonas áridas secas son más bajos.

### 5.3.3 Análisis de la evolución de patrones de circulación atmosférica

#### 5.3.3.1 *Gupta et al., 2018*

*Gupta H.V., Sapriza-Azuri G., Jódar J., Carrera J. (2018): Circulation pattern-based assessment of projected climate change for a catchment in Spain. Journal of Hydrology 556, 944-960. N° citas: 4*

Presenta un enfoque para evaluar los impactos hidrometeorológicos a escala de cuenca del cambio climático proyectado basado en los patrones de circulación atmosférica (ACP) de una región. El enfoque está motivado por la conjetura de que los GCM son especialmente buenos para simular los patrones de circulación atmosférica que controlan el transporte de humedad y que se puede esperar que cambien en respuesta al calentamiento global. En apoyo de esto, se muestra (para fines del siglo XX) que los GCM proporcionan simulaciones mucho mejores de ACP que las de la cantidad de precipitación para la cuenca del Alto Guadiana en el centro de España. Para el mismo período, cuatro de los veinte MCG que participan en la quinta evaluación del IPCC proporcionan representaciones bastante precisas de los patrones espaciales de la presión media del nivel del mar, la distribución de frecuencias del tipo de ACP, el "número de días lluviosos por mes" y la "probabilidad de lluvia diaria" (también reproducen la tendencia de "cantidad de días húmedos", aunque no las magnitudes reales). Un análisis consecuente de las tendencias proyectadas y los cambios en la ACP hidroclimática entre finales del siglo XX y XXI indica que (1) los cambios reales parecen ocurrir más rápido de lo previsto por los modelos, y (2) para dos escenarios de emisión de gases de efecto invernadero (RCP4.5 y RCP8.5) la disminución esperada en el volumen de precipitación se asocia principalmente con unos pocos ACP específicos (principalmente flujos direccionales desde el Océano Atlántico y el Mar Cantábrico), y con una probabilidad decreciente de lluvia (vinculada al aumento de las temperaturas) en lugar de la cantidad de días húmedos. Este enfoque es una alternativa para las evaluaciones de impactos climáticos a escala de cuenca que el enfoque tradicional de reducción de escala estadística y corrección de sesgos.





### 5.3.3.2 *Rust et al., 2019*

*Rust, W., Holman, I., Bloomfield, J., Cuthbert, M., Corstanje, R. (2019): Understanding the potential of climate teleconnections to project future groundwater drought. Hydrology and Earth System Sciences 23(8) 3233-3245. Nº citas: 1*

Evalúa el grado en que la variabilidad plurianual en las aguas subterráneas se puede utilizar para indicar la ocurrencia de las sequías de aguas subterráneas en el Reino Unido. Las transformaciones "wavelet" continuas muestran cómo los repetidos ciclos forzados por teleconexiones de 7 y 16-32 años en la mayoría de los sitios de aguas subterráneas de los principales acuíferos del Reino Unido pueden controlar sistemáticamente la recurrencia de la sequía de las aguas subterráneas; y se proporciona evidencia de que estos modos periódicos son impulsados por teleconexiones. Las reconstrucciones Wavelet demuestran que las periodicidades plurianuales de la Oscilación del Atlántico Norte, conocida por forzar la meteorología del Atlántico Norte, explican hasta el 40% de la variabilidad total del almacenamiento de agua subterránea. Además, la mayoría de las sequías registradas en el Reino Unido en la historia reciente coinciden con una fase mínima en los ciclos de 7 años impulsados por NAO en el nivel de las aguas subterráneas, que proporcionan información sobre los eventos de sequía en una escala de tiempo multianual. Los pronósticos de sequía de aguas subterráneas de largo alcance a través de teleconexiones climáticas presentan oportunidades para la predicción de la sequía y su gestión en toda la región del Atlántico Norte.

### 5.3.3.3 *Sapriza et al., 2013*

*Sapriza Azuri G., Jódar J., Carrera J., Gupta H.V. (2013): Stochastic Simulation of Nonstationary Rainfall Fields, Accounting for Seasonality and Atmospheric Circulation Pattern Evolution. Mathematical Geosciences 45(5) 621-645. Nº citas: 9*

Se presenta un modelo para generar campos de lluvia diarios y espacialmente correlacionados. El modelo, denominado "Stochastic Rainfall Generating Process" (Proceso estocástico de generación de lluvia), está diseñado para incorporar dos importantes no-estacionariedades: cambios en las frecuencias de diferentes mecanismos de generación de precipitación (frontal y convectiva) y no-estacionariedades espaciales causadas por interacciones de patrones atmosféricos de mesoescala con la topografía (efectos orográficos). Estas no-estacionariedades se estudian como conjuntos discretos del Proceso de generación de lluvia estocástica estacionaria en el tiempo, cada uno de los cuales representa los diferentes patrones espaciales de lluvia (incluida su variación con la topografía) asociados con diferentes patrones de circulación atmosférica y épocas del año (estaciones). Cada proceso de generación de lluvia estocástico discreto genera campos de lluvia correlacionados diariamente como el producto de dos campos aleatorios. Primero, la cantidad de lluvia es generada por un proceso Gaussiano transformado que aplica simulación Gaussiana secuencial. En segundo lugar, la delimitación de las áreas de lluvia y sin lluvia (proceso de intermitencia) se define mediante una función aleatoria binaria obtenida por simulaciones de indicadores secuenciales. El modelo se aplicó en la cuenca del Alto Guadiana en España. El resultado sugiere que el modelo proporciona una reproducción precisa de las principales características espacio-temporales de la lluvia necesarias para el modelado hidrológico y las evaluaciones de los recursos hídricos. Los resultados mejoraron significativamente al incorporar la deriva espacial relacionada con la precipitación orográfica en el modelo.

## 5.4 Técnicas basadas en observaciones

### 5.4.1 Caracterización de la no estacionariedad de variables observadas

#### 5.4.1.1 *Brunetti et al., 2004*

*Brunetti, M., Buffoni, L., Mangianti, F., Maugeri, M., Nanni, T. (2004): Temperature, precipitation and extreme events during the last century in Italy. Global and Planetary Change 40(43497) 141-149. Nº citas: 159*

Resume las actividades dentro de un amplio programa de investigación para la reconstrucción de la evolución del clima italiano en el siglo XX. El principal resultado del programa es que el clima italiano





se está volviendo más cálido y seco. La disminución de la precipitación depende de la reducción en el número de días húmedos, ya que la intensidad de precipitación muestra una tendencia positiva. Además, hay una tendencia hacia un aumento de los eventos de fuertes precipitaciones y largos períodos de sequía. La mayoría de las señales observadas parecen deberse a cambios en la circulación atmosférica que causan un aumento en la frecuencia de los anticiclones subtropicales sobre la cuenca del Mediterráneo occidental. Esta hipótesis también está respaldada por la evolución de la cantidad total de nubes en Italia en el período 1951-1996.

#### 5.4.1.2 *Chen et al., 2017*

*Chen, P.-C., Wang, Y.-H., You, G.J.-Y., Wei, C.-C. (2017): Comparison of methods for non-stationary hydrologic frequency analysis: Case study using annual maximum daily precipitation in Taiwan. Journal of Hydrology 545, 197-211. N° citas: 15*

Aplica tres métodos para analizar la no estacionariedad de la precipitación máxima anual. Basado en el principio de identificación de distribución y tendencias con momentos que varían en el tiempo, se emplean tres métodos: la estimación de mínimos cuadrados ponderados paramétricos (WLS), la transformación de wavelet discreta no paramétrica (DWT) y un conjunto de descomposición de modo empírico (EEMD). Se evalúa la aplicabilidad de los enfoques sin parámetros, en comparación con los métodos tradicionales basados en parámetros. A diferencia de la mayoría de los estudios que analizan la no estacionariedad de los primeros momentos, se incorpora el análisis del segundo momento. Se estudiaron las principales estaciones climáticas en Taiwán para evaluar la no estacionariedad de la precipitación diaria máxima anual. Los resultados demuestran la aplicabilidad de estos tres métodos en la identificación de no estacionariedad. Para la mayoría de los casos, no se observaron diferencias significativas con respecto a las tendencias identificadas usando WLS, DWT y EEMD. Según los resultados, un modelo lineal debería ser capaz de capturar la varianza de tiempo en el primer o segundo momento, mientras que las tendencias parabólicas deben usarse con precaución debido a sus rápidos aumentos característicos. También se observa que las variaciones locales en la precipitación tienden a ser demasiado enfatizadas por DWT y EEMD.

#### 5.4.1.3 *Garijo y Mediero, 2018*

*Garijo C., Mediero L. (2018): Influence of climate change on flood magnitude and seasonality in the Arga River catchment in Spain. Acta Geophysica 66(4) 769-790. N° citas: 1*

Se propone una metodología para cuantificar los cambios en la magnitud de las avenidas futuras y la estacionalidad debido al cambio climático a escala de cuenca. Se utilizan proyecciones de 24 modelos climáticos globales, con 10 "downscaled" por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y 14 del proyecto EURO-CORDEX, bajo dos escenarios de emisión, RCP4.5 y RCP8.5. Los modelos climáticos proporcionados por la AEMET se corrigieron en términos de sesgo. Se utiliza el modelo hidrológico HBV para simular el comportamiento hidrológico de la cuenca. Las simulaciones se analizaron a través de series de caudales máximos anuales y de caudales por encima del umbral (POT). Los resultados muestran una disminución en la magnitud de las crecidas extremas para las proyecciones de la AEMET. Sin embargo, los resultados de las proyecciones de EURO-CORDEX muestran tendencias diferentes, dependiendo del RCP. Se nota una pequeña disminución en la magnitud de las avenidas para el RCP4.5, mientras que se encuentra un aumento para el RCP8.5. Con respecto al análisis de estacionalidad mensual realizado mediante el uso de series POT, se identifica un retraso en el tiempo de la ocurrencia de las avenidas desde fines de otoño hasta fines de invierno que respalda los hallazgos de estudios recientes realizados con datos observados en las últimas décadas.

#### 5.4.1.4 *Kalra et al., 2008*

*Kalra, A., Piechota, T.C., Davies, R., Tootle, G.A. (2008): Changes in U.S. streamflow and Western U.S. snowpack. Journal of Hydrologic Engineering 13(3) 156-163. N° citas: 65*

Investiga la tendencia y los cambios de escorrentía durante un período de 52 años entre 1951 y 2002 utilizando datos de 639 estaciones de aforo no alteradas. Esto es particularmente relevante ya que el tema del cambio climático es de interés para muchos, y los estudios han indicado un cambio abrupto en el clima alrededor del año 1976/77. Las tendencias se evalúan mediante tres pruebas



estadísticas: rho de Spearman, Mann-Kendall y regresión lineal. La resolución temporal utilizada para el estudio incluyó el año hídrico octubre - septiembre, otoño - invierno octubre - marzo, y primavera - verano abril - períodos de septiembre. Además, los datos SWE equivalentes de agua de nieve para 121 estaciones SNOTEL para el período de 1941 a 2004 se utilizan para evaluar las tendencias en el oeste de los EE. UU. Los resultados indicaron que las regiones de Mississippi y Missouri tienen una tendencia creciente en la cantidad de escorrentía. Las regiones del Pacífico Noroeste y el Atlántico Sur-Golfo tienen una escorrentía decreciente debido a un cambio radical en el clima. Tendencias decrecientes para el SWE se destacó para una serie de estaciones en los estados de Oregon y Utah.

#### 5.4.1.5 *Ishak et al., 2013*

*Ishak, E.H., Rahman, A., Westra, S., Sharma, A., Kuczera, G. (2013): Evaluating the non-stationarity of Australian annual maximum flood. Journal of Hydrology 494 (2013) 134–145*

Se analiza la no-estacionariedad de las series más largas de caudales máximos anuales en Australia, en 491 pequeñas y medianas cuencas con registros desde 30 a 97 años en estado natural. Los datos se analizan para determinar las tendencias mediante la prueba de Mann-Kendall (MK), durante tres períodos de estudio (1955–2004, 1965–2004 y 1975–2004). También se utilizó un enfoque regional MK y un enfoque de remuestreo bootstrap para analizar la correlación cruzada en la estructura de los datos. El resultado de la prueba MK indica una tendencia descendente de inundaciones en las regiones sudeste y sudoeste de Australia. Además de la prueba MK, se realizó un análisis parcial MK para evaluar la influencia de tres índices que representan la variabilidad climática a gran escala: el modo anular meridional (SAM), la oscilación meridional El Niño (Niño 3.4) y la oscilación interdecadal del Pacífico (IPO). El estudio sugiere que gran parte de la tendencia observada en las inundaciones puede estar asociada con estos modos climáticos. Sin embargo, del estudio de covarianza aún no se puede determinar en qué medida los cambios observados se deben a la variabilidad natural o al cambio climático antropogénico.

#### 5.4.1.6 *Machado et al. 2015*

*Machado, M.J., Botero, B.A., López, J., Francés, F., Díez-Herrero, A., Benito, G. (2015): Flood frequency analysis of historical flood data under stationary and non-stationary modelling. Hydrology and Earth System Sciences 19(6) 2561-2576. Nº citas: 34*

Se analiza un registro detallado de avenidas de 400 años del río Tajo en Aranjuez bajo enfoques de análisis de frecuencia de caudales máximos estacionario y no estacionario. Los registros históricos de avenidas en Aranjuez se obtuvieron de documentos (Actas del Ayuntamiento, diarios, crónicas, memorias, etc.), marcas epigráficas y fuentes e informes históricos indirectos. Los caudales máximos asociados a niveles de agua de diferentes avenidas (derivadas de descripciones o marcas epigráficas) se calcularon utilizando un modelo hidráulico unidimensional (HEC-RAS). Sobre el registro sistemático del aforador en Aranjuez (1913–2008), se produjo un cambio sustancial en 1957 debido a la construcción de tres grandes embalses en las cabeceras del Tajo (Bolarque, Entrepeñas y Buendía) que controlan el 80% de la superficie de la cuenca que drena a Aranjuez. Se utilizaron dos modelos diferentes para el análisis de frecuencia de inundación: (a) un modelo estacionario y (b) un modelo variable en el tiempo basado en "modelos aditivos generalizados para ubicación, escala y forma" (GAMLSS), que incorpora covariables externas relacionadas con la variabilidad climática (índice NAO) y un índice de embalse. El análisis de frecuencia de caudales máximos utilizando datos documentales (más registros medidos) mejoró la estimación de la probabilidad de ocurrencia de caudales máximos extremos (período de retorno  $\geq$  a 100 años). Bajo el modelo no estacionario, la ocurrencia de caudales máximos anuales asociados a un período de retorno de 100 años ha cambiado en los últimos 500 años debido a la variabilidad decadal y multidecadal del NAO. Sin embargo, el análisis de frecuencia bajo modelos estacionarios fue exitoso al proporcionar un caudal máximo promedio alrededor de la cual los cuantiles de caudales máximos estimados por modelos no estacionarios fluctúan a través del tiempo.

#### 5.4.1.7 *Mentaschi et al., 2016*

*Mentaschi, L., Vousdoukas, M., Voukouvalas, E., Sartini, L., Feyen, L., Besio, G., Alfieri, L. (2016): The transformed-stationary approach: A generic and simplified methodology for non-stationary extreme value analysis. Hydrology and Earth System Sciences 20(9) 3527-3547. Nº citas: 9*



Se presenta una metodología transformada-estacionaria (TS) para realizar el análisis de valores extremos (EVA) no estacionario. Este enfoque consiste en (i) transformar una serie de tiempo no estacionaria en una estacionaria, a la que se puede aplicar la teoría de EVA estacionaria, y (ii) transformar inversamente el resultado en una distribución de valor extremo no estacionaria. Como transformación, se propone y discute una normalización simple de la señal que varía en el tiempo y se muestra que permite una formulación integral de modelos de valor extremo generalizado no estacionario (GEV) y distribución generalizada de Pareto (GPD) con un parámetro de forma constante. Se realiza una validación de la metodología en series temporales de altura de ola significativa y caudales en ríos, que muestran diversos grados de variabilidad a largo plazo y estacional. Los resultados del enfoque propuesto son comparables con los resultados de (a) un EVA estacionario con períodos cuasi-estacionarios de series no estacionarias y (b) el método establecido para EVA no estacionario. Sin embargo, la técnica propuesta tiene ventajas en ambos casos. Por ejemplo, en contraste con (a), la técnica propuesta utiliza el horizonte de tiempo completo de la serie para la estimación de los extremos, lo que permite una estimación más precisa de los grandes períodos de retorno. Además, con respecto a (b), desacopla la detección de patrones no estacionarios del ajuste de la distribución de valores extremos. Como resultado, los pasos del análisis se simplifican y es posible realizar diagnósticos intermedios. En particular, la transformación puede llevarse a cabo mediante técnicas estadísticas simples, como filtros basados en la media móvil y la desviación estándar, y el procedimiento de ajuste es estacionario con algunos grados de libertad y es fácil de implementar y controlar. Se ha desarrollado una caja de herramientas MATLAB de código abierto para aplicar esta metodología, que está disponible en <https://github.com/menta78/tsEva/>

#### 5.4.1.8 Lehner et al., 2006

*Lehner, B., Döll, P., Alcamo, J., Henrichs, T., Kaspar, F. (2006): Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: A continental, integrated analysis. Climatic Change 75(3) 273-299. Nº citas: 460*

Se presenta un análisis continental integrado por primera vez de los posibles impactos del cambio global (aquí definido como cambio climático y de uso del agua) en las futuras frecuencias de inundaciones y sequías para el área de estudio seleccionada de Europa. El modelo global de agua integrado WaterGAP se evalúa con respecto a su capacidad para simular regímenes de caudales altos y bajos y luego se aplica para calcular cambios relativos en las frecuencias de inundaciones y sequías. Los resultados indican grandes "regiones críticas" para las cuales se esperan cambios significativos en los riesgos de inundación o sequía en los escenarios de cambio global propuestos. Las regiones más propensas a un aumento en las frecuencias de inundación son del norte al noreste de Europa, mientras que el sur y el sureste de Europa muestran aumentos significativos en las frecuencias de sequía. En las regiones críticas, los eventos de inundaciones y sequías con un periodo de retorno de 100 años de hoy pueden repetirse cada 10 - 50 años para la década de 2070.

#### 5.4.1.9 Pons et al., 2010

*Pons, M.R., San-Martín, D., Herrera, S., Gutiérrez, J.M. (2010): Snow trends in Northern Spain: Analysis and simulation with statistical downscaling methods. International Journal of Climatology 30(12) 1795-1806. Nº citas: 16*

Se analiza y simula (con técnicas estadísticas de reducción de escala) las tendencias de nieve observadas en el norte de la Península Ibérica utilizando datos diarios de nieve observados (DSO) de una red de 33 estaciones que van desde 60 a 1350 m. Primero se analiza la frecuencia anual de nieve medida como el número anual de días de nieve (NSD), obteniendo una tendencia decreciente significativa desde mediados de los setenta con una reducción de NSD de aproximadamente 50%; Además, esta magnitud es similar para estaciones bajas y altas y para invierno y primavera por separado. Luego, se analiza las correlaciones existentes con la temperatura media y la ocurrencia de precipitación obteniendo diferentes relaciones dependiendo de la estación y la elevación. Finalmente, se simula las tendencias observadas utilizando la conexión de DSO con campos a gran escala simulados por un Modelo de circulación general; para este propósito, se aplica un método de reducción de escala estadístico basado en análogos para obtener una estimación de DSO, trabajando en condiciones de pronóstico perfectas utilizando datos de reanálisis. Por un lado, el método de



reducción de escala es capaz de estimar / predecir el DSO con valores típicos de tasas de aciertos y falsas alarmas de alrededor del 60% y 2%, respectivamente. Por otro lado, la frecuencia anual obtenida promediando las estimaciones de DSO reproduce muy bien tanto las tendencias observadas como la alta variabilidad interanual.

#### 5.4.1.10 Salas et al. 2018

Salas J.D., Obeysekera J., Vogel R.M. (2018): *Techniques for assessing water infrastructure for nonstationary extreme events: a review. Hydrological Sciences Journal* 63(3) 325-352. N° citas: 14

Documento de revisión. Se han utilizado métodos estadísticos y físicamente basados para diseñar y evaluar infraestructuras como aliviaderos y sistemas de drenaje de aguas pluviales. Los enfoques tradicionales asumen que los procesos hidrológicos evolucionan en un entorno donde el ciclo hidrológico es estacionario en el tiempo. Sin embargo, en los últimos años, se ha vuelto cada vez más evidente que en muchas áreas del mundo la suposición anterior ya no puede aplicarse, debido al efecto de los factores antropogénicos e inducidos por el clima que causan condiciones no estacionarias. Esto ha atraído la atención de agencias nacionales e internacionales, instituciones de investigación, academia y especialistas, lo que ha llevado al desarrollo de nuevas técnicas que pueden ser útiles en aquellos casos en los que hay buena evidencia y atribución de no estacionariedad. Se revisa las diversas técnicas propuestas en el campo y se señala algunos de los desafíos futuros en futuros desarrollos y aplicaciones. La revisión enfatiza el diseño hidrológico para protección contra eventos extremos como avenidas y sequías.

#### 5.4.1.11 Westra et al., 2014

Westra, S., Fowler, H.J., Evans, J.P., Alexander, L.V., Berg, P., Johnson, F., Kendon, E.J., Lenderink, G., Roberts, N.M. (2014): *Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall. Reviews of Geophysics* 52(3) 522-555. N° citas: 278

Documento de revisión. Examina la evidencia de intensificación de lluvia extrema de corta duración (sub diaria) debido al cambio climático y describe la comprensión física actual de la relación entre la intensidad de lluvia sub diaria (horaria) y la temperatura atmosférica. Se describe los tipos de investigación requeridos para producir una comprensión más exhaustiva de las relaciones entre los efectos termodinámicos a escala local, la circulación atmosférica a gran escala y la intensidad de lluvia extrema.

## 5.4.2 Análisis de tendencias de extremos de variables observadas

#### 5.4.2.1 Alpert et al., 2002.

Alpert, P., Ben-Gai, T., Baharad, A., Benjamini, Y., Yekutieli, D., Colacino, M., Diodato, L., Ramis, C., Homar, V., Romero, R., Michaelides, S., Manes, A. (2002): *The paradoxical increase of Mediterranean extreme daily rainfall in spite of decrease in total values. Geophysical Research Letters* 29(11) 31-1 - 31-4. N° citas: 330

Presenta un estudio de la lluvia diaria a gran escala (Mediterráneo) mostrando un aumento de la lluvia extrema a pesar de una disminución en los valores totales (1951-1995). Se detectaron fuerte picos en los años de El Niño.

#### 5.4.2.2 Blösch et al., 2017

Blöschl, G., Hall, J., Parajka, J., Perdigão, R.A.P., Merz, B., Arheimer, B., Aronica, G.T., Bilbashi, A., Bonacci, O., Borga, M., Čanjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G.B., Claps, P., Fiala, K., Frolova, N., Gorbachova, L., Gül, A., Hannaford, J., Harrigan, S., Kireeva, M., Kiss, A., Kjeldsen, T.R., Kohnová, S., Koskela, J.J., Ledvinka, O., Macdonald, N., Mavrova-Guirguinova, M., Mediero, L., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Murphy, C., Osuch, M., Ovcharuk, V., Radevski, I., Rogger, M., Salinas, J.L., Sauquet, E., Šraj, M., Szolgay, J., Viglione, A., Volpi, E., Wilson, D., Zaimi, K., Živković, N. (2017): *Changing climate shifts timing of European floods. Science* 357(6351) 588-590. N° citas: 112



Se analiza el momento en que ocurren las inundaciones de los ríos en Europa durante las últimas cinco décadas, utilizando una base de datos paneuropea de 4262 estaciones hidrométricas de observación. Se encontraron patrones claros de cambio en el momento que ocurren las inundaciones. Las temperaturas más cálidas han provocado inundaciones de deshielo en primavera en el noreste de Europa; las tormentas invernales retrasadas asociadas con el calentamiento polar han provocado inundaciones invernales posteriores alrededor del Mar del Norte y algunos sectores de la costa mediterránea; y los máximos de humedad del suelo se han adelantado provocando inundaciones de invierno más tempranas en Europa occidental.

#### 5.4.2.3 Blösch et al. 2019

*Blöschl, G., Hall, J., Viglione, A., Perdigão, R.A.P., Parajka, J., Merz, B., Lun, D., Arheimer, B., Aronica, G.T., Bilibashi, A., Boháč, M., Bonacci, O., Borga, M., Čanjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G.B., Claps, P., Frolova, N., Ganora, D., Gorbachova, L., Gül, A., Hannaford, J., Harrigan, S., Kireeva, M., Kiss, A., Kjeldsen, T.R., Kohnová, S., Koskela, J.J., Ledvinka, O., Macdonald, N., Mavrova-Guirguinova, M., Mediero, L., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Murphy, C., Osuch, M., Ovcharuk, V., Radevski, I., Salinas, J.L., Sauquet, E., Šraj, M., Szolgay, J., Volpi, E., Wilson, D., Zaimi, K., Živković, N. (2019): Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature* 573(7772) 108-111. Nº citas: 1*

Se muestran patrones regionales claros tanto de aumentos como de disminuciones en caudales de inundaciones de ríos observadas en las últimas cinco décadas en Europa, que son manifestaciones de un clima cambiante. El estudio sugiere que un aumento de las precipitaciones de otoño e invierno ha aumentado el número de crecidas en el noroeste de Europa; la precipitación decreciente y el aumento de la evaporación han llevado a la disminución de las inundaciones en cuencas medianas y grandes en el sur de Europa. La disminución de la cubierta de nieve y deshielo, como resultado de temperaturas más cálidas, han llevado a la disminución de las inundaciones en el este de Europa. Respecto a inundaciones regionales, la tendencia de caudales de crecidas en Europa varía desde un aumento de 11 % por década analizada a una disminución del 23 %. A pesar de la heterogeneidad espacial y temporal del registro de observaciones, el estudio sugiere que se están produciendo cambios.

#### 5.4.2.4 Du et al., 2015

*Du Tao, Xiong Lihua, Xu Chong-Yu, Gippel Christopher J., Guo Shenglian, Liu Pan (2015): Return period and risk analysis of nonstationary low-flow series under climate change. *Journal of Hydrology* 527 (2015) 234-250. Nº citas: 57*

El período de retorno y el riesgo de eventos hidrológicos extremos son consideraciones críticas en la gestión de los recursos hídricos. El supuesto de estacionariedad está puesto en duda debido al cambio climático. Ya se han propuesto en la literatura dos interpretaciones diferentes del período de retorno, es decir, el tiempo de espera esperado (EWT) y el número esperado de excedencias (ENE) para considerar la no estacionariedad en el período de retorno y el análisis de riesgos mediante la introducción del método de momento variable en el tiempo en el análisis de frecuencia, bajo el supuesto de que los parámetros estadísticos son funciones solo del tiempo. Este documento tiene como objetivo mejorar la caracterización del período de retorno no estacionario y el riesgo bajo la interpretación ENE mediante el uso de covariables meteorológicas en el análisis de frecuencia no estacionaria. La ventaja del método es que las variables meteorológicas reducidas a escala de los Modelos de circulación general (GCM) se pueden usar para calcular los parámetros estadísticos no estacionarios y las probabilidades de excedencia para los años futuros y, por lo tanto, el período de retorno y el riesgo correspondientes. El enfoque tradicional que usa el tiempo como la única covariable bajo las interpretaciones EWT y ENE también se aplica para la comparación. Ambos enfoques se aplican a series de aportaciones mensuales mínimas anuales de dos estaciones en el río Wei, China, y dan estimaciones del período de retorno no estacionario y el riesgo que son significativamente diferentes del caso estacionario. El período de retorno no estacionario y el riesgo bajo la interpretación ENE usando covariables meteorológicas se encuentran más razonables y recomendables que los de los casos EWT y ENE usando el tiempo solo como covariable.





#### 5.4.2.5 Griffin et al. 2019

Griffin, A., Vesuviano, G., Stewart, E. (2019): *Have trends changed over time? A study of UK peak flow data and sensitivity to observation period. Natural Hazards and Earth System Sciences 19(10) 2157-2167. N° citas: 1*

Considera cómo la estimación de parámetros para la distribución logística generalizada (en caudales máximos anuales históricos) varía a lo largo del tiempo en el Reino Unido. Se centra en el estudio de la sensibilidad de la estimación de parámetros al agregar nuevos registros, utilizando ventanas móviles de ancho fijo y ventanas de inicio fijo, y si las tendencias de los parámetros son más evidentes en regiones geográficas específicas. Bajo supuestos estacionarios, la adición de nuevos datos tiende a una convergencia de parámetros a un valor final. Sin embargo, la adición de un único dato puede cambiar sustancialmente la estimación de parámetros en series no estacionarias. En muchos lugares, la relación entre la inundación de 50 y 100 años está disminuyendo, mientras que la relación entre la inundación de 2 y 30 años está aumentando.

#### 5.4.2.6 Hoerling et al., 2012

Hoerling, M., Eischeid, J., Perlwitz, J., Quan, X., Zhang, T., Pegion, P. (2012): *On the increased frequency of Mediterranean drought. Journal of Climate 25(6) 2146-2161. N° citas: 278*

La superficie terrestre que rodea el mar Mediterráneo ha experimentado 10 de los 12 inviernos más secos desde 1902 en los últimos 20 años. Es probable que haya ocurrido un cambio en las precipitaciones mediterráneas durante el invierno hacia condiciones más secas durante 1902-2010, cuya magnitud no puede conciliarse solo con la variabilidad interna. Los gases antropogénicos de efecto invernadero y el forzamiento de aerosoles son factores clave atribuibles para este aumento del secado, aunque la señal externa explica solo la mitad de la magnitud del secado. Además, el forzamiento de la temperatura de la superficie del mar (TSM) durante 1902-2010 probablemente jugó un papel importante en el secado mediterráneo observado, y la señal de secado forzado externamente también se produce a través de una señal de cambio de TSM. El secado mediterráneo observado durante el invierno durante el siglo pasado puede entenderse en un marco simple de la sensibilidad de la región a un calentamiento global uniforme del océano y a cambios moderados en los gradientes de TSM meridionales y zonales del océano. Los modelos climáticos sometidos a un calentamiento uniforme de 10.58 °C de los océanos del mundo inducen el secado del este del Mediterráneo, pero no generan el patrón generalizado de secado observado en el Mediterráneo. Para un calentamiento de 10.58 °C SST limitado a latitudes tropicales solamente, se produce una señal seca que abarca toda la región del Mediterráneo. El secado mediterráneo simulado se intensifica aún más cuando el Océano Índico se calienta 10.58 °C más que los océanos tropicales restantes, una señal de secado mejorada atribuible a una respuesta de circulación atmosférica distintiva que se asemeja a la fase positiva de la Oscilación del Atlántico Norte.

#### 5.4.2.7 López y Francés, 2013

López, J., Francés, F. (2013): *Non-stationary flood frequency analysis in continental Spanish rivers, using climate and reservoir indices as external covariates. Hydrology and Earth System Sciences 17(8) 3189-3203. N° citas: 101*

Se desarrolla un marco para el análisis de frecuencia de inundación sobre la base de una herramienta que permite abordar el modelado de series de tiempo no estacionarias, a saber, los "modelos aditivos generalizados para ubicación, escala y forma" (GAMLSS). Se aplicó dos enfoques para el modelado no estacionario en GAMLSS a los registros de caudal máximo anual en 20 ríos continentales españoles. Los resultados del primer enfoque, en el que los parámetros de las distribuciones seleccionadas (Gumbel, Log normal, Weibull, Gamma, y Generalized Gamma) se modelaron solo en función del tiempo, muestra claramente la no-estacionariedad del régimen de caudales máximos. En el segundo enfoque, los parámetros de las distribuciones de caudales máximos se modelan como funciones de los índices climáticos (Oscilación del Ártico, Oscilación del Atlántico Norte, Oscilación del Mediterráneo y Oscilación del Mediterráneo Occidental) y un índice de embalse que se propone en este documento. Los resultados al incorporar covariables externas resaltan el importante papel de la variabilidad interanual en los forzamientos climáticos de baja frecuencia al modelar el régimen de caudales máximos en los ríos continentales españoles. La aplicación del análisis no estacionario





muestra que las diferencias entre los cuantiles no estacionarios y sus equivalentes estacionarios pueden ser importantes durante largos períodos de tiempo.

#### 5.4.2.8 Madsen et al., 2014

*Madsen H., Lawrence D., M. Lang, M. Martinkova, T.R. Kjeldsen (2014): Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. Journal of Hydrology 519 3634–3650*

Documento de revisión. Presenta una revisión del análisis de tendencias de precipitaciones y caudales extremos en Europa con base en observaciones y proyecciones climáticas futuras. Se resumen los métodos y metodologías aplicadas de una gran cantidad de estudios. Los análisis reportados de precipitaciones extremas observadas y los registros de avenidas muestran que hay evidencia de un aumento general en las precipitaciones extremas, mientras que no hay indicios claros de tendencias significativas a gran escala a nivel regional o nacional de crecidas extremas. Varios estudios en regiones dominadas por los caudales máximos inducidos por el deshielo informan disminuciones en el caudal máximo de deshielo. Los posibles cambios futuros basados en las proyecciones climáticas indica un aumento general de las precipitaciones extremas, que es consistente con las tendencias observadas. Las proyecciones hidrológicas de los caudales máximos muestran grandes impactos en muchas áreas con cambios tanto positivos como negativos. Se proyecta una disminución general en la magnitud de las avenidas. Las de primavera se espera ocurran más tempranas en cuencas dominados por el deshielo, lo que es consistente con las tendencias observadas. Finalmente, se revisan las metodologías existentes en Europa sobre el diseño de avenidas y la estimación de precipitaciones de diseño. La revisión muestra que solo unos pocos países han desarrollado directrices que incorporan una consideración de los impactos del cambio climático.

#### 5.4.2.9 Mediero et al., 2014

*Mediero, L., Santillán, D., Garrote, L., Granados, A. (2014): Detection and attribution of trends in magnitude, frequency and timing of floods in Spain. Journal of Hydrology 517, 1072-1088. Nº citas: 33*

Se realiza un análisis para detectar tendencias en magnitud, frecuencia y tiempo de caudales máximos en España a través de nueve indicadores de avenidas. Las series de caudales máximos anuales y caudales por encima de un umbral se extrajeron en tres períodos: 1942–2009, 1949–2009 y 1959–2009. Se aplica un procedimiento previo para eliminar la correlación serial y se aplica el test de Mann-Kendall para detectar tendencias. Se detecta una tendencia general decreciente en la magnitud y frecuencia de las avenidas en los tres períodos, con evidencia más notable en 1959–2009. También se encuentra una tendencia creciente en el noroeste de España. Además, se realiza un estudio para relacionar las tendencias de crecidas detectadas con un conjunto de factores potenciales. La mayoría de estas tendencias en las series de caudales máximos podrían explicarse por las tendencias correspondientes y crecientes en la evapotranspiración que aumentan las pérdidas de agua en los suelos y disminuyen el contenido de humedad del suelo antes de que ocurran las avenidas.

