



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

INFORME TÉCNICO
para

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente
Secretaría de Estado de Medio Ambiente
Dirección General del Agua

**ESTUDIO DE LOS IMPACTOS DEL CAMBIO
CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS
Y LAS MASAS DE AGUA**

INFORME FINAL

TOMO ÚNICO

Clave CEDEX: 40-407-1-001

Madrid, diciembre de 2012

Centro de Estudios Hidrográficos



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE AGRICULTURA,
ALIMENTACIÓN Y
MEDIO AMBIENTE

CEDEX

CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

INFORME TÉCNICO

para

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

Secretaría de Estado de Medio Ambiente

Dirección General del Agua

ESTUDIO DE LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS Y LAS MASAS DE AGUA

INFORME FINAL

TOMO ÚNICO

Clave CEDEX: 40-407-1-001

Madrid, diciembre de 2012

Centro de Estudios Hidrográficos



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE AGRICULTURA,
ALIMENTACIÓN Y
MEDIO AMBIENTE

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

TÍTULO:

ESTUDIO DE LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS Y LAS MASAS DE AGUA

INFORME FINAL

CLIENTE:

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

Secretaría de Estado de Medio Ambiente

Dirección General del Agua

EL PRESENTE INFORME CONSTITUYE UN DOCUMENTO OFICIAL DE ESTE TRABAJO Y, DE ACUERDO CON LAS NORMAS GENERALES DEL ORGANISMO, SU ENTREGA SUPONE EL CUMPLIMIENTO DE LAS ACTUACIONES TÉCNICAS DEL MISMO REFERENTES A LA MATERIA OBJETO DEL INFORME.

VALIDEZ OFICIAL

VISTO EL CONTENIDO DEL INFORME Y SIENDO ACORDE CON LAS CLÁUSULAS DEL CONVENIO DE COLABORACIÓN CORRESPONDIENTE, SE PROPONE AUTORIZAR SU EMISIÓN.

EL DIRECTOR DEL CENTRO DE ESTUDIOS HIDROGRÁFICOS

Fdo. Federico Estrada Lorenzo

AUTORIZA LA EMISIÓN DEL INFORME:

Madrid, a 28 de diciembre de 2012

EL DIRECTOR DEL CEDEX



Fdo. Mariano Navas Gutiérrez

SOLO SON INFORMES OFICIALES DEL CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS (CEDEX) LOS REFRENDADOS POR SU DIRECCIÓN

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	SEGUIMIENTO DE LOS TRABAJOS	2
3	TRABAJOS REALIZADOS	4
3.1	INFORMES EMITIDOS	4
3.2	SÍNTESIS DE LA ACTIVIDAD 1 “EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS EN RÉGIMEN NATURAL”	5
3.2.1	<i>Introducción</i>	5
3.2.2	<i>Objetivos y alcance</i>	5
3.2.3	<i>Datos e hipótesis de partida</i>	5
3.2.4	<i>Resultados</i>	6
3.2.4.1	Precipitación	6
3.2.4.2	Evapotranspiración	8
3.2.4.3	Recarga subterránea	8
3.2.4.4	Escorrentía	9
3.2.5	<i>Recomendaciones metodológicas para futuros estudios</i>	14
3.3	SÍNTESIS DE LA ACTIVIDAD 2 “EFECTOS POTENCIALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS DEMANDAS DE AGUA Y ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN”	14
3.3.1	<i>Introducción</i>	14
3.3.2	<i>Objetivos y alcance</i>	14
3.3.3	<i>Datos e hipótesis de partida</i>	15
3.3.4	<i>Métodos de trabajo</i>	15
3.3.5	<i>Resultados</i>	15
3.3.5.1	Demandas domésticas y de parques y jardines municipales	16
3.3.5.2	Demandas de regadíos	16
3.3.6	<i>Recomendaciones metodológicas para futuros estudios</i>	17
3.4	SÍNTESIS DE LA ACTIVIDAD 3 “EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DISPONIBLES EN LOS SISTEMAS DE EXPLOTACIÓN”	18
3.4.1	<i>Introducción</i>	18
3.4.2	<i>Objetivo y ámbito</i>	18
3.4.3	<i>Metodología</i>	18
3.4.3.1	Configuración de los sistemas de explotación	19
3.4.3.1.1	Ríos	19
3.4.3.1.2	Embalses	19
3.4.3.1.3	Aportaciones	20
3.4.3.1.4	Demandas	21
3.4.3.1.5	Conducciones	22
3.4.3.1.6	Restricciones previas	22
3.4.3.2	Modelo de optimización	23
3.4.3.3	Cálculo del recurso disponible	23
3.4.4	<i>Resultados</i>	24
3.4.5	<i>Conclusiones</i>	27
3.4.5.1	Período de control	27
3.4.5.2	Evolución del recurso disponible a lo largo del tiempo	28
3.5	SÍNTESIS DE LA ACTIVIDAD 4 “EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ESTADO ECOLÓGICO DE LAS MASAS DE AGUA”	29
3.5.1	<i>Antecedentes</i>	29
3.5.2	<i>Objeto del estudio y alcance</i>	29
3.5.3	<i>Metodología</i>	30
3.5.4	<i>Resultados</i>	33
3.5.4.1	Óptimos ecológicos para las familias de macroinvertebrados bentónicos	33
3.5.4.2	Modelos de transferencia de temperatura aire/agua	38
3.5.4.3	Modelos predictivos de distribución de taxones	40



CEDEX

3.5.4.4	Efecto del cambio climático en las tipologías.....	41
3.5.5	Recomendaciones.....	42
4	EQUIPO DE TRABAJO.....	44
	REFERENCIAS.....	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de la precipitación anual en España según las distintas proyecciones. Periodo de control (verde); escenario de emisiones A2 (rojo); B2 (azul). Promedios de las proyecciones en trazo grueso.	7
Figura 2. Variación de la precipitación (%) 2011-2040 respecto al periodo de control para el promedio de las proyecciones del escenario A2.	7
Figura 3. Variación de la evapotranspiración (%) en el período 2011-2040 respecto al periodo de control como promedio de las proyecciones A2.	8
Figura 4. Evolución de la escorrentía anual en España para el conjunto de proyecciones. Periodo de control (verde); escenario de emisiones A2 (rojo); B2 (azul). Promedios del conjunto de proyecciones en trazo grueso.	9
Figura 5. Variación del promedio de la escorrentía (%) para el período 2011-2040 respecto al periodo de control para las proyecciones A2.	10
Figura 6. Variación del promedio de la escorrentía (%) para el período 2011-2040 respecto al periodo de control para las proyecciones B2.	10
Figura 7. Variación del promedio de la escorrentía (%) para el período 2071-2100 respecto al periodo de control para las proyecciones A2.	11
Figura 8. Variación del promedio de la escorrentía (%) para el período 2071-2100 respecto al periodo de control para las proyecciones B2.	11
Figura 9. Metodología general del trabajo.	31
Figura 10. Distribución de las estaciones de la red biológica y de afloros en la cuenca del Júcar.	32
Figura 11. Definición y representación gráfica de las cuatro zonas diferenciadas en las que se clasifican los individuos de cada familia de macroinvertebrados según el método de la media ponderada (izquierda) o del óptimo robusto (derecha).	34
Figura 12. Resultados de la aplicación del método del Óptimo Robusto. Se representa para cada familia seleccionada en el estudio el porcentaje de individuos que han experimentado algún cambio como resultado de la simulación de los diferentes incrementos de temperatura del agua (0,5, 1,0, 1,5 y 2,0 °C).	35
Figura 13. Comparación entre el porcentaje de individuos con cambios de las familias mejor indicadoras, resultante de la aplicación de los métodos WA y RO para incrementos de temperatura del agua de 0,5 (a), 1,0 (b), 1,5 (c) y 2,0 °C (d). Los círculos señalan aquellas familias identificadas como potenciales indicadoras del calentamiento global utilizando el método RO pero no cuando se utiliza el método WA. La línea negra correspondiente al valor 75% del eje de ordenadas marca el umbral del porcentaje de individuos con cambio que una familia debe sobrepasar para constituir un buen indicador.	36
Figura 14. Estimaciones del óptimo ecológico, rango óptimo y rango de tolerancia para la temperatura del agua (sin incrementos) mediante los métodos WA (izquierda de cada subfigura) y RO (derecha de cada subfigura) para el grupo de familias descritas como indicadoras de calentamiento en al menos uno de los incrementos de temperatura simulados.	37
Figura 15. Gráficas de validación para la estación SAICA 810.	39
Figura 16. Esquema del estudio del efecto del cambio climático en las comunidades de macroinvertebrados en los ecosistemas fluviales mediante modelos predictivos.	40



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Actividades y tareas previstas en la encomienda de gestión para el “Estudio del cambio climático en los recursos hídricos y masas de agua”	1
Tabla 2. Actividades y tareas previstas en la encomienda de gestión para el “Estudio del cambio climático en los recursos hídricos y masas de agua” tras la modificación acordada por la Comisión de Seguimiento en su reunión de 14 de julio de 2008.	3
Tabla 3. Variación de la escurrentía (%) por demarcación hidrográfica en los distintos periodos respecto al periodo de control 1961-1990.....	13
Tabla 4. Proyecciones climáticas para las que se han calculado las series mensuales de aportación en régimen natural a incluir en el sistema de explotación de cada demarcación (las series de los dos escenarios coinciden en el periodo de control).....	21
Tabla 5. Variación del recurso disponible (%) por demarcación hidrográfica y de toda España en los diferentes periodos de estudio respecto al periodo de control 1961-1990. Demanda uniforme (verde>0%; amarillo 0% a -20%; rojo < -20%).....	24
Tabla 6. Variación del recurso disponible (%) por demarcación hidrográfica y de toda España en los diferentes periodos de estudio respecto al periodo de control 1961-1990. Demanda variable (verde>0%; amarillo 0% a -20%; rojo < -20%).....	25
Tabla 7. Regresiones lineales a escala mensual de temperaturas aire/agua en cada uno de las tipologías de ríos en los que se dispone de un registro de datos.	38
Tabla 8. Número y porcentaje de masas de agua que no cumplen los rangos establecidos para las variables “Temperatura media anual”, “Amplitud térmica media” y “Caudal medio anual” establecidos para cada una de las tipologías.	41

1 INTRODUCCIÓN

El 23 de abril de 2007 fue firmado el Acuerdo de encomienda de gestión por la Dirección General del Agua del entonces Ministerio de Medio Ambiente al Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) del Ministerio de Fomento para el “Estudio de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos y masas de agua”, publicado mediante Resolución de 3 de agosto de 2007 (BOE 192, 11 de agosto de 2007).

El plazo previsto para la realización de las distintas tareas de la encomienda era de 40 meses, si bien los trabajos no se han finalizado totalmente hasta diciembre de 2012.

El contenido de la encomienda se estructuró en cuatro actividades cuyos títulos y desglose en tareas se indican en la tabla adjunta (Tabla 1). El contenido concreto de cada una de las actividades puede consultarse en el texto del Acuerdo.

Tabla 1. Actividades y tareas previstas en la encomienda de gestión para el “Estudio del cambio climático en los recursos hídricos y masas de agua”.

ACTIVIDAD	TÍTULO
1	Efecto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural
1.1	Definición de las condiciones de referencia equivalentes a las condiciones hidrológicas del siglo XX
1.2	Tratamiento de la fase atmosférica según los escenarios climáticos regionales facilitados por la OECC para su implementación en el modelo hidrológico
1.3	Implementación del modelo hidrológico y valoración del impacto de los distintos escenarios
1.4	Conclusiones y elaboración base de datos cartográfica con los resultados de la simulación bajo los distintos escenarios considerados
1.5	Aproximación al tratamiento de los sucesos hidrológicos extremos
2	Efectos potenciales del cambio climático en las demandas de agua y estrategias de adaptación
2.1	Evaluación de los efectos potenciales del cambio climático sobre las demandas de abastecimiento
2.2	Evaluación de los efectos potenciales del cambio climático sobre las demandas industriales
2.3	Evaluación de los efectos potenciales del cambio climático sobre las demandas de riego
2.4	Estrategias de adaptación al cambio climático
2.5	Conclusiones y aplicación de usuario
3	Efecto del cambio climático en los recursos hídricos disponibles en los sistemas de explotación
3.1	Actualización del esquema del sistema unificado de explotación de recursos hídricos
3.2	Incorporación de series de aportaciones en régimen natural afectadas por el cambio climático
3.3	Evaluación de recursos disponibles
3.4	Análisis con diferentes modulaciones temporales de la demanda
3.5	Conclusiones y aplicación de usuario
4	Efecto del cambio climático en el estado ecológico de las masas de agua
4.1	Simulación de la respuesta de las distintas comunidades biológicas específicas de cada tipo en los diferentes escenarios de cambio climático
4.2	Análisis de la sensibilidad de los sistemas actuales de indicadores biológicos y sus diferentes métricas implantados en las redes de seguimiento ante los efectos del cambio climático



ACTIVIDAD	TÍTULO
4.3	Propuesta de los sistemas de indicadores del estado ecológico (físico-químicos, hidromorfológicos y biológicos) más adecuados por su sensibilidad al cambio climático para cada tipología
4.4	Redefinición de las condiciones de referencia de cada tipo ecológico y reajuste de los valores del EQR de cada indicador para cada límite de clases de estado ecológico, en los distintos escenarios de cambio climático

El presente documento corresponde al Informe final de la encomienda cuya realización prevé el Acuerdo, una vez concluida la totalidad de los trabajos, con objeto de recoger una síntesis de los distintos estudios elaborados.

2 SEGUIMIENTO DE LOS TRABAJOS

De acuerdo con lo estipulado en la cláusula 7 del Acuerdo de encomienda de gestión, al inicio de los trabajos se constituyó una Comisión de Seguimiento, formada por dos representantes de la Dirección General del Agua y dos representantes de CEDEX, con los siguientes cometidos:

- Fijar el Plan anual de actividades
- Realizar el seguimiento del desarrollo de los trabajos
- Conocer y valorar el estado de avance de los trabajos
- Informar las valoraciones previas a su pago
- Proponer las modificaciones de la planificación, así como de los trabajos que procedan, de acuerdo con las necesidades y prioridades de la Dirección General del Agua y las capacidades del CEDEX
- Interpretar, en caso de duda, el contenido del Acuerdo.

La Comisión de Seguimiento se reunió por primera vez el 10 de octubre de 2007, estando formada por los siguientes representantes de cada parte:

- Por parte del CEDEX:
 - Director del Centro de Estudios Hidrográficos
 - Jefe del Área de Gestión Sostenible del Agua y Territorio (posteriormente sustituido por el Director de Estudios de Agua y Medio Ambiente).
- Por parte de la Dirección General del Agua, y tal como se establece en el Acuerdo:
 - Subdirector General de Planificación y Uso Sostenible del Agua
 - Subdirector General Adjunto de Planificación y Uso Sostenible del Agua

En virtud de lo establecido en la cláusula 7, se decidió sustituir a éste último por la Subdirectora General de Estrategias de Adaptación y Mitigación, en representación de la Oficina Española de Cambio Climático.

Las personas concretas que integraron la Comisión fueron variando a lo largo del desarrollo de la Encomienda en consonancia con los cambios que se produjeron en los titulares de los puestos de trabajo indicados.

En esta primera reunión se aprobó el reglamento interno de funcionamiento de la Comisión, tal como se establece en la cláusula 7 del Acuerdo.

La citada Comisión se reunió de manera periódica a lo largo del desarrollo de la Encomienda. Entre los acuerdos más significativos adoptados por la Comisión cabe citar los siguientes:

- Modificar algunas tareas de la Encomienda tal y como se indica a continuación y en la Tabla 2 (acuerdo adoptado en la reunión de la Comisión de Seguimiento de 14 de julio de 2008):
 - Modificar la tarea “Conclusiones y elaboración base de datos cartográfica con los resultados de la simulación bajo los distintos escenarios considerados” de la actividad 1 pasando a denominarse “Conclusiones, elaboración de una base de datos cartográfica con los resultados de la simulación bajo los distintos escenarios considerados y de una aplicación de usuario”.
 - Modificar la tarea “Conclusiones y aplicación de usuario” de la actividad 2 pasando a denominarse “Conclusiones”.
 - Modificar la tarea “Conclusiones y aplicación de usuario” de la actividad 3 pasando a denominarse “Conclusiones”.
 - Suspender la tarea “Evaluación de los efectos potenciales del cambio climático sobre las demandas industriales” de la actividad 2.
 - Acotar el alcance de la actividad 4 de tal forma que todos los trabajos de la citada actividad se refieran únicamente a la cuenca del Júcar.
- Establecer una prórroga de 4 meses, ampliando el plazo para la ejecución de los trabajos hasta diciembre de 2010 (acuerdo adoptado en la reunión de la Comisión de Seguimiento de fecha 17 de mayo de 2010).
- Establecer una nueva prórroga de 6 meses, adicional a la acordada anteriormente (acuerdo adoptado en la reunión de la Comisión de Seguimiento de fecha 22 de noviembre de 2010).

Tabla 2. Actividades y tareas previstas en la encomienda de gestión para el “Estudio del cambio climático en los recursos hídricos y masas de agua” tras la modificación acordada por la Comisión de Seguimiento en su reunión de 14 de julio de 2008.

ACTIVIDAD	TÍTULO
1	Efecto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural
1.1	Definición de las condiciones de referencia equivalentes a las condiciones hidrológicas del siglo XX
1.2	Tratamiento de la fase atmosférica según los escenarios climáticos regionales facilitados por la OECC para su implementación en el modelo hidrológico
1.3	Implementación del modelo hidrológico y valoración del impacto de los distintos escenarios
1.4	Conclusiones y elaboración base de datos cartográfica con los resultados de la simulación bajo los distintos escenarios considerados y de una aplicación de usuario
1.5	Aproximación al tratamiento de los sucesos hidrológicos extremos
2	Efectos potenciales del cambio climático en las demandas de agua y estrategias de adaptación
2.1	Evaluación de los efectos potenciales del cambio climático sobre las demandas de abastecimiento
2.2	Evaluación de los efectos potenciales del cambio climático sobre las demandas industriales
2.3	Evaluación de los efectos potenciales del cambio climático sobre las demandas de riego
2.4	Estrategias de adaptación al cambio climático



ACTIVIDAD	TÍTULO
2.5	Conclusiones
3	Efecto del cambio climático en los recursos hídricos disponibles en los sistemas de explotación
3.1	Actualización del esquema del sistema unificado de explotación de recursos hídricos
3.2	Incorporación de series de aportaciones en régimen natural afectadas por el cambio climático
3.3	Evaluación de recursos disponibles
3.4	Análisis con diferentes modulaciones temporales de la demanda
3.5	Conclusiones
4	Efecto del cambio climático en el estado ecológico de las masas de agua
4.1	Simulación de la respuesta de las distintas comunidades biológicas específicas de cada tipo en los diferentes escenarios de cambio climático
4.2	Análisis de la sensibilidad de los sistemas actuales de indicadores biológicos y sus diferentes métricas implantados en las redes de seguimiento ante los efectos del cambio climático
4.3	Propuesta de los sistemas de indicadores del estado ecológico (físico-químicos, hidromorfológicos y biológicos) más adecuados por su sensibilidad al cambio climático para cada tipología
4.4	Redefinición de las condiciones de referencia de cada tipo ecológico y reajuste de los valores del EQR de cada indicador para cada límite de clases de estado ecológico, en los distintos escenarios de cambio climático

3 TRABAJOS REALIZADOS

3.1 INFORMES EMITIDOS

Se han realizado la totalidad de los trabajos previstos en las cuatro actividades incluidas en la encomienda de gestión para el “Estudio de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos y masas de agua”, con las modificaciones acordadas por la Comisión de Seguimiento expuestas en el apartado anterior.

Como resultado de estos trabajos se han emitido, además del presente informe de síntesis, los siguientes seis informes técnicos:

- Efecto del cambio climático en los recursos hídricos disponibles en los sistemas de explotación. Actualización del sistema unificado de explotación de recursos hídricos. Conclusiones. Avance. Tomo único. Enero de 2009. Clave: 43-308-5-001.
- Ficha 1: Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural. Informe. Tomo único. Diciembre de 2010. Clave: 42-407-1-001.
- Efecto del cambio climático en el estado ecológico de las masas de agua. Informe. Tomo único. Junio de 2012. Clave: 44-407-1-001.
- Efectos potenciales del cambio climático en las demandas de agua y estrategias de adaptación. Informe. Tomo único. Noviembre de 2012. Clave: 45-407-1-001.
- Efecto del cambio climático en los recursos hídricos disponibles en los sistemas de explotación. Informe. Tomo único. Diciembre de 2012. Clave: 43-308-5-001.
- Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural. Aplicación informática para la visualización cartográfica de los resultados. Informe. Tomo único. Diciembre de 2012. Clave: 42-407-1-001.

Los seis informes anteriores se incluyen en formato digital en el CD que acompaña a este documento.

Como resumen de los trabajos realizados y resultados obtenidos en cada una de las actividades que conforman la encomienda, se incluye a continuación una síntesis basada en el resumen ejecutivo elaborado para cada una de ellas.

3.2 SÍNTESIS DE LA ACTIVIDAD 1 “EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS EN RÉGIMEN NATURAL”

3.2.1 Introducción

1. El agua es un recurso económico, ambiental, cultural y de bienestar social limitado. Por ello, la sociedad muestra un constante interés por el agua. A las incertidumbres sobre su disponibilidad y calidad se añaden actualmente las derivadas del impacto del cambio climático.
2. Según las previsiones del cambio climático realizadas hasta la fecha en España, el impacto sobre el agua es de carácter negativo: reducción de los recursos hídricos y aumento de la magnitud y frecuencia de fenómenos extremos como inundaciones y sequías.
3. El Libro blanco del agua en España (MIMAM, 2000a), expone que el cambio climático produciría, en el escenario menos pesimista, una disminución del 5% en las aportaciones totales en régimen natural en España, siendo el impacto más severo en el sureste peninsular, la cuenca del Guadiana, el valle del Ebro y la España insular. Esta disminución vendría acompañada de una mayor variabilidad anual, interanual y estacional.

3.2.2 Objetivos y alcance

4. El objetivo de este trabajo es el análisis del efecto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural en España.
5. Quedan fuera del alcance de este estudio los aspectos relacionados con medidas correctoras de estos impactos.
6. Los recursos hídricos en régimen natural son los correspondientes a un ciclo hidrológico en el que no se ha realizado ninguna alteración humana, ni en la cantidad ni en la secuencia temporal de los procesos hidrológicos. Las alteraciones posibles son muy variadas: tomas de agua de un río, extracciones de acuíferos, regulación en embalses, trasvases, etc.
7. El régimen natural solamente existe en pequeñas cuencas de cabecera, alejadas de las fuentes de alteración humana y de los usos del agua, pero es un concepto útil en planificación hidrológica. Los recursos hídricos en régimen natural son un elemento clave en los sistemas de explotación, junto con las demandas, las infraestructuras hidráulicas, los acuíferos, las reglas de gestión, las restricciones medioambientales, etc.

3.2.3 Datos e hipótesis de partida

8. El punto de partida de este trabajo han sido los escenarios climáticos regionalizados, denominados proyecciones en este informe, elaborados por la Agencia Estatal de Meteorología. 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, para distintos supuestos de emisión de gases de



efecto invernadero, a los que se aplica posteriormente un proceso de adaptación regional para mejorar su precisión a escala local (técnicas de regionalización). Para este estudio, la Agencia ha seleccionado doce de estas proyecciones, representativas de la variabilidad del conjunto de proyecciones, obtenidas como combinación de seis modelos regionalizados y dos escenarios de emisión.

9. Los escenarios de emisión elegidos (A2 y B2) forman parte del conjunto de escenarios de emisión de gases de efecto invernadero establecidos en el año 2000 por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (conocido por sus siglas inglesas, IPCC). Cada uno de ellos refleja un grado diferente de evolución de diversos factores socioeconómicos. Estos dos escenarios, seleccionados por la Agencia Estatal de Meteorología, abarcan un amplio margen de variación, por lo que se consideran suficientemente representativos del conjunto de escenarios.
10. 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.
11. Las fases del ciclo hidrológico se han simulado utilizando un modelo de recursos hídricos desarrollado por el CEDEX bajo las condiciones impuestas por las proyecciones de precipitación y temperatura seleccionadas. La escala de trabajo ha sido mensual y los principales resultados se refieren a la evapotranspiración, a la recarga de los acuíferos y a la escorrentía total, suma de la superficial y de la subterránea. La escorrentía de cada celda del territorio se ha acumulado en la red de drenaje para dar valores de aportación
12. Se ha adoptado un procedimiento directo de análisis basado en obtener desviaciones porcentuales entre los resultados de cada periodo del siglo XXI (punto 10) y el periodo de control, asumiendo que el clima se hubiera comportado según los datos de las proyecciones durante dicho periodo de control.

3.2.4 Resultados

13. La comparación de las proyecciones y los datos observados en el período de control revela importantes diferencias en cuanto a escala, variabilidad y evolución estacional, especialmente en el caso de la precipitación.

3.2.4.1 Precipitación

14. Las proyecciones pronostican una reducción generalizada de la precipitación conforme avanza el siglo XXI, por lo que se reducirían las disponibilidades de agua.
15. El conjunto de proyecciones del escenario de emisiones A2 supone decrementos de precipitación media en España en el entorno del -5%, -9% y -17% durante los periodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100 respectivamente (Figura 1).
16. Se obtienen cifras similares en el 1^{er} periodo del escenario B2 y un ligero incremento en el 2^o periodo con una disminución de lluvia del -8%. Sin embargo, esta tendencia se suaviza en el 3^{er} periodo llegando a una disminución del -9% (Figura 1).

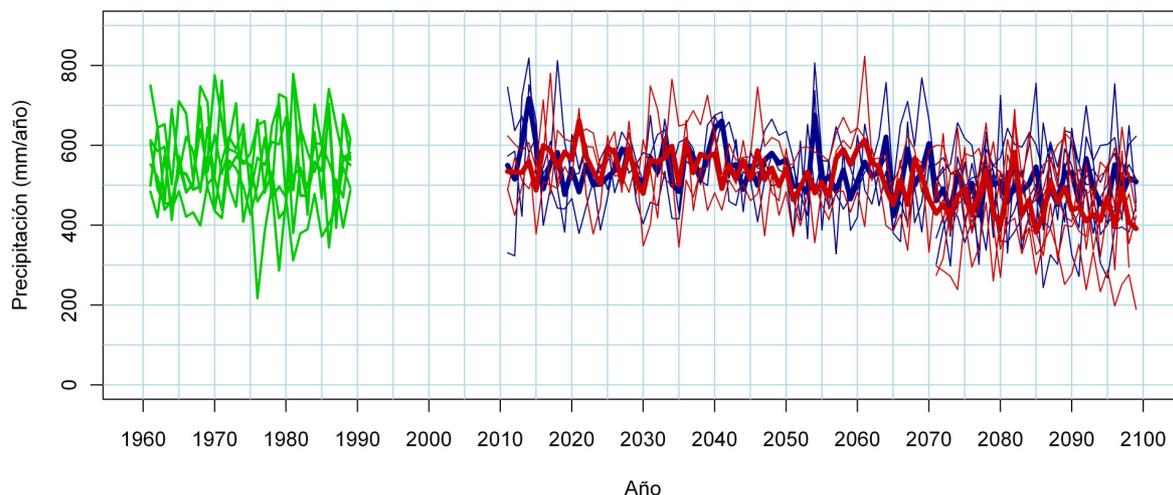


Figura 1. Evolución de la precipitación anual en España según las distintas proyecciones. Periodo de control (verde); escenario de emisiones A2 (rojo); B2 (azul). Promedios de las proyecciones en trazo grueso.

17. Existen diferencias regionales entre zonas de costa e interior y entre zonas con mayor o menor influencia mediterránea o atlántica (Figura 2).

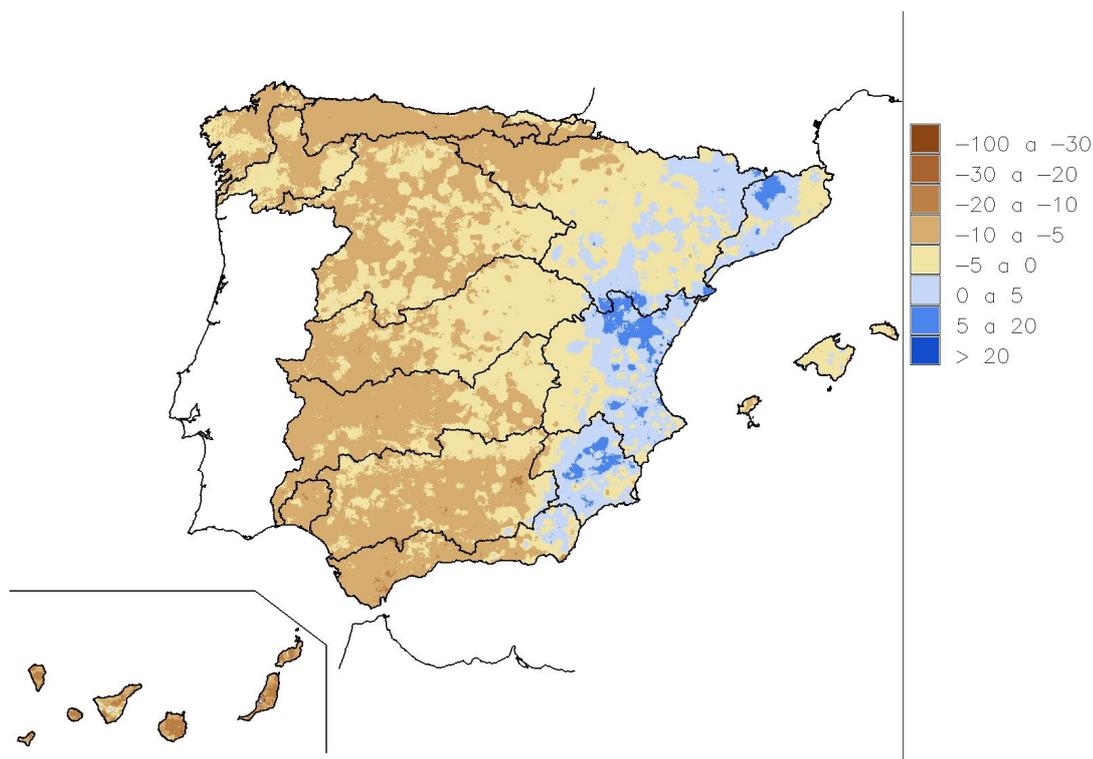


Figura 2. Variación de la precipitación (%) 2011-2040 respecto al periodo de control para el promedio de las proyecciones del escenario A2.

18. El mapa de la Figura 2 muestra que en la zona oriental de la Península se prevén menores disminuciones e incluso algún aumento para el periodo y el escenario considerados.

19. El análisis realizado sobre las precipitaciones máximas diarias, directamente relacionadas con la ocurrencia de inundaciones, revela importantes incertidumbres derivadas de las diferencias de resultados entre proyecciones. Debido principalmente a la tendencia decreciente de la lluvia total anual, se aprecia un aumento de la proporción de la precipitación máxima diaria respecto a la lluvia total anual en un número considerable de regiones de España.

3.2.4.2 Evapotranspiración

20. Se prevé un aumento de temperatura y, por tanto, de evaporación y transpiración por las plantas (evapotranspiración). Sin embargo, el efecto de este aumento en el ciclo hidrológico es menor por concentrarse en verano durante el cual el suelo tiene un reducido contenido de agua.

21. Las variaciones de valores medios de evapotranspiración se han estimado en el -3% para 2011-2040, -6% para 2041-2070 y -12% para 2071-2100 en el escenario A2. Para el escenario B2 son del -5%, -6% y -7% respectivamente.

22. La Figura 3 muestra, para el caso del escenario A2, las diferencias regionales en la variación de la evapotranspiración en el período 2011-2040 respecto al período de control.

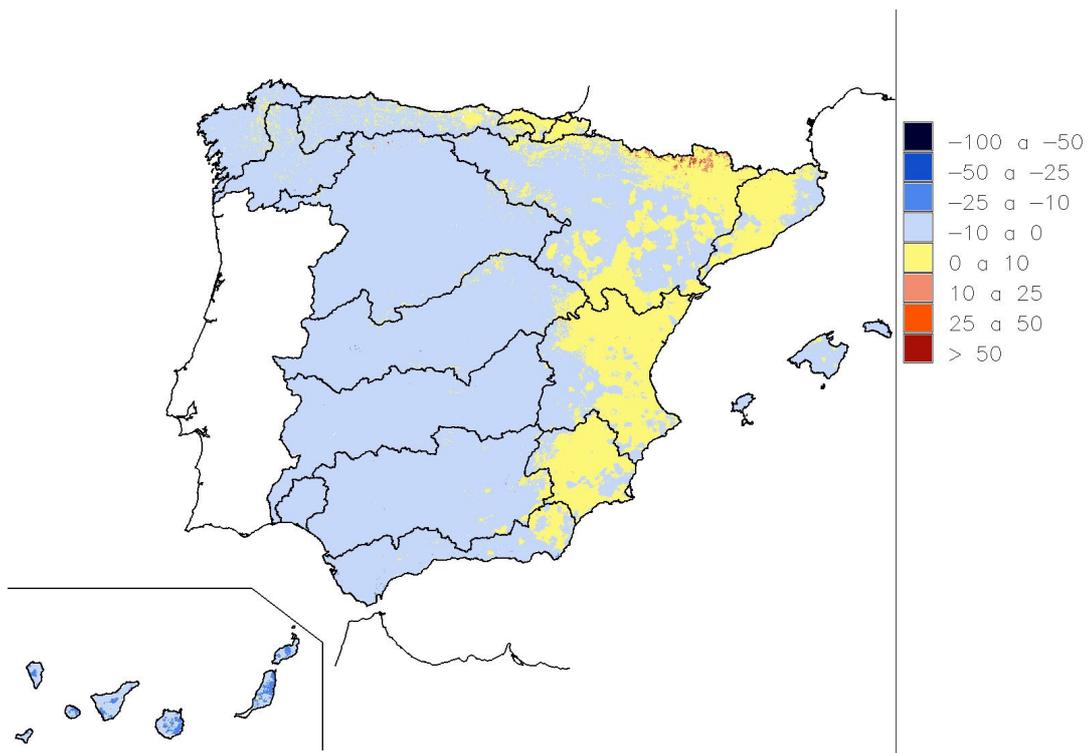


Figura 3. Variación de la evapotranspiración (%) en el período 2011-2040 respecto al período de control como promedio de las proyecciones A2.

3.2.4.3 Recarga subterránea

23. Aunque la estimación de la recarga subterránea está sujeta a grandes incertidumbres, los valores medios estimados pronostican una disminución generalizada en España conforme

se reduce la lluvia, siendo menos vulnerables las áreas silíceas que las calcáreas y detríticas.