#### 5.4.2.10 Paulo et al., 2012

*Paulo, A.A., Rosa, R.D., Pereira, L.S. (2012): Climate trends and behaviour of drought indices based on precipitation and evapotranspiration in Portugal. Natural Hazards and Earth System Science 12(5) 1481-1491. Nº citas: 109*

Se compara el índice SPI y PDSI con el PDSI modificado para condiciones mediterráneas (MedPDSI) y el Índice de Evapotranspiración de Precipitación Estandarizado (SPEI). MedPDSI resulta del balance hídrico del suelo de un cultivo de olivos, por lo que se considera la evapotranspiración real, mientras que SPEI utiliza la evapotranspiración potencial. Antes de comparar los índices de sequía, se realiza un análisis de tendencias en relación con la precipitación y la temperatura en 27 estaciones meteorológicas de Portugal para el período 1941 a 2006. Se observa una tendencia al aumento de la temperatura en algunas estaciones meteorológicas y se observan tendencias de disminución de la precipitación en marzo y aumento en octubre para algunos lugares. Las comparaciones de SPI y SPEI en escalas de tiempo de 9 y 12 meses, PDSI y MedPDSI se realizan para las mismas estaciones y



período. SPI y SPEI producen resultados similares para las mismas escalas de tiempo. PDSI y MedPDSI se correlacionan bien y lo mismo sucede con SPI y SPEI. PDSI y MedPDSI identifican las sequías más severas que SPI o SPEI e identifican la aparición de sequías antes que estos índices. Es probable que este comportamiento esté relacionado con el hecho de que se realiza un balance hídrico con PDSI y MedPDSI, que se acerca mejor al equilibrio de la oferta y la demanda de agua.

#### 5.4.2.11 *Spinoni et al., 2016*

*Spinoni, J., Naumann, G., Vogt, J., Barbosa P. (2016): Meteorological Droughts in Europe: Events and Impacts – Past Trends and Future Projections. Joint Research Centre Technical Reports, Publications Office of the European Union, Luxembourg, EUR 27748 EN.*

En este estudio, los eventos de sequía se analizaron a diferentes escalas espaciales (país, región) utilizando datos climáticos distribuidos y tres indicadores de sequía diferentes: el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) dependiente de la precipitación, el Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizado (SPEI) y el Indicador de Reconocimiento de Sequía (RDI). Los tres indicadores se fusionaron en dos indicadores compuestos para derivar características clave de las sequías durante el período histórico analizado (1950-2012). Se construyó una nueva base de datos de eventos de sequía meteorológica basada en el análisis de los indicadores compuestos. Esta base de datos también muestra las características de 21 grandes sequías que azotaron Europa desde 1950 hasta 2012, seis de las cuales ocurrieron después del año 2000. A cada evento de sequía meteorológica se le asignó un conjunto de parámetros estadísticos, que incluyen inicio, fin, máximo, duración, gravedad, intensidad y área afectada por las sequías. Para calcular las tendencias de las sequías en cada celda de la cuadrícula, se adoptó un enfoque similar al aplicado en Spinoni et al. (2014). La tendencia de la frecuencia de sequía (FS), la gravedad (GS) y la duración (DS) para el período 1951-2012 se calculó dividiendo el período histórico de análisis en nueve intervalos de siete años, calculando FS, GS y DS para cada intervalo. Posteriormente se realizó un análisis de tendencia lineal. Se comprobó la significancia de tendencias con una prueba t de Student (Wilks 2011). Se analizaron sequías de diferente duración, distinguiendo entre eventos que duran dos o más meses y eventos de sequía prolongada que duran al menos seis meses. Con base en las características del evento de sequía, por un lado, y los datos de impacto derivados de varias fuentes de datos, por otro, se analizó la correlación entre las sequías históricas (aspectos físicos) y sus impactos (pérdidas) y un conjunto de funciones de daño para diferentes sectores económicos.

Las proyecciones climáticas del modelo climático regional del Instituto Meteorológico Real de los Países Bajos (KNMI) (RACMO 2) en el escenario climático A1b se utilizaron para calcular los indicadores de sequía durante el período 1950-2100, seguido de un análisis de las tendencias de sequía para el futuro cercano (2041 -2070) y el futuro lejano (2071-2100). Los resultados muestran que, en el transcurso del siglo XXI, los eventos de sequía meteorológica tenderán a ser más largos, más frecuentes, intensos y severos en el sur de Europa, especialmente en la región del Mediterráneo y los Balcanes, principalmente debido al papel clave del calentamiento continuo. En el norte de Europa, los eventos de sequía meteorológica tenderán a ser más cortos, menos frecuentes, intensos y severos, especialmente en Escandinavia, principalmente debido a un aumento esperado en la precipitación.

#### 5.4.2.12 *Spinoni et al., 2014*

*Spinoni, J., Naumann, G., Carrao, H., Barbosa, P., Vogt, J. (2014): World drought frequency, duration, and severity for 1951-2010. International Journal of Climatology 34(8) 2792-2804. Nº citas: 136*

Presenta mapas de frecuencia, duración y severidad de la sequía global para los períodos 1951-1970, 1971-1990 y 1991-2010. La frecuencia de sequía se define como el número de eventos de sequía, la duración de la sequía como el número de meses en condiciones de sequía y la severidad de la sequía como la suma del área integral por debajo de cero de cada evento. Debido a que la sequía se debe principalmente a los déficits de lluvia, se elige el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) como el indicador base para derivar cantidades relacionadas con la sequía. El SPI-12 se calcula mensualmente utilizando una distribución Gamma ajustada a un período de referencia de 60 años (1951-2010). Las cuadrículas globales (0.5° × 0.5°) del conjunto de datos de reanálisis de Datos



Completos Versión 6.0 provisto por el Centro de Precipitación Climatológica Global (GPCC) se utilizan como entrada de datos de precipitación. Las regiones más expuestas a sequías prolongadas y severas durante 1951–1970 fueron el centro de Estados Unidos, la pampa argentina, Rusia y Australia central; durante 1971–1990 fueron el sur de Chile, el Sahel y Siberia; durante 1991–2010 fueron la selva amazónica, la cuenca del río Congo, Mongolia, el noreste de China y Borneo. Un análisis de tendencia lineal entre 1951 y 2010 muestra un pequeño aumento global en cada componente de sequía, pero la frecuencia de sequía disminuyó en el norte del Hemisferio. El aumento en la frecuencia, duración y severidad de la sequía es significativo en África, Asia Oriental, la región del Mediterráneo y el sur de Australia, mientras que América y Rusia muestran una disminución en cada componente de la sequía.

#### 5.4.2.13 Vogel et al., 2011

*Vogel, R.M., Yaoundi, C., Walter, M. (2011): Nonstationarity: Flood magnification and recurrence reduction factors in the United States. Journal of the American Water Resources Association 47(3) 464-474. Nº citas: 168*

Adopta un enfoque diferente al explorar las tendencias de los caudales máximos en cuencas que están sujetas a una amplia gama de influencias antropogénicas, no limitadas al cambio climático. Se desarrolla un modelo estadístico simple que puede simular la tendencia de los caudales máximos observados, así como la frecuencia de ocurrencia de estos en un mundo no estacionario. Se define un factor de aumento decadal de caudales máximos como la relación entre la avenida del año T en una década y la avenida del año T en la actualidad. Utilizando datos históricos de caudales máximos en los Estados Unidos, se obtienen factores de aumento de caudales máximos que exceden de 2-5 para muchas regiones de los Estados Unidos. Del mismo modo, se calcula los factores de reducción de recurrencia que indican que lo que ahora se considera la avenida de 100 años de periodo de retorno, puede convertirse en mucho más común en muchas cuencas hidrográficas. La no estacionariedad en las crecidas puede resultar de una variedad de procesos antropogénicos que incluyen cambios en el uso del suelo, el clima y el uso del agua, con interacciones probables entre los procesos hacen que sea muy difícil atribuir tendencias a una causa particular.

### 5.4.3 Análisis de cambios a largo plazo (paleo-hidrología)

#### 5.4.3.1 Benito et al., 2004

*Benito, G., Lang, M., Barriendos, M., Llasat, M.C., Francés, F., Ouarda, T., Thorndycraft, V.R., Enzel, Y., Bardossy, A., Coeur, D., Bobée, B. (2004): Use of systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation. Review of scientific method. Natural Hazards 31(3) 623-643. Nº citas: 169*

Utilizan técnicas de Paleocrecidas para proporcionar información sobre la variabilidad hidrológica y las inundaciones extremas durante largos intervalos de tiempo (100 a 10.000 años) y se pueden usar en combinación con datos históricos de inundaciones (últimos 1.000 años) y registros de aforo (últimos 30-50 años). Se describen las ventajas e incertidumbres relacionadas con la reconstrucción de inundaciones de paleocrecidas en diferentes entornos geomorfológicos e inundaciones históricas utilizando diferentes fuentes documentales. Los datos sistemáticos y no sistemáticos se pueden combinar en el análisis de frecuencia de inundación utilizando diferentes métodos para el ajuste de las funciones de distribución. Se discuten las herramientas técnicas que integran enfoques multidisciplinarios (geológicos, históricos, hidráulicos y estadísticos) sobre la evaluación del riesgo de inundación extrema. Este estudio es parte de un proyecto financiado por la Comisión Europea (SPHERE).

#### 5.4.3.2 Esper et al., 2007

*Esper, J., Frank, D., Büntgen, U., Verstege, A., Luterbacher, J., Xoplaki, E. (2007): Long-term drought severity variations in Morocco. Geophysical Research Letters 34(17). Nº citas: 226*

Se utiliza los datos de ancho de anillo de Cedrus Atlántica para reconstruir cambios a largo plazo en la sequía según el índice de Palmer (PDSI) durante los últimos 953 años en Marruecos, África del Noroeste. La reconstrucción captura las condiciones secas desde la década de 1980 y coloca este



período extremo dentro de un contexto de milenio. Los valores de PDSI estuvieron por encima del promedio durante la mayor parte del período de 1450 a 1980, lo que permite ver que la sequía reciente sería excepcional. La comparación de las estimaciones de PDSI con las reconstrucciones de campos de presión a gran escala revelan patrones sinópticos estacionarios para las condiciones de sequía en los últimos 350 años. Se sugiere que las tendencias en América del Norte y Marruecos están relacionadas (teleconexiones) con cambios de temperatura a largo plazo, potencialmente conectados con la variabilidad ENSO y forzados por cambios en la radiación solar.

#### 5.4.3.3 *Nicault et al., 2008*

*Nicault, A., Alleaume, S., Brewer, S., Carrer, M., Nola, P., Guiot, J. (2008): Mediterranean drought fluctuation during the last 500 years based on tree-ring data. Climate Dynamics 31(43526) 227-245. Nº citas: 88.*

Se describe una reconstrucción de la sequía con una cuadrícula de 2.5° x 2.5 en verano (abril a septiembre) sobre la región mediterránea (32.5/47.5N, 10W/50E; 152 puntos de cuadrícula), basada en una red de 165 series de anillos de árboles. El índice de sequía utilizado es el índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI), y el período considerado es del año 1500 al 2000. La técnica de reconstrucción combina una técnica análoga para la estimación de datos faltantes de anillos de árboles con una red neuronal artificial para una calibración no lineal óptima, que incluye una evaluación de error por "bootstrapping". Se prueban los errores relacionados con la densidad espacial heterogénea de los predictores utilizando pseudo-proxies, proporcionados por el modelo climático global ECHO-G. El siglo XVI y la primera parte del siglo XVII se caracterizan por episodios secos marcados en el oeste similares a los observados a fines del siglo XX. En contraste, los siglos XVIII y XIX (Little Ice Age) se caracterizan por períodos húmedos dominantes. En la parte oriental de la cuenca mediterránea, el fuerte período de sequía observado a fines del siglo XX parece ser el más fuerte de los últimos 500 años.

#### 5.4.3.4 *Rodriguez-Lloveras et al., 2017*

*Rodriguez-Lloveras, X., Corella, J.P., Benito, G. (2017): Modelling the Hydro-Sedimentary Dynamics of a Mediterranean Semiarid Ungauged Watershed Beyond the Instrumental Period. Land Degradation and Development 28(5) 1506-1518. Nº citas: 2*

Se aplica una metodología multidisciplinaria para estimar la escorrentía de agua y sedimentos en cuencas mediterráneas no calibradas durante un período de datos instrumentales escasos (es decir, la segunda mitad del siglo XIX y la primera mitad del siglo XX). Las reconstrucciones de escorrentía y precipitación se obtienen utilizando un enfoque integrador que incluye modelos de reanálisis sinópticos, conjuntos de datos climáticos regionales, archivos históricos y proxies de inundación de archivos naturales. La reconstrucción hidrológica resultante se ha implementado en un modelo distribuido hidro-sedimentario (TETIS) para comprender la dinámica hidro-sedimentaria en la cuenca estudiada. Se destaca que, en el área de estudio, los modelos basados en datos regionales (instrumentales, históricos y sedimentarios) muestran una mayor precisión en el cálculo del sedimento y la reconstrucción de la escorrentía que los modelos climáticos de reanálisis sinóptico. La dinámica sedimentaria modelada para el período estudiado responde a una interacción compleja entre las actividades humanas y la variabilidad climática. Durante las actividades de deforestación y pastoreo del siglo XIX combinado con una mayor frecuencia en eventos de escorrentía extrema resultó en una mayor escorrentía y transporte de sedimentos en el período 1863-1900. Durante el siglo XX, la reducción de las precipitaciones y el abandono de la tierra condujeron a una disminución en las tasas de erosión y el transporte de sedimentos, aunque aumentó en 1945-1960, coincidiendo con un período de mayor frecuencia de fuertes lluvias. Esta respuesta hidrológica a las actividades climáticas y humanas en la cuenca hidrográfica del estudio mejora nuestra comprensión de las tendencias futuras plausibles de degradación ambiental en pequeñas cuencas mediterráneas bajo diferentes usos del suelo y escenarios de cambio climático.



## 5.5 Técnicas específicas

### 5.5.1 Técnicas de reducción de escala

#### 5.5.1.1 *Belo-Pereira et al., 2011*

*Belo-Pereira, M., Dutra, E., Viterbo, P. (2011): Evaluation of global precipitation data sets over the Iberian Peninsula. Journal of Geophysical Research Atmospheres 116(20). Nº citas: 95*

Se presenta un nuevo conjunto de datos diarios de precipitación en cuadrícula, disponible públicamente sobre Portugal continental. Este conjunto de datos también se combina con un conjunto de datos español reciente para obtener un conjunto de datos ibéricos de alta resolución ( $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ ), etiquetado IB02. Este conjunto de datos cubre el período de 1950 a 2003 y se basa en una red densa, con más de 2000 y 400 estaciones con control de calidad en España y Portugal, respectivamente. En Portugal se aplicó el método de kriging ordinario para mantener la coherencia con el conjunto de datos en España, funciona ligeramente mejor que las técnicas de interpolación más simples probadas en Portugal. Además, este documento evalúa cuatro conjuntos de datos de cuadrícula global: dos basados en pluviómetros (Unidad de Investigación Climática (CRU) y Centro Global de Clima de Precipitación (GPCC)) y dos reanálisis de Centro Europeo para Pronósticos Meteorológicos de Mediano Alcance (ECMWF) (ERA - 40 y ERA - Interim), comparándolos con el conjunto de datos IB02. Las principales características de la distribución espacial de la precipitación media anual IB02 son capturadas razonablemente por los conjuntos de datos globales, a pesar de sus sesgos secos, principalmente en las regiones montañosas. Los cuatro conjuntos de datos funcionan mejor en el oeste de Iberia y pueden identificar los principales períodos de sequía a escala ibérica. A pesar de estas similitudes, GPCC supera a CRU y ERA-Interim es superior a ERA-40 en varios aspectos, como el ciclo anual y la detección de sequía. El rendimiento de CRU es similar al de ERA - Interim. La frecuencia de los días húmedos se sobreestima por las reanálisis, principalmente por ERA-Interim, mientras que los eventos de fuertes precipitaciones se subestiman, principalmente por ERA - 40.

#### 5.5.1.2 *Beniston et al., 2007*

*Beniston, M., Stephenson, D.B., Christensen, O.B. et al. (2007): Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. Climatic Change 81: 71. Nº de citas: 432*

Presenta una visión general de los cambios en los eventos extremos que tienen más probabilidades de afectar a Europa en las próximas décadas. Se utiliza una variedad de métodos de diagnóstico para determinar cómo cambian las olas de calor, las fuertes precipitaciones, las sequías, las tormentas de viento y las mareas en tormenta entre el clima presente (1961–90) y el futuro (2071–2100) sobre la base de simulaciones de modelos climáticos regionales producidos por El proyecto PRUDENCE. Olas de calor: el calentamiento regional de la superficie hace que aumente la frecuencia, intensidad y duración de las olas de calor en Europa. Precipitación: las fuertes precipitaciones de invierno aumentan en Europa central y septentrional y disminuye en el sur; Las fuertes precipitaciones de verano aumentan en el noreste de Europa y disminuyen en el sur. Las sequías mediterráneas comienzan más temprano en el año y duran más. Tormentas de invierno: las velocidades extremas del viento aumentan entre  $45^\circ$  N y  $55^\circ$  N, salvo excepciones. Estos cambios están asociados con reducciones en la presión media del nivel del mar, lo que lleva a más tormentas en el Mar del Norte y su aumento correspondiente en mareas de tormenta en las regiones costeras de Holanda, Alemania y Dinamarca.

#### 5.5.1.3 *Casanueva et al., 2016*

*Casanueva, A., Herrera, S., Fernández, J., Gutiérrez, J.M. (2016): Towards a fair comparison of statistical and dynamical downscaling in the framework of the EURO-CORDEX initiative. Climatic Change 137(43558) 411-426. Nº citas: 10*

Se destaca que las comparaciones de técnicas de downscaling correctas deberían basarse en índices que no se vean afectados por la calibración hacia el clima observado utilizado para algunos de los





métodos. Se centra en la precipitación (sobre la España continental) y se considera la producción de ocho modelos climáticos regionales (RCM) de la iniciativa EURO-CORDEX con una resolución de 0,44° y cinco métodos de reducción de escala estadística (SDM): remuestreo análogo, tipificación del clima y modelos lineales generalizados entrenado utilizando el conjunto de datos de cuadrícula observada Spain044 en la misma cuadrícula RCM. El rendimiento de estos modelos se compara en términos de varios índices estándar: precipitación media, percentil 90 en días húmedos, cantidad máxima de precipitación y número máximo de días secos consecutivos, teniendo en cuenta los parámetros involucrados en la fase de capacitación SDM. Se muestra que no solo los índices directamente afectados deben analizarse cuidadosamente, sino también aquellos que están influenciados indirectamente (por ejemplo, índices basados en percentiles para precipitación) que son más difíciles de identificar. También se analiza cómo se podrían aplicar transformaciones simples (por ejemplo, escala lineal) a las salidas de los métodos no calibrados para poner a los SDM y RCM en pie de igualdad, y así realizar una comparación más justa.

#### 5.5.1.4 *Castaneda et al., 2019*

*Castaneda-Gonzalez, M., Poulin, A., Romero-Lopez, R., Arsenault, R., Brissette, F., Turcotte, R. (2019): Sensitivity of seasonal flood simulations to regional climate model spatial resolution. Climate Dynamics 53(43684) 4337-4354. Nº citas: 1*

Se evalúa la sensibilidad de las simulaciones de crecidas a la resolución de la cuadrícula del Modelo Climático Regional Canadiense (CRCM). Se analizan tres situaciones climáticas (CRCM5) con reanálisis (ERA-Interim) a resoluciones de 0.44°, 0.22° y 0.11°, con paso de tiempo diario en el período 1981-2010. Se aplicó a más de 50 cuencas de Quebec (Canadá). Las inundaciones simuladas con resoluciones más gruesas presentan caudales máximos más pequeños que las simuladas con cuadrículas más finas. Las cuencas más pequeñas muestran una mayor sensibilidad a la resolución espacial.

#### 5.5.1.5 *Chen et al., 2012*

*Chen H., Xy, C.Y. & Guo, S. (2012): Comparison and evaluation of multiple GCM, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff. Journal of Hydrology 434-435, 36-45. Nº de citas: 45*

Se realiza una evaluación y una comparación de la diferencia en las simulaciones del balance hídrico derivadas del uso de diferentes técnicas de reducción de escala (downscaling), GCM y modelos hidrológicos en la cuenca alta de Hanjiang en China. El estudio consta de los siguientes pasos: (1) los datos de reanálisis NCEP / NCAR para el período 1961-2000 se utilizan para calibrar y validar las técnicas de reducción de escala estadística, es decir, SSVM (Smooth Support Vector Machine) y SDSM (Modelo de reducción de escala estadística); (2) los escenarios de emisión A2 de CGCM3 y HadCM3 para el mismo período se utilizan como entrada para el downscaling estadístico; y (3) los escenarios climáticos a escala reducida se utilizan como entrada para los modelos hidrológicos de Xin-anjiang y HBV. Los resultados muestran que: (1) para el mismo GCM, las escorrentías simuladas varían enormemente cuando se usa la lluvia proporcionada por diferentes técnicas de reducción de escala estadística como entrada a los modelos hidrológicos; (2) aunque las estadísticas más utilizadas en la literatura para la evaluación de los métodos estadísticos de reducción de escala muestran que SDSM tiene un mejor rendimiento que SSVM en la reducción de la precipitación, excepto la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSC) y la relación de la desviación estándar del error cuadrático medio (RSR) de las observaciones, la eficiencia de la simulación de escorrentía impulsada por la lluvia SDSM es mucho menor que la SSVM; y (3) al comparar diferentes estadísticas en la simulación de lluvia y escorrentía, se puede concluir que NSC y RSR entre lluvia simulada y observada se pueden usar como estadísticos clave para evaluar el desempeño de los modelos estadísticos.

#### 5.5.1.6 *Fowler et al., 2007*

*Fowler H.J., Blenkinsop S., Tebaldi C. (2007): Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modeling. International Journal of Climatology 27(12):1547-78. Nº de citas: 730*





Documento de revisión. Evalúa la literatura de “downscaling” (reducción de escala), examinando desarrollos en el campo de reducción de escala específicamente para los impactos hidrológicos. Se centra en estudios metodológicos comparativos; el modelado de extremos; y la aplicación a impactos hidrológicos. Luego se consideran los desarrollos en la construcción de escenarios climáticos que pueden ofrecer el mayor potencial de avance dentro de la comunidad de “reducción de escala para impactos hidrológicos”, tales como modelado probabilístico, escala de patrones y reducción de escala de múltiples variables y sugiere formas en que pueden fusionarse con técnicas de reducción de escala en un marco de escenario probabilístico de cambio climático para evaluar las incertidumbres asociadas con las proyecciones futuras. Dentro de los estudios de impacto hidrológico, todavía se da poca consideración a la investigación aplicada; cómo se pueden utilizar mejor los resultados para permitir que las partes interesadas y los gestores tomen decisiones informadas y sólidas sobre estrategias de adaptación y mitigación frente a muchas incertidumbres sobre el futuro.

#### 5.5.1.7 Gao et al., 2016

Gao, C., Yao, M.T., Wang, Y.J., Zhai, J.Q., Buda, S., Fischer, T., Zeng, X.F., Wang, W.P. (2016): *Hydrological model comparison and assessment: criteria from catchment scales and temporal resolution. Hydrological Sciences Journal* 61(10) 1941-1951. N° citas: 2

Examina el rendimiento de tres modelos hidrológicos, a saber, el modelo basado en red neuronal artificial (ANN), el modelo Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning-D (HBV-D) y el Modelo integrado de suelo y agua (SWIM) en la cuenca del río Huai, China. La evaluación se realiza utilizando bases de datos de diferente resolución temporal y examinando más a fondo la aplicabilidad de SWIM para diferentes tamaños de cuenca. Los resultados muestran que a escala mensual el rendimiento del modelo ANN es mejor que el de HBV-D y SWIM. El modelo ANN se puede aplicar a cualquier escala temporal, ya que establece una relación de precipitación artificial-escorrentía para varias escalas de tiempo utilizando solo datos mensuales de precipitación, temperatura y escorrentía. Sin embargo, a escala diaria, el rendimiento de HBV-D y SWIM es similar o incluso mejor que el modelo ANN. Además, el rendimiento de SWIM en una cuenca pequeña (menos de 10 000 km<sup>2</sup>) es mucho mejor que en una cuenca más grande. En vista del modelado del cambio climático, HBV-D y SWIM podrían integrarse en un modelado dinámico de la atmósfera y el ciclo del agua en lugar del modelo ANN debido al uso de enlaces físicos observados en lugar de relaciones artificiales dentro de una caja negra como usa el ANN.

#### 5.5.1.8 Herrera et al., 2016

Herrera S., Fernández J., Gutiérrez J.M. (2016): *Update of the Spain02 gridded observational dataset for EURO-CORDEX evaluation: Assessing the effect of the interpolation methodology. International Journal of Climatology* 36(2) 900-908. N° citas: 54

Se presenta una actualización del conjunto de datos diarios de precipitación en una cuadrícula (10km x 10km) Spain02 para la precipitación diaria y la temperatura media en las redes definidas para la iniciativa EURO-CORDEX. Para evaluar y comparar diferentes métodos de interpolación, analizamos (1) dos metodologías estándar (kriging ordinario y “thin plates splines”), (2) tres resoluciones horizontales: 0.11°, 0.22° y 0.44° (que coinciden con el EURO-CORDEX rotado y cuadrículas ENSEMBLES), (3) dos enfoques diferentes para garantizar representatividad promediada o puntual de área de los valores de cuadrícula resultantes y (4) incluyendo/excluyendo la orografía como una covariable en el procedimiento de interpolación. Además de presentar los nuevos conjuntos de datos cuadrículados, en este trabajo también se presentan algunos resultados preliminares sobre la sensibilidad de la temperatura y la precipitación (ambas en medias y regímenes extremos) a todos estos factores.

#### 5.5.1.9 Hertig et al., 2019

Hertig, E., Maraun, D., Bartholy, J., Pongracz, R., Vrac, M., Mares, I., Gutiérrez, J.M., Wibig, J., Casanueva, A., Soares, P.M.M. (2019): *Comparison of statistical downscaling methods with respect to extreme events over Europe: Validation results from the perfect predictor experiment of the COST Action VALUE. International Journal of Climatology* 39(9) 3846-3867. N° citas: 11



Dentro de la Acción EU-COST VALUE se desarrolla una metodología de validación integral para los métodos de reducción de escala (downscaling). Se presentan resultados de validación para temperaturas extremas y precipitaciones del experimento predictor perfecto que utiliza predictores basados en reanálisis. La salida de reanálisis en bruto revela que existe un sesgo mayor con respecto a los valores de índice extremos en las estaciones consideradas en toda Europa, lo que indica claramente la necesidad de reducir la escala. El rendimiento de los métodos de reducción de escala está estrechamente relacionado con su estructura y configuración específicas. Todos los métodos que utilizan distribuciones paramétricas requieren distribuciones no estándar para representar correctamente los aspectos marginales de los extremos. Además, el rendimiento mejora mucho al incluir explícitamente un componente estacional, particularmente en caso de precipitación. Con respecto a los aspectos marginales de los extremos, se encuentra el mejor rendimiento para las estadísticas de salida del modelo (MOS), los generadores meteorológicos (WG) y los métodos de pronóstico perfecto (PP) que utilizan análogos. Los extremos de temperatura se evalúan mejor mediante MOS y WG, los extremos de precipitación mediante métodos MOS y PP utilizando análogos. La habilidad de los métodos PP con funciones de transferencia varía mucho entre los métodos y depende del índice extremo, la región y la estación considerada.

#### 5.5.1.10 *Maraun et al., 2015*

*Maraun, D., Widmann, M., Gutiérrez, J.M., Kotlarski, S., Chandler, R.E., Hertig, E., Wibig, J., Huth, R., Wilcke, R.A.I. (2015): VALUE: A framework to validate downscaling approaches for climate change studies. Earth's Future 3(1) 1-14. Nº citas: 72*

VALUE es una red europea abierta para validar y comparar métodos de reducción de escala para la investigación del cambio climático. VALUE tiene como objetivo fomentar la colaboración y el intercambio de conocimientos entre climatólogos, modeladores de impacto, estadísticos y partes interesadas para establecer una comunidad de reducción de escala interdisciplinaria. Una entrega clave de VALUE es el desarrollo de un marco de validación sistemática para permitir la evaluación y comparación de métodos de reducción de escala dinámicos y estadísticos. En este artículo, se presenta los componentes clave de esta red. El enfoque principal de VALUE para la validación se centra en el usuario: a partir de un problema específico del usuario, un árbol de validación guía la selección de índices de validación relevantes y medidas de rendimiento. Se diseñan varios experimentos para aislar puntos específicos en el procedimiento de reducción de escala donde pueden ocurrir problemas: ¿cuál es la habilidad de reducción de escala aislada? ¿Cómo se comparan los métodos estadísticos y dinámicos? ¿Cómo funcionan los métodos a diferentes escalas espaciales? ¿Los métodos no representan el cambio climático regional? ¿Cómo es la representación general del clima regional, incluidos los errores heredados de los modelos climáticos globales? El marco es la base para un estudio integral de inter-comparación de reducción de escala abierto por la comunidad, pero también pretende proporcionar una guía general para otros estudios de validación.

#### 5.5.1.11 *Pulido-Velazquez et al., 2011*

*Pulido-Velazquez, D., Garrote, L., Andreu, J., Martin-Carrasco, F.-J., Iglesias, A. (2011): A methodology to diagnose the effect of climate change and to identify adaptive strategies to reduce its impacts in conjunctive-use systems at basin scale. Journal of Hydrology 405(43497) 110-122. Nº citas: 38*

Se presenta una metodología para analizar el impacto, la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático en los sistemas de recursos hídricos a escala de cuenca. Basado en el valor obtenido para varios índices bajo posibles escenarios futuros (índices obtenidos de los resultados de un modelo de gestión del sistema (AQUATOOL)), se presenta un procedimiento sistemático para identificar problemas y soluciones para adaptarse a los efectos del cambio climático. Los escenarios hidrológicos futuros a ser analizados se desarrollan a partir de las series históricas disponibles para el sistema (Serpis, este de España) y teniendo en cuenta los cambios esperados en los estadísticos clave de la serie. Se desarrolla un método para predecir los cambios esperados en las estadísticas clave utilizando los resultados de estudios previos sobre cambio climático en la región. Se propone un procedimiento de "reducción de escala" para traducir las variaciones climáticas en resultados a escala de cuenca.



#### 5.5.1.12 *Semenov, 2007*

*Semenov, M.A. (2007): Development of high-resolution UKCIP02-based climate change scenarios in the UK. Agricultural and Forest Meteorology 144(43497) 127-138. Nº citas: 142*

Se describe una metodología para la construcción de escenarios climáticos diarios específicos de cada sitio, basada en un generador de clima estocástico. Se utilizó, el generador de clima estocástico LARS-WG, que fue calibrado para el clima actual con datos diarios observados. Luego, sus parámetros se ajustan para el cambio climático, utilizando la salida de las proyecciones UKCIP02, presentadas como cambios en las variables climáticas medias mensuales entre la ejecución de control y los escenarios futuros. Para poder generar escenarios en cualquier ubicación del Reino Unido, los parámetros de LARS-WG, calculados para ubicaciones con largos registros históricos del tiempo, se interpolan. Las distribuciones para las variables climáticas se interpolan localmente y luego se modifican mediante valores medios interpolados globalmente para tener en cuenta el efecto de la topografía. Para ilustrar la metodología, se generan escenarios diarios basados en UKCIP02 y se usan para calcular varios eventos climáticos extremos y el impacto del cambio climático en el crecimiento del trigo. Bajo un clima más cálido, es probable que las estadísticas extremas relacionadas con la temperatura, como las olas de calor, aumenten sustancialmente en magnitud y frecuencia. Se analizan dos estadísticas de impacto para el trigo, es decir, el índice de estrés por sequía y la probabilidad de un episodio de temperatura caliente después de la antesis. A pesar de una temperatura más alta y una precipitación de verano más baja para el escenario 2080HI, el impacto relativo en el rendimiento debido al estrés por sequía es menor para 2080HI que para el clima de referencia, debido a la capacidad del trigo para madurar temprano en un clima más cálido evitando el calor del verano y el estrés por sequía.

#### 5.5.1.13 *Serrano-Notivoli et al., 2017*

*Serrano-Notivoli R., Beguería S., Saz M.A., Longares L.A., De Luis M. (2017): SPREAD: A high-resolution daily gridded precipitation dataset for Spain - An extreme events frequency and intensity overview. Earth System Science Data 9(2) 721-738. Nº citas: 18*

Se creó un conjunto de datos de precipitación diarios en una cuadrícula de alta resolución (5km x 5km) a partir de datos brutos de 12.858 estaciones que cubren un período de 1950 a 2012 en España peninsular y 1971 a 2012 en Baleares y Canarias (SPREAD). Se realiza un control de calidad de los datos originales y los huecos se rellenaron en cada día y lugar de forma independiente. Utilizando el conjunto de datos completo en serie, se construye una cuadrícula con una resolución espacial de 5 x 5 km mediante la estimación de las cantidades diarias de precipitación y su correspondiente incertidumbre en cada nodo de la cuadrícula. Las estimaciones diarias de precipitación se comparan con las observaciones originales para evaluar la calidad del conjunto de datos cuadrículados. Se calculan cuatro índices de precipitación diaria para caracterizar la distribución espacial de la precipitación diaria y se utilizaron nueve índices de precipitación extrema para describir la frecuencia e intensidad de los eventos de precipitación extrema. La costa mediterránea y la Cordillera Central mostró la mayor frecuencia e intensidad de eventos extremos, mientras que el número de días húmedos y los períodos secos y húmedos siguieron un gradiente de noroeste a sureste en la España peninsular, de valores altos a bajos en el número de días húmedos. La base SPREAD está disponible públicamente en <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/7393>.

#### 5.5.1.14 *Wilby y Dawson, 2013*

*Wilby, R.L., Dawson, C.W. (2013): The statistical downscaling model: Insights from one decade of application. International Journal of Climatology 33(7) 1707-1719. Nº citas: 108*

El Modelo Estadístico de Reducción de Escala (Statistical Downscaling Model (SDSM)) es una herramienta disponible gratuitamente que produce escenarios de cambio climático de alta resolución. La primera versión pública del software se lanzó en 2001 y desde entonces se han realizado más de 170 estudios documentados en todo el mundo. Este artículo relata la evolución conceptual y técnica subyacente de SDSM, basándose en evaluaciones independientes de las capacidades del modelo. Estos estudios muestran que SDSM produce estimaciones confiables de temperaturas extremas, totales de precipitación estacional y comportamiento de precipitación regional. La estimación de frecuencia de volúmenes extremos de precipitación en estaciones secas es menos confiable. Un



meta-análisis de los resultados de SDSM muestra una preponderancia de la investigación en Canadá, China y el Reino Unido, mientras que Estados Unidos y Australasia están subrepresentados. En línea con la comunidad más amplia de reducción de escala, el sector científico donde más se utiliza es la gestión del riesgo de sequías e inundaciones, que representa casi la mitad de toda la producción; La investigación en otros sectores como la agricultura, el medio ambiente y la salud humana es menos prominente, pero está creciendo. Más del 50% de los estudios se refieren a la producción de escenarios climáticos, comparación o refinamiento técnico de metodologías de reducción de escala.

## 5.5.2 Técnicas de corrección de sesgo

### 5.5.2.1 *González-Zeas et al., 2012*

*González-Zeas, D., Garrote, L., Iglesias, A., Sordo-Ward, A. (2012): Improving runoff estimates from regional climate models: A performance analysis in Spain. Hydrology and Earth System Sciences 16(6) 1709-1723. Nº citas: 19*

Se presenta una metodología simple para identificar la mejor alternativa para obtener series de tiempo de escorrentía mensuales con corrección de sesgo a partir de la salida de simulaciones RCM, para su aplicación en estudios a gran escala en regiones donde no está disponible un modelo hidrológico calibrado adecuadamente, y utilizando las variables de salida simuladas por los modelos climáticos regionales (MCR) del proyecto europeo PRUDENCE bajo el clima actual (período 1961–1990). La metodología compara diferentes métodos de interpolación y alternativas para generar series de tiempo anuales que minimizan el sesgo con respecto a los valores observados. Este estudio utiliza información de 338 cuencas en España y cuyos valores observados de escorrentía natural han sido estimados por el modelo hidrológico distribuido SIMPA. Se comparan cuatro métodos de interpolación para reducir la escorrentía a la escala de la cuenca. Las alternativas consideran el uso de la escorrentía directa de los MCR y la escorrentía media anual calculada utilizando cinco formas funcionales del índice de aridez, definido como la relación entre la evapotranspiración potencial y la precipitación. Además, se evalúa la comparación con respecto a la referencia de escorrentía global del conjunto de datos UNH / GRDC, como un contraste del "mejor estimador" de la escorrentía actual a gran escala. Los resultados muestran que el sesgo se minimiza utilizando el método de interpolación directa original y la mejor alternativa para la corrección del sesgo de las series temporales mensuales de escorrentía directa de RCM es el conjunto de datos UNH / GRDC, aunque la fórmula propuesta por Schreiber (1904) también da buenos resultados.

### 5.5.2.2 *Huang et al., 2014*

*Huang, S., Krysanova, V., Hattermann, F.F. (2014): Does bias correction increase reliability of flood projections under climate change? A case study of large rivers in Germany. International Journal of Climatology 34(14) 3780-3800. Nº citas: 15*

Investiga el rendimiento y los impactos de los métodos de corrección de sesgo (BC) en las proyecciones de inundaciones en Alemania. El método de mapeo se aplica para corregir los datos climáticos de los modelos climáticos regionales (RCM), CCLM (Cosmo-Climate Local Model) y REMO (REgional MOdel) desarrollado en Alemania. Los resultados muestran que BC pueden reducir efectivamente el sesgo en la escorrentía anual promedio simulada, pero la incertidumbre de las inundaciones simuladas permanece debido a la corrección imperfecta de precipitaciones extremas. Alrededor del 75% de las direcciones de cambio en los caudales de crecida de 50 años permanecen iguales antes y después de que se usó el BC. El período de control relativamente corto de 40 años y la suposición de estacionariedad del método BC son dos cuestiones importantes y problemáticas para las proyecciones de crecidas. Por lo tanto, es difícil demostrar que BC puede aumentar la confiabilidad de las proyecciones en la simulación de las crecidas.

### 5.5.2.3 *Li et al., 2010*

*Li, H., Sheffield, J., Wood, E.F. (2010): Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching. Journal of Geophysical Research Atmospheres 115(10). Nº citas: 338*



Se desarrolla un nuevo método de mapeo basado en cuantiles para la corrección de sesgo de los resultados del modelo de circulación global mensual. En comparación con el método de coincidencia basado en cuantiles ampliamente utilizado que asume la estacionariedad y solo usa las funciones de distribución acumulativa (CDF) del modelo y las observaciones para el período de referencia, el método propuesto incorpora y ajusta el CDF del modelo para el período de proyección sobre la base de la diferencia entre el modelo y los CDF de observación para el período de entrenamiento (línea de base). Por lo tanto, el método explica explícitamente los cambios de distribución para un modelo dado entre la proyección y los períodos de referencia. Se aplica el método en el norte de Eurasia. Se ajusta una distribución beta de cuatro parámetros a los campos de temperatura mensuales y se discute la sensibilidad de los resultados a la elección de los parámetros. Para los datos de precipitación mensual, se utiliza una distribución gamma mixta que explica la naturaleza intermitente de la lluvia. Para probar la fidelidad del método propuesto, se elige 1970–1999 como el período de entrenamiento inicial y luego se selecciona aleatoriamente 30 años entre 1901–1999 como el período de validación. El inicio se repite 30 veces para imitar las diferentes condiciones climáticas que pueden ocurrir, y los resultados sugieren que ambos métodos son comparables cuando se aplican al siglo XX tanto para temperatura como para precipitación en los cuantiles examinados. También se discute la dependencia de los resultados de corrección de sesgo en la elección del período de tiempo para el entrenamiento. Esto indica que los sesgos restantes en las series de tiempo con corrección de sesgos están directamente relacionados con el rendimiento del modelo durante el período de entrenamiento y, por lo tanto, se debe tener cuidado al usar un período de tiempo de entrenamiento en particular. Cuando se aplica a la proyección del escenario climático A2 del cuarto informe de evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (AR4), la serie temporal de datos después de la corrección del sesgo de ambos métodos exhibe patrones espaciales similares. Sin embargo, en las regiones donde el modelo climático muestra grandes cambios en la variabilidad proyectada, existen diferencias apreciables entre los métodos. El método propuesto es más sensible a una reducción en la variabilidad, ejemplificada por la temperatura del invierno. Otros experimentos sintéticos que utilizan el 33% inferior y el 33% superior del conjunto de datos completo como datos de validación sugieren que el método propuesto es más eficiente en la reducción de sesgos que el método tradicional de mapeo de CDF para climas cambiantes, especialmente para las colas de la distribución.

#### 5.5.2.4 Rojas et al., 2011

Rojas, R., Feyen, L., Dosio, A., Bavera, D. (2011): *Improving pan-European hydrological simulation of extreme events through statistical bias correction of RCM-driven climate simulations. Hydrology and Earth System Sciences 15(8) 2599-2620. Nº citas: 74*

Se evalúa el beneficio de eliminar el sesgo en los datos de forzamiento climático utilizados para la evaluación del impacto del cambio climático hidrológico a escala paneuropea, con énfasis en las avenidas. El sesgo de las simulaciones climáticas del modelo HIRHAM5-ECHAM5 bajo el escenario de emisión SRES-A1B se corrige utilizando un método de ecualización de histograma. Como datos objetivo para la corrección del sesgo, se emplea observaciones interpoladas de precipitación, temperatura media, mínima y máxima del conjunto de datos E-OBS (ver Haylock et al. 2008), desarrollado en el proyecto europeo ENSEMBLES (van der Linden y Mitchell 2009). Las funciones de transferencia de eliminación de sesgo se derivan para el período de control 1961–1990. Posteriormente, se utilizan para corregir las simulaciones climáticas para el período de control y, bajo el supuesto de un modelo de error estacionario, para la ventana de tiempo futuro 2071–2100. La validación contra la climatología de E-OBS en el período de control muestra que el método de corrección funciona con éxito al eliminar el sesgo en las estadísticas medias y extremas relevantes para la simulación de avenidas en la mayoría del dominio europeo y en todas las estaciones. Esto se traduce en una mejora de las simulaciones del modelo hidrológico (LisFlood) de caudales medios y extremos en la mayoría de las 554 estaciones de aforo consideradas para la validación en toda Europa. La estimación del período de retorno de caudales máximos anuales también se reproduce correctamente. Los resultados indican que las proyecciones futuras de riesgo de inundación en Europa basadas en simulaciones climáticas no corregidas, tanto en términos de su magnitud como del intervalo de recurrencia, probablemente estén sujetas a grandes errores. A pesar de las limitaciones inherentes del enfoque a gran escala utilizado en este documento, este estudio aboga





por la eliminación del sesgo en las simulaciones climáticas antes de su uso en la evaluación del impacto hidrológico.

### 5.5.3 Técnicas de análisis de incertidumbre

#### 5.5.3.1 Aerts et al., 2008

Aerts JCJH, Botzen W, Van Der Veen A, Krywkow J, Werners S (2008): *Dealing with uncertainty in flood management through diversification. Ecol Soc 13(1) 41. N° de citas: 24*

Este documento muestra, a través de un ejemplo numérico, cómo desarrollar carteras de inversión para la gestión de inundaciones con un riesgo aceptable. Se aplica a una región en la parte central de los Países Bajos. Se aplica un método basado en la "Modern Portfolio Theory" (MPT). MPT tiene como objetivo encontrar conjuntos de inversiones que diversifiquen los riesgos, reduciendo así el riesgo general del total de la cartera de inversiones. Se muestra que, mediante la combinación sistemática de cuatro medidas de protección contra inundaciones, el riesgo se reduce en comparación con las carteras que solo contienen una o dos medidas.

#### 5.5.3.2 Chavez-Jimenez et al., 2013

Chavez-Jimenez, A., Lama, B., Garrote, L., Martin-Carrasco, F., Sordo-Ward, A., Mediero, L. (2013): *Characterisation of the Sensitivity of Water Resources Systems to Climate Change. Water Resources Management 27(12) 4237-4258. N° citas: 21*

Presenta una metodología que permite la caracterización del comportamiento de los sistemas de recursos hídricos bajo el impacto del cambio climático a través de la evaluación de patrones de sensibilidad en una amplia gama de variaciones hidrológicas producidas por dicho cambio. El análisis se basa en la aplicación de dos indicadores (demand-satisfaction index y demand-reliability index) que, a su vez, se basan en los resultados de un modelo de optimización del sistema (OPTIGES, AQUATOOL). Bajo esta metodología, se visualiza la sensibilidad potencial de los sistemas de recursos hídricos en los casos de diferentes proyecciones climáticas, lo que permite identificar aquellos sistemas que requieren atención especial en su adaptación al cambio climático. La metodología se aplica a tres cuencas ubicadas en España: Guadalquivir, Ebro y la parte española de la cuenca internacional Duero.

#### 5.5.3.3 EU, WATCH, 2011

*Methodology for the assessment of uncertainty in hydrological extremes. Technical Report N° 54.*

Este informe técnico se dirige a evaluar cómo la incertidumbre de los modelos climáticos, GCM y RCM, se propaga a modelos hidrológicos, incluido el efecto de reducción de escala requerida para este último. Este informe presenta una metodología para evaluar la propagación de la incertidumbre. El método es general y puede aplicarse a cualquier modelo hidrológico, independientemente de su complejidad y de la discretización espacial del modelo (es decir, modelos agrupados o distribuidos). Se aplica la metodología a ØD-Box Models, pero también al modelo hidrológico distribuido de la cuenca superior del Guadiana. Se usa el modelo de corrección de sesgo (BC) IPSM de GCM para el período 1960-2000 y se utilizan como datos de clima forzado para los modelos hidrológicos. El tamaño de celda del modelo hidrológico distribuido es mucho más pequeño (2.5 x 2.5 km<sup>2</sup>) que los tamaños de celda típicos de GCM y RCM (60 x 60 km<sup>2</sup>). Ante esto, se desarrolla un nuevo método estadístico de reducción de escala. Los campos de lluvia diaria (DS) para el siglo XX son generados y utilizados para forzar los modelos hidrológicos. El método de propagación de incertidumbre también se aplica a esta nueva serie temporal. Los resultados se presentan en términos de sequías meteorológicas e hidrológicas. Se encuentra que el forzamiento de BC sobreestima los eventos de sequía más extremos (mayor déficit) de ambos, el almacenamiento del acuífero y la recarga del agua subterránea. El forzamiento DS subestima los eventos de sequía más extremos (mayor déficit) de ambos, el déficit de precipitación y la recarga de agua subterránea.

#### 5.5.3.4 Kotlarski et al., 2019

Kotlarski, S., Szabó, P., Herrera, S., Rätty, O., Keuler, K., Soares, P.M., Cardoso, R.M., Bosshard, T., Pagé, C., Boberg, F., Gutiérrez, J.M., Isotta, F.A., Jaczewski, A., Kreienkamp, F., Liniger, M.A.,





*Lussana, C., Pianko-Kluczyńska, K. (2019): Observational uncertainty and regional climate model evaluation: A pan-European perspective. International Journal of Climatology 39(9) 3730-3749. Nº citas: 24*

Se calcula la influencia de la incertidumbre en los datos observados de referencia en cuadrícula para la evaluación del modelo climático regional (MCR) y se cuantifica a escala paneuropea. Se consideran tres conjuntos de datos de referencia diferentes: el conjunto de datos E-OBS de resolución aproximada, una compilación de productos reticulados (HR) regionales de alta resolución y el reanálisis MESAN a escala europea. Se evalúan cinco experimentos RCM impulsados por ERA-Interim de alta resolución de la iniciativa EURO-CORDEX en cada una de estas referencias en ocho subregiones europeas y considerando un rango de métricas de performance para la temperatura media diaria y la precipitación diaria. La escala espacial de la evaluación es de 0.22°, es decir, el espaciado de la cuadrícula del conjunto de datos más grueso en el ejercicio (E-OBS). Si bien las tres cuadrículas de referencia concuerdan en la climatología media general, las diferencias pueden ser pronunciadas en las regiones individuales. Estas diferencias se traducen, en parte, en la incertidumbre de la evaluación RCM. Aun así, para la mayoría de los casos, la incertidumbre observacional es menor que la incertidumbre RCM. Sin embargo, para las subregiones individuales y las métricas de rendimiento, la incertidumbre observacional puede dominar. Esto es especialmente cierto para la precipitación y para las métricas dirigidas a la frecuencia de días húmedos, la correlación de patrones y la similitud de distribución. En algunos casos, el sesgo medio promediado espacialmente puede verse considerablemente afectado. Un ejercicio ilustrativo de clasificación destaca el efecto general de la incertidumbre observacional en la clasificación de RCM. Sobre subdominios individuales, la elección de una referencia específica puede modificar los rangos de RCM en hasta cuatro niveles (de cinco RCM). Sin embargo, para la mayoría de los casos, los rangos de RCM son estables independientemente de la referencia. Estos resultados proporcionan una imagen doble: la incertidumbre del modelo domina para la mayoría de las regiones y para la mayoría de las métricas de rendimiento consideradas, y la incertidumbre observacional juega un papel menor. Sin embargo, para casos individuales, la incertidumbre observacional puede ser pronunciada y debe tenerse definitivamente en cuenta.

#### **5.5.3.5 Obeysekera y Salas, 2014**

*Obeysekera J., Salas J.D. (2014): Quantifying the uncertainty of design floods under nonstationary conditions. Journal of Hydrologic Engineering 19(7) 1438-1446. Nº citas: 55*

Aborda el problema de la incertidumbre resultante del tamaño limitado de la muestra de las observaciones de caudales máximos anuales. Para ello se han desarrollado tres métodos para calcular los intervalos de confianza para el cuantil de diseño correspondiente a un período de retorno deseado en un marco no estacionario, que incluye (a) delta, (b) bootstrap, y (c) el método "profile likelihood". Estos métodos se han desarrollado asumiendo una distribución generalizada de valores extremos con parámetros no estacionarios. Se utilizó una serie de máximos caudales anuales en Assunpink Creek, Nueva Jersey (USA) para determinar el intervalo de confianza de los cuantiles. El método delta, con derivadas locales derivadas numéricamente, y el bootstrap pueden ser computacionalmente eficientes. El método de "profile likelihood", más preciso, es bastante pesado computacionalmente, pero proporciona intervalos de confianza asimétricos más realistas.

#### **5.5.3.6 Prudhomme y Davies, 2009a**

*Prudhomme C., Davies H. (2009a): Assessing uncertainties in climate change impact analyses on the river flow regimes in the UK. Part 1: Baseline climate. Climatic Change 93: 177. Nº de citas: 121*

Investiga las tres fuentes principales de incertidumbre que rodean los estudios de impacto del cambio climático en los caudales de los ríos: la incertidumbre en los MCG, en técnicas de reducción de escala y modelado hidrológico. El estudio analizó cuatro series de caudales de cuencas británicas simuladas con dos modelos conceptuales de precipitación-escorrentía (basado en el modelo "probability distributed moisture (PDM) model" (Moore 1985)) y utilizando tanto series de lluvia observadas como derivadas de GCM, representativas del horizonte de tiempo de referencia (1961-1990). Se utilizó una técnica de muestreo de bloques para evaluar la variabilidad climática, ya sea de registros observados (variabilidad natural) o reproducidos por GCM. También se evalúa las variaciones en las aportaciones



mensuales promedio debido a la incertidumbre del modelo hidrológico, de diferentes estructuras o parámetros del modelo. Se consideraron tres GCM (HadCM3, CCGCM2 y CSIRO-mk2) y dos técnicas de reducción de escala (SDSM y HadRM3). Los resultados muestran que, para las cuatro cuencas, la incertidumbre de GCM es generalmente mayor que la incertidumbre de reducción de escala, y ambas son consistentemente mayores que la incertidumbre del modelado hidrológico o la variabilidad natural. No se encontró que el GCM o la técnica de reducción de escala fueran significativamente mejores o que tuvieran un sesgo sistemático más pequeño que los demás. Esto resalta la necesidad de considerar más de un GCM y una técnica de reducción de escala en los estudios de impacto, y evaluar el sesgo que introducen al modelar los caudales de los ríos.

#### 5.5.3.7 Prudhomme y Davies, 2009b

*Prudhomme C., Davies H. (2009b): Assessing uncertainties in climate change impact analyses on the river flow regimes in the UK. Part 2: Future climate. Climatic Change 93: 197. 105. Nº de citas: 173.*

Utiliza los mismos modelos y métodos del estudio anterior (Prudhomme y Davies 2009a) para un horizonte futuro (2080) y analiza la importancia de estos cambios proyectados en comparación con la variabilidad natural de referencia en cuatro cuencas británicas. También se consideran los escenarios UKCIP02, que se utilizan ampliamente en el Reino Unido para estudiar el impacto del cambio climático. Los resultados muestran que los MCG son la mayor fuente de incertidumbre en los caudales futuros. Las incertidumbres de las técnicas de reducción de escala y los escenarios de emisión son de magnitud similar, y generalmente más pequeños que la incertidumbre de GCM. Para las cuencas donde la incertidumbre del modelado hidrológico es menor que la variabilidad del GCM para el caudal de referencia, esta incertidumbre puede ignorarse para las proyecciones futuras, de lo contrario, podría ser significativa. Los cambios pronosticados no siempre son significativos en comparación con la variabilidad inicial, menos del 50% de las proyecciones sugieren un cambio significativo en la aportación mensual. Cambios menores podrían ocurrir solo debido a la variabilidad climática y, por lo tanto, no se pueden atribuir al cambio climático, pero a menudo se ignoran en los estudios sobre el cambio climático y pueden llevar a conclusiones engañosas. El sesgo sistemático identificado en la reproducción del clima actual impacta en las proyecciones futuras y, por lo tanto, debe tenerse en cuenta al interpretar los resultados. Los cambios en la variabilidad del caudal de los ríos, importantes para la planificación del manejo del agua, pueden evaluarse fácilmente a partir de técnicas simples de remuestreo aplicadas tanto a la línea de base como a los horizontes temporales futuros. Este documento de dos partes demuestra que la incertidumbre debida a la modelización hidrológica y climática debe y puede explicarse para proporcionar un asesoramiento sólido y con base científica a los responsables de la toma de decisiones.

#### 5.5.3.8 Sordo-Ward et al., 2016

*Sordo-Ward Á., Granados I., Martín-Carrasco F., Garrote L. (2016): Impact of Hydrological Uncertainty on Water Management Decisions. Water Resources Management 30(14) 5535-5551. Nº citas: 5*

Se centra en el análisis de incertidumbres en las series hidrológicas y su impacto en las decisiones de gestión de los recursos hídricos. La metodología se basa en la simulación de Monte Carlo, donde se consideran los parámetros relevantes sobre los procesos de precipitación y escorrentía de un modelo hidrológico a partir de distribuciones de probabilidad adecuadas para analizar la distribución de probabilidad de las variables de salida en un modelo de sistema de recursos hídricos. El procedimiento se aplica a tres sistemas de recursos hídricos en la cuenca del Duero (España). Los resultados muestran que el desempeño de los sistemas de recursos hídricos es muy sensible a las incertidumbres en la entrada del modelo. La desviación de las garantías o déficits de suministro obtenidos en los sistemas de recursos hídricos en comparación con las entradas de referencia fue mucho mayor cuando las perturbaciones eran desfavorables que cuando eran favorables. Esto sugiere que el análisis de incertidumbre puede tener implicaciones importantes cuando se evalúa el desempeño de los sistemas de recursos hídricos.



#### 5.5.3.9 Steinschneider et al. 2014

Steinschneider, S., Wi, S., Brown, C. (2014): *The integrated effects of climate and hydrologic uncertainty on future flood risk assessments. Hydrological Processes, 29(12), 2823-2839. N° citas: 47*

El estudio examina el riesgo futuro de crecidas integrando la incertidumbre asociada a la modelación climática e hidrológica. El estudio se basa en la propagación de un conjunto de simulaciones climáticas a través de modelos hidrológicos y luego a través de un modelo de simulación de embalse para definir el rango de seguridad hidrológica de una presa ante crecidas en una amplia gama de condiciones climáticas. La incertidumbre en los cambios climáticos medios y la variabilidad climática interna se enmarcan utilizando una metodología basada en el riesgo y se exploran utilizando un generador de clima estocástico. Para cuantificar la incertidumbre hidrológica, se consideran dos modelos hidrológicos, un modelo conceptual agregado y un modelo distribuido físicamente basado. En el modelo agregado, la incertidumbre del error residual y de los parámetros se cuantifican y propagan utilizando un marco de modelado bayesiano. La metodología se aplica en la presa de Coralville en el río Iowa (Iowa, USA). Los resultados indican que la incertidumbre asociada al modelado hidrológico y la variabilidad climática interna puede ser del mismo orden de magnitud que el cambio climático.

#### 5.5.3.10 Vetter et al., 2017

Vetter, T., Reinhardt, J., Flörke, M., van Griensven, A., Hattermann, F., Huang, S., Koch, H., Pechlivanidis, I.G., Plötner, S., Seidou, O., Su, B., Vervoort, R.W., Krysanova, V. (2017): *Evaluation of sources of uncertainty in projected hydrological changes under climate change in 12 large-scale river basins. Climatic Change 141(3) 419-433. N° citas: 49*

Tiene como objetivo evaluar las fuentes de incertidumbre en los cambios hidrológicos proyectados bajo el cambio climático en doce cuencas fluviales a gran escala en todo el mundo (una de ellas la cuenca del Río Tajo), considerando el caudal medio y los dos cuantiles de escorrentía Q10 (caudal alto) y Q90 (caudal bajo). Primero, los cambios en la escorrentía media, baja y alta se evalúan utilizando resultados de simulación de un modelo multi-hidrológico (nueve modelos hidrológicos, HM) y escenarios múltiples (cuatro RCP, cinco CMIP5 Modelos de circulación general, GCM). Luego, se analizan tres fuentes principales de incertidumbre (de GCM, RCP y HM) utilizando el método ANOVA, que permite descomponer las variaciones e indicar las principales fuentes de incertidumbre a lo largo de la cadena modelo GCM-RCP-HM. El análisis de incertidumbres muestra que, en general, la mayor parte de la incertidumbre está relacionada con los GCM, seguida de los RCP, y la menor con los HM. Los modelos hidrológicos son los que menos contribuyen a la incertidumbre para Q10 y el caudal medio, pero su contribución es más significativa para Q90.

## 5.6 Análisis de efectos en sistemas naturales y sociales

### 5.6.1 Técnicas de caracterización y evaluación de fenómenos extremos

#### 5.6.1.1 Cao y Gao, 2019

Cao, F., Gao, T. (2019): *Effect of climate change on the centennial drought over China using high-resolution NASA-NEX downscaled climate ensemble data. Theoretical and Applied Climatology 138(43497) 1189-1202. N° citas: 1*

Analiza los impactos del cambio climático sobre las sequías en varias regiones de China utilizando múltiples enfoques estadísticos, basados en 20 modelos climáticos globales y "downscaled" proporcionados por la NASA (NEX-GDDP) bajo los escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5. Los resultados muestran que la temperatura juega un papel crucial en la variabilidad de las condiciones de sequía en China al comparar las discrepancias entre el Índice de precipitación estandarizada (SPI) y el Índice de evapotranspiración de precipitación estandarizada (SPEI). Mientras que la variabilidad de la extensión de la sequía no es evidente si se proyecta para SPI, la variabilidad de la extensión de la sequía para SPEI es notable. Según SPEI, se observa un agravamiento considerable en la extensión espacial y la intensidad de los eventos futuros de sequía en la mayoría de las regiones,



particularmente en el noroeste y noreste de China, excepto en el invierno sobre la región noreste. La extensión de la sequía aumenta más después de finales de la década de 2070 en el escenario RCP8.5, y las diferencias de la extensión de la sequía no son significativas entre los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 a principios y mediados del siglo XXI. El 85% de las regiones muestran una tendencia decreciente de SPEI en primavera, verano y otoño, lo que sugiere una tendencia a la sequía en la mayor parte de China, y la frecuencia de la sequía también aumenta significativamente en el norte y noroeste de China, excepto en invierno.

#### 5.6.1.2 *Deltares, 2018*

*Comparative Assessment of Drought Hazard and Risk Modeling Tools. 11200758-002*

Se realiza una evaluación de las herramientas disponibles a escala mundial de modelado para el estudio de riesgo de sequía, el mapeo de peligro de sequía y la identificación de puntos críticos, y detección y pronóstico de sequía. Este informe describe una evaluación comparativa cuantitativa y cualitativa de una selección de herramientas y recursos de modelación de riesgos y sequías disponibles en el inventario global de sequías desarrollado por el GFDRR (Deltares 2018). No todas las herramientas de modelado y los recursos recopilados en el inventario de sequía global se utilizaron en estos análisis. Solo se evaluaron las herramientas y recursos de modelado disponibles en línea, sin costo y con cobertura global. La razón de estos criterios de selección es que los resultados de este estudio deberían ser aplicables a todos los usuarios en todos los países del mundo. Sin embargo, para la revisión y comparación cualitativa de los sistemas de monitoreo y pronóstico de sequía, también se evaluaron los sistemas regionales y nacionales. La evaluación comparativa de las herramientas y recursos de modelado de riesgo y sequía consistió en los siguientes componentes: 1) Un análisis comparativo de series temporales espaciales de modelos de peligro de sequía, 2) Comparación a escala de país de conjuntos de datos globales, 3) Validación de datos globales con series de tiempo locales, 4) Sensibilidad a la variabilidad hidroclimática forzada por ENOS, 5) Una comparación cualitativa de modelos de impacto de sequía y 6) Una revisión y comparación cualitativa de los sistemas de detección y pronóstico de sequía.

#### 5.6.1.3 *García-Ruiz et al., 2011*

*García-Ruiz, J.M., López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Lasanta-Martínez, T., Beguería, S. (2011): Mediterranean water resources in a global change scenario. Earth-Science Reviews 105(43558) 121-139. Nº citas: 404*

Estudia el impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos. Los escenarios futuros para los recursos hídricos en la región del Mediterráneo sugieren (1) una disminución progresiva en el caudal promedio (ya observado en muchos ríos desde la década de 1980), incluida una disminución en la frecuencia y magnitud de las inundaciones más frecuentes debido a la expansión de los bosques; (2) cambios importantes en las características del régimen hidrológico, incluyendo una disminución más temprana de los caudales altos del deshielo en primavera, una intensificación de los caudales bajos en verano y caudales más irregulares en invierno; (3) cambios en las aportaciones y la gestión de los embalses, incluida una disminución de la disponibilidad de agua para poder atender a las demandas de las zonas de riego y urbanas. La mayoría de los embalses en las zonas de montaña estarán sujetos a una creciente incertidumbre sobre los recursos hídricos, debido a la menor influencia de la acumulación de nieve y los procesos de deshielo. Además, la capacidad de los embalses se reduce naturalmente debido al aumento de la sedimentación y, en algunos casos, también se reduce para el control de inundaciones, lo que lleva a una reducción en la eficiencia para la agricultura; y (4) cambios hidrológicos y demográficos en las zonas costeras, particularmente en las zonas del delta, afectadas por el agotamiento del agua, la reducción del agua subterránea y la intrusión de agua salina. Estos escenarios aumentan la necesidad de mejorar la gestión del agua, el precio del agua y las políticas de reutilización del agua, a fin de garantizar el suministro de agua y reducir las tensiones entre las regiones y los países.

#### 5.6.1.4 *JRC, 2016*

*JCR (2016): Meteorological Droughts in Europe: Events and Impacts – Past Trends and Future Projections. Technical Reports EUR 27748*



Los registros de observación de 1950 en adelante y las proyecciones climáticas para el siglo XXI proporcionan evidencia de que las sequías son una característica recurrente del clima en grandes partes de Europa, especialmente en el Mediterráneo, pero también en Europa occidental, sudoriental y central. En el estudio de referencia, los eventos de sequía se analizaron a diferentes escalas espaciales (país, región) utilizando datos climáticos distribuidos y tres indicadores de sequía diferentes: el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) dependiente de la precipitación, el Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizado (SPEI) y el Indicador de Reconocimiento de Sequía (RDI). Los tres indicadores se fusionaron en dos indicadores compuestos para derivar características clave de las sequías durante el período analizado (1950-2012). Se construyó una nueva base de datos de eventos de sequía meteorológica basada en el análisis de los indicadores compuestos. Esta base de datos también muestra las características de 21 grandes sequías que azotaron Europa desde 1950 hasta 2012, seis de las cuales ocurrieron después del año 2000. A cada evento de sequía meteorológica se le asignó un conjunto de parámetros estadísticos, que incluyen inicio, fin, máximo, duración, gravedad, intensidad y área afectada por las sequías. Para calcular las tendencias de las sequías en cada celda de la cuadrícula, se adoptó un enfoque similar al aplicado en Spinoni et al. (2014). La tendencia de la frecuencia de sequía (FS), la gravedad (GS) y la duración (DS) para el período 1951-2012 se calculó dividiendo el período histórico de análisis en nueve intervalos de siete años, calculando FS, GS y DS para cada intervalo. Posteriormente se realizó un análisis de tendencia lineal. Se comprobó la significancia de tendencias con una prueba t de Student (Wilks 2011). Se analizaron sequías de diferente duración, distinguiendo entre eventos que duran dos o más meses y eventos de sequía prolongada que duran al menos seis meses. Las tendencias en los últimos 60 años muestran una frecuencia, duración e intensidad crecientes de sequías en estas regiones, mientras que se ha observado una tendencia negativa en el noreste de Europa. Con un clima cambiante, es probable que esta tendencia se refuerce durante el siglo XXI y afecte a una amplia gama de sectores socioeconómicos.

#### 5.6.1.5 Long et al., 2013

*Long, D., Scanlon, B.R., Longuevergne, L., Sun, A.Y., Fernando, D.N., Save, H. (2013): GRACE satellite monitoring of large depletion in water storage in response to the 2011 drought in Texas. Geophysical Research Letters 40(13) 3395-3401. Nº citas: 160*

Se evalúa el cambio de agua almacenada en el suelo (TWS) derivado del proyecto GRACE como un indicador alternativo de sequía basado en sensores remotos, independiente de los indicadores de sequía tradicionales basados en el monitoreo in situ. GRACE muestra una disminución en TWS de  $62.3 \pm 17.7 \text{ km}^3$  durante la sequía de 2011. Grandes incertidumbres en la simulación de la reducción del almacenamiento de humedad del suelo ( $14\text{--}83 \text{ km}^3$ ) de seis modelos de superficie terrestre indican que GRACE TWS es un indicador de sequía más confiable que la humedad desagregada del suelo o el almacenamiento de agua subterránea. El uso del agua subterránea y los datos del nivel del agua subterránea indican que la reducción está dominada por los cambios en el almacenamiento de humedad del suelo, lo que es consistente con la alta correlación entre GRACE TWS y el Índice de Sequía de Palmer.

#### 5.6.1.6 Mishra et al., 2009

*Mishra, A.K., Singh, V.P. (2009): Analysis of drought severity-area-frequency curves using a general circulation model and scenario uncertainty. Journal of Geophysical Research Atmospheres 114(6). Nº citas: 91.*

Se investiga el impacto del cambio climático con las curvas "severity-area-frequency" (SAF) para las sequías anuales en la cuenca del río Kansabati, India. Las sequías históricas se comparan con las curvas SAF históricas y con las curvas SAF desarrolladas sobre la base de las precipitaciones proyectadas utilizando un modelo de circulación general y la incertidumbre del escenario. Los índices de precipitación estandarizados (SPI 3 y SPI 12) se utilizan como índices de sequía para la construcción de curvas SAF durante dos períodos (2001-2050 y 2051-2100). Los resultados muestran que es probable que haya sequías más severas en 2001-2050 con mayor extensión espacial que las que han ocurrido históricamente.





#### 5.6.1.7 *Mpelasoka et al., 2008*

*Mpelasoka, F., Hennessy, K., Jones, R., Bates, B. (2008): Comparison of suitable drought indices for climate change impacts assessment over Australia towards resource management. International Journal of Climatology 28(10) 1283-1292. Nº citas: 127*

Compara dos índices de sequía por su utilidad potencial en la gestión de recursos. Se aplica a Australia. El índice de sequía basado en deciles de lluvia es una medida de la deficiencia de lluvia, mientras que el índice de sequía basado en deciles de humedad del suelo es una medida de la deficiencia de humedad del suelo atribuida a la lluvia y la evapotranspiración. Ambos índices se utilizan para evaluar futuros eventos de sequía en Australia debidos al calentamiento global atribuido a escenarios SRES B1 y A1F1, para períodos de 30 años centrados en 2030 y 2070. Los cambios proyectados en la lluvia y la evaporación potencial se basan en los resultados de los modelos climáticos CCCma1 y Mk2, desarrollados por el Canadian Climate Center y la Australian Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) respectivamente. Ambos índices muestran un aumento general en la frecuencia de sequía asociada con el calentamiento global en ambos modelos climáticos, excepto en la parte occidental de Australia. Los aumentos en la frecuencia de las sequías basadas en la humedad del suelo son mayores que los aumentos en la frecuencia de sequías meteorológicas. Para 2030, la frecuencia de la sequía basada en la humedad del suelo aumenta entre un 20 y un 40% en la mayor parte de Australia con respecto a 1975-2004 y hasta un 80% en las cuencas del Océano Índico y la costa sureste para 2070.

#### 5.6.1.8 *Shukla y Wood, 2008*

*Shukla, S., Wood, A.W. (2008): Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. Geophysical Research Letters 35(2). Nº citas: 343*

Se contrasta el comportamiento de un índice de escorrentía estandarizado (SRI) con el conocido índice de precipitación estandarizada (SPI) durante los eventos de sequía en una región de con influencia del deshielo (cuenca Feather, California, USA). Aunque el SRI y el SPI son similares cuando se aplican en períodos de acumulación amplios, el SRI incorpora procesos hidrológicos que determinan los retrasos estacionales en la influencia del clima en los caudales. Como resultado, en escalas de tiempo mensuales a estacionales, el SRI es un complemento útil al SPI para representar los aspectos hidrológicos de la sequía.

#### 5.6.1.9 *Sordo-Ward et al., 2017*

*Sordo-Ward, A., Bejarano, M.D., Iglesias, A., Asenjo, V., Garrote, L. (2017): Analysis of current and future SPEI droughts in the La Plata Basin based on results from the regional Eta Climate Model. Water (Switzerland) 9(11). Nº citas: 3*

Se identifica y analiza las sequías en la cuenca de La Plata (divididas en siete subcuencas) para el período actual (1961–2005) y se estima su evolución esperada bajo proyecciones climáticas futuras para los períodos 2011–2040, 2041–2070 y 2071– 2099. Las proyecciones climáticas futuras se analizaron a partir de los resultados del Modelo Climático Regional Eta (resolución de cuadrícula de aproximadamente 10 km) forzado por el modelo climático global HadGEM2-ES sobre la cuenca de La Plata, y considerando un escenario de emisión RCP4.5. Dentro de cada subcuenca, se centra el análisis de sequía en áreas de cultivo y pradera, debido a su relevancia económica. El índice de evapotranspiración de precipitación estandarizada de tres meses (SPEI3) se utilizó para la identificación y caracterización de la sequía. Las sequías se evaluaron en términos de tiempo (porcentaje de tiempo desde la duración total de cada escenario climático), espacio (porcentaje del área total) e intensidad (valores SPEI3), para cada escenario de subcuenca y clima. Las curvas de severidad-área-frecuencia de sequía (SAF) se desarrollaron para relacionar cuantitativamente la distribución de frecuencia de ocurrencia de sequía con la severidad de sequía y el área. Para el período 2011–2040, las sequías dominan las subcuencas del norte, mientras que la alternancia de períodos húmedos y secos cortos dominan las subcuencas del sur. El clima húmedo se extiende de sur a norte dentro de la cuenca de La Plata a medida que se analizan escenarios futuros más distantes, con un mayor número de períodos húmedos y menos sequías. El área de cada subcuenca afectada por la sequía en todos los escenarios climáticos fue muy variada temporal y espacialmente. La probabilidad de ocurrencia de sequías difirió significativamente entre los tipos de cobertura





estudiados en la subcuenca del Bajo Paraguay, siendo mayor para las tierras de cultivo que para las praderas. Principalmente, en el Alto Paraguay y en las cuencas del Alto Paraná, las proyecciones climáticas para todos los escenarios mostraron un aumento de sequías moderadas y severas en grandes regiones dedicadas a cultivos y pastos. Por otro lado, en el futuro cercano, las cuencas del Bajo Uruguay y el Río Plata mostraron una disminución de la severidad de la sequía en comparación con el período actual. Las proyecciones sugieren un aumento de la competencia entre los usos en estas regiones y la necesidad de una posible reubicación de ciertos cultivos desde las regiones del norte hacia regiones más frías ubicadas en el centro y el sur.