24. Las proyecciones para el escenario A2 muestran unas desviaciones de los valores medios del -8% para 2011-2040, -15% para 2041-2070 y -27% para 2071-2100. En el escenario B2 las desviaciones son del -8%, -12% y -16% respectivamente.

3.2.4.4 Escorrentía

25. Se prevé una disminución de la escorrentía acorde a las tendencias de temperatura y precipitación. Las proyecciones del escenario A2 dan lugar a unas reducciones de escorrentía en España del -8% para el periodo 2011-2040, -16% para el 2041-2070 y -28% para el 2071-2100. Las reducciones en el escenario B2 son del -8%, -11% y del -14%, respectivamente (Figura 4).

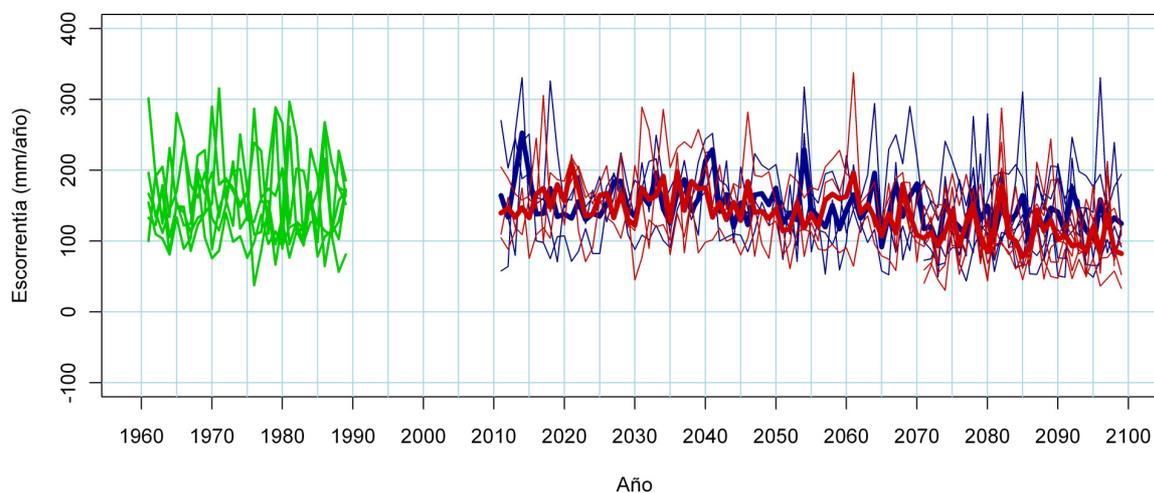


Figura 4. Evolución de la escorrentía anual en España para el conjunto de proyecciones. Periodo de control (verde); escenario de emisiones A2 (rojo); B2 (azul). Promedios del conjunto de proyecciones en trazo grueso.

26. La disminución de la escorrentía varía también regionalmente según muestran los mapas de las Figuras 5 a 8.

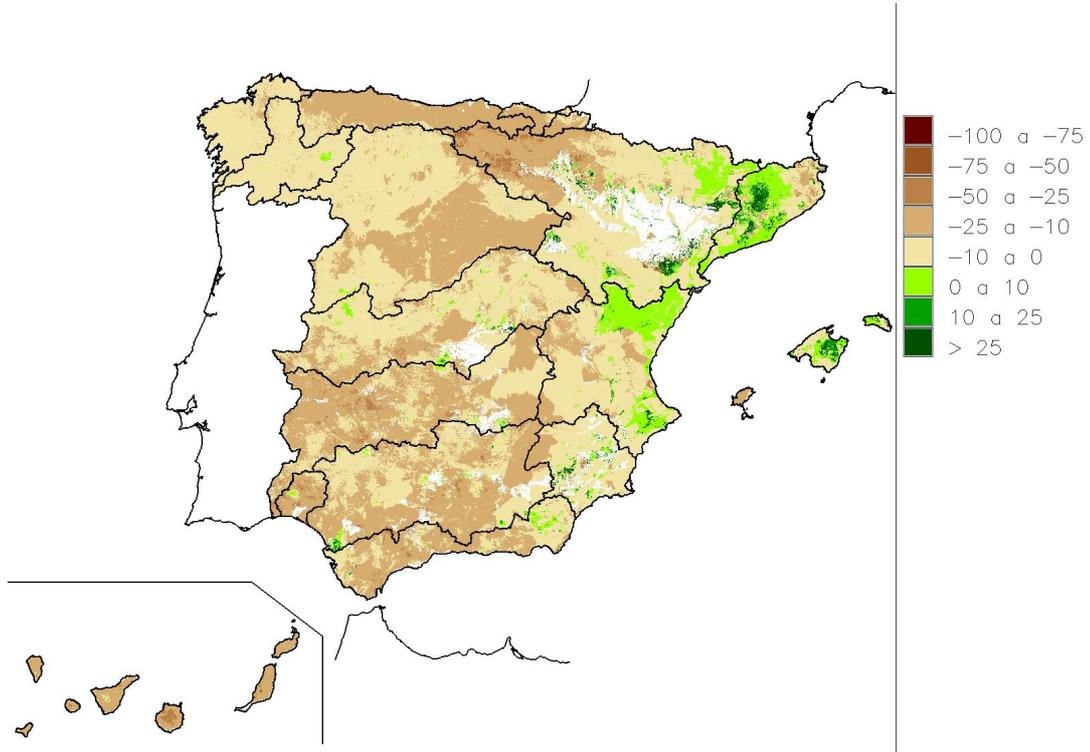


Figura 5. Variación del promedio de la escorrentía (%) para el período 2011-2040 respecto al periodo de control para las proyecciones A2.

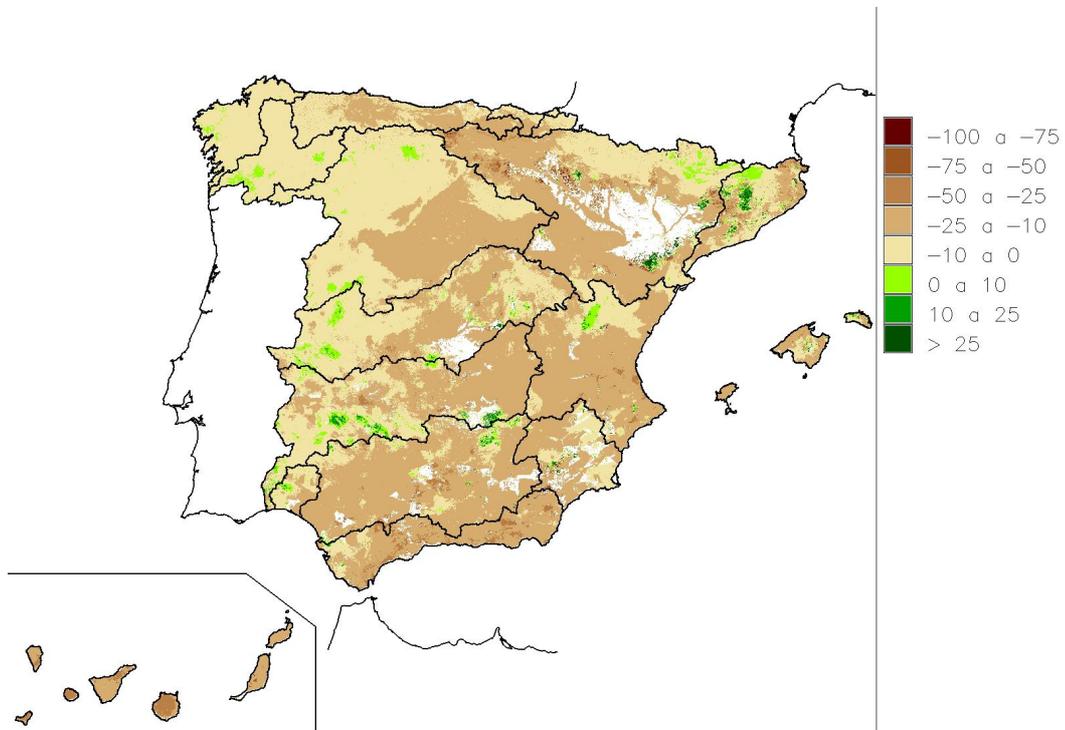


Figura 6. Variación del promedio de la escorrentía (%) para el período 2011-2040 respecto al periodo de control para las proyecciones B2.

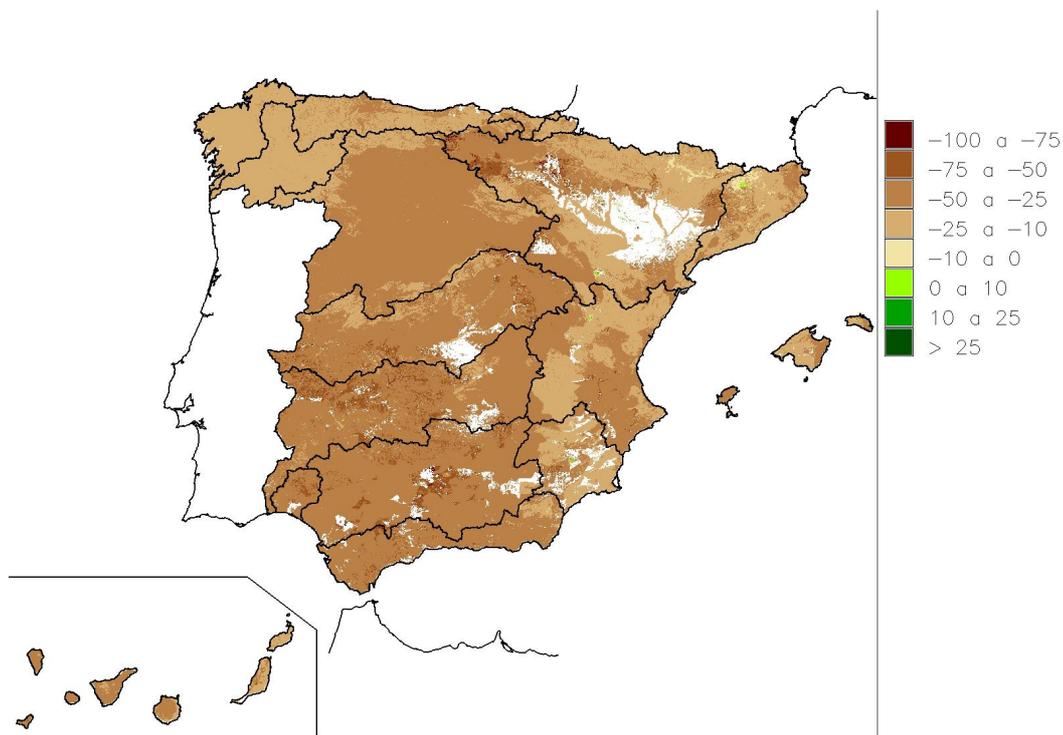


Figura 7. Variación del promedio de la escorrentía (%) para el período 2071-2100 respecto al periodo de control para las proyecciones A2.

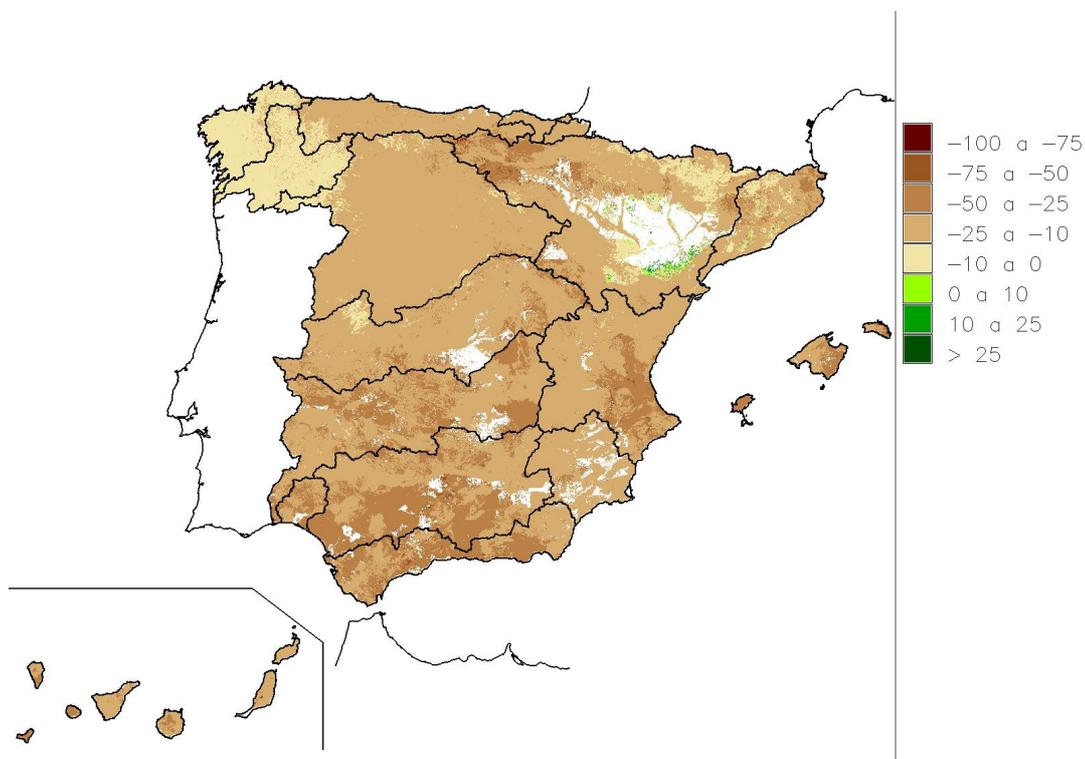


Figura 8. Variación del promedio de la escorrentía (%) para el período 2071-2100 respecto al periodo de control para las proyecciones B2.



27. El patrón predominante es el de disminución de la escorrentía para el período 2011-2040 y escenario A2 considerados en la Figura 5, con mayor incidencia en las cuencas Cantábricas, del País Vasco, cabeceras del Ebro y Duero, suroeste peninsular y Canarias.
28. La disminución se estima que será extendida en España para este escenario A2, excepto en algún área mediterránea y del noreste peninsular durante el 2º periodo del siglo XXI y ya generalizada durante el último periodo del siglo.
29. Las previsiones sobre la evolución de la escorrentía para el escenario B2 muestran diferencias locales con los resultados alcanzados en el A2 y la suavización de los decrementos durante el último periodo del siglo XXI.
30. Los resultados alcanzados por las distintas proyecciones difieren de manera considerable, especialmente durante el último periodo del siglo XXI en el que se estiman variaciones de lluvia entre -28% y 2% que se transforman en un -40% y 0% de escorrentía (Tabla 3).

Tabla 3. Variación de la escorrentía (%) por demarcación hidrográfica en los distintos períodos respecto al periodo de control 1961-1990.

		Escenario A2						Escenario B2							
		Modelo regionalizado I	Modelo regionalizado II	Modelo regionalizado III	Modelo regionalizado IV	Modelo regionalizado V	Modelo regionalizado VI	Δ del promedio	Modelo regionalizado I	Modelo regionalizado II	Modelo regionalizado III	Modelo regionalizado IV	Modelo regionalizado V	Modelo regionalizado VI	Δ del promedio
España	2011-2040	-3	-22		-2			-8	-6	-18		1			-8
	2041-2070	-9	-34		-8			-16	-5	-21		-8			-11
	2071-2100	-24	-37	0	-34	-28	-40	-28	-7	-28	-8	-1	-18	-22	-14
Cantábrico	2011-2040	-6	-20		-11			-13	-5	-15		-8			-10
	2041-2070	-4	-27		-17			-16	-6	-22		-19			-16
	2071-2100	-13	-40	-1	-38	-31	-44	-29	-1	-28	-12	-13	-20	-28	-17
Galicia Costa	2011-2040	-1	-20		-1			-6	2	-13		-2			-3
	2041-2070	-4	-31		-4			-12	-5	-21		-1			-8
	2071-2100	-18	-36	11	-22	-16	-29	-19	-2	-23	4	6	-8	-9	-5
Cuencas Internas del País Vasco	2011-2040	-6	-18		-11			-12	-5	-14		-10			-10
	2041-2070	-2	-24		-20			-16	-5	-21		-23			-16
	2071-2100	-9	-40	-8	-39	-41	-52	-30	2	-28	-20	-17	-31	-36	-20
Miño-Sil	2011-2040	-1	-21		1			-6	0	-15		2			-3
	2041-2070	-6	-34		0			-12	-4	-22		1			-7
	2071-2100	-19	-38	11	-20	-17	-34	-21	-2	-25	3	11	-8	-15	-6
Duero	2011-2040	-3	-25		1			-8	-7	-21		5			-7
	2041-2070	-13	-41		-1			-17	-7	-23		0			-9
	2071-2100	-31	-40	4	-33	-23	-47	-31	-10	-29	-2	8	-16	-24	-13
Tajo	2011-2040	-3	-31		4			-8	-11	-28		11			-8
	2041-2070	-16	-48		-1			-19	-8	-23		1			-9
	2071-2100	-39	-41	-5	-38	-32	-40	-35	-16	-32	-10	7	-22	-17	-15
Guadiana	2011-2040	-7	-40		2			-12	-16	-34		16			-9
	2041-2070	-23	-58		-11			-27	-9	-24		-4			-11
	2071-2100	-49	-48	-12	-48	-40	-25	-42	-24	-40	-15	4	-32	-16	-20
Guadalquivir	2011-2040	-2	-36		0			-11	-21	-34		13			-13
	2041-2070	-18	-55		-16			-28	-2	-25		-12			-12
	2071-2100	-48	-49	-20	-45	-44	-29	-43	-23	-43	-24	0	-33	-28	-24
Cuencas Internas de Andalucía	2011-2040	-1	-33		-1			-12	-16	-35		6			-16
	2041-2070	-15	-50		-24			-30	-2	-26		-17			-15
	2071-2100	-43	-44	-27	-50	-42	-25	-41	-23	-40	-25	-14	-29	-30	-27
Segura	2011-2040	-1	-25		-1			-10	-22	-24		10			-13
	2041-2070	-10	-39		-11			-21	-2	-28		-11			-14
	2071-2100	-23	-39	-22	-35	-48	-21	-33	-14	-33	-22	-5	-23	-28	-21
Júcar	2011-2040	1	-11		-4			-5	-21	-17		-1			-12
	2041-2070	-11	-28		-14			-18	-5	-20		-14			-13
	2071-2100	-21	-24	-18	-46	-45	-21	-32	-16	-27	-20	-18	-34	-14	-24
Ebro	2011-2040	-2	-19		-7			-9	-7	-15		-5			-9
	2041-2070	-6	-26		-12			-14	-5	-19		-17			-13
	2071-2100	-17	-31	3	-40	-30	-46	-28	-4	-25	-9	-11	-17	-29	-16
Cuencas Internas de Cataluña	2011-2040	6	-4		-3			0	-9	-5		-8			-7
	2041-2070	-2	-5		-6			-4	-2	-6		-19			-9
	2071-2100	-11	-3	-13	-34	-30	-29	-21	-13	-5	-18	-14	-20	-18	-16
Islas Baleares	2011-2040	-5	-21		11			-4	-19	-31		0			-15
	2041-2070	-9	-39		1			-15	-8	-31		-18			-20
	2071-2100	-20	-44	-24	-42	-22	-21	-31	-25	-39	-32	-6	-25	-13	-23
Islas Canarias	2011-2040	-7	-37		-4			-18	-15	-34		-24			-25
	2041-2070	-16	-41		-37			-32	-11	-36		-35			-28
	2071-2100	-31	-44	-30	-57			-41	-22	-37	-29	-47			-34



31. Las desviaciones de escorrentía del periodo 2011-2040 respecto a 1961-1990 trasladadas al periodo 1940-2005, utilizado en el Libro blanco del agua en España (MIMAM, 2000a) y la posterior Instrucción de Planificación Hidrológica, permiten comprobar que, en términos generales, las disminuciones de escorrentía se sitúan en los mismos órdenes de magnitud, con cifras alrededor del 5% y 6%.
32. Al desagregar esta cifra por demarcaciones hidrográficas, las cuencas del norte peninsular quedaban ligeramente infravaloradas, al contrario que las del sureste. En el resto de cuencas se mantienen valores de desviación similares.

3.2.5 Recomendaciones metodológicas para futuros estudios

33. Las diferencias entre las proyecciones y los datos observados tienen implicaciones importantes en estudios de impacto. Son, sin embargo, la mejor información disponible hasta el momento para el análisis de cambios en las variables meteorológicas y su repercusión en el ciclo hidrológico.
34. Es recomendable ampliar el periodo de control al máximo posible y poder comprobar así el grado de incertidumbre de las series climáticas.
35. Se recomienda considerar el periodo de planificación hidrológica que actualmente se utiliza en España, que abarca al menos desde 1940 e incluye periodos y secuencias secas y húmedas.

3.3 SÍNTESIS DE LA ACTIVIDAD 2 “EFECTOS POTENCIALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS DEMANDAS DE AGUA Y ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN”

3.3.1 Introducción

1. El agua es un recurso económico, ambiental, cultural y de bienestar social limitado. Por ello, la sociedad muestra un constante interés por el agua. A las incertidumbres habituales sobre las demandas de agua se añaden ahora las derivadas del impacto del cambio climático.
2. El Libro blanco del agua en España (MIMAM, 2000a), ya señalaba que los efectos del cambio climático sobre la demanda de agua presentan grandes incertidumbres, aunque prevé un pequeño aumento de la demanda urbana.

3.3.2 Objetivos y alcance

3. El objetivo de este estudio es evaluar los efectos potenciales del cambio climático sobre las demandas de agua en España, tanto de abastecimiento urbano como de riego, y definir las estrategias de adaptación que permitan paliar los efectos negativos previsibles.
4. Quedan fuera del alcance de este estudio los usos industriales, la acuicultura, los usos recreativos y la navegación y el transporte acuático.
5. Dentro del uso de abastecimiento urbano, sólo se considera en este estudio el uso doméstico y el riego de parques y jardines municipales.

3.3.3 Datos e hipótesis de partida

6. Este estudio se ha basado en los trabajos realizados en 2007 por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, acrónimo en inglés) y en los escenarios climáticos regionalizados elaborados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), también denominados proyecciones climáticas.
7. Las proyecciones climáticas incluyen los valores diarios que se prevé tomen la precipitación y la temperatura por efecto del cambio climático en cuatro periodos temporales.
8. Las demandas de agua se han estimado a lo largo del siglo XXI para los periodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100, con excepciones en alguno de los modelos. Como periodo de control se ha considerado 1961-1990.
9. Estas demandas se han estimado en función de dos escenarios de emisión de gases de efecto invernadero, por su influencia en el cambio climático, definidos en 2000 por el IPCC: uno de emisión medio-alta (A2) y otro de medio-baja (B2) como consecuencia de condiciones socioeconómicas diferentes.

3.3.4 Métodos de trabajo

10. Las demandas de abastecimiento urbano se han estimado integrando los resultados de demandas domésticas y de parques y jardines municipales obtenidas previamente, ponderando la participación de cada una de estas demandas en la demanda global de abastecimiento.
11. Para el cálculo de las demandas domésticas se han utilizado las fórmulas facilitadas por el Canal de Isabel II (CYII, 2007) que relacionan consumos de agua con precipitación y temperatura, considerando el porcentaje de viviendas unifamiliares y plurifamiliares en los municipios de España.
12. Se ha utilizado el método de la FAO (2006) para el cálculo de necesidades netas de riego de las plantas de parques y jardines municipales así como para los cultivos de regadío. Además, se han tenido en cuenta el efecto del CO₂ sobre la evapotranspiración de los cultivos y el concepto de integral térmica, con objeto de estimar la duración del ciclo de los cultivos anuales.
13. Para la estimación de la demanda de agua de zonas verdes municipales se han considerado diversas hipótesis sobre el porcentaje de césped, arbustos y árboles que componen los parques y jardines municipales.
14. Para la estimación de la demanda de agua del regadío se han diferenciando cultivos permanentes y cultivos anuales.

3.3.5 Resultados

15. Los resultados para cada período se presentan como incrementos de demanda en porcentaje respecto al periodo de control.
16. Los resultados de este estudio siguen presentando incertidumbres señaladas anteriormente en el Libro blanco del agua en España (MIMAM, 2000a). Lógicamente, estas incertidumbres se acentúan en los periodos de predicción a más largo plazo.



3.3.5.1 Demandas domésticas y de parques y jardines municipales

17. La temperatura influye más en la demanda de agua que la precipitación.
18. El cambio climático afectará más al consumo de agua en viviendas unifamiliares que en plurifamiliares, debido al uso de agua para riego de jardines particulares.
19. Los incrementos de demanda doméstica estimados para el promedio de España no difieren para los dos escenarios considerados a corto-medio plazo (período 2011-2040) y a más largo plazo (período 2041-2070), siendo respectivamente de aproximadamente el 2% y el 3%. Sin embargo, para finales del siglo XXI (período 2071-2100) en el escenario A2 son aproximadamente del 6% mientras que en el escenario B2 son del 4%.
20. A largo plazo se prevén mayores incrementos en zonas del interior de la España peninsular que en zonas costeras.
21. Las estimaciones de los incrementos de consumo doméstico mejorarían si en otras áreas de España se dispusiera de relaciones entre el consumo y la temperatura y la precipitación, similares a las del Canal de Isabel II utilizadas en este estudio.
22. Se prevé que el cambio climático afectará más al consumo de agua del césped que al de árboles y arbustos.
23. Los incrementos de necesidades netas de riego de parques y jardines municipales, estimados en porcentaje respecto al periodo de control, son mayores en zonas del norte de España, por ser pequeñas las necesidades de agua de riego en dicho periodo.
24. Las estimaciones de los incrementos de la demanda de agua de zonas verdes municipales mejorarían, si se dispusiera de estudios sobre la composición actual de grupos de plantas (césped, árboles y arbustos) en parques y jardines relevantes de España.
25. Los incrementos estimados del consumo de agua en parques y jardines municipales son mayores que los correspondientes a las demandas domésticas. Sin embargo, estos aumentos no suponen un gran incremento en la demanda conjunta, porque la demanda doméstica supone un 90-95% del conjunto de las dos demandas.
26. A largo plazo se estima que el incremento del consumo conjunto será más acentuado en las condiciones del escenario A2 que en las del B2.
27. Los modelos presentan resultados con cierta variabilidad pero dentro de un intervalo razonable.
28. Los incrementos de la demanda conjunta estimados para el promedio de España no difieren para los dos escenarios considerados a corto-medio plazo (período 2011-2040) y a más largo plazo (período 2041-2070), siendo respectivamente de aproximadamente el 3% y el 5%. Sin embargo, para finales del siglo XXI (período 2071-2100) en el escenario A2 son aproximadamente del 9% mientras que en el escenario B2 son del 6%.
29. El rango de magnitud de estos incrementos podría resultar inferior a los ahorros previsibles inherentes a la aplicación de nuevas medidas tecnológicas.

3.3.5.2 Demandas de regadíos

30. Las bases de partida utilizadas en las estimaciones de los incrementos de las demandas de agua de regadíos (mantenimiento en el futuro de los cultivos y variedades actuales; estimación de la evapotranspiración de los cultivos en función de la temperatura y de la

radiación solamente) suponen que los resultados obtenidos deban ser considerados como una aproximación meramente indicativa.

31. De las variables climáticas consideradas en este estudio, temperatura y precipitación, la primera será la de mayor influencia en los cambios de las necesidades netas de agua de riego de los cultivos anuales de verano. En cultivos permanentes de regadío también tendrán una influencia significativa los cambios en la precipitación total y en su distribución.
32. En general, a corto plazo, no hay diferencias significativas entre las estimaciones obtenidas para los distintos escenarios (A2 y B2), estando todos los resultados comprendidos en un rango estrecho de valores. No obstante, en cultivos permanentes, al igual que en parques y jardines, los incrementos de necesidades netas de agua de riego a largo plazo se acentúan en el escenario A2 respecto al B2.
33. Los cultivos anuales no presentan una tendencia clara de incremento de necesidades netas de agua de riego a lo largo de los periodos estudiados, observándose incluso disminuciones. Sin embargo, los cultivos permanentes sí presentan un aumento progresivo de dichas necesidades.
34. Los incrementos de las necesidades de agua en los meses de máxima demanda para cultivos anuales no siguen una tendencia clara. Sin embargo, los incrementos en dichos meses para cultivos permanentes aumentan de forma continua a lo largo del siglo XXI, salvo alguna excepción.
35. Para cultivos anuales, para el periodo 2011-2040, los incrementos medios en los meses de máxima demanda son, en general, superiores a sus correspondientes incrementos medios para todo el ciclo del cultivo. Para cultivos permanentes, en general, sucede lo contrario.
36. En cuanto a los valores extremos de incrementos, para cultivos anuales se encuentran entre el rango de -2 al 12%, excepto en Galicia Costa, y en permanentes entre el 4 y el 27%.
37. Las estimaciones para las cinco cuencas estudiadas con más detalle, muestran incrementos de las dotaciones netas medias de agua de riego para el periodo 2011-2040 en el rango del 3 al 6%. Los otros periodos de estudio no se han considerado por presentar mayores incertidumbres.
38. Las estimaciones para las cinco cuencas en el caso de adaptación de fecha de siembra de cultivos anuales proporcionan incrementos medios en un rango del 5 al 9%.
39. El rango de magnitud de estos incrementos podría resultar inferior a los ahorros previsibles inherentes a las mejoras de la eficiencia de riego y de las prácticas agronómicas.

3.3.6 Recomendaciones metodológicas para futuros estudios

40. Para la estimación de los incrementos de demandas domésticas es recomendable disponer de estudios en otras áreas de España, que relacionen el consumo con la temperatura y la precipitación, similares a las relaciones del Canal de Isabel II utilizadas en este estudio.
41. Disponer de estudios sobre la composición actual de grupos de plantas (césped, árboles y arbustos) en parques y jardines municipales relevantes de España, con objeto de estimar de forma más precisa los incrementos de la demanda de agua de zonas verdes municipales.



3.4 SÍNTESIS DE LA ACTIVIDAD 3 “EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DISPONIBLES EN LOS SISTEMAS DE EXPLOTACIÓN”

3.4.1 Introducción

1. El recurso disponible en un sistema de explotación puede asimilarse a la máxima demanda de agua que se puede satisfacer en dicho sistema una vez cumplidas las restricciones previas. El concepto de recurso disponible está asociado al tipo de demanda (modulación intraanual) y al criterio de garantía empleado. Se trata de dar un paso más allá de la evaluación del recurso natural, cuantificando la repercusión del cambio climático sobre el agua que se puede utilizar. El recurso disponible es un indicador teórico, que no pretende reflejar una situación real, sino identificar las posibilidades máximas de aprovechamiento en cada sistema para una configuración de infraestructuras y una serie de aportaciones naturales dadas. Por tanto, este estudio requiere como datos de entrada las aportaciones en régimen natural afectadas por el cambio climático, obtenidas en la primera actividad de la encomienda.

3.4.2 Objetivo y ámbito

2. El objetivo del trabajo es determinar la evolución del recurso disponible superficial en tres periodos futuros 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100 respecto al período de control para dos escenarios de emisiones, A2 y B2, definidos en los informes del Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC). De manera muy simplificada, el primero corresponde a no adoptar medidas de control de emisiones, mientras que el segundo corresponde a un desarrollo más sostenible. Los escenarios, modelos de circulación global y procedimientos de regionalización considerados han sido los establecidos por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) para la evaluación de la repercusión del cambio climático sobre los recursos hídricos en régimen natural.
3. El análisis se ha llevado a cabo para cada una de las demarcaciones hidrográficas peninsulares y, a partir de estos resultados, para el conjunto de la España peninsular.

3.4.3 Metodología

4. Para la determinación del recurso disponible se ha definido un sistema de explotación para cada demarcación hidrográfica. Este sistema constituye una simplificación que debe permitir reproducir el comportamiento de la demarcación desde el punto de vista de la disponibilidad del recurso. Una vez construido el sistema, la evaluación del recurso disponible se ha desarrollado a partir de un procedimiento de optimización de la gestión de los recursos hídricos.
5. Según el Reglamento de la Planificación Hidrológica (art. 19.2) un sistema de explotación de recursos está constituido por masas de agua superficial y subterránea, obras e instalaciones de infraestructura hidráulica, normas de utilización del agua derivadas de las características de las demandas y reglas de explotación que, aprovechando los recursos hídricos naturales, y de acuerdo con su calidad, permiten establecer los suministros de agua que configuran la oferta de recursos disponibles del sistema de explotación, cumpliendo los objetivos medioambientales.
6. El análisis de los sistemas de explotación permite integrar los elementos básicos que intervienen en la gestión de recursos hídricos: recursos en régimen natural, restricciones

ambientales, demandas e infraestructuras. A continuación se sintetizan los criterios seguidos para la definición de los sistemas de explotación, así como el procedimiento de optimización empleado.

3.4.3.1 Configuración de los sistemas de explotación

3.4.3.1.1 Ríos

7. Con carácter general, se han considerado todas aquellas masas de agua de la categoría ríos con una aportación anual media en el período 1940 – 2005 igual o superior a 50 hm³. Dicha aportación se ha calculado mediante el modelo hidrológico distribuido precipitación escorrentía SIMPA.

3.4.3.1.2 Embalses

8. Los criterios de selección se han basado en los utilizados en la evaluación del recurso disponible a nivel nacional efectuada en el Libro blanco del agua en España (MIMAM, 2000a), ampliándolos con objeto de mejorar la reproducción del comportamiento del sistema. Tras analizar la relación entre número de embalses, capacidad de almacenamiento y capacidad de regulación, los criterios que se han adoptado han sido los siguientes:
 - Se consideran todos los embalses con capacidad superior a 100 hm³
 - No se consideran embalses con capacidad inferior a 10 hm³, salvo que existan tramos con requerimientos ambientales aguas abajo, analizándose entonces caso a caso.
 - De los embalses cuya capacidad oscila entre 10 hm³ y 100 hm³ solo se consideran aquellos cuya relación entre capacidad y aportación media anual es superior a 0,3.
9. El número de embalses finalmente considerado es de 259, que representan el 92% de la capacidad total nacional, lo que supone un 30% de incremento con respecto a los trabajos del Libro blanco del agua. Se ha prescindido de los que se encontraban en construcción o solo adjudicados.
10. La hipótesis adoptada en cuanto a funcionamiento del embalse es la de libre disposición con independencia del régimen concesional actual. Es decir, se ha supuesto que puede utilizarse con total libertad la capacidad de todos los embalses considerados. Se obtendrá así un valor máximo del recurso disponible. Esta hipótesis obedece a los siguientes motivos: en primer lugar, la incertidumbre en cuanto a la situación concesional en horizontes a tan largo plazo como los manejados en este trabajo (2100); en segundo lugar, si el cambio climático implicara una reducción del recurso disponible para atender las necesidades consuntivas, parece razonable considerar que se liberarían concesiones a favor de los usos prioritarios. Con objeto de lograr la máxima simplificación posible en el esquema, se han agrupado embalses, cuidando siempre de no desdibujar el funcionamiento real del sistema.
11. Es necesario introducir un valor de la tasa de evaporación mensual en cada embalse para estimar las pérdidas por este concepto. Los valores se han obtenido a partir de los mapas de evapotranspiración potencial para cada proyección climática calculados en la *Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural*. Los mapas cubren todo el territorio nacional discretizado en celdas de 500 m de lado. Cuando se han



agrupado varios embalses se ha utilizado el valor correspondiente al de mayor superficie, con objeto de quedar del lado de la seguridad.