#### 5.6.1.10 *Tsakiris et al., 2007*

*Tsakiris, G., Pangalou, D., Vangelis, H. (2007): Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). Water Resources Management 21(5) 821-833. Nº citas: 292*

La evaluación regional de la sequía se basa convencionalmente en índices de sequía para la identificación de la intensidad, duración y extensión de la sequía. En este estudio, se propone un nuevo índice, el Índice de Reconocimiento de Sequía (RDI) junto con el conocido Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) y el método de deciles. El índice RDI muestra ventajas significativas sobre los otros índices al incluir, además de la precipitación, un parámetro meteorológico adicional, la evapotranspiración potencial. La evaluación de la sequía se logra utilizando los índices anteriores en dos cuencas fluviales, a saber, las cuencas Mornos y Nestos en Grecia. Se concluye que, aunque el RDI generalmente responde de manera similar al SPI (y en menor medida a los deciles), es más sensible y adecuado en casos de un entorno cambiante.

#### 5.6.1.11 *Van Lanen et al., 2016*

*Van Lanen, H.A.J., Laaha, G., Kingston, D.G., Gauster, T., Ionita, M., Vidal, J.-P., Vlnas, R., Tallaksen, L.M., Stahl, K., Hannaford, J., Delus, C., Fendekova, M., Mediero, L., Prudhomme, C., Rets, E., Romanowicz, R.J., Gailliez, S., Wong, W.K., Adler, M.-J., Blauhut, V., Caillouet, L., Chelcea, S., Frolova, N., Gudmundsson, L., Hanel, M., Haslinger, K., Kireeva, M., Osuch, M., Sauquet, E., Stagge, J.H., Van Loon, A.F. (2016): Hydrology needed to manage droughts: the 2015 European case. Hydrological Processes 30(17) 3097-3104. Nº citas: 50*

Documento de opinión. Analiza cómo la sequía, desde su origen como una anomalía meteorológica, se manifiesta como una deficiencia en la humedad del suelo y, posteriormente, como una sequía hidrológica. Además, se enfatiza que una mejor comprensión y manejo de la sequía requiere entender esta propagación de los déficits hídricos a lo largo del ciclo hidrológico, con la consideración de la naturaleza de los impactos resultantes en los sistemas socioeconómicos y naturales también de importancia crítica. La caracterización de la sequía desde esa perspectiva requiere una acción multidisciplinaria concertada de las comunidades climáticas e hidrológicas. Aunque algunas iniciativas (Harding et al. 2011, Schellnhuber et al. 2013) son prometedoras, es necesaria una acción más amplia e integral. Se usa la sequía europea de 2015 como ejemplo.

#### 5.6.1.12 *Vicente-Serrano et al., 2014*

*Vicente-Serrano, S.M., Lopez-Moreno, J.-I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Sanchez-Lorenzo, A., García-Ruiz, J.M., Azorin-Molina, C., Morán-Tejeda, E., Revuelto, J., Trigo, R., Coelho, F., Espejo, F. (2014): Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. Environmental Research Letters 9(4). Nº citas: 184*

Se utilizan datos climáticos de alta calidad de estaciones meteorológicas terrestres en la Península Ibérica (PI) e índices de sequía (SPI y SPEI) para confirmar que la severidad de la sequía ha aumentado en las últimas cinco décadas, como consecuencia de una mayor demanda de evaporación atmosférica como resultado del aumento de la temperatura. El aumento de la gravedad de la sequía es independiente del modelo utilizado para cuantificar la evapotranspiración de referencia. También se centra en los impactos de la sequía en los sistemas sensibles, como los caudales de ríos, analizando los datos de caudales para 287 ríos en la PI, y se descubre que la frecuencia y la severidad de la sequía hidrológica también han aumentado en las últimas cinco décadas en condiciones naturales, en cuencas reguladas y altamente reguladas. La tendencia positiva reciente en la demanda de agua atmosférica ha tenido una influencia directa en la evolución temporal de los caudales,



claramente identificada durante la estación cálida, en la que se registran tasas de evapotranspiración más altas.

#### 5.6.1.13 Vicente-Serrano et al., 2010a

Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I. (2010): *A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. Journal of Climate* 23(7) 1696-1718. Nº citas: 1828

Se propone un nuevo índice de sequía climática: el índice estandarizado de evapotranspiración y precipitación (SPEI). El SPEI se basa en datos de precipitación y temperatura, y tiene la ventaja de combinar el carácter multiescalar con la capacidad de incluir los efectos de la variabilidad de la temperatura en la evaluación de la sequía. El procedimiento para calcular el índice es detallado e implica un balance hídrico climático, la acumulación de déficit/excedente en diferentes escalas de tiempo y el ajuste a una distribución de probabilidad log-logística. Matemáticamente, el SPEI es similar al índice de precipitación estandarizado (SPI), pero incluye el papel de la temperatura. Debido a que el SPEI se basa en un balance hídrico, se puede comparar con el índice de severidad de sequía Palmer auto-calibrado (sc-PDSI). Se compararon series temporales de los tres índices para un conjunto de observaciones con diferentes características climáticas, ubicados en diferentes partes del mundo. Bajo condiciones de calentamiento global, solo el sc-PDSI y SPEI identificaron un aumento en la severidad de la sequía asociado con una mayor demanda de agua como resultado de la evapotranspiración. En relación con el sc-PDSI, el SPEI tiene la ventaja de ser multiescalar, lo cual es crucial para el análisis y monitoreo de la sequía.

#### 5.6.1.14 Vicente-Serrano et al., 2010b

Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I., Angulo, M., El Kenawy, A. (2010): *A new global 0.5° gridded dataset (1901-2006) of a multiscale drought index: Comparison with current drought index datasets based on the palmer drought severity index. Journal of Hydrometeorology* 11(4) 1033-1043. Nº citas: 233

Se presenta un conjunto de datos globales mensuales (1901-2006) de un índice de sequía multiescalar (SPEI) y se compara en términos de variabilidad espacial y temporal con los conjuntos de datos de sequía continentales y globales existentes basados en el índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI). El conjunto de datos presentado se basa en el índice de evapotranspiración de precipitación estandarizado (SPEI). El índice se obtuvo utilizando el conjunto de datos TS3.0 de la Unidad de Investigación Climática (CRU) a una resolución espacial de 0,5°. Las ventajas del nuevo conjunto de datos son que (i) mejora la resolución espacial del conjunto único de datos de sequía global a escala global; (ii) es espacial y temporalmente comparable a otros conjuntos de datos, dada la naturaleza probabilística del SPEI; (iii) permite la identificación de varios tipos de sequía, dado el carácter multiescalar del SPEI. El conjunto de datos está disponible gratuitamente en la página web del Consejo Nacional de Investigación de España (CSIC) en tres formatos diferentes [Formulario de datos comunes de red (*netCDF*), ráster binario y texto sin formato].

#### 5.6.1.15 Vidal et al., 2010

Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Habets, F., Soubeyroux, J.-M., Blanchard, M., Baillon, M. (2010): *Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite. Hydrology and Earth System Sciences* 14(3) 459-478. Nº citas: 105

Se describe un análisis retrospectivo de alta resolución de las sequías en Francia en los últimos cincuenta años, basado en el conjunto hidrometeorológico Safran-Isba-Modcou (SIM). El nuevo análisis atmosférico Safran de alta resolución de 1958-2008 se utilizó para forzar el esquema de la superficie terrestre de Isba y el modelo hidrogeológico Modcou. Las sequías meteorológicas se caracterizan con el Índice de precipitación estandarizada (SPI) en escalas de tiempo que varían de 1 a 24 meses. Se aplicaron métodos de estandarización similares a la humedad del suelo y a aportaciones en ríos para identificar las sequías agrícolas a múltiples escalas, a través del Índice de Humedad del Suelo Estandarizado (SSWI), y las sequías hidrológicas a múltiples escalas, a través del Índice de caudal Estandarizado (SFI). Basado en un nivel de umbral común para todos los índices, las estadísticas de eventos de sequía durante el período de 50 años (número de eventos, duración,



severidad y magnitud) se deriva localmente para resaltar las diferencias regionales en múltiples escalas de tiempo y en múltiples niveles de ciclo hidrológico (precipitación, humedad del suelo, caudales). Los resultados muestran una variedad sustancial de patrones de sequía temporal en el país que dependen en gran medida tanto de la escala variable como del tiempo considerado. Los eventos de sequía espacio-temporales independientes se identifican y describen combinando características locales con la evolución del área bajo sequía. Las estadísticas resumidas finalmente se utilizan para comparar eventos de sequía severa en el pasado, desde déficits de precipitación de varios años (1989–1990) hasta cortos períodos de calor y sequía (2003). Los resultados muestran que la clasificación de los eventos de sequía depende en gran medida tanto de la escala de tiempo como de la variable considerada.

#### 5.6.1.16 WMO, 2016

*Handbook of Drought Indicators and Indices. WMO-Nº 1173*

El objetivo de este manual es mostrar algunos de los indicadores/índices de sequía más utilizados que se aplican en las regiones propensas a la sequía, con el objetivo de avanzar en los sistemas de monitoreo, alerta temprana y entrega de información en apoyo de las políticas de gestión de la sequía basadas en el riesgo. Estos indicadores/índices se describen en lo que se considera un documento vivo que evolucionará e integrará nuevos indicadores e índices a medida que salgan a la luz y se apliquen en el futuro. El manual está dirigido a aquellos que desean generar indicadores e índices, así como a aquellos que simplemente desean obtener y usar productos que se generan en otros lugares. Está destinado a ser utilizado por profesionales de la sequía en general (por ejemplo, servicios y ministerios meteorológicos/hidrológicos, administradores de recursos y otros tomadores de decisiones en varios niveles) y tiene como objetivo servir como punto de partida, mostrando qué indicadores/índices están disponibles y se están poniendo en práctica en todo el mundo. Además, el manual ha sido diseñado teniendo en cuenta los procesos de gestión del riesgo de sequía. Sin embargo, esta publicación no tiene como objetivo recomendar el "mejor" conjunto de indicadores e índices. La elección de indicadores/índices se basa en las características específicas de las sequías más estrechamente asociadas con los impactos que preocupan a las partes interesadas. Este manual no intenta abordar todas las complejidades de los impactos y toda la gama de indicadores e índices socioeconómicos de sequía. Los indicadores e índices incluidos describen las características hidrometeorológicas de las sequías y no cubren factores socioeconómicos y ambientales como los que pueden ser necesarios para evaluar y anticipar las sequías. El manual pretende ser una referencia, proporcionando una visión general y una guía de fuentes de información adicional.

### 5.6.2 Efecto en la erosión y sedimentación

#### 5.6.2.1 Bussi et al., 2014

*Bussi, G., Francés, F., Horel, E., López-Tarazón, J.A., Batalla, R.J. (2014): Modelling the impact of climate change on sediment yield in a highly erodible Mediterranean catchment. Journal of Soils and Sediments 14(12) 1921-1937. Nº citas: 25*

Muestra una metodología para implementar un modelo de sedimento distribuido mediante la explotación de los volúmenes de sedimentación de los embalses. Se implementa un modelo de sedimento aprovechando la información proxy de sedimento proporcionada por los depósitos del fondo de los embalses y usarla así para la evaluación del cambio climático en una cuenca mediterránea. El modelo de sedimento se utiliza en una cuenca que drena en un gran embalse (río Ésera, España). El historial reconstruido de la sedimentación en el embalse es utilizado para la implementación del submodelo de sedimentos. Los resultados del modelo se comparan con datos de sedimentos suspendidos calibrados para verificar la robustez del modelo. Luego, el modelo se combina con futuros escenarios de precipitación y temperatura obtenidos de los modelos climáticos. Se simuló los resultados del modelo climatológico para dos escenarios de emisión (A2 y B2) y los resultados se compararon con un escenario de referencia. Los resultados del modelo hidrológico (TETIS) muestran una disminución general en la humedad del suelo y los caudales de agua. Las grandes crecidas, que son responsables de la mayoría de la movilización de sedimentos, también muestran una disminución general. El aporte de sedimento muestra una clara reducción en el



escenario A2, pero aumentó en el escenario B2. El aporte de sedimento específico calculado para el período de control fue de 6.33 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, mientras que para los escenarios A2 y B2, fue 3.62 y 7.04 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, respectivamente. Además, el transporte de sedimentos mostró un aumento en su compresión de tiempo, es decir, una mayor dependencia del aporte total de sedimentos a las contribuciones debidas a eventos extremos.

#### 5.6.2.2 *Herrero et al., 2017*

*Herrero, A., Buendía, C., Bussi, G., Sabater, S., Vericat, D., Palau, A., Batalla, R.J. (2017): Modeling the sedimentary response of a large Pyrenean basin to global change. Journal of Soils and Sediments 17(11) 2677-2690. Nº citas: 7*

Cuantifica la escorrentía y sedimento en la cuenca Noguera Pallaresa (cuenca del río Ebro, España) que son procesos complejos es compleja debido a los procesos físicos involucrados y su variabilidad temporal y espacial, especialmente a la luz del cambio global actual. Se aplica el modelo distribuido diario hidrológico y sedimentológico TETIS para determinar los patrones de escorrentía y sedimento en una gran cuenca de montaña. Los datos de dos batimetrías de embalse en la salida de la cuenca de estudio se usan para la calibración del submodelo sedimentológico. Después de la calibración del modelo, se simulan varios escenarios de cambio climático y de uso del suelo. Los escenarios climáticos muestran una disminución general en la precipitación anual promedio y un aumento en la temperatura, asociado con un aumento en la precipitación extrema eventos. Los escenarios de cambio global conducen a un efecto contrapuesto entre el aumento en el transporte de sedimentos durante los eventos extremos y la disminución de la erosión y del sedimento asociada con forestación tras el abandono de tierras agrícolas. En el caso del escenario climático más extremo combinado con la deforestación total de la cuenca, el modelo indica una sedimentación completa del embalse para el año 2050.

### 5.6.3 Efecto en las aguas subterráneas

#### 5.6.3.1 *Kløve et al., 2014*

*Kløve, B., Ala-Aho, P., Bertrand, G., Gurdak, J.J., Kupfersberger, H., Kværner, J., Muotka, T., Mykrä, H., Preda, E., Rossi, P., Uvo, C.B., Velasco, E., Pulido-Velazquez, M. (2014): Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. Journal of Hydrology 518(PB) 250-266. Nº citas: 176*

Documento de revisión. Esta revisión examina los efectos del cambio climático en las aguas subterráneas y los ecosistemas dependientes. Los mecanismos que afectan la variabilidad natural en el clima global y las consecuencias de los cambios climáticos y del uso de la tierra debido a las influencias antropogénicas se resumen en base a estudios de diferentes estratos hidrogeológicos y zonas climáticas. Los impactos en los ecosistemas se discuten en función de los avances actuales sobre los factores que influyen en la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos y terrestres. Se revisa la influencia de los cambios en las aguas subterráneas sobre la biodiversidad GDE y las amenazas futuras que plantea el cambio climático, utilizando información principalmente de estudios de aguas superficiales y el conocimiento de los ecosistemas de acuíferos y aguas subterráneas. Se identifican varias lagunas en la investigación. Debido a la falta de comprensión de varios procesos clave, la incertidumbre asociada con las técnicas de gestión como el modelado numérico es alta. Las posibilidades y roles de nuevas metodologías como indicadores y los métodos de modelado se discuten en el contexto de la gestión integrada de los recursos de aguas subterráneas. Se proporcionan ejemplos de los impactos del manejo en el agua subterránea, con recomendaciones sobre el manejo sostenible del agua subterránea.

#### 5.6.3.2 *Pulido-Velazquez et al., 2015*

*Pulido-Velazquez, M., Peña-Haro, S., García-Prats, A., Mocholi-Almudever, A.F., Henriquez-Dole, L., Macian-Sorribes, H., Lopez-Nicolas, A. (2015): Integrated assessment of the impact of climate and land use changes on groundwater quantity and quality in the Mancha Oriental system (Spain). Hydrology and Earth System Sciences 19(4) 1677-1693. Nº citas: 29*

En el sistema Mancha Oriental (MOS), uno de los cuerpos de agua subterránea más grandes de España, la transformación de tierras secas a irrigadas durante las últimas décadas ha llevado a una



caída significativa de la capa freática, con el consiguiente efecto sobre la interacción escorrentía-acuífero con el río Júcar conectado. Comprender la distribución espacial y temporal de la cantidad y la calidad del agua es esencial para una gestión adecuada del sistema. Se analiza los posibles impactos del cambio climático y del uso de la tierra en el sistema mediante el uso de un marco de modelado integrado que consiste en acoplar secuencialmente un modelo hidrológico basado en la agricultura de la cuenca (SWAT) con un modelo de flujo de agua subterránea desarrollado en MODFLOW, y con un modelo de transporte masivo de nitrato en MT3DMS. Los resultados del modelo SWAT (principalmente recarga y bombeo de agua subterránea, considerando las nuevas necesidades de riego bajo evapotranspiración cambiante (ET) y precipitación) se utilizan como entradas al MODFLOW para simular cambios en el caudal y almacenamiento de agua subterránea e impactos en la interacción arroyo-acuífero. Las salidas SWAT y MODFLOW (cargas de nitrato de SWAT, campo de velocidad del agua subterránea de MODFLOW) se utilizan como entradas MT3DMS para evaluar el destino y el transporte de nitrato lixiviado de la capa superior del suelo. Se consideran tres escenarios de cambio climático, correspondientes a tres modelos de circulación general (GCM) diferentes para el escenario de emisión A1B que cubre el período de control y los períodos futuros a corto, mediano y largo plazo. Se realizó un análisis multitemporal del cambio en el uso del suelo y la cobertura del suelo (LULC), ayudado por el estudio de las tendencias históricas (a partir de imágenes de teledetección) y las fuerzas impulsoras clave para explicar las transiciones LULC. Se utilizaron cadenas de Markov y escenarios y proyecciones europeas para cuantificar las tendencias en el futuro. La técnica de autómatas celulares se aplica para el modelado estocástico de futuros mapas LULC. Valores simulados de descarga fluvial, los rendimientos de los cultivos, los niveles de agua subterránea y las concentraciones de nitrato se ajustan bien a los observados. Los resultados muestran la respuesta de la cantidad y calidad del agua subterránea (contaminación por nitrato) a los cambios climáticos y de uso de la tierra, con la disminución de la recarga del agua subterránea y un aumento en las concentraciones de nitrato. La cadena de modelado secuencial ha demostrado ser una valiosa herramienta de evaluación para apoyar el desarrollo de estrategias de gestión sostenible.

### 5.6.3.3 Taylor et al., 2013

Taylor, R. G., Scanlon, B., Doll, P. et al. (2013): *Groundwater and climate change. Nature Clim Change* 3, 322-329. Nº de citas: 597

Documento de revisión. Se revisa críticamente investigaciones que evalúan los impactos del clima en el agua subterránea a través de procesos naturales e inducidos por el hombre, así como a través de retroalimentaciones impulsadas por el agua subterránea en el sistema climático. Además, se examina las posibles oportunidades y desafíos de usar y mantener los recursos de aguas subterráneas en las estrategias de adaptación climática, y se destaca la falta de observaciones de las aguas subterráneas, lo que, en la actualidad, limita nuestra comprensión de la relación dinámica entre las aguas subterráneas y el clima.

## 5.6.4 Estudios de impacto, vulnerabilidad y adaptación

### 5.6.4.1 Alcamo et al., 2007

Alcamo, J., Floerke, M., Maerker, M., (2007): *Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes. Hydrological Sciences* 52(2) 247-275. Nº de citas: 267

Se utiliza un modelo hidrológico global (WATERGAP) para analizar los impactos del cambio climático y las condicionantes socioeconómicas (derivadas de los escenarios A2 y B2 del IPCC) sobre el estrés hídrico global futuro. Este trabajo amplía la investigación mundial previa sobre el agua al analizar no solo el impacto del cambio climático y la población, sino también los efectos de los ingresos, la producción de electricidad, la eficiencia en el uso del agua y otras condicionantes sobre el estrés hídrico. Dependiendo del escenario y el modelo climático, el estrés hídrico aumenta (entre las condiciones actuales y la década de 2050) en un 62.0-75.8% del área total y disminuye en un 19.7-29.0%. Las áreas restantes tienen pequeños cambios. La causa principal de la disminución del estrés hídrico (donde ocurre) es la mayor disponibilidad de agua debido al aumento de la precipitación anual relacionada con el cambio climático. La causa principal del aumento del estrés hídrico es el aumento





de las extracciones de agua, y el factor más importante para este aumento es el crecimiento del uso doméstico del agua estimulado por el crecimiento de los ingresos. (El crecimiento de la población era un factor mucho menos importante y se suponía que el área regada permanecía constante). Para abordar la incertidumbre de las estimaciones de estrés hídrico, se calculan y compararon tres indicadores diferentes de estrés hídrico (ratio extracciones/disponibilidad de agua, Disponibilidad de agua per cápita y ratio consumo de agua/Q90).

#### **5.6.4.2 Australia, Victoria, 2016**

*Guidelines for Assessing the Impact of Climate Change on Water Supplies in Victoria.*

El propósito de estas guías es actualizar los escenarios de cambio climático y las proyecciones asociadas a la luz del mayor conocimiento y los cambios observados en el clima de Victoria. Los escenarios brindan orientación para la temperatura a largo plazo, la evapotranspiración potencial, la lluvia, la escorrentía y la recarga que se utilizarán en Victoria para evaluar el impacto del cambio climático en los suministros de agua. Apoyan a las corporaciones del agua para cumplir con sus responsabilidades bajo la Cláusula 6-A de la Declaración de obligaciones emitida por el Ministro de Medio Ambiente, Cambio Climático y Agua en diciembre de 2015, que requiere que las corporaciones del agua cumplan con las pautas para pronosticar los impactos del cambio climático en suministros de agua según lo emitido por el departamento de Medio Ambiente, Tierra, Agua y Planificación.

#### **5.6.4.3 Australia Government, 2006**

*Climate Change Impacts & Risk Management. A Guide for Business and Government*

El clima global está cambiando y seguirá cambiando, de manera que afecta la planificación y las operaciones diarias de las empresas, agencias gubernamentales y otras organizaciones. Este documento es una guía para integrar los impactos del cambio climático en la gestión de riesgos y otras actividades de planificación estratégica en las organizaciones del sector público y privado de Australia. El propósito de esta guía es ayudar a las empresas y organizaciones australianas a adaptarse al cambio climático. La Guía es consistente con el Estándar de Australia y Nueva Zelanda para la Gestión de Riesgos, AS / NZS 4360: 2004, que se utiliza ampliamente en los sectores público y privado para orientar la gestión de riesgos estratégicos, operativos y de otro tipo. La Guía describe cómo la aplicación rutinaria de la Norma puede extenderse para incluir los riesgos generados por los impactos del cambio climático.

#### **5.6.4.4 DHI, 2016**

*Water Resources, climate change. Guidelines. How to achieve sustainable adaptation.*

El objetivo es proporcionar una guía práctica sobre cómo incorporar el cambio climático al enfrentar los desafíos existentes en la gestión de los recursos hídricos. Partiendo de una perspectiva de gestión de los recursos hídricos, proporciona una introducción a los temas clave, orientación práctica sobre cómo considerar el cambio climático y enlaces a más información en cada paso. El impacto del cambio climático en la gestión de los recursos hídricos es un tema complejo y el volumen de conocimiento en este campo continúa creciendo rápidamente. Inicialmente, gran parte de la literatura se centró en el desarrollo de proyecciones climáticas. Posteriormente, estas proyecciones se han aplicado a numerosos estudios que utilizan diferentes metodologías para evaluar el impacto del cambio climático en muchos sectores, incluidos los recursos hídricos. Más recientemente, reconociendo el impacto potencial en los recursos hídricos, los esfuerzos se han centrado en desarrollar medidas de adaptación apropiadas e incorporar el cambio climático a largo plazo. Este documento no pretende ser una guía completa del campo del cambio climático en la gestión de los recursos hídricos. Tampoco es un sustituto de los conocimientos y la experiencia relacionados con el cambio climático. Sin embargo, proporciona una visión general de las metodologías, herramientas y estrategias disponibles para la evaluación de impacto y la adaptación al cambio climático, y lo que implica su implementación.





#### 5.6.4.5 Forzieri et al., 2016

Forzieri, G., Feyen, L., Russo, S., Voudoukas, M., Alfieri, L., Outten, S., Migliavacca, M., Bianchi, A., Rojas, R., Cid, A. (2016): *Multi-hazard assessment in Europe under climate change. Climatic Change* 137(43497) 105-119. Nº citas: 55

Se presenta una metodología de análisis de múltiples riesgos/amenazas para mapear la exposición a diferentes climas extremos en Europa a lo largo del siglo XXI. Utilizando un conjunto de proyecciones climáticas, se evalúan los cambios en la frecuencia de las olas de calor y frío, las inundaciones de ríos y costas, las sequías, los incendios forestales y las tormentas de viento. Las variaciones correspondientes en la exposición anual esperada permiten una comparación cuantitativa de los peligros descritos por diferentes características y métricas del proceso. Los cambios proyectados en la exposición representan variaciones importantes en los escenarios de peligro, especialmente los relacionados con el aumento de las temperaturas, y los patrones espaciales modulados en gran medida por las condiciones climáticas locales. Los resultados muestran que Europa probablemente enfrentará un aumento progresivo en la amenaza climática general con un gradiente espacial prominente hacia las regiones del sudoeste, principalmente debido al aumento de las olas de calor, las sequías y los incendios forestales. Los principales puntos críticos surgen particularmente a lo largo de las costas y en las llanuras de inundación, a menudo altamente pobladas y económicamente fundamentales, donde las inundaciones y las tormentas de viento podrían ser críticas en combinación con otros riesgos climáticos. Los aumentos proyectados en la exposición serán mayores para eventos extremos debido a sus pronunciados cambios en la frecuencia.

#### 5.6.4.6 Girard et al., 2015

Girard, C., Rinaudo, J.-D., Pulido-Velazquez, M., Caballero, Y. (2015): *An interdisciplinary modelling framework for selecting adaptation measures at the river basin scale in a global change scenario. Environmental Modelling and Software* 69, 42-54. Nº citas: 21

Presenta un enfoque metodológico de modelado integrando escenarios climáticos, económicos, agronómicos e hidrológicos (modelo GR2M y ESTIMHAB) para diseñar un programa de medidas de adaptación a escala de cuenca. Los escenarios de demanda futuros, combinados con un escenario climático reducido, proporcionan la base para estimar la demanda y los recursos hídricos en 2030. Luego, se aplica un modelo de optimización (OPTIGES) de cuenca para seleccionar medidas de adaptación que garanticen que se logren los objetivos ambientales y de gestión del suministro. En la cuenca del río Orb (Francia), se sugiere combinar medidas tanto de oferta y demanda para adaptarse al cambio global. Se investigan las compensaciones entre el costo del programa de medidas, el déficit en el suministro de agua agrícola y el nivel de los caudales ambientales. Finalmente se discuten los desafíos para implementar dichos enfoques interdisciplinarios en la definición de estrategias de adaptación.

#### 5.6.4.7 Hunink et al., 2019

Hunink, J., Simons, G., Suárez-Almiñana, S., Solera, A., Andreu, J., Giuliani, M., Zamberletti, P., Grillakis, M., Koutroulis, A., Tsanis, I., Schasfoort, F., Contreras, S., Ercin, E., Bastiaanssen, W. (2019): *A simplified water accounting procedure to assess climate change impact on water resources for agriculture across different European river basins. Water (Switzerland)* 11(10). Nº citas: 1

Presenta un marco simplificado de contabilidad del agua (Water Accounting plus, WA+) que permite una evaluación estandarizada de los impactos climáticos en la disponibilidad y uso de los recursos hídricos en múltiples cuencas. El marco se aplica a cinco cuencas fluviales diferentes en toda Europa (Delta del Rhine, Lago Como, Messara, Júcar, Segura). Se aplicaron varios modelos hidrológicos y de gestión: WA+, AQUATOOL, Sacramento (SAC-SMA), Spain02, SPHY, WEAP, PATRICAL, Topkapi-ETH, Dutch National Hydrological Model (NHM). Se extraen varios indicadores que describen explícitamente las aportaciones de agua verde versus los de agua azul y los impactos en la agricultura. Los ejemplos muestran que se puede utilizar un marco simplificado de contabilidad del agua para sintetizar información a nivel de cuenca sobre los impactos del cambio climático que puede apoyar la formulación de políticas sobre adaptación climática, recursos hídricos y agricultura.



#### 5.6.4.8 JICA (Japón), 2010

*Handbook on Climate Change Adaptation in the Water Sector. A Resilient Approach that Integrates Water Management and Community Development.*

Se pronostica que el cambio climático aumentará la intensidad y frecuencia de las inundaciones y sequías con sus impactos más severos en los países en desarrollo. Se requiere una revisión fundamental de los enfoques de asistencia para el desarrollo en el sector del agua. Este manual proporciona un nuevo enfoque para formular e implementar proyectos para la adaptación al cambio climático. Para el futuro, las intervenciones de desarrollo deben cumplir los siguientes requisitos: 1. Hacer frente a un clima cambiante 2. Formular e implementar proyectos mientras proyectar impactos futuros, y 3. Ajustar los sistemas de gestión del agua para reflejar el progreso diario en las tecnologías disponibles para proyección y adaptación.

#### 5.6.4.9 Lobanova et al., 2016

*Lobanova, A., Koch, H., Liersch, S., Hattermann, F.F., Krysanova, V. (2016): Impacts of changing climate on the hydrology and hydropower production of the Tagus River basin. Hydrological Processes 30(26) 5039-5052. Nº citas: 11*

Se aborda los efectos del cambio climático proyectado sobre la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca del río Tajo, España, e influencia del río en posibles cambios en la generación de energía hidroeléctrica de los tres embalses más importantes en la cuenca. La escala de cuenca, el modelo ecohidrológico (SWIM), se configuró, calibró y validó para toda la cuenca del río Tajo, teniendo en cuenta 15 grandes embalses en la cuenca. Las proyecciones climáticas futuras se seleccionaron de las generadas dentro del Proyecto de Intercomparación del Modelo de Impacto Intersectorial. Incluyen cinco conjuntos de datos climáticos con corrección de sesgos para la región, obtenidos del modelo de circulación global bajo dos escenarios de emisiones, moderados y extremos, y abarcan todo el siglo. Los resultados muestran un fuerte acuerdo entre las ejecuciones de modelos al proyectar una disminución sustancial de los caudales del río Tajo y, en consecuencia, una fuerte disminución en la producción de energía hidroeléctrica en ambos escenarios climáticos futuros.

#### 5.6.4.10 Navarro-Ortega et al., 2012

*Navarro-Ortega, A., Acuña, V., Batalla, R.J., Blasco, J., Conde, C., Elorza, F.J., Elosegí, A., Francés, F., La-Roca, F., Muñoz, I., Petrovic, M., Picó, Y., Sabater, S., Sanchez-Vila, X., Schuhmacher, M., Barceló, D. (2012): Assessing and forecasting the impacts of global change on Mediterranean rivers. The SCARCE Consolider project on Iberian basins. Environmental Science and Pollution Research 19(4) 918-933. Nº citas: 35*

El proyecto Consolider-Ingenio 2010 SCARCE, con el título "Evaluación y predicción de los efectos sobre la cantidad y calidad del agua en los ríos ibéricos causados por el cambio global" tiene como objetivo examinar y predecir la relevancia del cambio global en la disponibilidad del agua, la calidad del agua y los servicios de los ecosistemas en las cuencas mediterráneas de la Península Ibérica, así como sus impactos socioeconómicos. Se estudiaron las cuencas de los ríos Llobregat, Ebro, Júcar y Guadalquivir. Los datos históricos se utilizan como punto de partida del proyecto, pero también para obtener series de tiempo más largas. El principal valor agregado del proyecto SCARCE es la inclusión de disciplinas científicas que abarcan desde hidrología, geomorfología, ecología, química y ecotoxicología, hasta ingeniería, modelado y economía, en un esfuerzo sin precedentes en el área mediterránea. El proyecto realiza una investigación de minería de datos, de campo y de laboratorio, así como el modelado y la ampliación de los resultados para aplicarlos a las cuencas de los ríos seleccionados. El proyecto enfatiza la vinculación de la investigación básica y las prácticas de gestión en un solo marco. De hecho, uno de los principales objetivos de SCARCE es actuar como un puente entre lo científico y lo administrativo y transformar los resultados de la investigación en herramientas y claves de gestión para mejorar los planes de gestión de cuenca fluvial. En este trabajo se esboza la estructura general del proyecto y las actividades realizadas dentro de los diez paquetes de trabajo de SCARCE.



#### **5.6.4.11 New Zealand, Ministry for the Environment, 2008**

*Climate change effects and impacts assessment. A Guidance Manual for Local Government in New Zealand – 2nd Edition*

Este Manual está diseñado para ayudar a los gobiernos locales a identificar y cuantificar las oportunidades y los riesgos que el cambio climático plantea para sus funciones, responsabilidades e infraestructura. Esta es la segunda edición del Manual de Orientación, y reemplaza a la primera edición publicada en 2004. Sigue la evaluación actualizada de la ciencia del cambio climático producida por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) en su Cuarta Evaluación en 2007. Este manual: 1) proporciona proyecciones del futuro cambio climático alrededor de Nueva Zelanda, 2) compara estas proyecciones con los extremos y variaciones climáticas actuales, 3) identifica posibles efectos sobre las funciones y servicios del gobierno local, 3) describe métodos para evaluar la magnitud probable de tales efectos, 4) explica cómo se puede aplicar esta información para evaluar el riesgo asociado con varios impactos del cambio climático, 5) proporciona orientación sobre la incorporación de la evaluación del riesgo climático en los procesos de regulación, evaluación y planificación del gobierno local.

#### **5.6.4.12 Tanaka et al., 2006**

*Tanaka, S.K., Zhu, T., Lund, J.R., Howitt, R.E., Jenkins, M.W., Pulido, M.A., Tauber, M., Ritzema, R.S., Ferreira, I.C. (2006): Climate warming and water management adaptation for California. Climatic Change 76(43558) 361-387. Nº citas: 166*

Se examina la capacidad de un sistema de suministro de agua de California, USA para adaptarse a los cambios climáticos y demográficos a largo plazo. Se examinan dos escenarios de calentamiento climático (Parallel Climate Model (PCM) run B06.06 (2080 a 2099) y Hadley Centre Climate Model 2 (HCM) run 1 (2080 a 2099)) y un escenario climático histórico (1922-1993) con estimaciones de población y uso del suelo para el año 2100 utilizando un modelo de optimización de ingeniería económica de la gestión del suministro de agua (modelo CALVIN). Metodológicamente, los resultados de este análisis indican que para los estudios de cambio climático a largo plazo de sistemas complejos, es de gran valor incluir otros cambios importantes esperados durante un período de tiempo a largo plazo (como los cambios de población), lo que permite que el sistema se adapte a los cambios en las condiciones (una característica común de las sociedades humanas), y representar el sistema con suficiente detalle y amplitud hidrológica y operativa para permitir una adaptación significativa. Si bien los resultados de las políticas de este estudio son preliminares, apuntan a una considerable capacidad de ingeniería y económica de sistemas complejos, diversos e interrelacionados para adaptarse a cambios significativos en el clima y la población. Más específicamente, el sistema de suministro de agua de California parece físicamente capaz de adaptarse a cambios significativos en el clima y la población, aunque a un costo significativo. Tal adaptación implicaría grandes cambios en la operación de la gran capacidad de almacenamiento de agua subterránea de California, transferencias significativas de agua entre los usuarios de agua y alguna adopción de nuevas tecnologías.