3.4.3.1.3 Aportaciones

12. Para la definición de los puntos de aportación se ha partido de los trabajos del Libro blanco del agua y del *Análisis de los sistemas hidráulicos del Plan Hidrológico Nacional* (MIMAM, 2000b). Se han añadido aquellos que eran necesarios como consecuencia de la incorporación de nuevas demandas, infraestructuras o caudales mínimos. Con objeto de no complicar excesivamente el esquema de cada demarcación, salvo en casos singulares, se ha respetado el criterio general de que la aportación anual media acumulada en régimen natural en la intercuenca entre dos puntos de aportación consecutivos sea superior a 50 hm³. Dicha aportación se ha calculado mediante el modelo SIMPA para el período 1940-2005. El número de puntos de aportación considerados en el conjunto de las demarcaciones en los trabajos del Libro blanco del agua fue de 350 aproximadamente, mientras que en el presente estudio es de 514.
13. La serie de aportaciones en cada uno de los puntos considerados se ha obtenido a partir de los mapas de escorrentía natural total acumulada generados en el estudio *Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural* aplicando el modelo precipitación escorrentía SIMPA a las diferentes proyecciones climáticas consideradas. Se dispone de un mapa de aportaciones mensuales para cada proyección climática para todo el territorio nacional. Estos mapas están discretizados en celdas de 500 m de lado. Para obtener en cada punto de aportación la serie mensual correspondiente a cada proyección climática en cada período, se ha diseñado una aplicación sobre SIG que permite extraer los valores de escorrentía natural total acumulada de dichos mapas mensuales en cada punto.
14. La escorrentía total calculada a través del modelo SIMPA engloba la escorrentía superficial directa y la subterránea que acaba aflorando a los cauces. El modelo también estima la recarga que queda almacenada en los acuíferos sin fluir a la red superficial. Esta recarga no se introduce en la simulación del sistema de explotación. Por tanto, en la evaluación del recurso disponible se prescinde de este volumen, que, previa extracción, se podría integrar en el recurso disponible. El recurso disponible que se considera es exclusivamente el correspondiente al sistema superficial. La evolución del recurso disponible asociado al sistema subterráneo coincide con la evolución de la recarga en condiciones naturales, que ya ha sido evaluada en el estudio *Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural*.
15. Además de obtener la serie mensual de aportaciones en cada punto correspondiente a cada proyección climática y período de estudio, también se han obtenido mediante SIMPA las series mensuales correspondientes a las condiciones climáticas observadas para el período de control. Ello permite calcular el recurso disponible de "referencia" en el período de control y analizar las desviaciones de las estimaciones del recurso disponible realizadas con las diferentes proyecciones climáticas en el período de control, contando así con una estimación la incertidumbre de partida del recurso disponible para cada proyección climática.
16. Teniendo en cuenta las combinaciones de escenarios, modelos de circulación global, sistemas de regionalización y períodos, el número total de series de aportación a considerar en cada punto es de 30 (29 correspondientes a proyecciones de cambio climático, que se refleja en la tabla siguiente, y una a los datos observados en el período de control).

Tabla 4. Proyecciones climáticas para las que se han calculado las series mensuales de aportación en régimen natural a incluir en el sistema de explotación de cada demarcación (las series de los dos escenarios coinciden en el período de control).

Escenario de emisiones	Modelo de circulación global	Regionalización	Período			
			1961-1990 (P1)	2011-2040 (P2)	2041-2070 (P3)	2071-2100 (P4)
A2	CGCM2	Análogos-FIC	SI	SI	SI	SI
	ECHAM4	Análogos-FIC	SI	SI	SI	SI
	HadAM3	Análogos-FIC	SI	NO	NO	SI
	HadCM3	SDSM	SI	SI	SI	SI
	HadCM3	PROMES	SI	NO	NO	SI
	ECHAM4	RCAO y proyecto PRUDENCE	SI	NO	NO	SI
B2	CGCM2	Análogos-FIC	SI	SI	SI	SI
	ECHAM4	Análogos-FIC	SI	SI	SI	SI
	HadAM3	Análogos-FIC	SI	NO	NO	SI
	HadCM3	SDSM	SI	SI	SI	SI
	HadCM3	PROMES	SI	NO	NO	SI
	ECHAM4	RCAO y proyecto PRUDENCE	SI	NO	NO	SI

3.4.3.1.4 Demandas

17. Se han considerado demandas consuntivas, bien con modulación intraanual constante, asimilable al abastecimiento urbano, o bien con modulación variable. En este último caso, la modulación adoptada resulta del análisis de la demanda de una serie de zonas de regadío representativas a nivel nacional propuesta en el Libro blanco del agua en España (MIMAM, 2000a). Cabe destacar que sólo se ha considerado una modulación para demanda variable. La gama de posibilidades de adaptación de los cultivos y tipo de cultivo a los cambios ambientales es tal, que carece de sentido considerar múltiples modulaciones de demanda diferentes de la actual.
18. Para obtener el recurso disponible es necesario considerar cada tipo de demanda separadamente. Un concepto esencial para la determinación del recurso disponible es el criterio de garantía, que se utiliza para evaluar cuándo está satisfecha una demanda. El criterio es diferente para demanda uniforme o variable. Para demanda uniforme se ha adoptado un criterio de garantía del 100% mensual, es decir, no se admite déficit en ningún mes del período analizado. Es un criterio muy exigente, que permite obtener la máxima cantidad de agua que se puede extraer de un cauce sin interrupción a lo largo de todo el período considerado. Para demanda variable el criterio utilizado ha sido el establecido en la Instrucción de Planificación Hidrológica vigente (Orden ARM/2656/2008) para la demanda de riego, que admite un déficit del 50% de la demanda anual en un año, un déficit del 75% de la demanda anual acumulado en dos años consecutivos y un déficit del 100% de la demanda anual acumulada en 10 años consecutivos. Ambos criterios se han utilizado en otros estudios anteriores, en particular en el Libro blanco del agua en España (MIMAM, 2000a), lo que permite comparar resultados.
19. Debido a la enorme complejidad de simulación que supondría estimar el máximo recurso disponible teniendo en cuenta la distribución real de las demandas en el conjunto del sistema, se estudiaron los efectos que podría ocasionar la sustitución de todas las



demandas en una sola demanda colocada al final de cada cuenca o subcuenca incluida en el sistema de explotación. Se observó que esta simplificación no afectaba a los resultados sobre evolución del recurso disponible en los periodos futuros respecto al periodo de control. En consecuencia, y atendiendo al objetivo del trabajo, se adoptó la configuración de demandas concentradas al final de la cuenca, o subcuenca, con el fin de agilizar el proceso de cálculo. En el caso de que el tramo de río del final de la cuenca tuviera establecido un caudal ecológico, la demanda se colocó aguas arriba, de manera que ésta se viera afectada por dicha restricción, como sucede en la realidad. Si se trata de una cuenca que vierte a un agua de transición que, de acuerdo con el esquema simplificado, recibe más de una aportación, se colocó una demanda al final de cada una de las subcuencas afluentes para tener en cuenta su aportación en el cálculo del recurso disponible.

3.4.3.1.5 Conducciones

20. Se han representado aquellas conducciones artificiales que pueden ser relevantes para la satisfacción de las demandas o de los caudales ecológicos.

3.4.3.1.6 Restricciones previas

21. Son aquellas necesidades cuya atención es prioritaria frente a cualquier demanda y, por tanto, constituyen un requerimiento que la gestión del sistema debe asegurar previamente a la satisfacción de cualquier demanda. Pueden ser de dos tipos: geopolíticas y ambientales. Dentro de las primeras se encuentran los acuerdos internacionales establecidos en cuencas transfronterizas. Las ambientales corresponden al régimen de caudales ecológicos.

22. En España, las restricciones geopolíticas significativas afectan a las cuencas compartidas con Portugal, y están reflejadas en el Convenio de Albufeira. En él se regula el régimen de caudales que España debe garantizar en frontera a Portugal siempre que no se trate de circunstancias hidrológicas excepcionales, que están identificadas en dicho convenio. Hay que destacar que el plazo de vigencia establecido en el acuerdo es de 7 años (si bien se prevé su prórroga automática por periodos de tres años salvo que se denuncie por cualquiera de las partes). Debido a que el periodo temporal del estudio (100 años) es muy superior a la vigencia del Convenio (7 años), y a que las circunstancias hidrológicas naturales futuras pueden sufrir cambios importantes tanto en variabilidad como en magnitud respecto a las circunstancias actuales, se ha decidido no contemplar las restricciones geopolíticas, al no poder contar con una evaluación de las mismas adecuada a cada período de análisis.

23. Por lo que concierne al régimen de caudales ecológicos, la única componente que es aplicable a la escala mensual es el régimen de caudales mínimos. Existen dos tendencias básicas en cuanto a la consideración de los impactos del cambio climático en los ecosistemas fluviales. La primera consiste en considerar el cambio climático como una presión más a tener en cuenta sobre los ecosistemas, los cuales se consideran sistemas invariables a los que hay que proteger, lo que exigiría mantener los caudales mínimos de la situación inicial. La segunda, admite los cambios de los ecosistemas provocados por las nuevas condiciones ambientales que supondrán unas nuevas exigencias en cuanto a régimen de caudales mínimos. Dada la incertidumbre sobre las restricciones ambientales futuras a considerar, se ha optado por no tenerlas en cuenta en el presente estudio en periodos futuros.

24. Únicamente se ha evaluado en el período de control el efecto que produce la implantación del régimen de caudales mínimos sobre el recurso disponible y se ha comparado con el

efecto provocado por el cambio climático a largo plazo. En estos casos, se ha exigido para el caudal mínimo la misma garantía mensual que tendría en condiciones naturales, entendiendo por garantía mensual el porcentaje de meses en que el caudal circulante por un tramo es igual o superior al caudal mínimo de dicho tramo. El cálculo de la garantía del régimen de caudales mínimos en régimen natural se ha obtenido simulando el propio sistema sin tener en cuenta infraestructuras hidráulicas ni demandas. En el presente estudio sólo se han considerado aquellas masas en que la definición del régimen de caudales mínimos se consideró prioritaria por el organismo competente.

25. Este análisis solo se ha podido realizar en aquellas demarcaciones cuyo borrador de plan de cuenca se encontraba en consulta pública (o en una fase posterior del proceso de tramitación) durante la realización de este estudio (1 de mayo de 2011) y se disponía, por tanto, de unos valores propuestos en la normativa de dicho borrador. Son las demarcaciones de: Cantábrico Oriental (en la parte de las Cuencas Internas del País Vasco), Miño-Sil, Duero, Guadalquivir y Cuencas Internas de Cataluña.

3.4.3.2 Modelo de optimización

26. Para realizar los balances que permiten determinar el recurso disponible en el sistema de explotación de cada demarcación se ha utilizado el modelo OPTIGES, desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia e integrado en el entorno AQUATOOLDMA. Es un modelo de optimización de la gestión de un sistema de recursos hídricos. Esto supone que el modelo selecciona la gestión óptima, entendiendo por tal aquella que minimiza la suma ponderada de déficit de caudales ecológicos, déficit de demandas y maximiza el volumen almacenado en embalses al final de cada período de optimización, de acuerdo con unos coeficientes de ponderación definidos por el usuario.

3.4.3.3 Cálculo del recurso disponible

27. El cálculo del recurso disponible es un proceso iterativo de incremento de la demanda hídrica, donde se comprueba en cada paso si se cumplen los criterios de garantía definidos para los caudales mínimos y las demandas. Cada iteración consiste en una ejecución del modelo OPTIGES. El resultado final se alcanza cuando se obtiene la máxima demanda cumpliendo las garantías exigidas.
28. El cálculo del recurso disponible para cada proyección debe realizarse tanto en los períodos futuros como en el de control. El resultado del estudio es la evolución del recurso disponible desde el año 2011 hasta el año 2100 respecto al período de control. Para ello, en cada demarcación ha sido necesario estimar el recurso disponible en 60 escenarios diferentes, 30 para cada uno de los dos tipos de demanda. Hay que añadir, sin embargo, 2 escenarios más por demarcación, que son los correspondientes a los datos climáticos observados. Además, en las demarcaciones en las que se ha evaluado el efecto de las restricciones ambientales sobre el recurso disponible, ha sido necesario estudiar 18 situaciones más en el período de control: seis simulaciones en régimen natural sin infraestructura ni demanda alguna para calcular la garantía mensual de los caudales mínimos, seis simulaciones con demanda uniforme y seis con variable. En definitiva, puesto que existen 15 demarcaciones hidrográficas peninsulares y se dispone de información sobre caudales ecológicos en cinco de ellas, ha sido necesario evaluar 1.020 combinaciones diferentes. Hay que tener en cuenta que, como se mencionó antes, el resultado para cada uno de ellas se ha obtenido a partir de un procedimiento iterativo de incrementos de demanda, lo que pone de manifiesto la complejidad del estudio en términos de simulación.



3.4.4 Resultados

29. En las tablas siguientes figura la variación (%) del recurso disponible con respecto al período de control calculado para cada demarcación, proyección climática, período y modulación de demanda, así como una media por demarcación, proyección y período. Se han incluido también las cifras equivalentes para el conjunto de la España peninsular.

Tabla 5. Variación del recurso disponible (%) por demarcación hidrográfica y de toda España en los diferentes periodos de estudio respecto al periodo de control 1961-1990. Demanda uniforme (verde>0%; amarillo 0% a -20%; rojo < -20%).

		Escenario de Emisiones A2							Escenario de Emisiones B2						
		CGCM2-FIC	ECHAM4--FIC	HadAM3-FIC	HadCM3-SDSM	HadCM3-PROMES	ECHAM4-RCAO	Media	CGCM2-FIC	ECHAM4--FIC	HadAM3-FIC	HadCM3-SDSM	HadCM3-PROMES	ECHAM4-RCAO	Media
España	2011-2040	-13	-28		-7			-16	-10	-26		-28			-21
	2041-2070	-12	-36		-20			-23	-11	-30		-16			-19
	2071-2100	-25	-40	-13	-39	-38	-46	-34	-9	-33	-20	-7	-29	-20	-20
Cantábrico Oriental	2011-2040	-8	-24		-21			-18	-6	-16		-24			-15
	2041-2070	-11	-34		-33			-26	-12	-33		-40			-28
	2071-2100	-16	-50	2	-59	-41	-56	-37	-1	-39	-1	-37	-27	-33	-23
Cantábrico Occidental	2011-2040	-19	-35		-26			-27	-5	-25		-25			-18
	2041-2070	-20	-38		-33			-30	-20	-36		-34			-30
	2071-2100	-20	-48	-10	-48	-47	-40	-36	-10	-42	-14	-33	-32	-23	-26
Galicia-Costa	2011-2040	-10	-30		-11			-17	-2	-10		-25			-12
	2041-2070	-14	-37		-21			-24	-6	-34		-22			-21
	2071-2100	-21	-42	-13	-29	-50	-27	-30	-7	-40	-18	-24	-11	-11	-19
Miño-Sil	2011-2040	-8	-29		5			-11	-2	-5		-16			-8
	2041-2070	-11	-28		-11			-17	-13	-37		-9			-20
	2071-2100	-17	-34	-17	-20	-35	-34	-26	-8	-33	-23	-7	0	-10	-14
Duero	2011-2040	-15	-22		-13			-17	-9	-27		-41			-26
	2041-2070	-10	-37		-19			-22	-11	-30		-21			-21
	2071-2100	-28	-37	-11	-34	-36	-51	-33	-9	-34	-28	2	-37	-27	-22
Tajo	2011-2040	-16	-31		-1			-16	-17	-45		-36			-33
	2041-2070	-13	-50		-13			-25	-11	-25		-5			-14
	2071-2100	-34	-48	-7	-39	-38	-50	-36	-15	-37	-25	10	-53	-7	-21
Guadiana	2011-2040	-23	-35		12			-15	-16	-40		0			-19
	2041-2070	-19	-58		-32			-36	-16	-23		-14			-18
	2071-2100	-45	-54	-15	-53	-40	-51	-43	-17	-41	-23	5	-41	-11	-21
Guadalquivir	2011-2040	-16	-36		-4			-19	-13	-48		-26			-29
	2041-2070	-7	-55		-34			-32	-5	-36		-18			-20
	2071-2100	-37	-62	-26	-52	-41	-56	-46	-8	-44	-34	-5	-40	-22	-26
Tinto, Odiel Y Piedras	2011-2040	-10	-41		23			-9	-14	-61		-39			-38

		Escenario de Emisiones A2							Escenario de Emisiones B2						
		CGCM2-FIC	ECHAM4-FIC	HadAM3-FIC	HadCM3-SDSM	HadCM3-PROMES	ECHAM4-RCAO	Media	CGCM2-FIC	ECHAM4-FIC	HadAM3-FIC	HadCM3-SDSM	HadCM3-PROMES	ECHAM4-RCAO	Media
	2041-2070	-8	-65		-25			-33	-12	-44		-16			-24
	2071-2100	-51	-65	-39	-59	-35	-43	-49	-18	-46	-48	4	-54	-43	-34
Guadalete - Barbate	2011-2040	-20	-35		2			-18	-16	-41		9			-16
	2041-2070	-12	-56		-41			-36	-10	-35		-20			-22
	2071-2100	-46	-62	-33	-58	-45	-64	-51	-10	-42	-38	-12	-46	-26	-29
Cuencas Mediterráneas Andaluzas	2011-2040	-4	-26		-9			-13	-12	-33		-28			-24
	2041-2070	-13	-41		-36			-30	-4	-31		-23			-19
	2071-2100	-29	-47	-33	-59	-32	-48	-41	-14	-31	-30	-27	-23	-15	-23
Segura	2011-2040	-12	-29		-5			-15	-28	-31		-30			-30
	2041-2070	-11	-44		-26			-27	-12	-32		-17			-20
	2071-2100	-25	-54	-19	-45	-47	-42	-39	-14	-38	-26	-11	-20	-24	-22
Júcar	2011-2040	-3	-16		-5			-8	-21	-26		-29			-25
	2041-2070	-11	-32		-20			-21	-12	-24		-15			-17
	2071-2100	-25	-33	-2	-48	-42	-48	-33	-12	-26	-16	-12	-29	-18	-19
Ebro	2011-2040	-11	-27		-12			-17	-8	-25		-32			-22
	2041-2070	-14	-27		-19			-20	-9	-26		-16			-17
	2071-2100	-19	-31	-15	-43	-38	-46	-32	-6	-26	-15	-12	-23	-24	-18
Cuencas Internas de Cataluña	2011-2040	5	-1		-7			-1	-9	-8		-26			-14
	2041-2070	-5	-11		-15			-10	-5	1		-5			-3
	2071-2100	-9	-7	14	-31	-35	-43	-19	-13	8	6	-10	-30	-8	-8

Tabla 6. Variación del recurso disponible (%) por demarcación hidrográfica y de toda España en los diferentes periodos de estudio respecto al periodo de control 1961-1990. Demanda variable (verde>0%; amarillo 0% a -20%; rojo < -20%).