#### **5.6.4.13 UK, EA, 2013**

*Climate change approaches in water resources planning – overview of new methods. Report – SC090017/R3.*

Este es el informe final del proyecto de investigación SC090017, Cambio climático y planificación del suministro de agua, que fue cofinanciado por la Agencia de Medio Ambiente y la Investigación de la Industria del Agua del Reino Unido (UKWIR). El objetivo del proyecto era examinar cómo se ha incorporado el cambio climático en los planes de gestión de recursos hídricos (WRMP) hasta la fecha, y recomendar las mejores prácticas apropiadas para el futuro, con referencia particular al uso de herramientas detalladas y datos climáticos probabilísticos. en UKCP09, publicado en julio de 2009 (Murphy et al. 2009) y los resultados del proyecto Future Flows (Prudhomme et al. 2012). El marco de gestión y planificación de los recursos hídricos utilizado en Inglaterra y Gales se ha desarrollado considerablemente en la última década. Los métodos para incorporar el cambio climático en el análisis se han hecho más avanzados durante este tiempo, a un costo de tiempo y complejidad que no siempre han sido proporcional a la situación que enfrentan las compañías de agua individuales.



Las recomendaciones previas han definido un estándar mínimo común de evaluación que la mayoría de las empresas han seguido. Sin embargo, en algunos casos, las empresas han completado análisis detallados del cambio climático cuando los impactos del cambio climático han sido insignificantes en comparación con los de otros riesgos e incertidumbres; mientras que, en otros casos, se adoptó un enfoque mínimo cuando una evaluación más detallada se justificaba por los riesgos que plantea el cambio climático. UKCP09 se publicó demasiado tarde para ser incluido en la guía de la Agencia de Medio Ambiente para WRMP09 y PR09, y demasiado tarde para su inclusión en los planes comerciales de la compañía de agua. Las determinaciones de las empresas sobre los impactos del cambio climático y las justificaciones de la necesidad de inversión para PR09 debían basarse en los datos de escenarios climáticos anteriores (UKWIR06 y UKWIR 2007), y el regulador económico, Ofwat, rechazó los casos de inversión de PR09 basados únicamente en consideraciones de cambio climático. Desde la perspectiva de la compañía de agua, este proyecto aporta el desarrollo de una guía clara para que las empresas sepan qué se necesita para cumplir con los requisitos reglamentarios, qué es un enfoque razonable "basado en el riesgo" y qué proporcionaría un análisis ejemplar de los riesgos potenciales del cambio climático. Como UKCP09 proporciona varios datos de magnitud del cambio climático, se necesita un nuevo marco que ofrezca flexibilidad y orientación sobre diferentes enfoques de cambio climático. Sin embargo, existen varias barreras para completar evaluaciones más avanzadas del cambio climático para los planes en 2014, tales como: 1) La amplia gama de metodologías de producción desplegable que utilizan actualmente las compañías de agua en Inglaterra y Gales con respecto a la disponibilidad de recursos hidrológicos a más largo plazo. Los datos, la aplicación de modelos hidrológicos, el uso de coeficientes de caudales como un enfoque alternativo para el modelado de la lluvia y la escorrentía, y la captación incompleta de los modelos de recursos hídricos significa que las empresas están comenzando sus evaluaciones desde puntos muy diferentes. 2) Las distintas dificultades de modelar los impactos del cambio climático en las aguas subterráneas. Aunque Inglaterra y Gales ahora tienen una buena cobertura de los modelos modernos de agua subterránea, sigue siendo una tarea importante ejecutar grandes cantidades de escenarios a través de modelos de agua subterránea distribuidos y luego traducir los resultados a rendimientos de origen. 3) El tiempo disponible para completar las evaluaciones es relativamente corto y un desafío para algunas compañías de agua. Además de los cambios en la metodología sobre el cambio climático, se proponen métodos nuevos y bastante complejos para actualizar la Economía del equilibrio de la oferta y la demanda (EBSO). Algunas empresas pueden no tener la capacidad (conocimiento, datos e información, procesos y presupuestos financieros) para completar evaluaciones avanzadas. El marco presentado incluye diferentes niveles de evaluaciones para mejorar algunos de estos problemas y, cuando sea posible, se hacen comentarios adicionales sobre dónde y cómo se puede simplificar la evaluación del cambio climático para que sea manejable en los plazos disponibles para PR14.

#### **5.6.4.14 United Nations, 2019**

*Drought impact and vulnerability assessment. A rapid review and policy recommendations.*

Esta revisión rápida explora la aplicación de los enfoques y métodos disponibles para evaluar los impactos y la vulnerabilidad a la sequía. Se basa en una serie de entrevistas con profesionales expertos de diferentes regiones del mundo afectadas por la sequía. Esto se complementó con una breve revisión de la literatura publicada relevante y una evaluación resumida de las fortalezas y debilidades del rango de enfoques de evaluación disponibles. En la actualidad, la mayoría de las evaluaciones disponibles aún no tienen en cuenta los impactos a largo plazo y la vulnerabilidad asociados con la sequía. Sin embargo, pueden mejorarse mediante la aplicación práctica y la revisión continua, incluidos los grupos más vulnerables. La acción internacional puede apoyar los esfuerzos nacionales para aplicar los mejores enfoques disponibles, desarrollar capacidades e intercambiar lecciones. Las líneas de base de vulnerabilidad, los objetivos alcanzables y los sistemas de monitoreo pueden facilitar la evaluación global y la reducción del riesgo de sequía.

#### **5.6.4.15 United Nations, 2009**

*Guía sobre agua y adaptación al cambio climático. ECE/MP.WAT/30*



El propósito de esta Guía es orientar a las Partes en el Convenio y en el Protocolo sobre agua y salud en el plan de implementación de las disposiciones del Convenio y del Protocolo dentro del marco del cambio climático. La Guía no es jurídicamente vinculante y no tiene por objeto reemplazar las obligaciones jurídicas resultantes del Convenio y el Protocolo. Esta Guía tiene como objetivo apoyar a los dirigentes tanto a nivel local como a nivel transfronterizo e internacional, ofreciendo asesoramiento sobre los desafíos que plantea el cambio climático para la gestión del agua y las actividades relacionadas con la misma y con ello desarrollar estrategias de adaptación. Se basa en el concepto de la GIRH que muchos países están aplicando. El cambio climático complica más la labor de esta implementación. La Guía aborda los retos adicionales del cambio climático, pero no se ocupa de la GIRH en su conjunto. La Guía no sólo aborda los fenómenos extremos, sino también la gestión del agua, en general, bajo la influencia del cambio climático y la variabilidad y la incertidumbre que genera. La Guía pretende hacer hincapié en las necesidades y problemas específicos de las cuencas transfronterizas, con el objeto de prevenir, controlar y reducir los impactos transfronterizos de las medidas nacionales de adaptación y evitar y resolver de este modo los posibles conflictos relacionados con el impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos. Sin embargo, la Guía se basa en la muy incompleta experiencia acumulada sobre la adaptación al cambio climático en el contexto transfronterizo y refleja este conocimiento deficiente. La Guía representa una hoja de ruta estratégica general hacia la adaptación de la gestión de los recursos hídricos al cambio climático, pero debe ajustarse a las situaciones locales específicas. Por consiguiente, esta Guía no proporciona una descripción detallada de todas las medidas o elementos posibles de una estrategia de adaptación, ya que estos dependen del contexto local y sectorial. El anexo 2 proporciona una lista de control que permite a los usuarios de esta Guía evaluar su nivel de progreso en la adaptación al cambio climático.

#### **5.6.4.16 USA, California, 2011**

*Climate Change Handbook for Regional Water Planning.*

A medida que la ciencia avanza en el estudio del cambio climático, los profesionales de planificación de cuencas hidrográficas enfrentan el desafío de interpretar nueva información y discernir qué métodos y enfoques son más apropiados para sus necesidades de planificación. Este manual ofrece un marco analítico innovador para incorporar los impactos del cambio climático en un proceso de planificación regional y de cuencas hidrográficas. Este manual fue desarrollado como una asociación de la Región 9 de la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA), el Departamento de Recursos Hídricos de California, la División del Pacífico Sur del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU. Y el Fondo de Legado de Recursos. Si bien este manual se centra en el proceso de Planificación Integrada del Manejo del Agua Regional de California (IRWMP), otros profesionales pueden utilizarlo a nivel nacional e internacional al incorporar el cambio climático en cualquier proceso de planificación de cuencas o suministro de agua.

#### **5.6.4.17 USA, EPA, 2008**

*Handbook for Developing Watershed Plans to Restore and Protect Our Waters.*

Este manual proporciona información sobre el desarrollo y la implementación de planes de gestión de cuencas hidrográficas que ayudan a restaurar y proteger la calidad del agua. Una cuenca hidrográfica es el área de tierra que contribuye a la escorrentía de un lago, río, arroyo, humedal, estuario o bahía. Un plan de gestión de cuencas hidrográficas define y aborda los problemas de calidad del agua existentes o futuros tanto de fuentes puntuales como de fuentes no puntuales de contaminantes. La experiencia durante la última década ha demostrado que el manejo efectivo de las cuencas hidrográficas incluye la participación de las partes interesadas, el análisis y la cuantificación de las causas y las fuentes específicas de los problemas de calidad del agua, la identificación de objetivos medibles de calidad del agua y la implementación de acciones específicas necesarias para resolver esos problemas.

#### **5.6.4.18 World Bank, 2019**

*Assessing Drought Hazard and Risk: Principles and Implementation Guidance.*

El enfoque general requerido para llevar a cabo una evaluación exitosa del riesgo de sequía en diversas condiciones y para determinar cómo se deben aplicar los modelos, conjuntos de datos,





métodos y/ herramientas en un contexto particular no es sencillo. El objetivo de este documento es brindar apoyo a profesionales no expertos en estos temas. Esta guía de riesgo de sequía brinda apoyo en varios niveles de detalle. Primero, se proporciona una base con definiciones y aspectos clave de las evaluaciones de riesgo de sequía: peligro de sequía, exposición y vulnerabilidad de sectores susceptibles a la sequía y riesgo de sequía. A continuación, se describen cuatro principios rectores de las evaluaciones del riesgo de sequía que deben tenerse en cuenta al diseñar el enfoque general de la evaluación del riesgo de sequía: 1. La evaluación de la sequía debe usar una perspectiva de escala del sistema 2. La sequía debe definirse y evaluarse en relación con sus impactos 3. El riesgo de sequía cambia con el tiempo 4. La gestión eficaz de la sequía debería aumentar la resiliencia y mejorar la preparación. Las acciones justo a tiempo, por ejemplo, requieren un enfoque diferente al establecimiento de un sistema de pronóstico de sequía o la implementación de medidas de reducción del riesgo de sequía a largo plazo. Por lo tanto, es importante que durante una evaluación del riesgo de sequía se tengan en cuenta el objetivo y los resultados necesarios para implementar la gestión del riesgo de sequía. Para los profesionales que requieren orientación práctica al evaluar las sequías, se incluye una guía de implementación. Esta parte del documento proporciona orientación práctica sobre cómo configurar y ejecutar una evaluación de riesgo de sequía y en qué momentos involucrar a expertos. Se proporciona un flujo de trabajo esquemático que guía a los usuarios paso a paso a través de las cuatro fases de una evaluación del riesgo de sequía: la fase de determinación del alcance, la fase de inicio, la fase de evaluación y la fase de implementación. Se proporcionan enlaces a los modelos, conjuntos de datos, métodos y herramientas disponibles para los cuales se puede encontrar información más detallada en el catálogo de sequía en línea ([www.droughtcatalogue.com](http://www.droughtcatalogue.com); consulte también Deltares 2018a). Al pasar por este flujo de trabajo, se proporciona orientación para enfoques específicos de casos. Por ejemplo, si el objetivo de la evaluación es obtener una visión inicial de los posibles riesgos de sequía como parte de una evaluación amplia de riesgos a escala nacional, puede que no sea necesario pasar por una fase de evaluación muy detallada.

## 5.6.5 Análisis de disponibilidad de agua

### 5.6.5.1 Crespo et al., 2019

Crespo, D., Albiac, J., Kahil, T., Esteban, E., Baccour, S. (2019): Tradeoffs between Water Uses and Environmental Flows: A Hydroeconomic Analysis in the Ebro Basin. *Water Resources Management* 33(7) 2301-2317. Nº citas: 1

Tiene como objetivo evaluar la relación entre los usos económicos del agua y los caudales ambientales en la cuenca del Ebro, España. El estudio utiliza un modelo hidroeconómico que incluye los principales usos del agua en el Ebro para analizar los efectos de diferentes políticas de asignación de agua bajo combinaciones de escenarios de disponibilidad de agua y caudal ambiental. Entre los resultados de este estudio destaca la importancia de evaluar los costos de oportunidad y las implicaciones políticas de reasignar el agua de las actividades económicas al medio ambiente bajo el efecto cambio climático.

### 5.6.5.2 Hernández-Bedolla et al., 2017

Hernández-Bedolla, J., Solera, A., Paredes-Arquiola, J., Pedro-Monzonís, M., Andreu, J., Sánchez-Quispe, S.T. (2017): *The Assessment of Sustainability Indexes and Climate Change Impacts on Integrated Water Resource Management. Water (Switzerland)* 9(3). Nº citas: 10

Se desarrollan diferentes índices para evaluar la disponibilidad de agua utilizando un enfoque de gestión integrada de recursos hídricos (IWRM). Estos índices evalúan el suministro de las demandas, la disponibilidad de agua superficial, disponibilidad de agua subterránea, reservorios y caudales ambientales. Además, se determina la garantía, la resiliencia y la vulnerabilidad de los sistemas. El índice de sostenibilidad (SI) y el índice de sostenibilidad por grupos (SG) se determinaron en función de cinco índices (todos los índices varían de 0 a 1). Los impactos del cambio climático afectan la disponibilidad de agua superficial y subterránea, al igual que los suministros a requerimientos agrícolas, urbanos e industriales. Se utiliza el sistema general de soporte de decisiones AQUATOOL Shell (DSSS) para evaluar la GIRH en la cuenca del Río Grande (Morelia, México). Se aplicaron varios





escenarios de emisión (RCP) a la cuenca para los años 2015-2039 y 2075-2099. Los resultados indican aumentos en la demanda agrícola y urbana, y disminuciones en la escorrentía superficial, así como la recarga de agua subterránea. Los índices propuestos son útiles para diferentes enfoques (tomadores de decisiones, políticas de agua y riesgos de sequía, entre otros).

#### 5.6.5.3 *Pedro-Monzonis et al., 2015*

*Pedro-Monzonis, M., Solera, A., Ferrer, J., Estrela, T., Paredes-Arquiola, J. (2015): A review of water scarcity and drought indexes in water resources planning and management. Journal of Hydrology 527, 482-493. Nº citas: 88*

Documento de revisión. Proporciona una revisión de los índices fundamentales de escasez de agua y sequía que permite evaluar el estado de un sistema de explotación de agua. Con el objetivo de una mejor gestión y gobernanza del agua en condiciones de escasez de agua, este documento también presenta una clasificación de índices para ayudar a los tomadores de decisiones y las partes interesadas a seleccionar los índices más apropiados, tomando como punto de partida los objetivos del análisis y el río características de la cuenca.

#### 5.6.5.4 *Santos y Melendez-Pastor, 2019*

*Santos, G.M.-D., Melendez-Pastor, I., Navarro-Pedreño, J., Koch, M. (2019): Assessing water availability in Mediterranean regions affected by water conflicts through MODIS data time series analysis. Remote Sensing 11(11) 1355. Nº citas: 1*

Presenta una metodología para evaluar las demandas actuales y futuras de agua a fin de asignar mejor los recursos hídricos limitados. Se investiga la interdependencia entre un índice de vegetación (NDVI), la temperatura de la superficie terrestre (LST), la precipitación (actual y futura) y la disponibilidad de recursos de agua superficial en dos cuencas en el sureste de España (Amadorio y Algar-Guadalest) Se utilizaron MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), NDVI (índice de vegetación) y productos LST (como proxy de la sequía), mapas de precipitación (generados a partir de registros de estaciones climáticas) e información de medidas de almacenamiento de agua en reservorios para calcular anomalías de series de tiempo de 2001 a 2014 y generar imágenes de regresión y regresión espacial modelos. La relación temporal entre el almacenamiento del reservorio y las series temporales de imágenes satelitales permitió la detección de prácticas de gestión del agua diferentes y contrastantes en las dos cuencas. Además, una comparación de las tasas de precipitación actuales y las condiciones de precipitación futuras obtenidas de los modelos climáticos globales sugiere reducciones de precipitaciones altas, especialmente en áreas que tienen el potencial de contribuir significativamente al almacenamiento de agua subterránea y la escorrentía superficial, y por lo tanto son críticas para el almacenamiento de reservorios. Finalmente, los modelos de regresión espacial minimizan los efectos de autocorrelación espacial, y sus resultados sugieren el gran potencial de la metodología que combina series de tiempo NDVI y LST para predecir escenarios futuros de escasez de agua.

#### 5.6.5.5 *Sordo-Ward et al., 2019*

*Sordo-Ward, A., Granados, I., Iglesias, A., Garrote, L. (2019): Blue water in Europe: Estimates of current and future availability and analysis of uncertainty. Water (Switzerland) 11(3). Nº citas: 2*

Presenta una evaluación de la disponibilidad futura de agua azul en Europa bajo diferentes supuestos. El período de referencia (1960 a 1999) se compara con el futuro cercano (2020 a 2059) y el futuro a largo plazo (2060 a 2099). La disponibilidad de agua azul se estima como la cantidad máxima de agua suministrada en un determinado punto de la red fluvial que satisface una demanda definida, teniendo en cuenta los requisitos de garantía de suministro especificados. La disponibilidad de agua se calcula con el modelo de Evaluación de Políticas de Adaptación y Disponibilidad de Agua (WAAPA) de alta resolución geoespacial. La definición del modelo WAAPA para este estudio se extiende por más de 6 millones de km<sup>2</sup> en Europa y considera casi 4000 subcuencas. El modelo tiene en cuenta 2300 embalses de más de 5 hm<sup>3</sup> y el conjunto de datos de Hydro 1k con 1700 subcuencas. Los escenarios hidrológicos para este estudio se toman del Proyecto Intersectorial de Intercomparación de Modelos de Impacto (ISIMIP) e incluyen simulaciones de cinco modelos climáticos globales (GFDL-ESM2NM, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, y NorESM1-M) bajo diferentes



escenarios de RCP (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, y RCP8.5). Los resultados destacan grandes incertidumbres asociadas al conjunto de estimaciones de disponibilidad de agua en toda Europa. Se encuentra que las incertidumbres del modelo climático para la escorrentía media anual y la disponibilidad potencial de agua eran mayores que las incertidumbres del escenario. Además, la infraestructura hidráulica existente y su gestión juegan un papel importante al desacoplar la disponibilidad de agua de la variabilidad hidrológica. Esto se observa para todos los modelos climáticos, los escenarios de emisiones considerados y para el futuro a corto y largo plazo. El equilibrio entre la disponibilidad de agua y las demandas está amenazado en algunas regiones, como la región mediterránea. Los resultados de este estudio contribuyen a definir los desafíos potenciales en los sistemas de recursos hídricos y las áreas de riesgo regional.

#### 5.6.5.6 Lobanova et al., 2017

*Lobanova A., Liersch S., Tàbara J.D., Koch H., Hattermann F.F., Krysanova V. (2017): Harmonizing human-hydrological system under climate change: A scenario-based approach for the case of the headwaters of the Tagus River. Journal of Hydrology 548, 436-447. Nº citas: 8*

Se evalúa la posibilidad de armonizar el esquema de asignación de agua intersectorial dentro de un sistema humano-hidrológico altamente alterado bajo la reducción de la disponibilidad de agua, desencadenado por el cambio climático proyectado aplicando un enfoque basado en escenarios. Las cabeceras de la cuenca del río Tajo, con una desproporción significativa en la asignación de recursos hídricos entre los objetivos ambientales y socioeconómicos, se toman como un ejemplo perfecto de sistema desequilibrado. Se propone tres estrategias diferentes de asignación de agua para esta región, que incluye dos esquemas convencionales y un cambio importante hacia la gestión sostenible del agua y la restauración ambiental del río. Se combina en un marco de modelado integrado el SWIM basado en procesos eco-hidrológicos, junto con los módulos conceptuales de reserva de agua en embalses y asignación de agua condicionados por las últimas proyecciones climáticas con corrección de sesgos para la región e investigamos posibles escenarios de asignación de agua en la región bajo disponibilidad limitada de agua en el futuro. Los resultados muestran que las demandas socioeconómicas deben ser reconsideradas y disminuidas bajo cualquier estrategia de asignación de agua, ya que los impactos climáticos pueden reducir significativamente la disponibilidad de agua en el futuro. Además, se muestra que un cambio hacia la estrategia de gestión sostenible del agua y la restauración del río es posible incluso bajo disponibilidad de agua reducida.

### 5.6.6 Efecto sobre la seguridad de infraestructuras

#### 5.6.6.1 Fluixá-Sanmartín et al., 2019

*Fluixá-Sanmartín, J., Morales-Torres, A., Escuder-Bueno, I., Paredes-Arquiola, J. (2019): Quantification of climate change impact on dam failure risk under hydrological scenarios: A case study from a Spanish dam. Natural Hazards and Earth System Sciences 19(10) 2117-2139. Nº citas: 1*

Presenta una evaluación cuantitativa integral de los impactos del cambio climático en la seguridad de una presa española bajo diferentes escenarios hidrológicos, integrando los diversos efectos que actúan sobre cada componente del riesgo, desde la hidrología de entrada hasta las consecuencias del hidrograma de salida. Se utilizó los resultados de 21 modelos climáticos regionales y varios escenarios de emisión (RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5) para calcular la evolución del riesgo de la presa hasta el final del siglo XXI. Los resultados muestran un deterioro progresivo del riesgo de falla de la presa, especialmente para los escenarios RCP2.6 y RCP4.5. Además, la variación del hidrograma de entrada por efecto del cambio climático es el componente de riesgo que tiene una mayor influencia en el riesgo final. El enfoque seguido en este documento puede servir como una guía útil para los propietarios de presas y los profesionales de seguridad de presas en el análisis de otros casos de estudio.



#### 5.6.6.2 Forzieri et al. 2018

Forzieri, G., Bianchi, A., Silva, F.B.E., Marin Herrera, M.A., Leblois, A., Lavallo, C., Aerts, J.C.J.H., Feyen, L. (2018): Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe. *Global Environmental Change* 48, 97-107. Nº citas: 16

Se muestra el riesgo de daños en los sectores críticos de energía, el transporte, las infraestructuras industriales y en Europa hasta el año 2100 bajo la influencia del cambio climático. Se combina un conjunto de proyecciones de amenazas climáticas de alta resolución, una representación detallada de los activos físicos en varios sectores y su sensibilidad a las amenazas, y más de 1100 registros de pérdidas por condiciones climáticas extremas en un marco de modelos de pronóstico. Se muestra que los daños podrían triplicarse para la década del 2020, multiplicarse seis veces a mediados de siglo y llegar a multiplicarse por 10 veces (presente € 3,4 mil millones por año) para fines de siglo debido solo al cambio climático. Los daños causados por las olas de calor, las sequías en el sur de Europa y las inundaciones costeras muestran el aumento más dramático, pero los riesgos de inundaciones continentales, tormentas de viento e incendios forestales también aumentarán en Europa, con diversos grados de cambio entre las regiones. Las pérdidas económicas son más altas para los sectores de la industria, el transporte y la energía. Los países del sur y sureste de Europa serán los más afectados y, como resultado, probablemente requerirán mayores costos de adaptación.

#### 5.6.6.3 François et al., 2019

François B., Schlef K.E., Wi S., Brown C.M. (2019): Design considerations for riverine floods in a changing climate – A review. *Journal of Hydrology* 574, 557-573. Nº citas: 1

Documento de revisión. La literatura deja en claro que no existe una metodología de consenso para estimar las variables de diseño bajo el cambio climático. Se presenta una revisión de los desafíos y avances en el diseño hidrológico de infraestructuras bajo no estacionariedad. Primero, se describen las posibles fuentes de no estacionariedad en series temporales de caudales máximos. En segundo lugar, se presentan los métodos para estimar los caudales de diseño que se basan en el supuesto estacionario y se discuten sus limitaciones. En tercer lugar, se resumen los métodos para estimar las avenidas de diseño y que incluyen no estacionariedad resultante del cambio climático. Finalmente, se evalúan las deficiencias de las metodologías de diseño actuales en vista de las incertidumbres generalizadas y se presentan estrategias para gestionar las consecuencias de esas incertidumbres.

#### 5.6.6.4 Khandel y Soliman, 2019

Khandel, O., Soliman, M. (2019): Integrated Framework for Quantifying the Effect of Climate Change on the Risk of Bridge Failure Due to Floods and Flood-Induced Scour. *Journal of Bridge Engineering* 24(9). Nº citas: 1

Propone una metodología probabilística integral para cuantificar el riesgo de fallo de un puente debido a eventos de crecidas y considerando el efecto del cambio climático. Los resultados muestran que el uso de enfoques de evaluación tradicionales que no consideran adecuadamente los efectos del cambio climático puede conducir a una considerable subestimación o sobrestimación del riesgo futuro. El enfoque se aplicó a un puente existente en Oklahoma, USA.

#### 5.6.6.5 Reder et al., 2018

Reder, A., Iturbide, M., Herrera, S., Rianna, G., Mercogliano, P., Gutiérrez, J.M. (2018): Assessing variations of extreme indices inducing weather-hazards on critical infrastructures over Europe—the INTACT framework. *Climatic Change* 148(43497) 123-138. Nº citas: 4.

El proyecto INTACT FP7-European evalúa la capacidad de recuperación y la vulnerabilidad de las infraestructuras críticas a los fenómenos meteorológicos extremos en un escenario de cambio climático. Para identificar los cambios en la amenaza inducida por el cambio climático, se definen indicadores climáticos extremos (EWI), como indicadores de las principales características atmosféricas que desencadenan eventos con alto impacto en las infraestructuras, para una serie de estudios de casos y se analizan diferentes enfoques para obtener proyecciones climáticas locales. Se considera la influencia de los esquemas de corrección de peso y sesgo en el enfoque delta seguido para obtener las proyecciones resultantes, considerando datos del conjunto Euro-CORDEX de



escenarios climáticos futuros regionales en Europa. El objetivo es proporcionar a los profesionales, los encargados de la toma de decisiones y los administradores, los métodos apropiados para obtener resultados factibles y plausibles en escenarios climáticos futuros locales/regionales. Los resultados muestran una pequeña sensibilidad al enfoque de ponderación y una gran sensibilidad al sesgo que corrige las proyecciones futuras.

#### **5.6.6.6 USA, Federal Highway Administration, 2012**

##### *Climate Change and Extreme Weather Vulnerability Assessment Framework.*

Es una guía para las agencias de transporte interesadas en evaluar su vulnerabilidad al cambio climático y los eventos climáticos extremos. Ofrece una visión general de los pasos clave para realizar evaluaciones de vulnerabilidad y utiliza ejemplos de práctica para demostrar una variedad de formas de recopilar y procesar información. El marco se compone de tres pasos clave: definición de objetivos y alcance del estudio; evaluación de vulnerabilidad; e incorporar resultados en la toma de decisiones. La definición de los objetivos y el alcance del estudio al comienzo del proceso es importante porque crea límites para el análisis y puede limitar los esfuerzos de recopilación de datos. Para definir el alcance del estudio, las agencias deben considerar primero sus metas y objetivos generales. Los objetivos para una evaluación de vulnerabilidad pueden incluir ubicar nuevos activos en áreas menos vulnerables al cambio climático, educar al personal sobre los riesgos climáticos generales para el sistema de transporte de la agencia o informar el desarrollo de estrategias de adaptación. Con base en estos objetivos, una agencia puede seleccionar y caracterizar activos relevantes e identificar variables climáticas para su estudio. Los objetivos iniciales y el alcance pueden ser alterados por los otros pasos del proceso a medida que se reúna nueva información o se entiendan mejor las limitaciones. El cambio climático y la vulnerabilidad climática extrema en el contexto del transporte dependen de la sensibilidad de un activo de transporte o sistema a los efectos climáticos, la exposición a los efectos climáticos y la capacidad de adaptación. Las tareas en la evaluación de vulnerabilidad incluyen: recopilar e integrar datos e información sobre la ubicación de los activos, características y sensibilidades climáticas; recopilación y obtención de información sobre eventos climáticos históricos y clima proyectado; combinando la información de activos y clima para identificar vulnerabilidades; y potencialmente, asignar un nivel de riesgo de los impactos climáticos en los activos. El trabajo de evaluación de vulnerabilidad es un proceso iterativo; la información recopilada sobre los activos puede informar necesidades de información climática y viceversa. La incorporación de los resultados de la evaluación de vulnerabilidad en el proceso de toma de decisiones de la agencia garantiza que los resultados del estudio se utilicen en la práctica. Una agencia puede usar los resultados de la evaluación en sus programas de gestión de activos, planes de mitigación de riesgos, criterios de selección de proyectos de planificación de transporte u otros programas y procesos. Además, una agencia de transporte podría estar interesada en utilizar los resultados del análisis para informar el desarrollo de estrategias específicas de adaptación para activos identificados como altamente vulnerables al cambio climático.



## 5.7 Referencias bibliográficas

1. Abiodun, B.J., Makhanya, N., Petja, B., Abatan, A.A., Oguntunde, P.G. 2019. Future projection of droughts over major river basins in Southern Africa at specific global warming levels. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(43558), 1785-1799.
2. Abramowitz, M., Stegun, I.A. 1965. *Handbook of Mathematical Functions*. Dover Publications, New York.
3. Acquavotta, F., Faccini, F., Fratianni, S., Paliaga, G., Sacchini, A., Vilímek, V. 2019. Increased flash flooding in Genoa Metropolitan Area: a combination of climate changes and soil consumption?. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 131(4), 1099-1110.
4. AEMET (2016). *Proyecciones climáticas para el siglo XXI*. [http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio\\_climat](http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat). Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico.
5. Aerts, J.C.J.H., Botzen, W., van der Ven, A., Krywkow, J., Werners, S. 2008. Dealing with uncertainty in flood management through diversification. *Ecology and Society*, 13(1).
6. AghaKouchak, A., Cheng, L., Mazdiyasni, O., Farahmand, A. 2014. Global warming and changes in risk of concurrent climate extremes: Insights from the 2014 California drought. *Geophysical Research Letters*, 41(24), 8847-8852.
7. Ahmad, M.I., Sinclair, C.D. Werrity, A. 1988. Log-logistic flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 98, 205-224.
8. Ajami, N.K., Hornberger, G.M., Sunding, D.L. 2008. Sustainable water resource management under hydrological uncertainty. *Water Resources Research*, 44(11).
9. Alcamo, J., Döll, P., Henrichs, T., Kaspar, F., Lehner, B., Rösch, T., Siebert, S. 2003. Global estimates of water withdrawals and availability under current and future "business-as-usual" conditions. *Hydrological Sciences Journal*, 48(3), 339-348.
10. Alcamo, J., Döll, P., Henrichs, T., Kaspar, F., Lehner, B., Rösch, T., Siebert, S. 2003. Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability. *Hydrological Sciences Journal*, 48(3), 317-338.
11. Alcamo, J., Flörke, M., Märker, M. 2007. Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes. *Hydrological Sciences Journal*, 52(2), 247-275.
12. Alfieri, L., Bisselink, B., Dottori, F., Naumann, G., de Roo, A., Salamon, P., Wyser, K., Feyen, L. 2017. Global projections of river flood risk in a warmer world. *Earth's Future*, 5(2), 171-182.
13. Alfieri, L., Burek, P., Feyen, L., Forzieri, G. 2015. Global warming increases the frequency of river floods in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(5), 2247-2260.
14. Alpert, P., Ben-Gai, T., Baharad, A., Benjamini, Y., Yekutieli, D., Colacino, M., Diodato, L., Ramis, C., Homar, V., Romero, R., Michaelides, S., Manes, A. 2002. The paradoxical increase of Mediterranean extreme daily rainfall in spite of decrease in total values. *Geophysical Research Letters*, 29(11), 31-1 - 31-4.
15. Álvarez-Rodríguez, J., Sánchez, A., Quintas, L. 2005. SIMPA, a GRASS based tool for Hydrological Studies. *International Journal of Geoinformatics*, 1 (1). Association for Geoinformation Technology. Proceedings of the FOSS/GRASS Users Conference, Bangkok, Tailandia, 12-14 September 2004.
16. Álvarez-Rodríguez, J. 2011. *Estimación de la distribución espacial de la precipitación en zonas montañosas mediante métodos geoestadísticos*. Tesis Doctoral, Univ. Politécnica, Madrid
17. Álvarez-Rodríguez, J., Barranco, L.M., Potenciano de las Heras, Á. 2012. *Evaluación del Impacto del Cambio Climático en los Recursos Hídricos de España*. Monografía del CEDEX, M-116. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento.
18. Ali, R., McFarlane, D., Varma, S., Dawes, W., Emelyanova, I., Hodgson, G., Charles, S. 2012. Potential climate change impacts on groundwater resources of south-western Australia. *Journal of Hydrology*, 475, 456-472.
19. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. 1998. *Crop evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper, 56.





20. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO, riego y drenaje 56. Roma.
21. Andreu, J, Capilla, J, Sanchis, E (1996) AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. *J Hydrol* 177, 269–291.
22. Apipattanavis, S., Podesta, G., Rajagopalan, B., Katz, R.W. 2007. A semiparametric multivariate and multisite weather generator. *Water Resources Research*, 43, W11401.
23. Arahetes, A., Olcina Cantos, J. 2019. The potential of sustainable urban drainage systems (SuDS) as an adaptive strategy to climate change in the Spanish Mediterranean. *International Journal of Environmental Studies*, 76(5), 764-779.
24. Arnell, N.W., Lowe, J.A., Challinor, A.J., Osborn, T.J. 2019. Global and regional impacts of climate change at different levels of global temperature increase. *Climatic Change*, 155(3), 377-391.
25. Arnell, N.W., Gosling, S.N. 2016. The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. *Climatic Change*, 134(3), 387-401.
26. Arnell, N.W., Lloyd-Hughes, B. 2014. The global-scale impacts of climate change on water resources and flooding under new climate and socio-economic scenarios. *Climatic Change*, 122(43497), 127-140.
27. Arnell, N.W., van Vuuren, D.P., Isaac, M. 2011. The implications of climate policy for the impacts of climate change on global water resources. *Global Environmental Change*, 21(2), 592-603.
28. Arnell, N.W., Delaney, E.K. 2006. Adapting to climate change: Public water supply in England and Wales. *Climatic Change*, 78(43557), 227-255.
29. Arnell, N.W. 2003. Effects of IPCC SRES emissions scenarios on river runoff: A global perspective. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7(5), 619-641.
30. Arnell, N.W. 1999. The effect of climate change on hydrological regimes in Europe: A continental perspective. *Global Environmental Change*, 9(1), 5-23.
31. Arnell, N.W., Reynard, N.S. 1996. The effects of climate change due to global warming on river flows in Great Britain. *Journal of Hydrology*, 183, 397-424.
32. Balica, S.F., Wright, N.G., van der Meulen, F. 2012. A flood vulnerability index for coastal cities and its use in assessing climate change impacts. *Natural Hazards*, 64(1), 73-105.
33. Bárdossy, A, Stehlík, J, Caspary, HJ. 2002. Automated objective classification of daily circulation patterns for precipitation and temperature downscaling based on optimized fuzzy rules. *Climate Research*, 23, 11–22.
34. Bárdossy, A, Bogardi, I, Matyasovszky, I. 2005. Fuzzy rule-based downscaling of precipitation. *Theoretical and Applied Climatology*, 82, 119–129.
35. Barnett, T.P., Adam, J.C., Lettenmaier, D.P. 2005. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066), 303-309.
36. Barranco, L.M., Álvarez-Rodríguez, J., Olivera, F., Potenciano, Á., Quintas, L., Estrada, F. 2014. Assessment of the expected runoff change in Spain using climate simulations. *J. Hydrol. Eng.*, 19 (7), 1481–1490.
37. Batelaan O., De Smedt F. 2007. GIS-based recharge estimation by coupling surface–subsurface water balances. *Journal of Hydrology* 337, 337– 355.
38. Bayliss, A.C., Jones, R.C. 1993. Peaks-over-Threshold Flood Database: Summary Statistics and Seasonality. Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
39. Belo-Pereira, M., Dutra, E., Viterbo, P. 2011. Evaluation of global precipitation data sets over the Iberian Peninsula. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116(20).
40. Bell, V.A., Kay, A.L., Jones, R.G., Moore, R.J. 2007. Development of a high resolution grid-based river flow model for use with regional climate model output. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(1), 532-549.
41. Bellone, E., Hughes, J.P., Guttorp, P. 2000. A hidden Markov model for downscaling synoptic atmospheric patterns to precipitation amounts. *Climate Research*, 15, 1–12.
42. Beniston, M. 2003. Climatic change in mountain regions: A review of possible impacts. *Climatic Change*, 59(43497), 5-31.
43. Beniston, M., Stephenson, D.B., Christensen, O.B., Ferro, C.A.T., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylhä, K., Koffi, B., Palutikof, J., Schöll, R., Semmler, T., Woth, K.





2007. Future extreme events in European climate: An exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, 81(SUPPL. 1), 71-95.
44. Benito, G., Lang, M., Barriendos, M., Llasat, M.C., Francés, F., Ouarda, T., Thorndycraft, V.R., Enzel, Y., Bardossy, A., Coeur, D., Bobée, B. 2004. Use of systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation. Review of scientific method. *Natural Hazards*, 31(3), 623-643.
  45. Berg, P., Feldmann, H., Panitz, H.J. 2012. Bias correction of high resolution regional climate model data. *J. Hydrol.*, 448-449, 80-92.
  46. Bertola, M., Viglione, A., Blöschl, G. 2019. Informed attribution of flood changes to decadal variation of atmospheric, catchment and river drivers in Upper Austria. *Journal of Hydrology*, 577.
  47. Biemans, H., Hutjes, R., Kabat, P., Strengers, B., Gerten, D., Rost, S. 2009. Impacts of precipitation uncertainty on discharge calculations for main river basins. *Journal of Hydrometeorology*, 10, 1011-1025.
  48. Bivand, R., Keitt, T., Rowlingson, B. 2016. rgdal: Bindings for the Geospatial Data Abstraction Library. <https://CRAN.R-project.org/package=rgdal>.
  49. Bivand, R., Lewin-Koh N. 2016. maptools: Tools for Reading and Handling Spatial Objects. <https://CRAN.R-project.org/package=maptools>.
  50. Blenkinsop, S., Fowler, H.J. 2007. Changes in European drought characteristics projected by the PRUDENCE regional climate models. *International Journal of Climatology*, 27(12), 1595-1610.
  51. Blöschl, G., Hall, J., Parajka, J., Perdigão, R.A.P., Merz, B., Arheimer, B., Aronica, G.T., Bilibashi, A., Bonacci, O., Borga, M., Čanjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G.B., Claps, P., Fiala, K., Frolova, N., Gorbachova, L., Gül, A., Hannaford, J., Harrigan, S., Kireeva, M., Kiss, A., Kjeldsen, T.R., Kohnová, S., Koskela, J.J., Ledvinka, O., Macdonald, N., Mavrova-Guirguinova, M., Mediero, L., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Murphy, C., Osuch, M., Ovcharuk, V., Radevski, I., Rogger, M., Salinas, J.L., Sauquet, E., Šraj, M., Szolgay, J., Viglione, A., Volpi, E., Wilson, D., Zaimi, K., Živković, N. 2017. Changing climate shifts timing of European floods. *Science*, 357(6351), 588-590.
  52. Blöschl, G., Hall, J., Viglione, A., Perdigão, R.A.P., Parajka, J., Merz, B., Lun, D., Arheimer, B., Aronica, G.T., Bilibashi, A., Boháč, M., Bonacci, O., Borga, M., Čanjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G.B., Claps, P., Frolova, N., Ganora, D., Gorbachova, L., Gül, A., Hannaford, J., Harrigan, S., Kireeva, M., Kiss, A., Kjeldsen, T.R., Kohnová, S., Koskela, J.J., Ledvinka, O., Macdonald, N., Mavrova-Guirguinova, M., Mediero, L., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Murphy, C., Osuch, M., Ovcharuk, V., Radevski, I., Salinas, J.L., Sauquet, E., Šraj, M., Szolgay, J., Volpi, E., Wilson, D., Zaimi, K., Živković, N. 2019. Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 573(7772), 108-111.
  53. Blöschl, G., Nester, T., Komma, J., Parajka, J., Perdigão, R. 2013. The June 2013 flood in the Upper Danube basin, and comparisons with the 2002, 1954 and 1899 floods. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 5197-5212.
  54. Bonaccorso, B., Bordini, I., Cancelliere, A., Rossi, G., Sutera, A. 2003. Spatial variability of drought: An analysis of the SPI in Sicily. *Water Resources Management*, 17(4), 273-296.
  55. Bordini, I., Fraedrich, K., Sutera, A. 2009. Observed drought and wetness trends in Europe: An update. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(8), 1519-1530.
  56. Bosshard, T., Carambia, M., et al. 2013. Quantifying uncertainty sources in an ensemble of hydrological climate impact projections. *Water Resour Res*, 49, 1523-1536.
  57. Botzen, W.J.W., Van Den Bergh, J.C.J.M. 2008. Insurance against climate change and flooding in the Netherlands: Present, future, and comparison with other countries. *Risk Analysis*, 28(2), 413-426.
  58. Bouwer, L.M. 2013. Projections of Future Extreme Weather Losses Under Changes in Climate and Exposure. *Risk Analysis*, 33(5), 915-930.
  59. Boyle, D., Gupta, H., Sorrosian, S. 2000. Toward improved calibration of hydrologic models: combining the strengths of manual and automatic methods. *Water Resources Research*, 36, 3663-3674.



60. Briffa, K.R., van der Schrier, G., Jones, P.D. 2009. Wet and dry summers in Europe since 1750: Evidence of increasing drought. *International Journal of Climatology*, 29(13), 1894-1905.
61. Bronstert, A. 2003. Floods and climate change: Interactions and impacts. *Risk Analysis*, 23(3), 545-557.
62. Brown C., Ghile Y., Lavery M., Li K. 2012. Decision scaling: linking bottom-up vulnerability analysis with climate projections in the water sector. *Water Resources Research*, 48, W09537.
63. Brown, I., Poggio, L., Gimona, A., Castellazzi, M. 2011. Climate change, drought risk and land capability for agriculture: Implications for land use in Scotland. *Regional Environmental Change*, 11(3), 503-518.
64. Brown, S.L., Bierman, P.R., Lini, A., Southon, J. 2000. 10 000 yr record of extreme hydrologic events. *Geology*, 28(4), 335-338.
65. Brunetti, M., Buffoni, L., Mangianti, F., Maugeri, M., Nanni, T. 2004. Temperature, precipitation and extreme events during the last century in Italy. *Global and Planetary Change*, 40(43497), 141-149.
66. Bubeck, P., Dillenardt, L., Alfieri, L., Feyen, L., Thielen, A.H., Kellermann, P. 2019. Global warming to increase flood risk on European railways. *Climatic Change*, 155(1), 19-36.
67. Buchtele, J. 1993. Runoff changes simulated using a rainfall-runoff model. *Water Resources Management*, 7(4), 273-287.
68. Buendia, C., Bussi, G., Tuset, J., Vericat, D., Sabater, S., Palau, A., Batalla, R.J. 2016. Effects of afforestation on runoff and sediment load in an upland Mediterranean catchment. *Science of the Total Environment*, 540, 144-157.
69. Burek, P., Van der Knijff, J., de Roo, A. 2013. LISFLOOD distributed water balance and flood simulation model. Revised user manual. JRC technical reports EUR 22166 EN/3 EN.
70. Bürger, G., Chen, Y. 2005. Regression-based downscaling of spatial variability for hydrologic applications. *Journal of Hydrology*, 311, 299-317.
71. Bussi, G., Francés, F., Horel, E., López-Tarazón, J.A., Batalla, R.J. 2014. Modelling the impact of climate change on sediment yield in a highly erodible Mediterranean catchment. *Journal of Soils and Sediments*, 14(12), 1921-1937.
72. Busuioc, A., Chen, D., Hellström, C. 2001. Performance of statistical downscaling models in GCM validation and regional climate change estimates: application for Swedish precipitation. *International Journal of Climatology*, 21, 557-578.
73. Buytaert, W., Céleri, R., Timbe, L. 2009. Predicting climate change impacts on water resources in the tropical Andes: effects of GCM uncertainty. *Geophys Res Lett.*, 36,1-5.
74. Cai, W., Cowan, T. 2008. Evidence of impacts from rising temperature on inflows to the Murray-Darling Basin. *Geophysical Research Letters*, 35(7).
75. Cameron, D., Beven, K., Naden, P. 2000. Flood frequency estimation by continuous simulation under climate change (with uncertainty). *Hydrology and Earth System Sciences*, 4(3), 393-405.
76. Cannon A.J., Sobie S.R., Murdock T.Q. 2015. Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes?. *Journal of Climate*, 28(17), 6938-6959.
77. Cao, F., Gao, T. 2019. Effect of climate change on the centennial drought over China using high-resolution NASA-NEX downscaled climate ensemble data. *Theoretical and Applied Climatology*, 138(43497), 1189-1202.
78. Casanueva, A., Bedia, J., Herrera, S., Fernández, J., Gutiérrez, J.M. 2018. Direct and component-wise bias correction of multi-variate climate indices: the percentile adjustment function diagnostic tool. *Climatic Change*, 147(43558), 411-425.
79. Casanueva, A., Frías, M.D., Herrera, S., San-Martín, D., Zaninovic, K., Gutiérrez, J.M. 2014. Statistical downscaling of climate impact indices: testing the direct approach. *Climatic Change*, 127(43558), 547-560.
80. Casanueva, A., Herrera, S., Fernández, J., Gutiérrez, J.M. 2016. Towards a fair comparison of statistical and dynamical downscaling in the framework of the EURO-CORDEX initiative. *Climatic Change*, 137(43558), 411-426.



81. Castaneda-Gonzalez, M., Poulin, A., Romero-Lopez, R., Arsenault, R., Brissette, F., Turcotte, R. 2019. Sensitivity of seasonal flood simulations to regional climate model spatial resolution. *Climate Dynamics*, 53(43684), 4337-4354.
82. Castaño, S., Sanz, D., Gómez-Alday, J.J. 2013. Sensitivity of a Groundwater Flow Model to Both Climatic Variations and Management Scenarios in a Semi-arid Region of SE Spain. *Water Resources Management*, 27(7), 2089-2101.
83. CEDEX 2017. Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España. Informe Técnico, CEDEX, 42-415-0-001.
84. CEDEX 2011. Evaluación del Impacto del Cambio Climático en los Recursos Hídricos en régimen natural - Resumen Ejecutivo. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, Madrid, pp 1-22.
85. CEDEX 2010. Estudio de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua. Ficha 1: Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural. Informe Técnico Centro de Estudios Hidrográficos - CEDEX, Tomo único, clave CEDEX 42-407-1-001. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento.
86. Clarke, R.T. 2013. How should trends in hydrological extremes be estimated?. *Water Resour. Res.*, 49, 6756-6764.
87. Coles S. 2001. An introduction to statistical modelling of extreme values. London, Springer Series in Statistics.
88. Conway, D., Wilby, R.L., Jones, P.D. 1996. Precipitation and air flow indices over the British Isles. *Climate Research*, 7, 169-183.
89. Cook, E.R., Seager, R., Heim Jr, R.R., Vose, R.S., Herweijer, C., Woodhouse, C. 2010. Megadroughts in North America: Placing IPCC projections of hydroclimatic change in a long-term palaeoclimate context. *Journal of Quaternary Science*, 25(1), 48-61.
90. Costa, A.C., Soares, A. 2009. Trends in extreme precipitation indices derived from a daily rainfall database for the South of Portugal. *International Journal of Climatology*, 29(13), 1956-1975.
91. Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J.-P., Iglesias, A., Lange, M.A., Lionello, P., Llasat, M.C., Paz, S., Peñuelas, J., Snoussi, M., Toreti, A., Tsimplis, M.N., Xoplaki, E. 2018. Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nature Climate Change*, 8(11), 972-980.
92. Crespo, D., Albiac, J., Kahil, T., Esteban, E., Baccour, S. 2019. Tradeoffs between Water Uses and Environmental Flows: A Hydroeconomic Analysis in the Ebro Basin. *Water Resources Management*, 33(7), 2301-2317.
93. Crooks, S.M., Naden, P.S. 2007. CLASSIC: a semi-distributed modelling system. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(1), 516-531.
94. Cubasch, U., von Storch, H., Waszkewitz, J., Zorita, E. 1996. Estimates of climate change in southern Europe using different downscaling techniques. *Climate Research*, 7, 129-149.
95. Chavez-Jimenez, A., Lama, B., Garrote, L., Martin-Carrasco, F., Sordo-Ward, A., Mediero, L. 2013. Characterisation of the Sensitivity of Water Resources Systems to Climate Change. *Water Resources Management*, 27(12), 4237-4258.
96. Chen, H., Sun, J. 2015. Changes in drought characteristics over china using the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 28(13), 5430-5447.
97. Chen, H., Xu, C.-Y., Guo, S. 2012. Comparison and evaluation of multiple GCM, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff. *Journal of Hydrology*, 434-435, 36-45.
98. Chen, P.-C., Wang, Y.-H., You, G.J.-Y., Wei, C.-C. 2017. Comparison of methods for non-stationary hydrologic frequency analysis: Case study using annual maximum daily precipitation in Taiwan. *Journal of Hydrology*, 545, 197-211.
99. Christensen, J.H., Boberg, F., Christensen, O.B., Lucas-Picher, P. 2008. On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation. *Geophys Res Lett.*, 35(20), L20709.



100. Däll, P., Zhang, J. 2010. Impact of climate change on freshwater ecosystems: A global-scale analysis of ecologically relevant river flow alterations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(5), 783-799.
101. Dankers, R., Feyen, L. 2009. Flood hazard in Europe in an ensemble of regional climate scenarios. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114(16).
102. Dankers, R., Feyen, L. 2008. Climate change impact on flood hazard in Europe: An assessment based on high-resolution climate simulations. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113(19).
103. Das, T., Dettinger, M.D., Cayan, D.R., Hidalgo, H.G. 2011. Potential increase in floods in California's Sierra Nevada under future climate projections. *Climatic Change*, 109(SUPPL. 1), 71-94.
104. Decharme, B., Douville, H., Prigent, C., Papa, F., Aires, F. 2008. A new river flooding scheme for global climate applications : Off-line evaluation over South America. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113(11).
105. Delgado J.M., Merz B., Apel H. 2014. Projecting flood hazard under climate change: An alternative approach to model chains. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(6), 1579-1589.
106. Dettinger, M. 2011. Climate change, atmospheric rivers, and floods in California - a multimodel analysis of storm frequency and magnitude changes. *Journal of the American Water Resources Association*, 47(3), 514-523.
107. Diaz-Nieto, J., Wilby, R.L. 2005. A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: Impacts on low flows in the River Thames, United Kingdom. *Climatic Change*, 69, 245-268.
108. Ding, Y., Wang, Z., Sun, Y. 2008. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences. *International Journal of Climatology*, 28(9), 1139-1161.
109. Dittes, B., Špacková, O., Schoppa, L., Straub, D. (2018):. Managing uncertainty in flood protection planning with climate projections. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 2511-2526.
110. Doherty J. 2004. PEST model-independent parameter estimation users manual. Watermark, Brisbane, Australia.
111. Donnelly, C., Andersson, J.C.M., Arheimer, B. 2016. Using flow signatures and catchment similarities to evaluate the E-HYPE multi-basin model across Europe. *Hydrological Sciences Journal*, 61(2), 255-273.
112. Du, T., Xiong, L., Xu, C.-Y., Gippel, C.J., Guo, S., Liu, P. 2015. Return period and risk analysis of nonstationary low-flow series under climate change. *Journal of Hydrology*, 527, 234-250.
113. Duan, H.-F., Gao, X. 2019. Flooding Control and Hydro-Energy Assessment for Urban Stormwater Drainage Systems under Climate Change: Framework Development and Case Study. *Water Resources Management*, 33(10), 3523-3545.
114. Dubrovsky, M., Buchtele, J., Zalud, Z. 2004. High-frequency and low frequency variability in stochastic daily weather generator and its effect on agricultural and hydrologic modelling. *Climatic Change*, 63, 145-179.
115. Dunn, S.M., Brown, I., Sample, J., Post, H. 2012. Relationships between climate, water resources, land use and diffuse pollution and the significance of uncertainty in climate change. *Journal of Hydrology*, 434-435, 19-35.
116. Easterling, D.R., Meehl, G.A., Parmesan, C., Changnon, S.A., Karl, T.R., Mearns, L.O. 2000. Climate extremes: Observations, modeling, and impacts. *Science*, 289(5487), 2068-2074.
117. Eastman, J.R. 2006. IDRISI Andes, Guide to GIS and image processing. Clark University, Worcester, MA.
118. EEA: Corine Land Cover 2000, 2002. Tech. Rep. 89 European Commission, European Environment Agency (EEA), disponible en: <http://dataservice.eea.europa.eu/>.
119. Ehret, U., Zehe, E., Wulfmeyer, V., Warrach-Sagi, K., Liebert, J. 2012. Should we apply bias correction to global and regional climate model data?. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3391-3404.



120. Engeland K., Hisdal H., Frigessi A. 2004. Practical extreme value modelling of hydrological floods and droughts: A case study. *Extremes*, 7(1), 5–30.
121. Escriva-Bou, A., Pulido-Velazquez, M., Pulido-Velazquez, D. 2017. Economic value of climate change adaptation strategies for water management in Spain's Jucar Basin. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(5).
122. Esper, J., Frank, D., Büntgen, U., Verstege, A., Luterbacher, J., Xoplaki, E. 2007. Long-term drought severity variations in Morocco. *Geophysical Research Letters*, 34(17).
123. Estrela, T., Quintas, L. 1996. El sistema integrado de modelización precipitación escorrentía (SIMPA). *Revista de Ingeniería Civil* N°10, 43–52.
124. Estrela, T., Pérez-Martin, M., Vargas, E. 2012. Impacts of climate change on water resources in Spain [Impacts du changement climatique sur les ressources en eau en Espagne]. *Hydrological Sciences Journal*, 57(6), 1154-1167.
125. Eum, H.-I., Simonovic, S.P. 2010. Integrated Reservoir Management System for Adaptation to Climate Change: The Nakdong River Basin in Korea. *Water Resources Management*, 24(13), 3397-3417.
126. Eum, H.-I., Vasan, A., Simonovic, S.P. 2012. Integrated Reservoir Management System for Flood Risk Assessment Under Climate Change. *Water Resources Management*, 26(13), 3785-3802.
127. Evans, J.P. 2009. 21st century climate change in the Middle East. *Climatic Change*, 92(43558), 417-432.
128. Evans, J., Schreider, S. 2002. Hydrological impacts of climate change on inflows to Perth, Australia. *Climatic Change*, 55, 361–393.
129. Falck A.S., Maggioni V., Tomasella J., Diniz F.L.R., Mei Y., Beneti C.A., Herdies D.L., Neundorf R., Caram R.O., Rodriguez D.A. 2018. Improving the use of ground-based radar rainfall data for monitoring and predicting floods in the Iguazu river basin. *Journal of Hydrology*, 567, 626-636.
130. Feranec, J., Hazeu, G., Soukup, T., Jaffrain, G. 2010. Determining changes and flows in European landscapes 1990–2000 using CORINE land cover data. *Appl. Geogr.*, 30, 19–35.
131. Fernández, B., Salas, J. 1999a. Return period and risk of hydrologic events. I: Mathematical formulation" *J. Hydrologic Eng.*, 4(4), 297-307.
132. Fernández, B., Salas, J. 1999b. Return period and risk of hydrologic events. II: Applications. *J. Hydrologic Eng.*, 4(4), 308-316.
133. Feyen, L., Dankers, R., Bódis, K., Salamon, P., Barredo, J.I. 2012. Fluvial flood risk in Europe in present and future climates. *Climatic Change*, 112(1), 47-62.
134. Feyen L., Dankers R. 2009. Impact of global warming on streamflow drought in Europe. *Journal of Geophysical Research*, 114, D17116.
135. Fluixá-Sanmartín, J., Morales-Torres, A., Escuder-Bueno, I., Paredes-Arquiola, J. 2019. Quantification of climate change impact on dam failure risk under hydrological scenarios: A case study from a Spanish dam. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(10), 2117-2139.
136. Foley, A.M., 2010. Uncertainty in regional climate modelling: A review. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 34(5), 647-670.
137. Forzieri, G., Bianchi, A., Silva, F.B.E., Marin Herrera, M.A., Leblois, A., Lavalley, C., Aerts, J.C.J.H., Feyen, L. 2018. Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe. *Global Environmental Change*, 48, 97-107.
138. Forzieri, G., Feyen, L., Rojas, R., Flörke, M., Wimmer, F., Bianchi, A. 2014. Ensemble projections of future streamflow droughts in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(1), 85-108.
139. Forzieri, G., Feyen, L., Russo, S., Voutsoukas, M., Alfieri, L., Outten, S., Migliavacca, M., Bianchi, A., Rojas, R., Cid, A. 2016. Multi-hazard assessment in Europe under climate change. *Climatic Change*, 137(43497), 105-119.
140. Fowler, H.J., Blenkinsop, S., Tebaldi, C. 2007. Linking climate change modelling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, 27(12), 1547-1578.
141. Fowler, H.J., Kilsby, C.G. 2007. Using regional climate model data to simulate historical and future river flows in northwest England. *Climatic Change* 80(3–4), 337–367.





142. Fowler, H.J., Ekström, M., Blenkinsop, S., Smith, A.P. 2007. Estimating change in extreme European precipitation using a multi-model ensemble. *Geophysical Research Atmospheres*, 112, D18.
143. Fowler, H.J., Ekström, M., Kilsby, C.G., Jones, P.D. 2005a. New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. 1. Assessment of control climate. *Journal of Hydrology*, 300, 212–233.
144. Fowler, H.J., Kilsby, C.G., O’Connell, P.E., Burton, A. 2005b. A weather type conditioned multi-site stochastic rainfall model for generation of scenarios of climatic variability and change. *Journal of Hydrology*, 308(1–4), 50–66.
145. Fowler, H.J., Kilsby, C.G. 2003. Implications of changes in seasonal and annual extreme rainfall. *Geophysical Research Letters*, 30(13), 53-1 - 53-4.
146. Fowler, H.J., Kilsby C.G. 2002. Precipitation and the North Atlantic Oscillation: a study of climatic variability in Northern England. *International Journal of Climatology*, 22, 843–866.
147. Fowler, H.J., Kilsby, C.G., O’Connell, P.E. 2000. A stochastic rainfall model for the assessment of regional water resource systems under changed climatic conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4, 261–280.
148. François B., Schlef K.E., Wi S., Brown C.M. 2019. Design considerations for riverine floods in a changing climate – A review. *Journal of Hydrology*, 574, 557-573.
149. Frei C., Schöll, R., Fukutome, S., Schmidli, J., Vidale, P.L. 2006. Future change of precipitation extremes in Europe: an intercomparison of scenarios from regional climate models. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 111.
150. Frei, C., Christensen, J.H., Déqué, M., Jacob, D., Jones R.G., Vidale P.L. 2003. Daily precipitation statistics in regional climate models: evaluation and intercomparison for the European Alps. *Journal of Geophysical Research*, 108(D3), 4124.
151. Frías, M.D., Herrera, S., Cofiño, A.S., Gutiérrez, J.M. 2010. Assessing the skill of precipitation and temperature seasonal forecasts in Spain: Windows of opportunity related to ENSO events. *Journal of Climate*, 23(2), 209-220.
152. Fronzek, S., Carter, T.R. 2007. Assessing uncertainties in climate change impacts on resource potential for Europe based on projections from RCMs and GCMs. *Climatic Change*, 81(SUPPL. 1), 357-371.
153. Gado, T.A., Nguyen, V.-T.-V. 2016. An at-site flood estimation method in the context of nonstationarity I. A simulation study. *Journal of Hydrology*, 535, 710-721.
154. Gao, C., Yao, M.T., Wang, Y.J., Zhai, J.Q., Buda, S., Fischer, T., Zeng, X.F., Wang, W.P. 2016. Hydrological model comparison and assessment: criteria from catchment scales and temporal resolution. *Hydrological Sciences Journal*, 61(10), 1941-1951.
155. García-Ruiz, J.M., López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Lasanta-Martínez, T., Beguería, S. 2011. Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Science Reviews*, 105(43558), 121-139.
156. Gardner, L.R. 2009. Assessing the effect of climate change on mean annual runoff. *Journal of Hydrology*, 379(43558), 351-359.
157. Garijo C., Mediero L. 2018. Influence of climate change on flood magnitude and seasonality in the Arga River catchment in Spain. *Acta Geophysica*, 66(4), 769-790.
158. Garrote, L., Iglesias, A., Granados, A., Mediero, L., Martín-Carrasco, F. 2015. Quantitative Assessment of Climate Change Vulnerability of Irrigation Demands in Mediterranean Europe. *Water Resources Management*, 29(2), 325-338.
159. Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green C.H., Arnold, J.G. 2007. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. *T. ASABE*, 50, 1211–1250.
160. Gassman, P.W., Sadeghi A.M., Srinivasan R. 2014. Applications of the SWAT model special section: overview and insights, *J. Environ. Qual.*, 43, 1–8.
161. Gersonius, B., Ashley, R., Pathirana, A., Zevenbergen, C. 2013. Climate change uncertainty: Building flexibility into water and flood risk infrastructure. *Climatic Change*, 116(2), 411-423.
162. Gerten, D., Heinke, J., Hoff, H., Biemans, H., Fader, M., Waha, K. 2011. Global water availability and requirements for future food production. *Journal of Hydrometeorology*, 12(5), 885-899.





163. Giannakopoulos, C., Le Sager, P., Bindi, M., Moriondo, M., Kostopoulou, E., Goodess, C.M. 2009. Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2 °C global warming. *Global and Planetary Change*, 68(3), 209-224.
164. Giannini, A., Biasutti, M., Verstraete, M.M. 2008. A climate model-based review of drought in the Sahel: Desertification, the re-greening and climate change. *Global and Planetary Change*, 64(43558), 119-128.
165. Giorgi, F., Lionello, P. 2008. Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63(43526), 90-104.
166. Giorgi, F., Hewitson, B.C. 2001. Regional climate information – evaluation and projections. In *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. C, Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, vander Linden PJ, Dia X, Maskell K, Johnson CA (eds). Cambridge University Press: Cambridge.
167. Girard, C., Pulido-Velazquez, M., Rinaudo, J.-D., Pagé, C., Caballero, Y. 2015. Integrating top-down and bottom-up approaches to design global change adaptation at the river basin scale. *Global Environmental Change*, 34, 132-146.
168. Girard, C., Rinaudo, J.-D., Pulido-Velazquez, M., Caballero, Y. 2015. An interdisciplinary modelling framework for selecting adaptation measures at the river basin scale in a global change scenario. *Environmental Modelling and Software*, 69, 42-54.
169. Gleick, P.H. 1987. The development and testing of a water balance model for climate impact assessment: Modeling the Sacramento Basin. *Water Resources Research*, 23(6), 1049-1061.
170. Gleick, P.H., Chalecki, E.L. 1999. The impacts of climatic changes for water resources of the Colorado and Sacramento-San Joaquin River Basins. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(6), 1429-1441.
171. González-Zeas, D., Garrote, L., Iglesias, A., Sordo-Ward, A. 2012. Improving runoff estimates from regional climate models: A performance analysis in Spain. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(6), 1709-1723.
172. Goodess, C.M., Palutikof, J. 1998. Development of daily rainfall scenarios for southeast Spain using a circulation-type approach to downscaling. *International Journal of Climatology*, 18, 1051-1083.
173. Graham, L.P., Andréasson, J., Carlsson, B. 2007a. Assessing climate change impacts on hydrology from an ensemble of regional climate models, model scales and linking methods - A case study on the Lule River basin. *Climatic Change*, 81(Supplement), 293-307.
174. Graham, L.P., Hagemann, S., Jaun, S., Beniston, M. 2007b. On interpreting hydrological change from regional climate models. *Climatic Change*, 81(Supplement), 97-122.
175. Greuell, J.W., Andersson, J., Donnelly, C., Feyen, L., Gerten, D., Ludwig, F., Pisacane, G., Roudier, P., Schaphoff, S. 2015. Evaluation of five hydrological models across Europe and their suitability for making projections under climate change. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 12, 10289-10330.
176. Griffin, A., Vesuviano, G., Stewart, E. 2019. Have trends changed over time? A study of UK peak flow data and sensitivity to observation period. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(10), 2157-2167.
177. Guan, X., Zhang, J., Elmahdi, A., Li, X., Liu, J., Liu, Y., Jin, J., Liu, Y., Bao, Z., Liu, C., He, R., Wang, G. 2019. The capacity of the hydrological modeling for water resource assessment under the changing environment in semi-arid river Basins in China. *Water (Switzerland)*, 11(7).
178. Guhathakurta, P., Sreejith, O.P., Menon, P.A. 2011. Impact of climate change on extreme rainfall events and flood risk in India. *Journal of Earth System Science*, 120(3), 359-373.
179. Gupta H.V., Sapriza-Azuri G., Jódar J., Carrera J. 2018. Circulation pattern-based assessment of projected climate change for a catchment in Spain. *Journal of Hydrology*, 556, 944-960.
180. Gutiérrez, J.M., San-Martín, D., Brands, S., Manzanas, R., Herrera, S. 2013. Reassessing statistical downscaling techniques for their robust application under climate change conditions. *Journal of Climate*, 26(1), 171-188.



181. Gutzler, D.S., Robbins, T.O. 2011. Climate variability and projected change in the western United States: Regional downscaling and drought statistics. *Climate Dynamics*, 37(5), 835-849.
182. Haerter, J.O., Hagemann, S., Moseley, C., Piani, C. 2011. Climate model bias correction and the role of timescales. *Hydrol Earth Syst Sci* 15, 1065–1079.
183. Hall, J., Arheimer, B., Aronica, G.T., Bilibashi, A., Boháč, M., Bonacci, O., Borga, M., Burlando, P., Castellarin, A., Chirico, G.B., Claps, P., Fiala, K., Gaál, L., Gorbachova, L., Gül, A., Hannaford, J., Kiss, A., Kjeldsen, T., Kohnová, S., Koskela, J.J., MacDonald, N., Mavrova-Guirguinova, M., Ledvinka, O., Mediero, L., Merz, B., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Osuch, M., Parajka, J., Perdigão, R.A.P., Radevski, I., Renard, B., Rogger, M., Salinas, J.L., Sauquet, E., Šraj, M., Szolgay, J., Viglione, A., Volpi, E., Wilson, D., Zaimi, K., Blöschl, G. 2015. A European flood database: Facilitating comprehensive flood research beyond administrative boundaries. *IAHS-AISH Proceedings and Reports*, 370, 89-95.
184. Hall, J., Arheimer, B., Borga, M., Brázdil, R., Claps, P., Kiss, A., Kjeldsen, T.R., Kriaučiūnienė, J., Kundzewicz, Z.W., Lang, M., Llasat, M.C., Macdonald, N., McIntyre, N., Mediero, L., Merz, B., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Neuhold, C., Parajka, J., Perdigão, R.A.P., Plavcová, L., Rogger, M., Salinas, J.L., Sauquet, E., Schär, C., Szolgay, J., Viglione, A., Blöschl, G. 2014. Understanding flood regime changes in Europe: A state-of-the-art assessment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(7), 2735-2772.
185. Hall, J.W., Sayers, P.B., Dawson, R.J. 2005. National-scale assessment of current and future flood risk in England and Wales. *Natural Hazards*, 36(43497), 147-164.
186. Hamm S.Y., Cheong J.Y., Kim H.S. 2005. Comparing inversion and trial-and-error methods to determine optimum yield at a riverbank filtration site, Korea. *Salt Lake City Annual Meeting. Geol. Soc. Am. Abst.*, 37(7), 1–66.
187. Hannaford, J., Marsh, T.J. 2008. High-flow and flood trends in a network of undisturbed catchments in the UK. *International Journal of Climatology*, 28(10), 1325-1338.
188. Hansen, M., DeFries, R., Townshend, J.R.G., Sohlberg, R. 1998. UMD Global Land Cover Classification, 1 Kilometer, 1.0, Department of Geography, University of Maryland, College Park, Maryland, 1981–1994.
189. Hanssen-Bauer, I., Førland, E.J., Haugen, J.E., Tveito, O.E. 2003. Temperature and precipitation scenarios for Norway: comparison of results from dynamical and empirical downscaling. *Climate Research*, 25, 15–27.
190. Harbaugh A.W., Banta E.R., Hill M.C., McDonald M.G. 2000. MODFLOW- 2000, The U.S. Geological Survey modular groundwater model-User guide to modularization concepts and the groundwater flow process. *US Geol. Surv. Open-File Rep. 00-92*, 121 pp.
191. Hargreaves, G.H., Allen, R.G. 2003. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(1), 53-63.
192. Hattermann, F.F., Huang, S., Burghoff, O., Willems, W., Österle, H., Büchner, M., Kundzewicz, Z. 2014. Modelling flood damages under climate change conditions-a case study for Germany. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(12), 3151-3169.
193. Haylock, M.R., Hofstra, N., Klein Tank, A.M.G., Klok, E.J., Jones P.D., New M. 2008. A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *J Geophys Res Atmos* 113. Hellström, C., Chen, D., Achberger, C., Räisänen, J. 2001. Comparison of climate change scenarios for Sweden based on statistical and dynamical downscaling of monthly precipitation. *Climate Research*, 19, 45–55.
194. Hazeleger W., Wang X., Severijns C., Ștefănescu S., Bintanja R., Sterl A., Wyser K., Semmler T., Yang S., Van den Hurk B., Van Noije T., Van der Linden E., Van der Wiel K. 2012. EC-Earth V2.2: Description and validation of a new seamless Earth system prediction model. *Climate Dynamics*, 39(11), 2611–2629.
195. Heinke J et al (2013) A new dataset for systematic assessments of climate change impacts as a function of global warming. *Geosci Model Dev* 6:1689–1703
196. Helsel, D.R., Frans, L.M. 2006. Regional Kendall test for trend. *Environ. Sci. Technol.*, 40, 4066–4073.
197. Hempel, S., Frieler, K., et al. 2013. A trend-preserving bias correction – the ISI-MIP approach. *Earth Syst Dynam*, 4, 219–236.



198. Henriques, C., Holman, I.P., Audsley, E., Pearn, K. 2008. An interactive multi-scale integrated assessment of future regional water availability for agricultural irrigation in East Anglia and North West England. *Climatic Change*, 90(43497), 89-111.
199. Hernández-Bedolla, J., Solera, A., Paredes-Arquiola, J., Pedro-Monzonís, M., Andreu, J., Sánchez-Quispe, S.T. 2017. The Assessment of Sustainability Indexes and Climate Change Impacts on Integrated Water Resource Management. *Water (Switzerland)*, 9(3).
200. Herrera S., Fernández J., Gutiérrez J.M. 2016. Update of the Spain02 gridded observational dataset for EURO-CORDEX evaluation: Assessing the effect of the interpolation methodology. *International Journal of Climatology*, 36(2), 900-908.
201. Herrera, S., Kotlarski, S., Soares, P.M.M., Cardoso, R.M., Jaczewski, A., Gutiérrez, J.M., Maraun, D. 2019. Uncertainty in gridded precipitation products: Influence of station density, interpolation method and grid resolution. *International Journal of Climatology*, 39(9), 3717-3729.
202. Herrero, A., Buendía, C., Bussi, G., Sabater, S., Vericat, D., Palau, A., Batalla, R.J. 2017. Modeling the sedimentary response of a large Pyrenean basin to global change. *Journal of Soils and Sediments*, 17(11), 2677-2690.
203. Hertig, E., Maraun, D., Bartholy, J., Pongracz, R., Vrac, M., Mares, I., Gutiérrez, J.M., Wibig, J., Casanueva, A., Soares, P.M.M. 2019. Comparison of statistical downscaling methods with respect to extreme events over Europe: Validation results from the perfect predictor experiment of the COST Action VALUE. *International Journal of Climatology*, 39(9), 3846-3867.
204. Hesse, C., Stefanova, A., Krysanova, V. 2015. Comparison of water flows in four European lagoon catchments under a set of future climate scenarios. *Water (Switzerland)*, 7(2), 716-746.
205. Hiederer, R., de Roo, A. 2003. A European flow network and catchment data set. Tech. rep., Joint Research Centre, European Commission.
206. Hiemstra, P.H., Pebesma, E.J., Twenhöfel, C.J., Heuvelink, G.B. 2009. Real-time automatic interpolation of ambient gamma dose rates from the Dutch radioactivity monitoring network. *Comput. Geosci.*, 35, 1711-1721.
207. Hijmans, R.J. 2016. raster: Geographic Data Analysis and Modeling (2016); <https://CRAN.R-project.org/package=raster>.
208. Hirschi, M., Seneviratne, S.I., Alexandrov, V., Boberg, F., Boroneant, C., Christensen, O.B., Formayer, H., Orłowsky, B., Stepanek, P. 2011. Observational evidence for soil-moisture impact on hot extremes in southeastern Europe. *Nature Geoscience*, 4(1), 17-21.
209. Hodgkins, G.A., Whitfield, P.H., Burn, D.H., Hannaford, J., Renard, B., Stahl, K., Fleig, A.K., Madsen, H., Mediero, L., Korhonen, J., Murphy, C., Wilson, D. 2017. Climate-driven variability in the occurrence of major floods across North America and Europe. *Journal of Hydrology*, 552, 704-717.
210. Hoerling, M., Eischeid, J., Perlwitz, J., Quan, X., Zhang, T., Pegion, P. 2012. On the increased frequency of mediterranean drought. *Journal of Climate*, 25(6), 2146-2161.
211. Hosking, J.R.M. 1986. The theory of probability weighted moments. Res. Rep. RC 12210 IBM Research Division, Yorktown Heights NY 10598.
212. Huang, S., Chang, J., Huang, Q., Chen, Y., Leng, G. 2016. Quantifying the relative contribution of climate and human impacts on runoff change based on the budyko hypothesis and SVM model. *Water Resources Management*, 30(7), 2377-2390.
213. Huang, S., Krysanova, V., Hattermann, F.F. 2014. Does bias correction increase reliability of flood projections under climate change? A case study of large rivers in Germany. *International Journal of Climatology*, 34(14), 3780-3800.
214. Hunink, J., Simons, G., Suárez-Almiñana, S., Solera, A., Andreu, J., Giuliani, M., Zamberletti, P., Grillakis, M., Koutroulis, A., Tsanis, I., Schasfoort, F., Contreras, S., Ercin, E., Bastiaanssen, W. 2019. A simplified water accounting procedure to assess climate change impact on water resources for agriculture across different European river basins. *Water (Switzerland)*, 11(10).
215. Huntingford, C., Jones, R.G., Prudhomme, C., Lamb, R., Gash, J.H.C., Jones, D.A. 2003. Regional climate-model predictions of extreme rainfall for a changing climate. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 129(590 PART A), 1607-1621.



216. Huth, R. 1999. Statistical downscaling in central Europe: evaluation of methods and potential predictors. *Climate Research*, 13, 91–101.
217. IGME-DGA, 2010. Trabajos de la Actividad 4 "Identificación y caracterización de la interrelación entre aguas subterráneas, cursos fluviales, descargas por manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial interés hídrico". Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas, Demarcación Hidrográfica del Júcar, Instituto Geológico y Minero de España (Ministerio de Ciencia e Innovación) y Dirección General del Agua (Ministerio de Medio y Medio Rural y Marino).
218. IPCC 2018: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)].
219. IPCC 2000. Special Report on Emissions Scenarios. Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate - Summary for Policymakers.
220. Ishak, E.H., Rahman, A., Westra, S., Sharma, A., Kuczera, G. 2013. Evaluating the non-stationarity of australian annual maximum flood. *Journal of Hydrology*, 494, 134-145.
221. Islam, Md.S., Oki, T., Kanae, S., Hanasaki, N., Agata, Y., Yoshimura, K. 2007. A grid-based assessment of global water scarcity including virtual water trading. *Water Resources Management*, 21(1), 19-33.
222. Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B. et al. 2014. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg Environ Change* 14, 563–578.
223. Jacobeit, J., Glaser, R., Luterbacher, J., Wanner, H. 2003. Links between flood events in central Europe since AD 1500 and large-scale atmospheric circulation modes. *Geophysical Research Letters*, 30(4), 21-1 - 21-4.
224. James, R., Washington, R., Schleussner, C-F, Rogelj J., Conway D. 2017. Characterizing half-a-degree difference: a review of methods for identifying regional climate responses to global warming targets. *WIREs Clim Change*, 8:e457.
225. Janke S., Tinsley F. 2005. Introduction to linear Models and Statistical Inference. John Wiley & Sons, New Jersey.
226. Jasper K., Calanca, P., Gyalistras, D., Fuhrer, J. 2004. Differential impacts of climate change on the hydrology of two alpine river basins. *Climate Research* 26, 113–129.
227. Jiang D., Wang K. 2019. The role of satellite-based remote sensing in improving simulated streamflow: A review. *Water (Switzerland)*, 11(8).
228. Jiang, T., Chen, Y.D., Xu, C.-y., Chen, X., Chen, X., Singh, V.P. 2007. Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China. *Journal of Hydrology*, 336(43558), 316-333.
229. Jodar-Abellan, A., Ruiz, M., Melgarejo, J. 2018. Evaluación del impacto del cambio climático sobre una cuenca hidrológica en régimen natural (SE, España) usando un modelo SWAT. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 35(3), 240-253.
230. Jolliffe, I.T., Stephenson, D.B (Eds) 2003. Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science. Wiley, Chichester, U.K.
231. Jones, P.D., Reid, P.A. 2001. Assessing future changes in extreme precipitation over Britain using regional climate model integrations. *International Journal of Climatology*, 21(11), 1337-1356.
232. Kalra, A., Piechota, T.C., Davies, R., Tootle, G.A. 2008. Changes in U.S. streamflow and Western U.S. snowpack. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(3), 156-163.
233. Karl, T.R., Wang, W.C., Schlesinger, M.E., Knight, R.W., Portman, D. 1990. A method of relating general circulation model simulated climate to observed local climate. Part I: seasonal statistics. *Journal of Climate*, 3, 1053–1079.
234. Kay, A.L., Davies, H.N., Bell, V.A., Jones, R.G. 2009. Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: Flood frequency in England. *Climatic Change*, 92(43497), 41-63.



235. Khalaf A., Donoghue D. 2012. Estimating recharge distribution using remote sensing: A case study from the West Bank. *Journal of Hydrology*, 414–415, 354–363.
236. Khandel, O., Soliman, M. 2019. Integrated Framework for Quantifying the Effect of Climate Change on the Risk of Bridge Failure Due to Floods and Flood-Induced Scour. *Journal of Bridge Engineering*, 24(9).
237. Kilsby, C.G., Cowpertwait, P.S.P., O'Connell, P.E., Jones, P.D. 1998. Predicting rainfall statistics in England and Wales using atmospheric circulation variables. *International Journal of Climatology*, 18, 523–539.
238. Kim, N.W., Chung, I.M., Won, Y.S., Arnold, J.G. 2008. Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model. *J. Hydrology*, 356, 1–16.
239. King, D., Daroussin, J., Tavernier, R. 1994. Development of a soil geographic database from the Soil Map of the European Communities. *Catena*, 21, 37–56.
240. Kjeldsen, T.R., Macdonald, N., Lang, M., Mediero, L., Albuquerque, T., Bogdanowicz, E., Bra'zdil, R., Castellarin, A., David, V., Fleig, A., Gu'li, G.O., Kriaciuniene, J., Kohnova', S., Merz, B., Nicholson, O., Roald, L.A., Salinas, J.L., Sarauskiene, D., S'raj, M., Strupczewski, W., Szolgay, J., Toumazis, A., Vanneuville, W., Veijalainen, N., Wilson, D. 2014. Documentary evidence of past floods in Europe and their utility in flood frequency estimation. *Journal of Hydrology*, 517, 963–973.
241. Kjellstrom, E., Nikulin, G., Hasson, U., Strandberg, G., Ullerstig, A. 2011. 21st century changes in the European climate: uncertainties derived from an ensemble of regional climate model simulations. *Tellus A*, 63, 24–40.
242. Klein, Tank A., Wijngaard, J.B., Können, G.P. et al. 2002. Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European climate assessment. *Int. J. Climatol.*, 22(12), 1441–1453.
243. Kleinen, T., Petschel-Held, G. 2007. Integrated assessment of changes in flooding probabilities due to climate change. *Climatic Change*, 81(43558), 283–312.
244. Kliment, Z., Matoušková, M. 2009. Runoff changes in the Šumava Mountains (Black Forest) and the foothill regions: Extent of influence by human impact and climate change. *Water Resources Management*, 23(9), 1813–1834.
245. Kløve, B., Ala-Aho, P., Bertrand, G., Gurdak, J.J., Kupfersberger, H., Kværner, J., Muotka, T., Mykrä, H., Preda, E., Rossi, P., Uvo, C.B., Velasco, E., Pulido-Velazquez, M. 2014. Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. *Journal of Hydrology*, 518(PB), 250–266.
246. Knight K. 1999. *Mathematical Statistics*. Chapman and Hall, New York.
247. Knowles, N., Cayan, D.R. 2002. Potential effects of global warming on the Sacramento/San Joaquin watershed and the San Francisco estuary. *Geophysical Research Letters*, 29(18), 38–1.
248. Koch H., Liersch S., de Azevedo J.R.G., Silva A.L.C., Hattermann F.F. 2018. Assessment of observed and simulated low flow indices for a highly managed river basin. *Hydrology Research*, 49(6), 1831–1846.
249. Kotlarski, S., Szabó, P., Herrera, S., Rätty, O., Keuler, K., Soares, P.M., Cardoso, R.M., Bosshard, T., Pagé, C., Boberg, F., Gutiérrez, J.M., Isotta, F.A., Jaczewski, A., Kreienkamp, F., Liniger, M.A., Lussana, C., Pianko-Kluczyńska, K. 2019. Observational uncertainty and regional climate model evaluation: A pan-European perspective. *International Journal of Climatology*, 39(9), 3730–3749.
250. Kotlarski S., Keuler K., Christensen, O.B. et al. 2014. Regional climate modelling on European scales: A joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geosci. Model Dev.*, 7, 1297–1333.
251. Krol, M.S., de Vries, M.J., van Oel, P.R., de Araújo, J.C. 2011. Sustainability of Small Reservoirs and Large Scale Water Availability Under Current Conditions and Climate Change. *Water Resources Management*, 25(12), 3017–3026.
252. Krysanova V., Vetter T., Eisner S., Huang S., Pechlivanidis I., Strauch M., Gelfan A., Kumar R., Aich V., Arheimer B., Chamorro A., Van Griensven A., Kundu D., Lobanova A., Mishra V., Plötner S., Reinhardt J., Seidou O., Wang X., Wortmann M., Zeng X., Hattermann F.F. 2017. Intercomparison of regional-scale hydrological models and climate change impacts





- projected for 12 large river basins worldwide - A synthesis. *Environmental Research Letters*, 12(10).
253. Krysanova, V., Dickens, C., Timmerman, J., Varela-Ortega, C., Schlüter, M., Roest, K., Huntjens, P., Jaspers, F., Buiteveld, H., Moreno, E., de Pedraza Carrera, J., Slámová, R., Martínková, M., Blanco, I., Esteve, P., Pringle, K., Pahl-Wostl, C., Kabat, P. 2010. Cross-Comparison of Climate Change Adaptation Strategies Across Large River Basins in Europe, Africa and Asia. *Water Resources Management*, 24(14), 4121-4160.
  254. Krysanova, V., Hattermann, F., Huang, S., Hesse, C., Vetter, T., Liersch, S., Koch, H., Kundzewicz, Z.W. 2015. Modelling climate and land-use change impacts with SWIM: lessons learnt from multiple applications [Modélisation des impacts des changements climatiques et d'occupation des sols avec SWIM: enseignements tirés d'applications multiples]. *Hydrological Sciences Journal*, 60(4), 606-635.
  255. Kundzewicz, Z.W., Hirabayashi, Y., Kanae, S. 2010. River Floods in the Changing Climate- Observations and Projections. *Water Resources Management*, 24(11), 2633-2646.
  256. Kundzewicz, Z.W., Radziejewski, M., Pińskwar, I. 2006. Precipitation extremes in the changing climate of Europe. *Climate Research*, 31(1), 51-58.
  257. Kundzewicz, Z.W., Schellnhuber, H.-J. 2004. Floods in the IPCC TAR perspective. *Natural Hazards*, 31(1), 111-128.
  258. Kundzewicz, Z.W., Ulbrich, U., Brücher, T., Graczyk, D., Krüger, A., Leckebusch, G.C., Menzel, L., Pińskwar, I., Radziejewski, M., Szwed, M. 2005. Summer floods in Central Europe - Climate change track?. *Natural Hazards*, 36(43497), 165-189.
  259. Kusangaya, S., Warburton, M.L., Archer van Garderen, E., Jewitt, G.P.W. 2014. Impacts of climate change on water resources in southern Africa: A review. *Physics and Chemistry of the Earth*, 67-69, 47-54.
  260. Kwon, H-H., Lall, U., Khalil, A.F. 2007. Stochastic simulation model for nonstationary time series using an autoregressive wavelet decomposition: applications to rainfall and temperature. *Water Resources Research*, 43, W05407.
  261. Laaha, G., Gauster, T., Tallaksen, L.M., Vidal, J.-P., Stahl, K., Prudhomme, C., Heudorfer, B., Vlnas, R., Ionita, M., Van Lanen, H.A.J., Adler, M.-J., Caillouet, L., Delus, C., Fendekova, M., Gailliez, S., Hannaford, J., Kingston, D., Van Loon, A.F., Mediero, L., Osuch, M., Romanowicz, R., Sauquet, E., Stagge, J.H., Wong, W.K. 2017. The European 2015 drought from a hydrological perspective. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(6), 3001-3024.
  262. Lane, S.N., Tayefi, V., Reid, S.C., Yu, D., Hardy, R.J. 2007. Interactions between sediment delivery, channel change, climate change and flood risk in a temperate upland environment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(3), 429-446.
  263. Langousis A., Deidda R., Carsteanu A.A., Onof C., Burlando P., Uijlenhoet R., Bárdossy A. 2018. Precipitation measurement and modelling: Uncertainty, variability, observations, ensemble simulation and downscaling. *Journal of Hydrology*, 556, 824-826.
  264. Le Houérou, H.N. 1996. Climate change, drought and desertification. *Journal of Arid Environments*, 34(2), 133-185.
  265. Leander, R., Buishand, A.T., van den Hurk, B.J.J.M., de Wit, M.J.M. 2008. Estimated changes in flood quantiles of the river Meuse from resampling of regional climate model output. *J. Hydrol.*, 351(3-4), 331-343.
  266. Leblanc, M., Tweed, S., Van Dijk, A., Timbal, B. 2012. A review of historic and future hydrological changes in the Murray-Darling Basin. *Global and Planetary Change*, 80-81, 226-246.
  267. Lehner, B., Döll, P., Alcamo, J., Henrichs, T., Kaspar, F. 2006. Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: A continental, integrated analysis. *Climatic Change*, 75(3), 273-299.
  268. Lelieveld, J., Hadjinicolaou, P., Kostopoulou, E., Chenoweth, J., El Maayar, M., Giannakopoulos, C., Hannides, C., Lange, M.A., Tanarhte, M., Tyrlis, E., Xoplaki, E. 2012. Climate change and impacts in the Eastern Mediterranean and the Middle East. *Climatic Change*, 114(43558), 667-687.
  269. Leng, G., Tang, Q., Rayburg, S. 2015. Climate change impacts on meteorological, agricultural and hydrological droughts in China. *Global and Planetary Change*, 126, 23-34.





270. Lettenmaier, D.P., Wood, A.W., Palmer, R.N., Wood, E.F., Stakhiv, E.Z. 1999. Water resources implications of global warming: A U.S. regional perspective. *Climatic Change*, 43(3), 537-579.
271. Leung, R.L., Mearns, L.O., Giorgi, F., Wilby, R.L. 2003a. Regional climate research: Needs and opportunities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84, 89–95.
272. Leung, L.R., Qian, Y., Bian, X., Hunt, A. 2003b. Hydroclimate of the western United States based on observations and regional climate simulation of 1981–2000. Part II: mesoscale ENSO anomalies. *Journal of Climate* 16, 1912–1928.
273. Leung, L.R., Qian, Y., Bian, X., Washington, W.M., Han, J., Roads, J.O. 2004. Mid-century ensemble regional climate change scenarios for the Western United States. *Climatic Change*, 62, 75–113.
274. Li, H., Sheffield, J., Wood, E.F. 2010. Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 115(10).
275. Li, L., Xu, H., Chen, X., Simonovic, S.P. 2010. Streamflow forecast and reservoir operation performance assessment under climate change. *Water Resources Management*, 24(1), 83-104.
276. Li, Z., Fang, H. 2017. Modeling the impact of climate change on watershed discharge and sediment yield in the black soil region, northeastern China. *Geomorphology*, 293, 255-271.
277. Liang, X., Lettenmaier, D.P., Wood, E.F., Burges, S.J. 1994. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *J Geophys Res Atmos*, 99(1984–2012), 14415–14428.
278. Liu, L., Ping Xu, Y., Li Pan, S., Xu Bai, Z. 2019. Potential application of hydrological ensemble prediction in forecasting floods and its components over the Yarlung Zangbo River basin, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(8), 3335-3352.
279. Loaiciga, H.A., Valdes, J.B., Vogel, R., Garvey, J., Schwarz, H. 1996. Global warming and the hydrologic cycle. *Journal of Hydrology*, 174(43497), 83-127.
280. Lobanova A., Liersch S., Nunes J.P., Didovets I., Stagl J., Huang S., Koch H., Rivas López M.D.R., Maule C.F., Hattermann F., Krysanova V. 2018. Hydrological impacts of moderate and high-end climate change across European river basins. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 18, 15-30.
281. Lobanova A., Liersch S., Tàbara J.D., Koch H., Hattermann F.F., Krysanova V. 2017. Harmonizing human-hydrological system under climate change: A scenario-based approach for the case of the headwaters of the Tagus River. *Journal of Hydrology*, 548, 436-447.
282. Lobanova, A., Koch, H., Liersch, S., Hattermann, F.F., Krysanova, V. 2016. Impacts of changing climate on the hydrology and hydropower production of the Tagus River basin. *Hydrological Processes*, 30(26), 5039-5052.
283. Long, D., Scanlon, B.R., Longuevergne, L., Sun, A.Y., Fernando, D.N., Save, H. 2013. GRACE satellite monitoring of large depletion in water storage in response to the 2011 drought in Texas. *Geophysical Research Letters*, 40(13), 3395-3401.
284. López, J., Francés, F. 2013. Non-stationary flood frequency analysis in continental Spanish rivers, using climate and reservoir indices as external covariates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(8), 3189-3203.
285. López Urrea, R., López Córcoles, H., López Fuster, P., Montoro Rodríguez, A., Martín de Santa Olalla Mañas, F., Calero Martínez, J.A. 2003. Ensayos de programación de riegos en kenaf, trigo blando y brócoli ([http://www.itap.es/media/3279/4.programación\\_riegos\\_2003.pdf](http://www.itap.es/media/3279/4.programación_riegos_2003.pdf)).
286. Loucks, D.P., Van Beek, E., Stedinger, J.R., Dijkman, J.P.M., Villars, M.T. 2005. Chapter 9: Model Sensitivity and Uncertainty Analysis. In: UNESCO (ed.) *Water Resources Systems Planning and Management*. Paris: United Nations Educational Scientific and Cultural Organization.
287. Luna, M.Y., Guijarro, J. A., Lopez, J.A. 2012. A monthly precipitation database for Spain (1851–2008): reconstruction, homogeneity and trends. *Advances in Science & Research*, 8, 1–4



288. Machado, M.J., Botero, B.A., López, J., Francés, F., Díez-Herrero, A., Benito, G. 2015. Flood frequency analysis of historical flood data under stationary and non-stationary modelling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(6), 2561-2576.
289. Macklin, M.G., Lewin, J., Woodward, J.C. 2012. The fluvial record of climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370(1966), 2143-2172.
290. Madsen, H., Lawrence, D., Lang, M., Martinkova, M., Kjeldsen, T.R. 2014. Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *Journal of Hydrology*, 519(PD), 3634-3650.
291. Manzano, A., Clemente, M.A., Morata, A., Luna, M.Y., Beguería, S., Vicente-Serrano, S.M., Martín, M.L. 2019. Analysis of the atmospheric circulation pattern effects over SPEI drought index in Spain. *Atmospheric Research*, 230.
292. Maraun, D., Shepherd, T.G., Widmann, M., Zappa, G., Walton, D., Gutiérrez, J.M., Hagemann, S., Richter, I., Soares, P.M.M., Hall, A., Mearns, L.O. 2017. Towards process-informed bias correction of climate change simulations. *Nature Climate Change*, 7(11), 764-773.
293. Maraun, D., Widmann, M., Gutiérrez, J.M., Kotlarski, S., Chandler, R.E., Hertig, E., Wibig, J., Huth, R., Wilcke, R.A.I. 2015. VALUE: A framework to validate downscaling approaches for climate change studies. *Earth's Future*, 3(1), 1-14.
294. Marcos-García P., Lopez-Nicolas A., Pulido-Velazquez M. 2017. Combined use of relative drought indices to analyze climate change impact on meteorological and hydrological droughts in a Mediterranean basin. *Journal of Hydrology*, 554, 292-305.
295. Mardia, K.V. 1972. *Statistics of Directional Data*. Academic Press.
296. Mardia, K.V., Jupp, P.E. 2008. in *Directional Statistics* (Wiley, 2008), pp. 93–118.
297. Marengo, J.A., Espinoza, J.C. 2016. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: Causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology*, 36(3), 1033-1050.
298. Marengo, J.A., Jones, R., Alves, L.M., Valverde, M.C. 2009. Future change of temperature and precipitation extremes in south america as derived from the precis regional climate modeling system. *International Journal of Climatology*, 29(15), 2241-2255.
299. Martín-Carrasco, F., Garrote, L. 2007. Drought-induced water scarcity in water resources systems. In: Vasiliev OF, van Gelder PHAJM, Plate EJ, Bolgov MV (eds), *Extreme Hydrological Events: New Concepts for Security*. NATO Science Series, vol. 78, Part 4. pp. 301– 311.
300. Martín-Carrasco, F., Garrote, L., Iglesias, A., Mediero, L. 2012. Diagnosing causes of water scarcity in complex water resources systems and identifying risk management actions. *Water Resour Manag.*, 27, 1693–1705.
301. Maurer, E.P., Wood, A.W., Adam, J.C., Lettenmaier, D.P., Nijssen, B. 2002. A long-term hydrologically-based data set of land surface fluxes and states for the conterminous United States. *Journal of Climate*, 15, 3237–3251.
302. McDonald, M.G., Harbaugh, A.W. 1988. A modular threedimensional finite difference groundwater flow model. *US Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigation Book 6, Chapter A1*, 586 pp.
303. McKee T.B., Doeskin N.J., Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. American Meteorological Society, Boston, MA, 179–184.
304. Medellín-Azuara, J., Harou, J.J., Olivares, M.A., Madani, K., Lund, J.R., Howitt, R.E., Tanaka, S.K., Jenkins, M.W., Zhu, T. 2007. Adaptability and adaptations of California's water supply system to dry climate warming. *Climatic Change*, 87(1 SUPPL), S75-S90.
305. Mediero, L., Kjeldsen, T.R., Macdonald, N., Kohnova, S., Merz, B., Vorogushyn, S., Wilson, D., Alburquerque, T., Blöschl, G., Bogdanowicz, E., Castellarin, A., Hall, J., Kobold, M., Kriauciuniene, J., Lang, M., Madsen, H., Onușluel Gül, G., Perdigão, R.A.P., Roald, L.A., Salinas, J.L., Toumazis, A.D., Veijalainen, N., Órarinsson, Ó. 2015. Identification of coherent flood regions across Europe by using the longest streamflow records. *Journal of Hydrology*, 528, 341-360.



306. Mediero, L., Santillán, D., Garrote, L., Granados, A. 2014. Detection and attribution of trends in magnitude, frequency and timing of floods in Spain. *Journal of Hydrology*, 517, 1072-1088.
307. Meigh, J.R., McKenzie, A.A., Sene, K.J. 1999. A grid-based approach to water scarcity estimates for eastern and southern Africa. *Water Resources Management*, 13(2), 85-115.
308. Mentaschi, L., Vousdoukas, M., Voukouvalas, E., Sartini, L., Feyen, L., Besio, G., Alfieri, L. 2016. The transformed-stationary approach: A generic and simplified methodology for non-stationary extreme value analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(9), 3527-3547.
309. Menzel, L., Thielen, A.H., Schwandt, D., Bürger, G. 2006. Impact of climate change on the regional hydrology - Scenario-based modelling studies in the German Rhine catchment. *Natural Hazards*, 38(43497), 45-61.
310. Merz, B., Vorogushyn, S., Uhlemann, S., Delgado, J., Hundscha, Y. 2012. HESS Opinions: "More efforts and scientific rigour are needed to attribute trends in flood time series". *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(5), 1379-1387.
311. Mesbahzadeh, T., Soleimani Sardoo, F. 2019. Assessment and Prediction of Droughts Using Climate Change Scenarios (The Case Study: Southeastern Iran). *Russian Meteorology and Hydrology*, 44(8), 548-554.
312. Meyer, J.L., Sale, M.J., Mulholland, P.J., Poff, N.L. 1999. Impacts of climate change on aquatic ecosystem functioning and health. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(6), 1373-1384.
313. Milly, P.C.D., Dunne, K.A., Vecchia, A.V. 2005. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438(7066), 347-350.
314. Mishra, A.K., Singh, V.P. 2009. Analysis of drought severity-area-frequency curves using a general circulation model and scenario uncertainty. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114(6).
315. Mishra, V., Cherkauer, K.A., Shukla, S. 2010. Assessment of Drought due to Historic Climate Variability and Projected Future Climate Change in the Midwestern United States. *Journal of Hydrometeorology*, 11(1), 46-68.
316. Molina, J.-L., Pulido-Velázquez, D., García-Aróstegui, J.L., Pulido-Velázquez, M. 2013. Dynamic Bayesian Networks as a Decision Support tool for assessing Climate Change impacts on highly stressed groundwater systems. *Journal of Hydrology*, 479, 113-129.
317. Molnar P. 2001. Climate change, flooding in arid environments, and erosion rates. *Geology*, 29(12), 1071-1074.
318. Molnar, P., Anderson, R.S., Kier, G., Rose, J. 2006. Relationships among probability distributions of stream discharges in floods, climate, bed load transport, and river incision. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 111(2).
319. Monier, E., Gao, X., Scott, J.R. et al. 2015. A framework for modeling uncertainty in regional climate change. *Climatic Change*, 131(51). 131, 51-66.
320. Moratalla, A., Gómez-Alday, J.J., De las Heras, J., Sanz, D., Castaño, S. 2009. Nitrate in the Water-Supply Wells in the Mancha Oriental Hydrogeological System (SE Spain). *Water Resour. Manage.*, 23, 1621-1640.
321. Morss, R.E., Wilhelmi, O.V., Downton, M.W., Grunfest, E. 2005. Flood risk, uncertainty, and scientific information for decision making: Lessons from an interdisciplinary project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(11), 1593-1601.
322. Mpelasoka, F., Hennessy, K., Jones, R., Bates, B. 2008. Comparison of suitable drought indices for climate change impacts assessment over Australia towards resource management. *International Journal of Climatology*, 28(10), 1283-1292.
323. Mudelsee, M., Börngen, M., Tetzlaff, G., Grünewald, U. 2004. Extreme floods in central Europe over the past 500 years: Role of cyclone pathway "Zugstrasse Vb". *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 109(23), 1-21.
324. Muerth, M.J., Gauvin St-Denis, B., Ricard, S., Velázquez, J.A., Schmid, J., Minville, M., Caya, D., Chaumont, D., Ludwig, R., Turcotte, R. 2013. On the need for bias correction in regional climate scenarios to assess climate change impacts on river runoff. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(3), 1189-1204.



325. Mujumdar, P.P. 2013. Climate Change: A Growing Challenge for Water Management in Developing Countries. *Water Resources Management*, 27(4), 953-954.
326. Müller-Wohlfeil, D.I., Bürger, G., Lahmer, W. 2000. Response of a river catchment to climate change: application of expanded downscaling to northern Germany. *Climatic Change* 47: 61–89.
327. Murphy, B.F., Timbal, B. 2008. A review of recent climate variability and climate change in Southeastern Australia. *International Journal of Climatology*, 28(7), 859-879.
328. Naden, P.S. 1993. Methods and techniques for peaks-over-threshold analysis. Report to Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Institute of Hydrology, 36pp.
329. Nakicenovic, N., Swart, R. (Eds.): IPCC Special Report on Emissions Scenarios, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.
330. Naumann, G., Alfieri, L., Wyser, K., Mentaschi, L., Betts, R.A., Carrao, H., Spinoni, J., Vogt, J., Feyen, L. 2018. Global Changes in Drought Conditions Under Different Levels of Warming. *Geophysical Research Letters*, 45(7), 3285-3296.
331. Navarro-Ortega, A., Acuña, V., Batalla, R.J., Blasco, J., Conde, C., Elorza, F.J., Elosegi, A., Francés, F., La-Roca, F., Muñoz, I., Petrovic, M., Picó, Y., Sabater, S., Sanchez-Vila, X., Schuhmacher, M., Barceló, D. 2012. Assessing and forecasting the impacts of global change on Mediterranean rivers. The SCARCE Consolider project on Iberian basins. *Environmental Science and Pollution Research*, 19(4), 918-933.
332. Neuwirth, E. 2014. RColorBrewer: ColorBrewer Palettes. <https://CRAN.R-project.org/package=RColorBrewer>.
333. Nicault, A., Alleaume, S., Brewer, S., Carrer, M., Nola, P., Guiot, J. 2008. Mediterranean drought fluctuation during the last 500 years based on tree-ring data. *Climate Dynamics*, 31(43526), 227-245.
334. Nicholls, N. 2004. The changing nature of Australian droughts. *Climatic Change*, 63(3), 323-336.
335. Nikulin, G., Kjellstrom, E., Hasson, U., Strandberg, G., Ullerstig, A. 2011. Evaluation and future projections of temperature, precipitation and wind extremes over Europe in an ensemble of regional climate simulations. *Tellus*, 63A, 41–55.
336. Ntegeka, V., Baguis, P., Roulin, E., Willems, P. 2014. Developing tailored climate change scenarios for hydrological impact assessments. *Journal of Hydrology*, 508, 307-321.
337. Obeysekera J., Salas J.D. 2014. Quantifying the uncertainty of design floods under nonstationary conditions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(7), 1438-1446.
338. Obeysekera J., Salas J.D. 2016. Frequency of recurrent extremes under nonstationarity. *Journal of Hydrologic Engineering*, 21(5).
339. Oñate-Valdivieso, F., Bosque Sendra, J. 2010. Application of GIS and remote sensing techniques in generation of land use scenarios for hydrological modeling. *J. Hydrol.*, 395, 256–263.
340. Paeth, H., Born, K., Girmes, R., Podzun, R., Jacob, D. 2009. Regional climate change in tropical and Northern Africa due to greenhouse forcing and land use changes. *Journal of Climate*, 22(1), 114-132.
341. Pahl-Wostl, C. 2007. Transitions towards adaptive management of water facing climate and global change. *Water Resources Management*, 21(1), 49-62.
342. Pal, J.S., Giorgi, F., Bi, X. 2004. Consistency of recent European summer precipitation trends and extremes with future regional climate projections. *Geophysical Research Letters*, 31(13), L13202 1-4.
343. Palazón, L., Navas, A. 2016. Case study: Effect of climatic characterization on river discharge in an alpine-prealpine catchment of the Spanish Pyrenees using the SWAT model. *Water (Switzerland)*, 8(10).
344. Palmer, M.A., Lettenmaier, D.P., Poff, N.L., Postel, S.L., Richter, B., Warner, R. 2009. Climate change and river ecosystems: Protection and adaptation options. *Environmental Management*, 44(6), 1053-1068.
345. Pascual, D., Pla, E., Lopez-Bustins, J.A., Retana, J., Terradas, J. 2015. Impacts of climate change on water resources in the Mediterranean Basin: a case study in Catalonia, Spain [Impacts du changement climatique sur les ressources en eau dans le bassin méditerranéen



- : une étude de cas en Catalogne, Espagne]. *Hydrological Sciences Journal*, 60(12), 2132-2147.
346. Pasho, E., Camarero, J.J., de Luis, M., Vicente-Serrano, S.M. 2011. Impacts of drought at different time scales on forest growth across a wide climatic gradient in north-eastern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(12), 1800-1811.
  347. Pasquier, U., He, Y., Hooton, S., Goulden, M., Hiscock, K.M. 2019. An integrated 1D-2D hydraulic modelling approach to assess the sensitivity of a coastal region to compound flooding hazard under climate change. *Natural Hazards*, 98(3), 915-937.
  348. Paulo, A.A., Rosa, R.D., Pereira, L.S. 2012. Climate trends and behaviour of drought indices based on precipitation and evapotranspiration in Portugal. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(5), 1481-1491.
  349. Pechlivanidis I.G., Arheimer B., Donnelly C., Hundecha Y., Huang S., Aich V., Samaniego L., Eisner S., Shi P. 2017. Analysis of hydrological extremes at different hydro-climatic regimes under present and future conditions. *Climatic Change*, 141(3), 467-481.
  350. Pedro-Monzónis, M., Solera, A., Ferrer, J., Estrela, T., Paredes-Arquiola, J. 2015. A review of water scarcity and drought indexes in water resources planning and management. *Journal of Hydrology*, 527, 482-493.
  351. Peraza-Castro, M., Ruiz-Romera, E., Meaurio, M., Sauvage, S., Sánchez-Pérez, J.M. 2018. Modelling the impact of climate and land cover change on hydrology and water quality in a forest watershed in the Basque Country (Northern Spain). *Ecological Engineering*, 122, 315-326.
  352. Piani, C., Haerter, J., Coppola, E. 2010a. Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theor. Appl. Climatol.*, 99, 187-192.
  353. Piani, C., Weedon, G., Best, M., Gomes, S., Viterbo, P., Hagemann, S., Haerter, J. 2010b. Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. *Journal of Hydrology*, 395, 199-215.
  354. Piao, S., Ciais, P., Huang, Y., Shen, Z., Peng, S., Li, J., Zhou, L., Liu, H., Ma, Y., Ding, Y., Friedlingstein, P., Liu, C., Tan, K., Yu, Y., Zhang, T., Fang, J. 2010. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 467(7311), 43-51.
  355. Piao, S., Zhang, X., Chen, A., Liu, Q., Lian, X., Wang, X., Peng, S., Wu, X. 2019. The impacts of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: A review. *Science China Earth Sciences*, 62(10), 1551-1563.
  356. Piccarreta, M., Capolongo, D., Boenzi, F. 2004. Trend analysis of precipitation and drought in Basilicata from 1923 to 2000 within a southern Italy context. *International Journal of Climatology*, 24(7), 907-922.
  357. Pielke R.A., Jr., Downton, M.W. 2000. Precipitation and damaging floods: Trends in the United States, 1932-97. *Journal of Climate*, 13(20), 3625-3637.
  358. Pierce, D. 2015. ncdf4: Interface to Unidata netCDF (Version 4 or Earlier) Format Data Files. <https://CRAN.R-project.org/package=ncdf4>.
  359. Pilling, C.G., Jones, J.A.A. 2002. The impact of future climate change on seasonal discharge, hydrological processes and extreme flows in the Upper Wye experimental catchment, mid-Wales. *Hydrological Processes* 16: 1201-1213.
  360. PRUDENCE 2007. Prediction of regional scenarios and uncertainties for defining European climate change risks and effects. Project EKV2-CT2001-00132 in the EU 5th Framework program for energy, environment and sustainable development.
  361. Prudhomme, C., Reynard, N., Crooks, S. 2002. Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: Where are we now?. *Hydrological Processes*, 16, 1137-1150.
  362. Poff, N.L. 2002. Ecological response to and management of increased flooding caused by climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 360(1796), 1497-1510.
  363. Poff, N.L., Brown, C.M., Grantham, T.E., Matthews, J.H., Palmer, M.A., Spence, C.M., Wilby, R.L., Haasnoot, M., Mendoza, G.F., Dominique, K.C., Baeza, A. 2016. Sustainable water management under future uncertainty with eco-engineering decision scaling. *Nature Climate Change*, 6(1), 25-34.