		Escenario de Emisiones A2							Escenario de Emisiones B2						
		CGCM2-FIC	ECHAM4-FIC	HadAM3-FIC	HadCM3-SDSM	HadCM3-PROMES	ECHAM4-RCAO	Media	CGCM2-FIC	ECHAM4-FIC	HadAM3-FIC	HadCM3-SDSM	HadCM3-PROMES	ECHAM4-RCAO	Media
España	2011-2040	-10	-20		-5			-12	-11	-24		-8			-14
	2041-2070	-11	-32		-19			-21	-12	-25		-16			-18
	2071-2100	-25	-35	-10	-38	-30	-41	-30	-7	-28	-16	-8	-30	-19	-18
Cantábrico Oriental	2011-2040	-11	-11		-22			-15	-7	-8		-20			-12
	2041-2070	-11	-25		-38			-25	-13	-23		-35			-24
	2071-2100	-17	-40	-20	-57	-47	-56	-40	-5	-27	-10	-35	-40	-34	-25
Cantábrico Occidental	2011-2040	-15	-23		-25			-21	-10	-13		-15			-13



Estudio de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua

CEDEX

		Escenario de Emisiones A2						Escenario de Emisiones B2							
		CGCM2-FIC	ECHAM4-FIC	HadAM3-FIC	HadCM3-SDSM	HadCM3-PROMES	ECHAM4-RCAO	Media	CGCM2-FIC	ECHAM4-FIC	HadAM3-FIC	HadCM3-SDSM	HadCM3-PROMES	ECHAM4-RCAO	Media
	2041-2070	-23	-30		-32			-28	-19	-26		-29			-25
	2071-2100	-23	-40	-20	-48	-36	-37	-34	-13	-31	-6	-34	-33	-24	-24
Galicia-Costa	2011-2040	-3	-18		-11			-11	-1	-10		-11			-7
	2041-2070	-11	-26		-12			-16	-9	-20		-14			-14
	2071-2100	-19	-32	-7	-23	-42	-33	-26	-8	-25	-15	-13	-20	-12	-16
Miño-Sil	2011-2040	-4	-19		-9			-11	-3	-12		-9			-8
	2041-2070	-8	-24		-12			-15	-10	-24		-11			-15
	2071-2100	-17	-29	-6	-21	-25	-23	-20	-7	-23	-14	-9	-18	-11	-14
Duero	2011-2040	-9	-23		-5			-12	-9	-29		-10			-16
	2041-2070	-13	-37		-19			-23	-16	-34		-17			-22
	2071-2100	-25	-37	-7	-34	-27	-45	-29	-7	-33	-21	-4	-29	-22	-19
Tajo	2011-2040	-12	-28		10			-10	-14	-42		-17			-24
	2041-2070	-10	-50		-13			-24	-12	-27		-9			-16
	2071-2100	-31	-48	-2	-40	-28	-51	-33	-4	-38	-22	13	-49	-7	-18
Guadiana	2011-2040	-25	-33		10			-16	-18	-40		21			-12
	2041-2070	-17	-58		-29			-35	-13	-22		-16			-17
	2071-2100	-46	-56	-16	-54	-43	-51	-44	-14	-44	-26	3	-34	-11	-21
Guadalquivir	2011-2040	-26	-29		-4			-20	-19	-42		9			-17
	2041-2070	-13	-52		-32			-32	-15	-33		-18			-22
	2071-2100	-41	-60	-23	-51	-41	-55	-45	-14	-42	-29	-6	-32	-24	-25
Tinto, Odiel Y Piedras	2011-2040	-14	-43		24			-11	-10	-64		-9			-28
	2041-2070	-11	-69		-26			-35	-10	-44		-10			-21
	2071-2100	-55	-67	-34	-58	-38	-52	-51	-19	-53	-49	9	-53	-44	-35
Guadalete - Barbate	2011-2040	-25	-34		2			-19	-23	-42		22			-14
	2041-2070	-17	-58		-38			-38	-11	-37		-20			-23
	2071-2100	-47	-65	-33	-55	-45	-69	-52	-11	-44	-37	-9	-44	-29	-29
Cuencas Mediterráneas Andaluzas	2011-2040	-4	-20		-10			-11	-13	-30		-11			-18
	2041-2070	-6	-39		-34			-26	-7	-28		-24			-20
	2071-2100	-32	-45	-31	-57	-33	-52	-42	-11	-29	-30	-29	-23	-17	-23
Segura	2011-2040	-15	-27		-3			-15	-29	-29		-8			-22
	2041-2070	-14	-45		-23			-27	-15	-33		-18			-22
	2071-2100	-28	-54	-19	-44	-50	-41	-39	-14	-37	-27	-9	-19	-24	-22
Júcar	2011-2040	-6	-13		-4			-8	-22	-25		-10			-19
	2041-2070	-10	-30		-20			-20	-12	-22		-17			-17
	2071-2100	-26	-33	-3	-48	-46	-50	-34	-12	-25	-19	-12	-34	-21	-21

		Escenario de Emisiones A2						Escenario de Emisiones B2							
		CGCM2-FIC	ECHAM4-FIC	HadAM3-FIC	HadCM3-SDSM	HadCM3-PROMES	ECHAM4-RCAO	Media	CGCM2-FIC	ECHAM4-FIC	HadAM3-FIC	HadCM3-SDSM	HadCM3-PROMES	ECHAM4-RCAO	Media
Ebro	2011-2040	-7	-13		-12			-11	-8	-14		-9			-10
	2041-2070	-11	-18		-18			-16	-12	-21		-17			-17
	2071-2100	-17	-21	-12	-40	-26	-37	-26	-5	-18	-10	-17	-23	-22	-16
Cuencas Internas de Cataluña	2011-2040	6	18		-8			5	-7	7		-10			-3
	2041-2070	-3	18		-16			0	-2	15		-13			0
	2071-2100	-9	27	-3	-29	-38	-54	-18	-2	18	-7	-14	-43	-26	-12

3.4.5 Conclusiones

3.4.5.1 Período de control

30. Se observan desviaciones importantes entre las estimaciones de la aportación anual en régimen natural de la demarcación obtenidas con las diferentes proyecciones climáticas y también entre éstas y las obtenidas con datos climáticos observados. En general, se aprecia una subestimación de la aportación anual obtenida con datos climáticos simulados respecto a la obtenida con datos observados. Tan solo en la demarcación del Miño-Sil se da algún caso en que esta tendencia se invierte. La variabilidad interanual de las series de aportación anual de las diferentes proyecciones climáticas también difiere sustancialmente entre sí, así como con respecto a la de la serie obtenida a partir de datos climáticos observados. La incertidumbre observada en la estimación del recurso en régimen natural en el periodo de control se traslada al cálculo del recurso disponible.
31. Si bien el comportamiento es diferente de una demarcación a otra, con frecuencia, las proyecciones de los modelos ECHAM4-RCAO y las HadAM3-FIC son las que presentan las mayores desviaciones en cuanto a aportación anual media de la demarcación en régimen natural y en cuanto a recurso disponible en el período de control frente a los valores simulados a partir de los datos observados.
32. El análisis de la repercusión de la implantación de caudales mínimos se ha limitado a cinco demarcaciones en función de la información disponible. Con las simplificaciones adoptadas, los únicos casos en los que se puede tener una aproximación al efecto que supone la implantación del régimen de caudales mínimos sobre el recurso disponible son el Miño-Sil y las Cuencas Internas de Cataluña, pues existe un tramo con caudal mínimo inmediatamente aguas abajo de la demanda concentrada. La simplificación de concentrar la demanda al final de la cuenca puede implicar una sobrevaloración de la reducción del recurso disponible debida a la implantación de los caudales mínimos. La reducción de recurso disponible que supone su consideración en el período de control oscila entre el 20% y el 50%, dependiendo de la proyección, en el Miño-Sil, y entre el 30% y el 50% en las Cuencas Internas de Cataluña. La variación del recurso disponible calculada como consecuencia del cambio climático entre 2011 y 2100 oscila entre +5% y -35% para el Miño-Sil y +8% y -43% para las Cuencas Internas de Cataluña.



3.4.5.2 Evolución del recurso disponible a lo largo del tiempo

33. Se considera que, si bien del examen de las tablas anteriores parece deducirse que existe una tendencia generalizada a la reducción del recurso disponible, esta conclusión debe ser muy matizada. Ello es debido, además de a las incertidumbres detectadas en el análisis del período de control, a la dispersión de los resultados de variación del recurso disponible respecto al período de control obtenidos para una misma demarcación, escenario, período y modulación de demanda, en función del modelo de circulación global o del procedimiento de regionalización. Como se observa en las tablas anteriores las diferencias son sustanciales. En consecuencia, se considera que los valores medios no son representativos y que la disparidad de los resultados obliga a reconsiderar los datos de partida, dificultando la obtención de cualquier tipo de conclusiones. En función de todo lo anterior parece razonable dedicar mayores esfuerzos a seleccionar los modelos y procedimientos de regionalización que conduzcan a resultados más fiables y realizar los análisis sólo con ellos, acotando el número de proyecciones a considerar.
34. No pueden establecerse patrones de comportamiento de validez general para todas las demarcaciones. En la mayoría de ellas, la evolución del recurso disponible a lo largo del tiempo en un mismo escenario climático no es sensible a la modulación de la demanda. Sin embargo, en cinco demarcaciones (Cantábrico Occidental, Cantábrico Oriental, Miño-Sil, Galicia Costa y Cuencas Internas de Cataluña) sí existe un comportamiento diferente en función de la demanda, siendo en general más desfavorable la demanda uniforme. El motivo puede ser la mayor exigencia de garantía de las demandas, la diferencia en la distribución de los valores mínimos de las series de aportaciones y el grado de regulación de la cuenca.
35. En el escenario A2, para una misma demarcación, en general se observa un incremento de la reducción del recurso disponible frente al período de control a medida que se avanza en el tiempo, si bien el gradiente de la reducción es variable según la proyección y la demarcación. En cambio, en el escenario B2, para una misma demarcación, en general hay disparidad de tendencias según la proyección. Cabe destacar que en este escenario en la proyección HadCM3-SDSM, el recurso disponible con frecuencia tiende a aumentar a largo plazo. Es decir, si bien se suele producir una reducción creciente del recurso disponible en los períodos 2011-2040 y 2041-2070 frente al período de control, en el período 2071-2100 el recurso disponible se reduce menos que en los dos anteriores respecto al de control o incluso aumenta ligeramente con respecto al de control.
36. En general hay una coincidencia en todas las demarcaciones en que a largo plazo el escenario B2 es más favorable que el A2; es decir, la reducción del recurso disponible con respecto al período de control tanto con demanda uniforme como variable a largo plazo es mayor en el escenario A2 que en el B2. Sin embargo, a corto plazo hay disparidad de resultados según la proyección y la demarcación, siendo con frecuencia peor el resultado en el escenario B2 que en el A2. Este resultado avalaría la eficacia de las medidas adoptadas en el escenario B2 a largo plazo.
37. Por último, en algunas demarcaciones existen proyecciones en las que la aportación anual media en régimen natural y el recurso disponible respecto varían respecto al período de control de manera aparentemente anómala. Así, para una aportación anual media igual o incluso mayor que la del período de control, el recurso disponible se reduce frente a dicho período o viceversa. En la mayor parte de estos casos, la explicación preliminar es que la aportación anual mínima en el período con resultados anómalos es menor que la correspondiente al período de control, y esto es determinante puesto que el recurso

disponible está condicionado tanto por los valores mínimos de la serie como por su sucesión temporal. En cambio, la aportación media está muy influida por los valores extremos de la serie. Un aumento en el valor medio de las aportaciones, debido a un incremento de los valores más elevados no se traducirá necesariamente en un aumento del recurso disponible, puesto que como se ha indicado, está condicionado por los valores mínimos de la serie de aportaciones.

3.5 SÍNTESIS DE LA ACTIVIDAD 4 “EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ESTADO ECOLÓGICO DE LAS MASAS DE AGUA”

3.5.1 Antecedentes

1. Es previsible que en los próximos años el cambio climático afecte intensamente a los recursos hídricos debido a la alteración del régimen habitual de las precipitaciones y al incremento de las temperaturas. Ello aconseja integrar la consideración del cambio climático en la política sectorial del agua, con el fin de planificar y poner en práctica las medidas de adaptación y mitigación que resulten pertinentes.
2. Inicialmente estaba previsto realizar el estudio con la información generada de las redes de control del estado ecológico de las masas de agua de todas las cuencas españolas, pero finalmente la Comisión de Seguimiento de la encomienda de gestión decidió acotar el trabajo únicamente para los ríos de la cuenca hidrográfica del Júcar al no estar disponible la información necesaria para todo el territorio nacional.
3. La red hidrográfica del ámbito del Júcar comprende 9 de las 32 tipologías ecológicas definidas para el territorio peninsular español de acuerdo con la Directiva Marco del Agua. La base de datos, proporcionada por la Confederación Hidrográfica del Júcar, contiene información de variables físicas, químicas y biológicas entre 1999 y 2006. Esta información, si bien su componente biológica sólo es relativa a los macroinvertebrados bentónicos, ha permitido llevar a cabo de forma piloto un ensayo y desarrollo de la metodología que se propone para su aplicación en todo el territorio nacional.

3.5.2 Objeto del estudio y alcance

4. Este informe recoge el trabajo realizado hasta la fecha del estudio del efecto del cambio climático en el estado ecológico de las masas de agua de categoría río en la cuenca hidrográfica del Júcar, como cuenca piloto. Se han realizado en concreto una serie de tareas que sirven como base para poder llevar a cabo los trabajos de simulación de la respuesta de las comunidades de macroinvertebrados bentónicos en los diferentes escenarios de cambio climático, y por tanto los efectos en el estado ecológico.
5. Para poder predecir los posibles impactos del cambio climático en los ecosistemas acuáticos se requiere estimar e interpretar el óptimo ecológico y los rangos óptimo y de tolerancia de los taxones biológicos respecto a las variables ambientales. Para ello, se han elaborado en un GIS una serie de atlas de distribución de las familias de los macroinvertebrados bentónicos fluviales con una base de datos de variables ambientales asociada, lo que ha permitido obtener los óptimos ecológicos, rangos óptimo y de tolerancia de dichas familias para las diferentes variables ambientales (físico-químicas, hidrológicas y fisiográficas) y la diferencia de los óptimos ecológicos con respecto a la resolución taxonómica.



6. La distribución de los macroinvertebrados bentónicos depende, entre otras variables, de la temperatura del agua, siendo esta una de las variables presumiblemente más afectada por el cambio climático. Para poder estudiar este efecto y relacionarlo posteriormente con el posible impacto en la comunidad biológica, ha sido necesario elaborar una metodología que permitiese transferir los efectos de los cambios en la temperatura del aire (escenarios futuros climáticos) a la temperatura del agua. Se han desarrollado dos posibles modelos de transferencia de temperatura aire/agua: un modelo a escala mensual y otro a escala diaria.
7. Hasta la fecha, no son muy numerosos los estudios relativos al efecto del cambio climático en los ecosistemas acuáticos desde el punto de vista de la respuesta de las comunidades biológicas, en sentido amplio. Los modelos de distribución de especies constituyen herramientas para relacionar la distribución actual de las especies con las variables ambientales con las que se relacionan. El estudio recoge la revisión y valoración de algunos modelos y métodos existentes para estimar la distribución futura de los macroinvertebrados bentónicos en dichos escenarios.
8. Por último, el alcance del estudio abarca además el análisis de la posible repercusión del impacto del cambio climático en las variables que caracterizan las tipologías en las que se clasifican las masas de agua. Se desarrolla una metodología que permite evaluar el número de masas de agua susceptibles de ver modificada su asignación a una tipología y detectar aquellas tipologías más sensibles a los posibles efectos del cambio climático.

3.5.3 Metodología

9. Para el estudio del efecto del cambio climático en el estado ecológico de las masas de agua se ha seleccionado como cuenca piloto la cuenca hidrográfica del Júcar.
10. En la siguiente figura se muestra un esquema de la metodología general que se ha establecido para estudiar el efecto del cambio climático en el estado ecológico de las masas de agua.

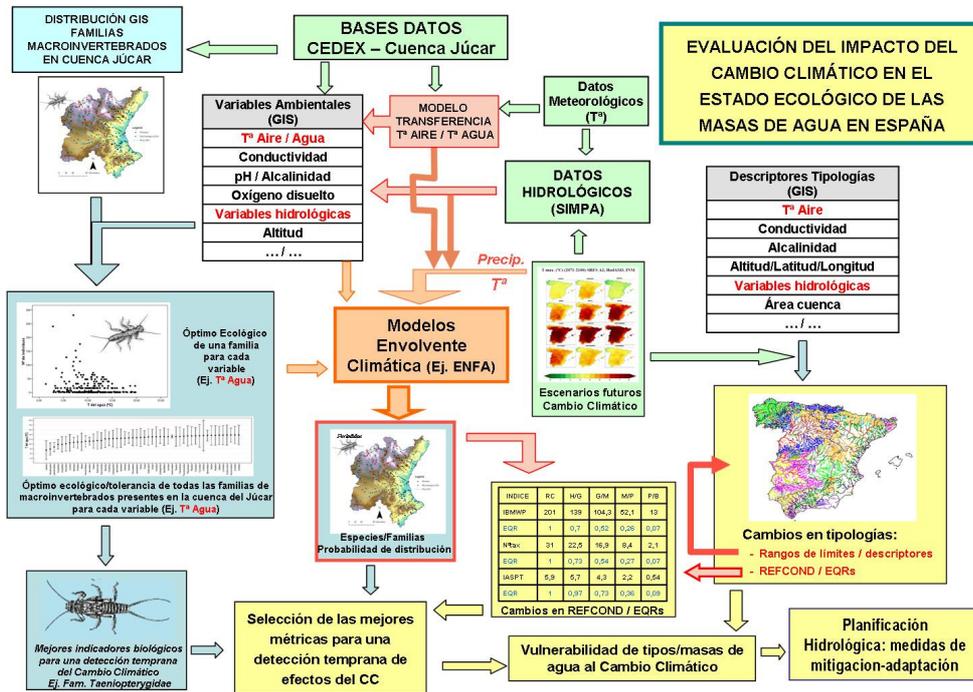


Figura 9. Metodología general del trabajo

11. La base de datos biológica, proporcionada por la Confederación Hidrográfica del Júcar, se compone de 310 estaciones de muestreo con información sobre variables físicas, químicas y biológicas entre 1999 y 2006 (figura 10). De todas ellas, se han seleccionado 73 con datos de presencia y de abundancia totales de macroinvertebrados bentónicos. Con respecto a las estaciones de aforo, de las 445 distribuidas en la cuenca, se han seleccionado 56, en las que se dispone de datos continuos diarios de caudal entre 1985 y 2006 (figura 10).

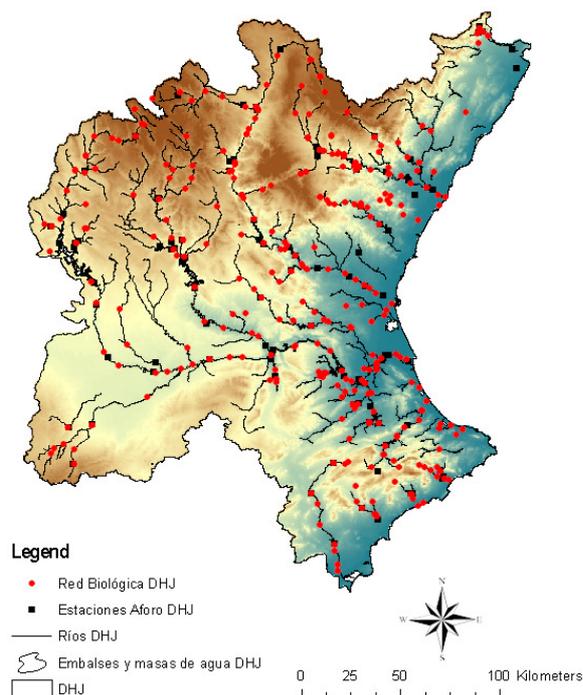


Figura 10. Distribución de las estaciones de la red biológica y de aforos en la cuenca del Júcar.

12. Para estimar el óptimo ecológico y los rangos óptimos y de tolerancia se han comparado dos métodos: método de la media ponderada (WA), que es el método clásico, y método del óptimo robusto (RO), analizando la sensibilidad de las familias de macroinvertebrados como indicadores frente al efecto del cambio climático. Para ello, aplicando ambos métodos, se ha observado la respuesta de las familias frente a incrementos simulados de temperatura del agua de 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 °C. Además, el método RO se ha aplicado para la obtención de los óptimos ecológicos para un grupo de variables con el fin de analizar su idoneidad para estudiar el valor indicador de las familias frente a posibles efectos relacionados con el cambio climático: alcalinidad, altitud, amonio, anchura media del cauce, área de la cuenca, caudal, conductividad, DBO₅, días con caudal cero, distancia a la divisoria de aguas, fosfatos, sólidos en suspensión, nitratos, oxígeno disuelto, pH, profundidad media del cauce, sulfatos y temperatura del agua.
13. Se han comparado los óptimos ecológicos estimados para dos niveles diferentes de resolución taxonómica (familia y género) en datos obtenidos para tres familias de efemerópteros (*Heptageniidae*, *Baetidae* y *Leptophlebiidae*), incluyendo varios géneros cada una, y escogiendo como variables la temperatura, conductividad, pH, caudal, altitud, media del número de días con caudal cero y distancia a la divisoria.
14. Para poder obtener la temperatura del agua en los escenarios futuros de cambio climático, se han desarrollado dos modelos de transferencia aire/agua: a escala mensual (mediante técnica de regresión lineal) y a escala diaria (mediante modelo estocástico). Para poder construir y validar los modelos, se han tomado los datos de temperatura del agua de la red SAICA (Sistema Automático de Información de Calidad de las Aguas) y los de la temperatura del aire, de las estaciones meteorológicas de la AEMET (Agencia Española de Meteorología). De todas las estaciones SAICA y AEMET se han seleccionado aquellas que cumplieran una serie de requisitos: de las estaciones SAICA, aquellas que se encontrasen a

más de 30 km aguas debajo de cualquier infraestructura o presión que ejerza algún tipo de contaminación térmica y de las estaciones AEMET, aquellas que se ubicasen a menos de 20 km de las correspondientes estaciones SAICA y con una diferencia de altitud entre ambas siempre inferior a 250 m.

15. Para poder elegir el modelo de distribución de especies más adecuado para poder cuantificar la influencia del cambio climático en las comunidades biológicas, se ha procedido a la revisión de los principales modelos existentes. Fundamentalmente, se ha tomado como fuente principal el trabajo “Novels methods improve prediction of species distributions from occurrence data” (Elith et. al., 2006), aunque también se han revisado otras publicaciones.
16. Para poder evaluar los posibles incumplimientos de las masas de agua con los rangos de las variables de las tipologías, en primer lugar se han seleccionado aquellas variables más sensibles al cambio climático (temperatura media anual, amplitud térmica media y caudal medio anual). Se han obtenido las predicciones de dichas variables para los periodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100 con el modelo climático ECHAM4, y aplicando como análisis de varianza el método no paramétrico Friedman se ha comprobado qué masas de agua no cumplen los rangos de las variables de las tipologías en las que se clasificaron.

3.5.4 Resultados

3.5.4.1 Óptimos ecológicos para las familias de macroinvertebrados bentónicos

17. Para estimar el óptimo ecológico y los rangos óptimos y de tolerancia con los dos métodos seleccionados (RO y WA) se han clasificado los individuos de cada familia en una de las cuatro zonas de la barra de error (WA) y de los box-plots (RO) en función de su localización (figura 11).

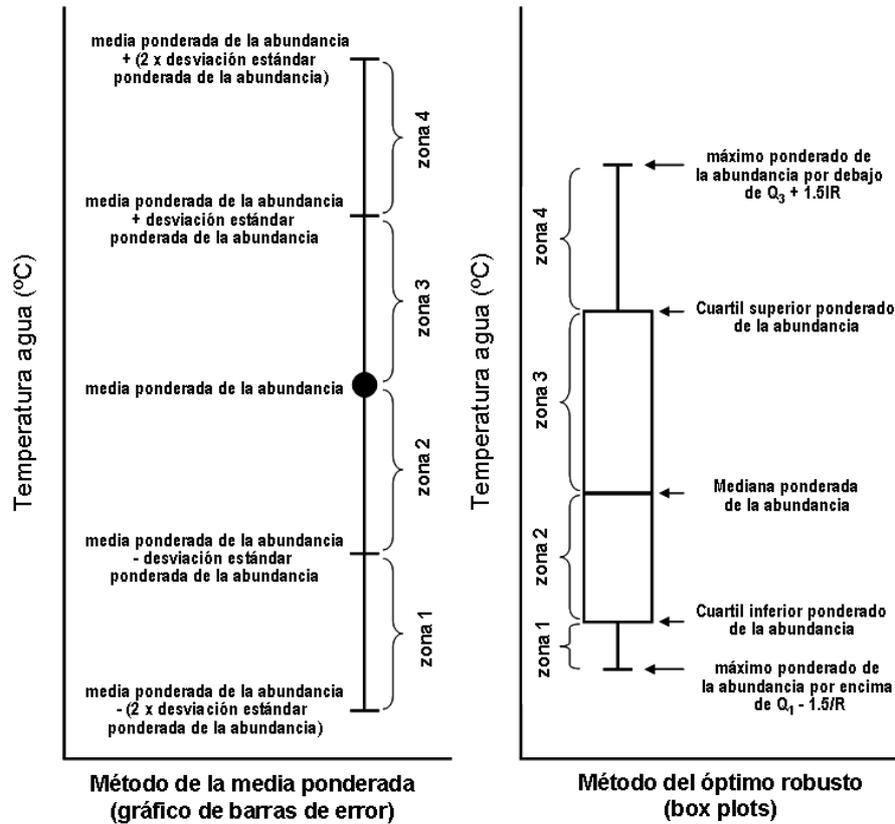


Figura 11. Definición y representación gráfica de las cuatro zonas diferenciadas en las que se clasifican los individuos de cada familia de macroinvertebrados según el método de la media ponderada (izquierda) o del óptimo robusto (derecha).

18. Aplicando el método RO se ha obtenido el porcentaje de individuos que cambian su clasificación de una zona a otra cuando se simulan incrementos de la temperatura del agua de 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 °C. Las familias que se consideran mejores indicadoras (9 familias) son aquellas cuyos porcentajes de individuos de cambio son mayores del 75 %. Cuanto mayor es el incremento de temperatura, mayor es el porcentaje de individuos afectados por el calentamiento (Figura 12).

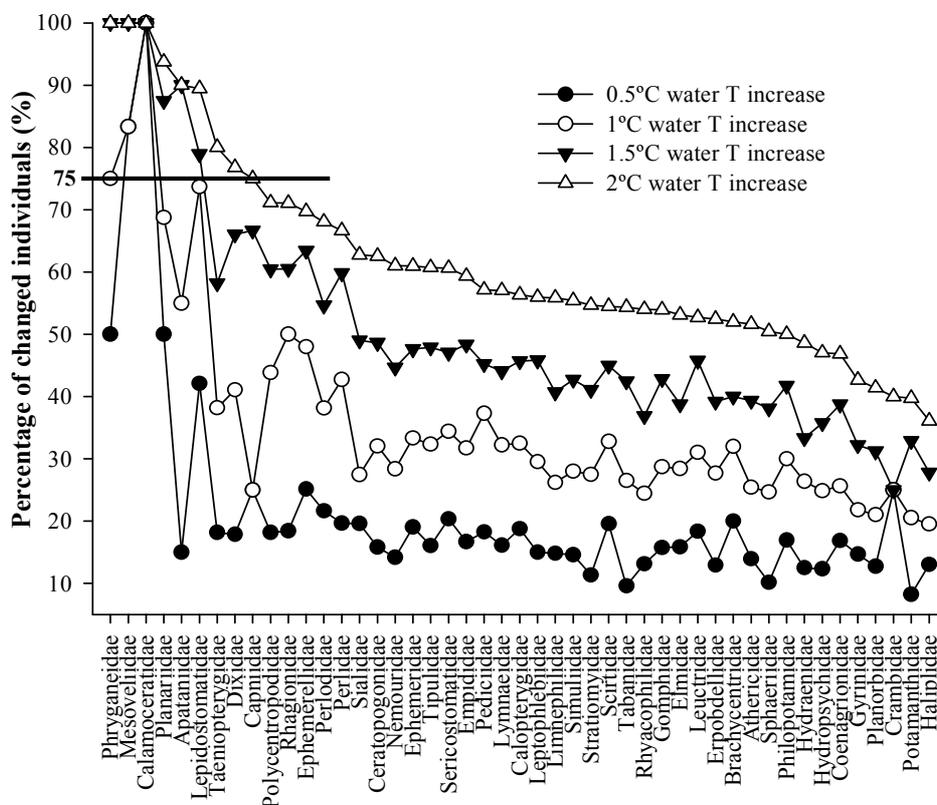


Figura 12. Resultados de la aplicación del método del Óptimo Robusto. Se representa para cada familia seleccionada en el estudio el porcentaje de individuos que han experimentado algún cambio como resultado de la simulación de los diferentes incrementos de temperatura del agua (0,5, 1,0, 1,5 y 2,0 °C).

19. Para las nueve familias que se han considerado mejores indicadoras del cambio térmico, se han comparado los porcentajes de individuos que cambian su clasificación de zona, debido al calentamiento, aplicando los dos métodos (WA y RO) observándose diferencias notables al comparar el porcentaje de individuos afectados. El método RO discrimina con mayor resolución los mejores indicadores de cambios en la temperatura (Figura 13).

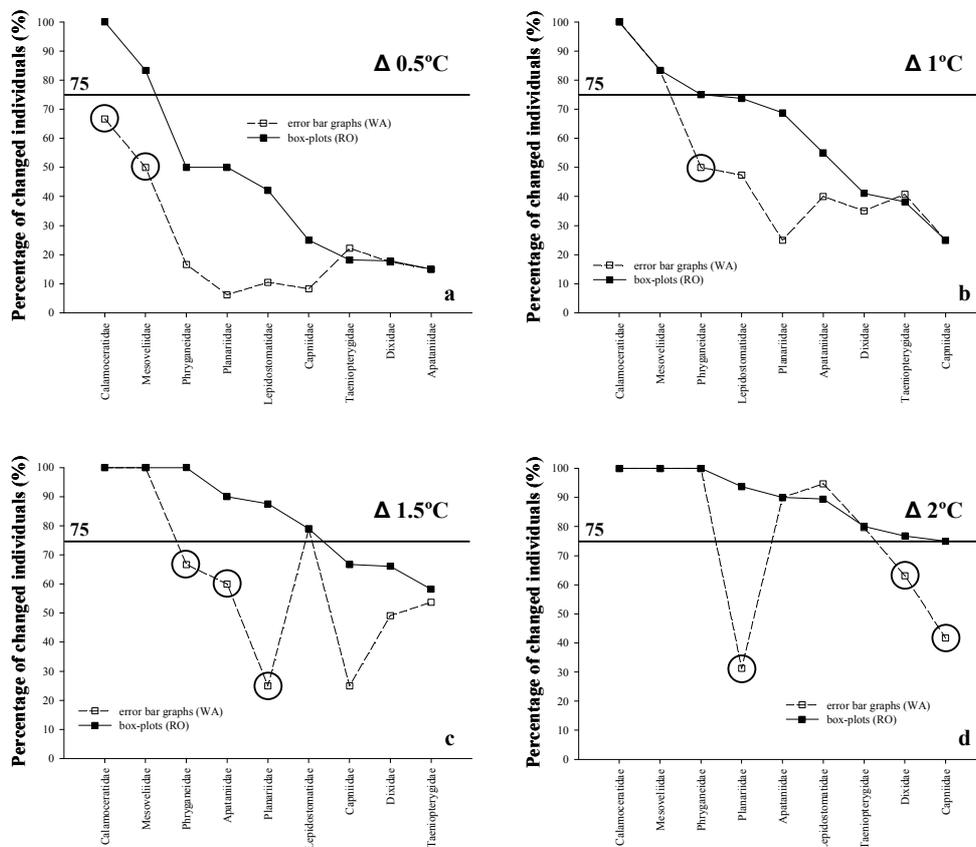


Figura 13. Comparación entre el porcentaje de individuos con cambios de las familias mejor indicadoras, resultante de la aplicación de los métodos WA y RO para incrementos de temperatura del agua de 0,5 (a), 1,0 (b), 1,5 (c) y 2,0 $^\circ\text{C}$ (d). Los círculos señalan aquellas familias identificadas como potenciales indicadoras del calentamiento global utilizando el método RO pero no cuando se utiliza el método WA. La línea negra correspondiente al valor 75% del eje de ordenadas marca el umbral del porcentaje de individuos con cambio que una familia debe sobrepasar para constituir un buen indicador.