364. Pohle, I., Koch, H., Gädeke, A., Kaltofen, M., Schramm, M., Redetzky, M., Müller, F., Grünewald, U. 2013. Potential impacts of climate change on natural and managed discharges of the Rivers Spree, Schwarze Elster and Lusatian Neisse, Central Europe. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 178, 3-15.
365. Pons, M.R., Herrera, S., Gutiérrez, J.M. 2016. Future trends of snowfall days in northern Spain from ENSEMBLES regional climate projections. *Climate Dynamics*, 46(43810), 3645-3655.
366. Pons, M.R., San-Martín, D., Herrera, S., Gutiérrez, J.M. 2010. Snow trends in Northern Spain: Analysis and simulation with statistical downscaling methods. *International Journal of Climatology*, 30(12), 1795-1806.
367. Prudhomme, C., Davies, H. 2009. Assessing uncertainties in climate change impact analyses on the river flow regimes in the UK. Part 1: Baseline climate. *Climatic Change*, 93(43497), 177-195.
368. Prudhomme, C., Davies, H. 2009. Assessing uncertainties in climate change impact analyses on the river flow regimes in the UK. Part 2: Future climate. *Climatic Change*, 93(43497), 197-222.
369. Pulido-Velazquez, D., Garrote, L., Andreu, J., Martín-Carrasco, F.-J., Iglesias, A. 2011. A methodology to diagnose the effect of climate change and to identify adaptive strategies to reduce its impacts in conjunctive-use systems at basin scale. *Journal of Hydrology*, 405(43497), 110-122.
370. Pulido-Velazquez, M., Peña-Haro, S., García-Prats, A., Mocholi-Almudever, A.F., Henriquez-Dole, L., Macian-Sorribes, H., Lopez-Nicolas, A. 2015. Integrated assessment of the impact of climate and land use changes on groundwater quantity and quality in the Mancha Oriental system (Spain). *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(4), 1677-1693.
371. Pulwarty, R.S., Maia, R. 2015. Adaptation Challenges in Complex Rivers Around the World: The Guadiana and the Colorado Basins. *Water Resources Management*, 29(2), 273-293.
372. Purkey, D.R., Huber-Lee, A., Yates, D.N., Hanemann, M., Herrod-Julius, S. 2007. Integrating a climate change assessment tool into stakeholder-driven water management decision-making processes in California. *Water Resources Management*, 21(1), 315-329.
373. Quintas, L. (1996). La base de datos hidrológicos HIDRO del CEDEX. *Ingeniería Civil*, 104, 117-126.
374. R Development Core Team 2008. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, ISBN 3-900051-07-0.
375. R Core Team 2016. A Language and Environment for Statistical Computing; [www.R-project.org](http://www.R-project.org).
376. Reder, A., Iturbide, M., Herrera, S., Rianna, G., Mercogliano, P., Gutiérrez, J.M. 2018. Assessing variations of extreme indices inducing weather-hazards on critical infrastructures over Europe—the INTACT framework. *Climatic Change*, 148(43497), 123-138.
377. Reynard, N.S., Prudhomme, C., Crooks, S.M. 2001. The flood characteristics of large U.K. rivers: Potential effects of changing climate and land use. *Climatic Change*, 48(43526), 343-359.
378. Rigby, R.A., Stasinopoulos, D.M. 2005. Generalized additive models for location, scale and shape. *J. Roy. Stat. Soc. C*, 54, 507-554.
379. Rijks, D., Terres, J., Vossen, P. 1998. Agrometeorological applications for regional crop monitoring and production assessment. Tech. Rep. EUR 17735, European Commission, Joint Research Centre, Ispra, Italy.
380. Rivaes, R.P., Rodríguez-González, P.M., Ferreira, M.T., Pinheiro, A.N., Politti, E., Egger, G., García-Arias, A., Francés, F. 2014. Modeling the evolution of riparian woodlands facing climate change in three european rivers with contrasting flow regimes. *PLoS ONE*, 9(10).
381. Robeson, S.M. 2015. Revisiting the recent California drought as an extreme value. *Geophysical Research Letters*, 42(16), 6771-6779.
382. Rodríguez Díaz, J.A., Weatherhead, E.K., Knox, J.W., Camacho, E. 2007. Climate change impacts on irrigation water requirements in the Guadalquivir river basin in Spain. *Regional Environmental Change*, 7(3), 149-159.
383. Rodriguez-Lloveras, X., Buytaert, W., Benito, G. 2016. Land use can offset climate change induced increases in erosion in Mediterranean watersheds. *Catena*, 143, 244-255.





384. Rodríguez-Lloveras, X., Corella, J.P., Benito, G. 2017. Modelling the Hydro-Sedimentary Dynamics of a Mediterranean Semiarid Ungauged Watershed Beyond the Instrumental Period. *Land Degradation and Development*, 28(5), 1506-1518.
385. Rojas, R., Feyen, L., Dosio, A., Bavera, D. 2011. Improving pan-European hydrological simulation of extreme events through statistical bias correction of RCM-driven climate simulations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(8), 2599-2620.
386. Rossi G., Caporali E., Garrote L. 2011. Definition of risk indicators for reservoirs management optimization. *Water Resources Management*, 26(4), 981-996.
387. Ruiz-Villanueva, V., Stoffel, M., Bussi, G., Francés, F., Bréthaut, C. 2014. Climate change impacts on discharges of the Rhone River in Lyon by the end of the twenty-first century: model results and implications. *Regional Environmental Change*, 15(3), 505-515.
388. Rust, W., Holman, I., Bloomfield, J., Cuthbert, M., Corstanje, R. 2019. Understanding the potential of climate teleconnections to project future groundwater drought. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(8), 3233-3245.
389. Saghaian, B., Farazjoo, H., Bozorgy, B., Yazdandoost, F. 2008. Flood intensification due to changes in land use. *Water Resources Management*, 22(8), 1051-1067.
390. Salas J.D., Obeysekera J., Vogel R.M. 2018. Techniques for assessing water infrastructure for nonstationary extreme events: a review. *Hydrological Sciences Journal*, 63(3), 325-352.
391. Salas, J., Obeysekera, J. 2014. Revisiting the concepts of return period and risk for nonstationary hydrologic extreme events. *J Hydrol Eng.*, 19, 554-568.
392. Salas, J.D., Fu, C.J., Cancelliere, A., Dustin, D., Bode, D., Pineda, A., Vincent, E. 2005. Characterizing the severity and risk of drought in the Poudre River, Colorado. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(5), 383-393.
393. Salathé, E.P. 2003. Comparison of various precipitation downscaling methods for the simulation of streamflow in a rainshadow river basin. *International Journal of Climatology*, 23, 887-901.
394. Salmoral, G., Willaarts, B.A., Troch, P.A., Garrido, A. 2015. Drivers influencing streamflow changes in the Upper Turia basin, Spain. *Science of the Total Environment*, 503-504, 258-268.
395. San-Martín, D., Manzanas, R., Brands, S., Herrera, S., M. Gutiérrez, J. 2017. Reassessing model uncertainty for regional projections of precipitation with an ensemble of statistical downscaling methods. *Journal of Climate*, 30(1), 203-223.
396. Sánchez, E., Solman, S., Remedio, A.R.C., Berbery, H., Samuelsson, R.P., Da Rocha, C., Mourão, L., Marengo, J., De Castro, M., Jacob, D. et al. 2015. Regional climate modelling in CLARIS-LPB: A concerted approach towards twenty first century projections of regional temperature and precipitation over South America. *Clim. Dyn.* 45, 2193-2212.
397. Santos, G.M.-D., Melendez-Pastor, I., Navarro-Pedreño, J., Koch, M. 2019. Assessing water availability in Mediterranean regions affected by water conflicts through MODIS data time series analysis. *Remote Sensing*, 11(11).
398. Sanz, D., Gómez-Alday, J.J., Castaño, S., Moratalla, A., De las Heras, L., Martínez Alfaro, P.P. 2009. Hydrostratigraphic framework and hydrogeological behaviour of the Mancha Oriental System (SE Spain). *Hydrogeol. J.*, 17, 1375-1391.
399. Sanz, D., Castaño, S., Cassiraga, E., Sahuquillo, A., Gómez-Alday, J.J., Peña, S., Calera, A. 2011. Modeling aquifer-river interactions under the influence of groundwater abstraction in the Mancha Oriental System (SE Spain). *Hydrogeol. J.*, 19, 475-487.
400. Sapriza Azuri G., Jódar J., Carrera J., Gupta H.V. 2013. Stochastic Simulation of Nonstationary Rainfall Fields, Accounting for Seasonality and Atmospheric Circulation Pattern Evolution. *Mathematical Geosciences*, 45(5), 621-645.
401. Sarkar, D. 2008. *Lattice: Multivariate Data Visualization with R*. Springer, <http://lmdvr.rforge.R-project.org>.
402. Sauquet, E., Richard, B., Devers, A., Prudhomme, C. 2019. Water restrictions under climate change: A Rhône-Mediterranean perspective combining bottom-up and top-down approaches. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(9), 3683-3710.
403. Schaphoff, S., Heyder, U., Ostberg, S., Gerten, D., Heinke, J., Lucht, W. 2013. Contribution of permafrost soils to the global carbon budget. *Environmental Research Letters*, 8, 014026,5.



404. Schmidli, J., Goodess, C.M., Frei, C., Haylock, M.R., Hundecha, Y., Ribalaygua, J., Schmith, T. 2007. Statistical and dynamical downscaling of precipitation: An evaluation and comparison of scenarios for the European Alps. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 112(4).
405. Schreider, S.Y., Smith, D.I., Jakeman, A.J. 2000. Climate change impacts on urban flooding. *Climatic Change*, 47(43497), 91-115.
406. Seager, R., Hoerling, M., Schubert, S., Wang, H., Lyon, B., Kumar, A., Nakamura, J., Henderson, N. 2015. Causes of the 2011-14 California drought. *Journal of Climate*, 28(18), 6997-7024.
407. Seager, R., Ting, M., Li, C., Naik, N., Cook, B., Nakamura, J., Liu, H. 2013. Projections of declining surface-water availability for the southwestern United States. *Nature Climate Change*, 3(5), 482-486.
408. Seager, R., Tzanova, A., Nakamura, J. 2009. Drought in the Southeastern United States: Causes, variability over the last millennium, and the potential for future hydroclimate change. *Journal of Climate*, 22(19), 5021-5045.
409. Semenov, M.A. 2007. Development of high-resolution UKCIP02-based climate change scenarios in the UK. *Agricultural and Forest Meteorology*, 144(43497), 127-138.
410. Sen, P.K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *J. Am. Stat. Assoc.*, 63, 1379-1389.
411. Senent-Aparicio, J., Liu, S., Pérez-Sánchez, J., López-Ballesteros, A., Jimeno-Sáez, P. 2018. Assessing impacts of climate variability and reforestation activities on water resources in the headwaters of the Segura River Basin (SE Spain). *Sustainability (Switzerland)*, 10(9).
412. Senent-Aparicio, J., Pérez-Sánchez, J., Carrillo-García, J., Soto, J. 2017. Using SWAT and fuzzy TOPSIS to assess the impact of climate change in the headwaters of the Segura River Basin (SE Spain). *Water (Switzerland)*, 9(2).
413. Seneviratne, S.I., Corti, T., Davin, E.L., Hirschi, M., Jaeger, E.B., Lehner, I., Orlowsky, B., Teuling, A.J. 2010. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 99(43558), 125-161.
414. Serrano-Notivol R., Beguería S., Saz M.A., Longares L.A., De Luis M. 2017. SPREAD: A high-resolution daily gridded precipitation dataset for Spain - An extreme events frequency and intensity overview. *Earth System Science Data*, 9(2), 721-738.
415. Shao T. Krishnamurty S. 2008. A clustering-based surrogate model updating approach to simulation-based engineering design. *ASME J. Mech. Des.*, 130, 1-13.
416. Sharma, D., Gupta, A., Babel, M. 2007. Spatial disaggregation of bias-corrected GCM precipitation for improved hydrologic simulation: Ping River Basin, Thailand. *Hydrol Earth Syst Sci.*, 11, 1373-1390.
417. Sheffield, J., Wood, E.F. 2008. Global trends and variability in soil moisture and drought characteristics, 1950-2000, from observation-driven simulations of the terrestrial hydrologic cycle. *Journal of Climate*, 21(3), 432-458.
418. Sheffield, J., Wood, E.F. 2008. Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. *Climate Dynamics*, 31(1), 79-105.
419. Shi, P., Chen, C., Srinivasan, R., Zhang, X., Cai, T., Fang, X., Qu, S., Chen, X., Li, Q. 2011. Evaluating the SWAT Model for Hydrological Modeling in the Xixian Watershed and a Comparison with the XAJ Model. *Water Resources Management*, 25(10), 2595-2612.
420. Shiau, J.T., Shen, H.W. 2001. Recurrence analysis of hydrologic droughts of differing severity. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127(1), 30-40.
421. Shukla, S., Wood, A.W. 2008. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters*, 35(2).
422. Simonovic, S.P., Li, L. 2004. Sensitivity of the Red River basin flood protection system to climate variability and change. *Water Resources Management*, 18(2), 89-110.
423. Singh, V.P. Guo, F.X.Y. 1993. Parameter estimation for 3-parameter log-logistic distribution (LLD3) by Pome. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 7, 163-177.
424. Sohoulade Djebou, D.C. 2019. Streamflow Drought Interpreted Using SWAT Model Simulations of Past and Future Hydrologic Scenarios: Application to Neches and Trinity River Basins, Texas. *Journal of Hydrologic Engineering*, 24(9).



425. Sophocleous, M., Perkins, S.P. 2000. Methodology and application of combined watershed and ground-water models in Kansas. *J. Hydrol.*, 236, 185–201.
426. Sordo, C., Frías, M.D., Herrera, S., Cofiño, A.S., Gutiérrez, J.M. 2008. Interval-based statistical validation of operational seasonal forecasts in Spain condition to El Niño-Southern Oscillation events. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113(17).
427. Sordo-Ward, A., Granados, A., Iglesias, A., Garrote, L., Bejarano, M.D. 2019. Adaptation effort and performance of water management strategies to face climate change impacts in six representative basins of Southern Europe. *Water (Switzerland)*, 11(5).
428. Sordo-Ward, A., Granados, I., Iglesias, A., Garrote, L. 2019. Blue water in Europe: Estimates of current and future availability and analysis of uncertainty. *Water (Switzerland)*, 11(3).
429. Sordo-Ward, A., Bejarano, M.D., Iglesias, A., Asenjo, V., Garrote, L. 2017. Analysis of current and future SPEI droughts in the La Plata Basin based on results from the regional Eta Climate Model. *Water (Switzerland)*, 9(11).
430. Sordo-Ward Á., Granados I., Martín-Carrasco F., Garrote L. 2016. Impact of Hydrological Uncertainty on Water Management Decisions. *Water Resources Management*, 30(14), 5535-5551.
431. Soundharajan, B.-S., Adeloeye, A.J., Remesan, R. 2016. Evaluating the variability in surface water reservoir planning characteristics during climate change impacts assessment. *Journal of Hydrology*, 538, 625-639.
432. South, A. 2011. rworldmap: A new R package for mapping global data. *R J*, 3, 35–43.
433. Sperna Weiland, F.C., Van Beek, L.P.H., Weerts, A.H., Bierkens, M.F.P. 2012. Extracting information from an ensemble of GCMs to reliably assess future global runoff change. *Journal of Hydrology*, 412-413, 66-75.
434. Spinoni, J., Naumann, G., Carrao, H., Barbosa, P., Vogt, J. 2014. World drought frequency, duration, and severity for 1951-2010. *International Journal of Climatology*, 34(8), 2792-2804.
435. Srivastava, P.K., Islam, T., Gupta, M., Petropoulos, G., Dai, Q. 2015. WRF Dynamical Downscaling and Bias Correction Schemes for NCEP Estimated Hydro-Meteorological Variables. *Water Resources Management*, 29(7), 2267-2284.
436. Stasinopoulos, D.M., Rigby, R.A. 2007. Generalized additive models for location scale and shape (GAMLSS) in R. *J. Stat. Softw.*, 23, 1–46
437. Steinschneider, S., Brown, C. 2013. A semiparametric multivariate, multisite weather generator with low-frequency variability for use in climate risk assessments. *Water Resources Research*, 49, 7205–7220.
438. Strzepek, K.M., Major, D.C., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Yates, D.N., Holt, A., Hillel, D. 1999. New methods of modeling water availability for agriculture under climate change: The U.S. Cornbelt. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(6), 1639-1655.
439. Suarez, P., Anderson, W., Mahal, V., Lakshmanan, T.R. 2005. Impacts of flooding and climate change on urban transportation: A systemwide performance assessment of the Boston Metro Area. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 10(3), 231-244.
440. Szentimrey T. 1999. Multiple analysis of series for homogenization (MASH). In: *Proceedings of the Second Seminar for Homogenization of Surface Climatological Data*, 27–46.
441. Tanaka, S.K., Zhu, T., Lund, J.R., Howitt, R.E., Jenkins, M.W., Pulido, M.A., Tauber, M., Ritzema, R.S., Ferreira, I.C. 2006. Climate warming and water management adaptation for California. *Climatic Change*, 76(43558), 361-387.
442. Taylor, R.G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., Van Beek, R., Wada, Y., Longuevergne, L., Leblanc, M., Famiglietti, J.S., Edmunds, M., Konikow, L., Green, T.R., Chen, J., Taniguchi, M., Bierkens, M.F.P., Macdonald, A., Fan, Y., Maxwell, R.M., Yechieli, Y., Gurdak, J.J., Allen, D.M., Shamsudduha, M., Hiscock, K., Yeh, P.J.-F., Holman, I., Treidel, H. 2013. Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, 3(4), 322-329.
443. Terink, W., Lutz, A.F., Simons, G.W.H., Immerzeel, W.W., Droogers, P. 2015. SPHY v2.0: Spatial Processes in HYdrology. *Geoscientific Model Development*, 8(7), 2009-2034.



444. Teutschbein, C., Seibert, J. 2012. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 456, 12-29.
445. Theil, H. 1950. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, part 1. *Proc. R. Neth. Acad. Sci.*, 53, 386–392.
446. Thielen, J., Gomes, G., Sint, H., Lorini, V., Zambrano-Bigiarini, M., Ntegeka, V. Salamon, P. 2013. EFAS-Meteo: A European daily high-resolution gridded meteorological data set for 1990-2011. Institute for Environment and Sustainability, Technical report. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
447. Thornthwaite C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 55-94.
448. Towner, J., Cloke, H.L., Zsoter, E., Flamig, Z., Hoch, J.M., Bazo, J., De Perez, E.C., Stephens, E.M. 2019. Assessing the performance of global hydrological models for capturing peak river flows in the Amazon basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(7), 3057-3080.
449. Trenberth, K.E. 2011. Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(43497), 123-138.
450. Tsakiris, G., Nalbantis, I., Vangelis, H., Verbeiren, B., Huysmans, M., Tychon, B., Jacquemin, I., Canters, F., Vanderhaegen, S., Engelen, G., Poelmans, L., De Becker, P., Batelaan, O. 2013. A System-based Paradigm of Drought Analysis for Operational Management. *Water Resources Management*, 27(15), 5281-5297.
451. Tsakiris, G., Pangalou, D., Vangelis, H. 2007. Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resources Management*, 21(5), 821-833.
452. Tsakiris G., Vangelis H. 2005. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, 9(10), 3-11.
453. USDA-NRCS. 2000. Soil Survey Geographic (SSURGO) database for Johnson County, Iowa.
454. van Aalst, M.K. 2006. The impacts of climate change on the risk of natural disasters. *Disasters*, 30(1), 5-18.
455. Van der Knijff, J., Younis, J., de Roo, A. 2010. LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, 24, 189–212.
456. van der Schrier G., Jones P.D., Briffa K.R. 2011. The sensitivity of the PDSI to the Thornthwaite and Penman-Monteith parameterizations for potential evapotranspiration. *Journal of Geophysical Research, Atmospheres (1984–2012)*, 116(D3).
457. Van Lanen, H.A.J., Laaha, G., Kingston, D.G., Gauster, T., Ionita, M., Vidal, J.-P., Vlnas, R., Tallaksen, L.M., Stahl, K., Hannaford, J., Delus, C., Fendekova, M., Mediero, L., Prudhomme, C., Rets, E., Romanowicz, R.J., Gailliez, S., Wong, W.K., Adler, M.-J., Blauhut, V., Caillouet, L., Chelcea, S., Frolova, N., Gudmundsson, L., Hanel, M., Haslinger, K., Kireeva, M., Osuch, M., Sauquet, E., Stagge, J.H., Van Loon, A.F. 2016. Hydrology needed to manage droughts: the 2015 European case. *Hydrological Processes*, 30(17), 3097-3104.
458. Van Vliet, M., Donnelly, C., Stromback, L., Capell, R. 2015. European scale climate information services for water use sectors. *Journal of Hydrology*, 528, 503–513.
459. Vautard, R. et al. 2014. The European climate under a 2°C global warming. *Environ Res Lett.*, 9:034006.
460. Velázquez, J.A., Schmid, J., Ricard, S., Muerth, M.J., Gauvin St-Denis, B., Minville, M., Chaumont, D., Caya, D., Ludwig, R., Turcotte, R. 2013. An ensemble approach to assess hydrological models' contribution to uncertainties in the analysis of climate change impact on water resources. *Hydrol Earth Syst Sci*, 17, 565–578.
461. Vetter, T., Huang, S., Aich, V., Yang, T., Wang, X., Krysanova, V., Hattermann, F. 2015. Multi-model climate impact assessment and intercomparison for three large-scale river basins on three continents. *Earth System Dynamics*, 6(1), 17-43.
462. Vetter, T., Reinhardt, J., Flörke, M., van Griensven, A., Hattermann, F., Huang, S., Koch, H., Pechlivanidis, I.G., Plötner, S., Seidou, O., Su, B., Vervoort, R.W., Krysanova, V. 2017. Evaluation of sources of uncertainty in projected hydrological changes under climate change in 12 large-scale river basins. *Climatic Change*, 141(3), 419-433.



463. Vicente-Serrano, S.M., Lopez-Moreno, J.-I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Sanchez-Lorenzo, A., García-Ruiz, J.M., Azorin-Molina, C., Morán-Tejeda, E., Revuelto, J., Trigo, R., Coelho, F., Espejo, F. 2014. Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. *Environmental Research Letters*, 9(4).
464. Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C., Morán-Tejeda, E. 2012. Accurate computation of a streamflow drought index. *J. Hydrol. Eng.*, 17, 17(2), 318-332.
465. Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I. 2010. A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718.
466. Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I., Angulo, M., El Kenawy, A. 2010. A new global 0.5° gridded dataset (1901-2006) of a multiscale drought index: Comparison with current drought index datasets based on the palmer drought severity index. *Journal of Hydrometeorology*, 11(4), 1033-1043.
467. Vicente-Serrano, S.M. 2006. Spatial and temporal analysis of droughts in the Iberian Peninsula (1910-2000). *Hydrological Sciences Journal*, 51(1), 83-97.
468. Vicente-Serrano, S.M. 2006. Differences in spatial patterns of drought on different time scales: An analysis of the Iberian Peninsula. *Water Resources Management*, 20(1), 37-60.
469. Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Habets, F., Soubeyrou, J.-M., Blanchard, M., Baillon, M. 2010. Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(3), 459-478.
470. Villarini, G., Smith, J.A., Baeck, M.L., Krajewski, W.F. 2011. Examining Flood Frequency Distributions in the Midwest U.S.. *Journal of the American Water Resources Association*, 47(3), 447-463.
471. Villarini, G., Smith, J.A., Serinaldi, F., Ntelekos, A.A. 2011. Analyses of seasonal and annual maximum daily discharge records for central Europe. *Journal of Hydrology*, 399(43558), 299-312.
472. Villarini G., Smith J.A., Napolitano F. 2010a. Nonstationary modelling of a long record of rainfall and temperature over Rome. *Adv. Water Resour.*, 33, 1256-1267.
473. Villarini G., Vecchi, G.A., Smith, J.A. 2010b. Modeling the dependence of tropical storm counts in the North Atlantic basin on climate indices. *Mon. Weather Rev.*, 138, 2681-2705.
474. Villarini, G., Smith, J.A., Serinaldi, F., Bales, J., Bates, P.D., Krajewski, W.F. 2009. Flood frequency analysis for nonstationary annual peak records in an urban drainage basin. *Adv. Water Resour.*, 32, 1255-1266.
475. Vogel, R.M., Yaindl, C., Walter, M. 2011. Nonstationarity: Flood magnification and recurrence reduction factors in the united states. *Journal of the American Water Resources Association*, 47(3), 464-474.
476. Volodin, E.M., Dianskii, N.A., Gusev, A.V. 2010. Simulating present-day climate with the INMCM4.0 coupled model of the atmospheric and oceanic general circulations. *Atmos. Ocean. Phys.*, 46, 414-431.
477. Vörösmarty, C.J., Federer, C.A., Schloss, A.L. 1998. Potential evaporation functions compared on US watersheds: Possible implications for global-scale water balance and terrestrial ecosystem modelling. *Journal of Hydrology*, 207, 147-169.
478. Vörösmarty, C.J., McIntyre, P.B., Gessner, M.O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S.E., Sullivan, C.A., Liermann, C.R., Davies, P.M. 2010. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467(7315), 555-561.
479. Walther, G.-R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T.J.C., Fromentin, J.-M., Hoegh-Guldberg, O., Bairlein, F. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416(6879), 389-395.
480. Wang, G. 2005. Agricultural drought in a future climate: Results from 15 global climate models participating in the IPCC 4th assessment. *Climate Dynamics*, 25(43684), 739-753.
481. Wang, H.-J., Sun, J.-Q., Chen, H.-P., Zhu, Y.-L., Zhang, Y., Jiang, D.-B., Lang, X.-M., Fan, K., Yu, E.-T., Yang, S. 2012. Extreme climate in China: Facts, simulation and projection. *Meteorologische Zeitschrift*, 21(3), 279-304.





482. Wang, L., Chen, W. 2014. A CMIP5 multimodel projection of future temperature, precipitation, and climatological drought in China. *International Journal of Climatology*, 34(6), 2059-2078.
483. Watanabe, S., Hajima, T., Sudo, K., Nagashima, T., Takemura, T., Okajima, H., Nozawa, T., Kawase, H., Abe, M., Yokohata, T., Ise, T., Sato, H., Kato, E., Takata, K., Emori, S., Kawamiya, M. 2011. MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geosci. Model Dev.*, 4, 845-872.
484. Weedon, G.P., Gomes, S. et al. 2011. Creation of the watch forcing data and its use to assess global and regional reference crop evaporation over land during the twentieth century. *J Hydrometeorol*, 12, 823-848.
485. Wei, Y., Yu, H., Huang, J., Zhou, T., Zhang, M., Ren, Y. 2019. Drylands climate response to transient and stabilized 2 °C and 1.5 °C global warming targets. *Climate Dynamics*, 53(43558), 2375-2389.
486. Westra, S., Fowler, H.J., Evans, J.P., Alexander, L.V., Berg, P., Johnson, F., Kendon, E.J., Lenderink, G., Roberts, N.M. 2014. Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall. *Reviews of Geophysics*, 52(3), 522-555.
487. Wheater, H.S. 2002. Progress in and prospects for fluvial flood modelling. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 360(1796), 1409-1431.
488. Wickham, H. 2011. The split-apply-combine strategy for data analysis. *J. Stat. Softw.*, 40, 1-29.
489. Wilby, R.L., Dawson, C.W. 2013. The statistical downscaling model: Insights from one decade of application. *International Journal of Climatology*, 33(7), 1707-1719.
490. Wilby, R.L., Keenan, R. 2012. Adapting to flood risk under climate change. *Progress in Physical Geography*, 36(3), 348-378.
491. Wilby R.L., Dessai S. 2010. Robust adaptation to climate change. *Weather*, 65(7), 180-185.
492. Wilby, R.L., Wigley, T.M.L. 2000. Precipitation predictors for downscaling: observed and general circulation model relationships. *International Journal of Climatology*, 20, 641-661.
493. Wilby, R.L., Hay, L.E., Leavesley, G.H. 1999. A comparison of downscaled and raw GCM output: implications for climate change scenarios in the San Juan River basin, Colorado. *Journal of Hydrology*, 225, 67-91.
494. Wilby, R.L., Wigley, T.M.L. 1997. Downscaling general circulation model: a review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography*, 21, 530-548.
495. Wilhite, D.A., Sivakumar, M.V.K., Pulwarty, R. 2014. Managing drought risk in a changing climate: The role of national drought policy. *Weather and Climate Extremes*, 3, 4-13.
496. Wilks D.S. 2011. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 3rd ed. International Geophysics, 100, 2-676, Elsevier Inc., Academic Press, Oxford, UK.
497. Wilks D.S. 1992. Adapting stochastic weather generation algorithms for climate change studies. *Climatic Change*, 22, 67-84.
498. Williams, A.P., Seager, R., Abatzoglou, J.T., Cook, B.I., Smerdon, J.E., Cook, E.R. 2015. Contribution of anthropogenic warming to California drought during 2012-2014. *Geophysical Research Letters*, 42(16), 6819-6828.
499. Wobus, C., Zheng, P., Stein, J., Lay, C., Mahoney, H., Lorie, M., Mills, D., Spies, R., Szafranski, B., Martinich, J. 2019. Projecting Changes in Expected Annual Damages From Riverine Flooding in the United States. *Earth's Future*, 7(5), 516-527.
500. World Meteorological Organization (WMO); Global Water Partnership (GWP) 2016. *Handbook of Drought Indicators and Indices; Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2*; Svoboda M., Fuchs B.A., Eds. WMO, Geneva, Switzerland, 1-52.
501. World Meteorological Organization (WMO) 2012. *Standardized Precipitation Index. User Guide*. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 1-24.
502. Wood, A.W., Leung, L.R., Sridhar, V., Lettenmaier, D.P. 2004. Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. *Climatic Change*, 62, 189-216.





503. Wösten, J., Lilly, A., Le Bas, C. 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, 90, 169–185.
504. Wurbs, R.A., Muttiah, R.S., Felden, F. 2005. Incorporation of climate change in water availability modeling. *Journal of Hydrologic Engineering*, 10(5), 375-385.
505. Xu, Y., Yang, Z.L. 2012. A method to study the impact of climate change on variability of river flow: an example from the Guadalupe River in Texas. *Climate Changr*, 113, 965–979.
506. Xu, C.-Y., Singh, V.P. 2004. Review on regional water resources assessment models under stationary and changing climate. *Water Resources Management*, 18(6), 591-612.
507. Xu, C.-Y. 2000. Modelling the effects of climate change on water resources in central Sweden. *Water Resources Management*, 14(3), 177-189.
508. Xu, C.-Y. 1999. Climate change and hydrologic models: A review of existing gaps and recent research developments. *Water Resources Management*, 13(5), 369-382.
509. Yao, H., Georgakakos, A. 2001. Assessment of folsom lake response to historical and potential future climate scenarios 2. Reservoir management. *Journal of Hydrology*, 249(43556), 176-196.
510. Yevjevich, V. 1967. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. *Hydrology Paper 23*, Colorado State University, Fort Collins, USA.
511. Yukimoto, S., Yoshimura, H., Hosaka, M., Sakami, T., Tsujino, H., Hirabara, M., Tanaka, T.Y., Deushi, M., Obata, A., Nakano, H., Adachi, Y., Shindo, E., Yabu, S., Ose, T., Kitoh, A. 2011. Meteorological Research Institute-Earth System Model Version 1 (MRI-ESM1) — Model Description —. Technical Reports of the Meteorological Research Institute N°64. Japan.
512. Zeng, Q., Chen, H., Xu, C.-Y., Jie, M.-X., Hou, Y.-K. 2016. Feasibility and uncertainty of using conceptual rainfallrunoff models in design flood estimation. *Hydrology Research*, 47(4), 701-717.
513. Zhang, Q., Xu, C.-Y., Tao, H., Jiang, T., Chen, Y.D. 2010. Climate changes and their impacts on water resources in the arid regions: A case study of the Tarim River basin, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 24(3), 349-358.
514. Zhang, Q., Xu, C.-Y., Zhang, Z. 2009. Observed changes of drought/wetness episodes in the Pearl River basin, China, using the standardized precipitation index and aridity index. *Theoretical and Applied Climatology*, 98(43497), 89-99.
515. Zheng, C., Wang, P.P. 1999. MT3DMS: a modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; documentation and user's guide. SERDP-99-1, Washington, DC, US Army Corps of Engineers.
516. Zorita, E., von Storch, H. 1999. The analog method as a simple statistical downscaling technique: Comparison with more complicated methods. *Journal of Climate*, 12, 2474–2489.



FUNDACIÓN CANAL  
Canal de Isabel II



[fundacioncanal.com](http://fundacioncanal.com)

Mateo Inurria, 2. 28036 Madrid