20. Para la obtención de óptimos ecológicos y rangos óptimo y de tolerancia, el método RO se muestra más eficaz y más robusto que el método WA puesto que no le afecta ni la presencia de valores extremos ni una distribución de los datos asimétrica. La figura 14 muestra las estimas realizadas de estos parámetros mediante los métodos WA (izquierda de cada subfigura) y RO (derecha de cada subfigura) para el grupo de nueve familias descritas como indicadoras de calentamiento en al menos uno de los incrementos de temperatura simulados.

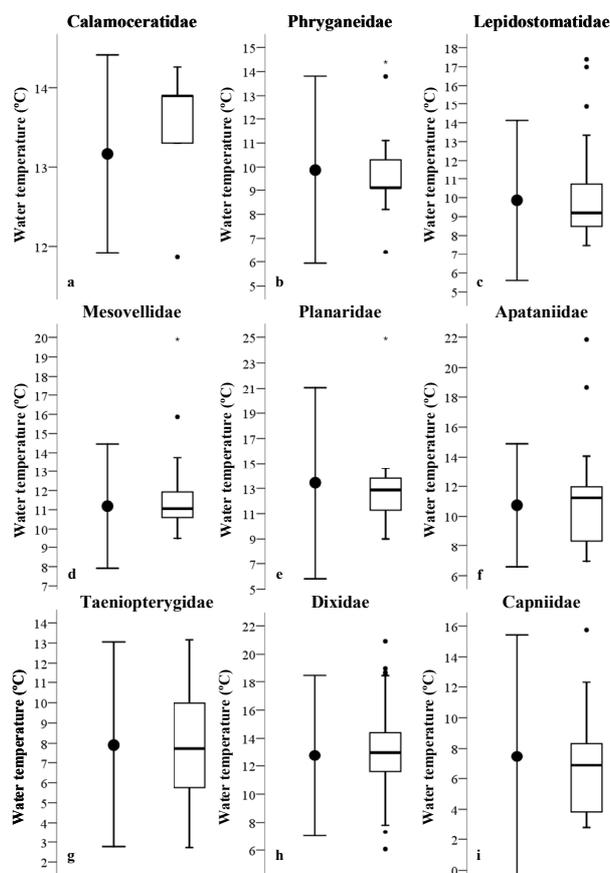


Figura 14. Estimaciones del óptimo ecológico, rango óptimo y rango de tolerancia para la temperatura del agua (sin incrementos) mediante los métodos WA (izquierda de cada subfigura) y RO (derecha de cada subfigura) para el grupo de familias descritas como indicadoras de calentamiento en al menos uno de los incrementos de temperatura simulados.

21. Se han obtenido los óptimos ecológicos de los taxones de macroinvertebrados para las variables analizadas. Se prescinde del pH y sulfatos ya que no reflejan diferencias significativas entre las familias (mostrando rangos similares prácticamente para todas las familias). También se excluyen las variables DBO₅, orden del río, área de la cuenca y sólidos en suspensión por ser parámetros no incluidos en la valoración del estado ecológico y además no estar influenciadas claramente por la temperatura ni la precipitación. Por último, las variables amonio, nitratos, fosfatos y conductividad tampoco se tienen en cuenta por la dificultad de modelización al estar afectadas por otro tipo de presiones.
22. Se han comparado los óptimos ecológicos considerando como nivel taxonómico la familia y el género tomando como ejemplo representativo un grupo de familias de efemerópteros. Algunos géneros tienen óptimos ecológicos significativamente más restrictivos que los de sus familias respectivas para determinadas variables como son la amplitud y temperatura, y por otro lado, hay variables en las que las diferencias de óptimos entre familias o géneros son más patentes, y otras en las que no se aprecian estas diferencias. Con respecto a la altitud, para la familia *Heptageniidae*, son buenos indicadores el género *Epeorus* y *Rhithrogena* para alta montaña y alta-media montaña respectivamente. Para tramos bajos, son buenos indicadores los géneros *Cloeon* (familia *Baetidae*), y *Thraululus* y *Choroterpes* (familia *Leptophlebiidae*). Con respecto a la temperatura, para valores bajos es buen

indicador el *Epeorus* con respecto a su familia; para valores más altos, los géneros *Paraleptophlebia* y *Choroerpes* (familia *Leptophlebiidae*), y *Cloeon* y *Procloeon* (familia *Baetidae*). Es predecible que en diferentes escenarios de cambio climático con variaciones en las variables más relacionadas con la precipitación (régimen de caudales) y temperatura, la influencia del cambio climático se aprecie antes en un seguimiento de determinados géneros seleccionados que en un control basado en una resolución taxonómica a nivel de sus familias respectivas. La recomendación de la resolución taxonómica más adecuada para detectar los posibles efectos del cambio climático no es algo que se pueda establecer de forma general, ya que dependerá de los diferentes grupos biológicos, objetivos concretos del trabajo, y finalmente, de la relación coste-beneficio en las redes de seguimiento.

3.5.4.2 Modelos de transferencia de temperatura aire/agua

23. Se han obtenido, a escala mensual, una ecuación de la regresión lineal para cada una de las tipologías en donde se tenían datos de temperatura aire/agua (Tabla 7). Todas las ecuaciones tienen un coeficiente de regresión superior a 0.8, salvo para la tipología 14.

Tabla 7. Regresiones lineales a escala mensual de temperaturas aire/agua en cada uno de las tipologías de ríos en los que se dispone de un registro de datos.

Tipología de río	Regresión lineal	Coefficiente de correlación (R ²)
1	$T_{agua}^s = 0.8416 \cdot T_{aire}^s + 4.2125$	0.9093
2	$T_{agua}^s = 0.8548 \cdot T_{aire}^s + 1.8408$	0.9672
4	$T_{agua}^s = 0.6702 \cdot T_{aire}^s + 4.6794$	0.9216
6	$T_{agua}^s = 0.5816 \cdot T_{aire}^s + 6.3596$	0.8670
7	$T_{agua}^s = 0.7549 \cdot T_{aire}^s + 3.117$	0.9748
9	$T_{agua}^s = 0.898 \cdot T_{aire}^s + 2.7849$	0.9455
10	$T_{agua}^s = 1.0087 \cdot T_{aire}^s + 0.1063$	0.9720
12	$T_{agua}^s = 0.7258 \cdot T_{aire}^s + 3.2657$	0.8639
14	$T_{agua}^s = 0.5352 \cdot T_{aire}^s + 9.2289$	0.6467
15	$T_{agua}^s = 0.8536 \cdot T_{aire}^s + 3.0706$	0.8954
16	$T_{agua}^s = 0.847 \cdot T_{aire}^s + 3.8489$	0.9271
17	$T_{agua}^s = 0.8708 \cdot T_{aire}^s + 3.1076$	0.9015
18	$T_{agua}^s = 0.9301 \cdot T_{aire}^s + 1.1256$	0.9489
21	$T_{agua}^s = 0.9092 \cdot T_{aire}^s + 2.51$	0.8321
26	$T_{agua}^s = 0.825 \cdot T_{aire}^s + 2.5196$	0.9620
28	$T_{agua}^s = 0.8928 \cdot T_{aire}^s + 1.9513$	0.9185

29	$T_{\text{agua}}^s = 0.8872 \cdot T_{\text{aire}}^s + 2.5792$	0.8436
31	$T_{\text{agua}}^s = 0.8169 \cdot T_{\text{aire}}^s + 3.6198$	0.9564
32	$T_{\text{agua}}^s = 0.9513 \cdot T_{\text{aire}}^s + 1.961$	0.9445

24. El modelo estocástico a escala diaria separa la temperatura (tanto la del aire como la del agua) en dos componentes: una componente anual o estacional (también llamada densidad de temperatura) y una componente residual o no estacional.
25. Calibrado el modelo, se ha validado para el resto de años en los que se tienen datos. En la siguiente figura se muestra como ejemplo las gráficas de validación para la estación SAICA 810. Los datos punteados son los datos reales de temperatura del agua medidos en los distintos años de validación y la línea continua es la predicción para cada año de validación.

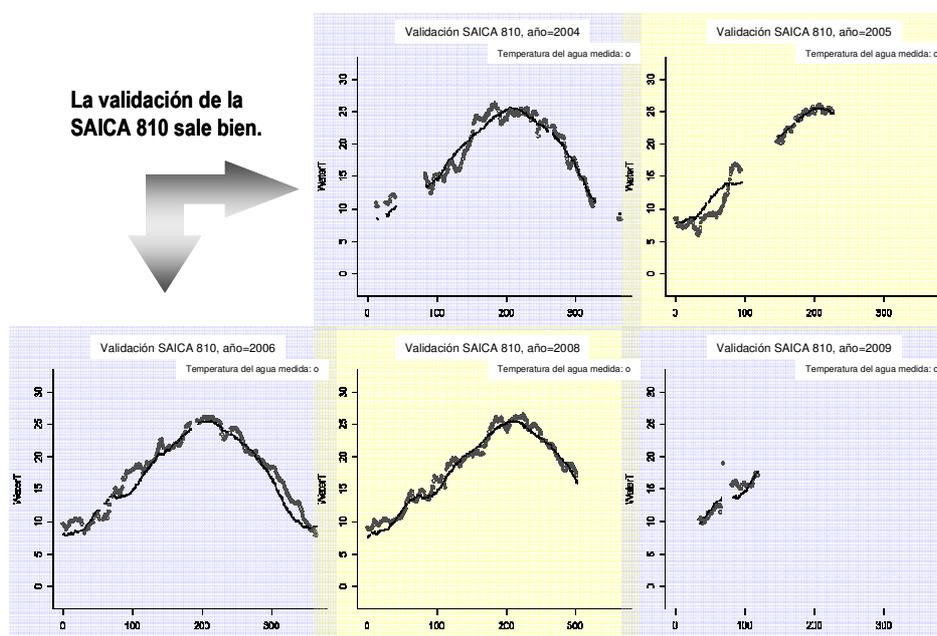


Figura 15. Gráficas de validación para la estación SAICA 810.

26. Para evaluar las predicciones tanto del año de calibración como del año de validación se ha utilizado el error cuadrático medio, ECM y el coeficiente de regresión, R^2 .
27. Se han elaborado curvas de media y medianas de temperatura del agua para cada tipología. En algunas tipologías estaciones con datos disponibles son escasas, o incluso una sola, por lo que la representatividad es baja (tipos 2, 4, 6, 7, 18, 21, 26 y 31). Otras de ellas tienen 2 ó 4 estaciones por lo que la representatividad se debe tomar con cierta prudencia (tipos 1, 9, 10, 14, 28 y 29). En las tipologías 3, 5, 8, 11, 13, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 27 y 30 no existen pares de estaciones SAICA-AEMET que cumplan los requisitos cuando se seleccionaron las estaciones, por lo que no es posible realizar ninguna predicción ni obtener curvas térmicas.

3.5.4.3 Modelos predictivos de distribución de taxones

28. Para la elección del modelo predictivo, tras analizar la aplicabilidad y las ventajas e inconvenientes de un grupo de modelos más utilizados, se propone aplicar 2 o varios de los modelos para poder analizar las posibles similitudes y diferencias, adoptando el criterio del Principio de Parsimonia, es decir, seleccionar la hipótesis más sencilla entre varias hipótesis concurrentes.
29. El planteamiento del trabajo (figura 16) parte de las predicciones de la temperatura del aire y de las precipitaciones en los distintos escenarios futuros de cambio climático realizadas por la AEMET, a partir de los cuales, y mediante el modelo SIMPA y los modelos de transferencia de temperatura aire-agua explicados en la sección 7, se obtienen las predicciones de caudal natural y de la temperatura del agua en los diferentes escenarios de cambio climático. Además de éstas dos variables, se pueden obtener más variables ambientales que afecten a las comunidades de macroinvertebrados bentónicos. Paralelamente, se ha obtenido la información relativa a los óptimos ecológicos y rangos de tolerancia de los organismos frente a las variables ambientales consideradas. Una vez obtenido el conjunto de variables ambientales determinantes y predictoras, para estimar la influencia del cambio climático sobre la distribución futura de las comunidades biológicas, se aplicaría el modelo predictivo de distribución de especies seleccionado.

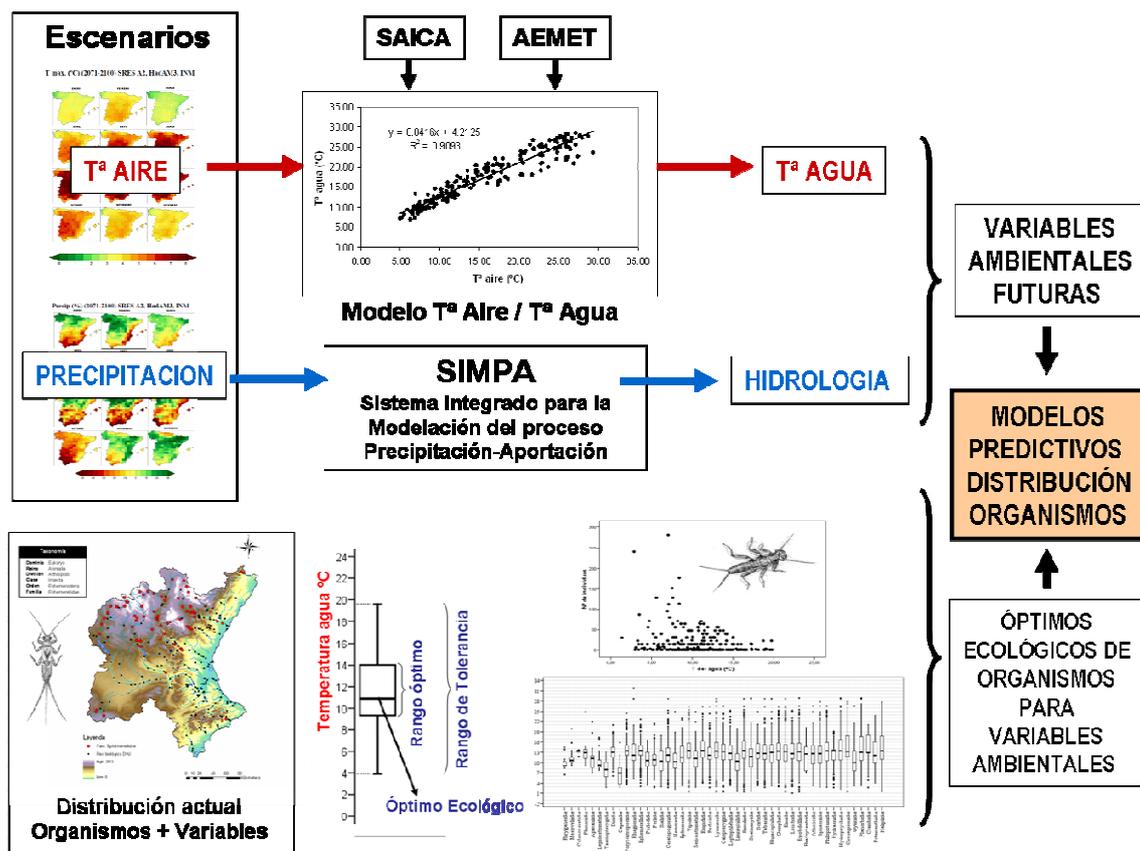


Figura 16. Esquema del estudio del efecto del cambio climático en las comunidades de macroinvertebrados en los ecosistemas fluviales mediante modelos predictivos.

30. Para una primera aproximación, en base al análisis y discusión sobre los posibles modelos a utilizar y en función de los datos disponibles, debido a su simplicidad y facilidad de implementación, se ha decidido aplicar como método más representativo los GLMs (Modelos Lineales Generalizados). Son modelos de fácil aplicación, proporcionan mejores resultados que los métodos de solo presencia (los GLMs usan datos de presencia/ausencia) y además pueden aplicarse mediante el software informático R (R Development Core Team, 2011).
31. Se propone la utilización conjunta de modelos GLMs con un modelo ENFA (Ecological Niche Factor Analysis), ya que puede proporcionar una información más clara para analizar la incertidumbre en las predicciones cuando solo se dispone de datos de presencia (mayoría de las redes de seguimiento en España). Además, dentro de los modelos que utilizan solo datos de presencia, el ENFA muestra un comportamiento óptimo, existiendo ya algunos trabajos que comparan el ENFA y los GLMs, donde se enfatiza el papel que puede desempeñar este modelo como punto de partida para categorizar la disponibilidad de hábitats previo a la aplicación de los GLMs.

3.5.4.4 Efecto del cambio climático en las tipologías

32. Se han obtenido, para los tres periodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100 porcentajes muy elevados (superiores al 50 %) de masas de agua que no cumplen los valores de los rangos de alguna de las variables que definen cada una de las tipologías (Tabla 8).

Tabla 8. Número y porcentaje de masas de agua que no cumplen los rangos establecidos para las variables "Temperatura media anual", "Amplitud térmica media" y "Caudal medio anual" establecidos para cada una de las tipologías.

Tipología	Nº total masas	Periodo	Temperatura media anual		Amplitud térmica anual		Caudal medio anual	
			Nº masas	% masas	Nº masas	% masas	Nº masas	% masas
TIPO 5	19	2011-2040	19	100	12	63.16	14	73.68
		2041-2070	19	100	8	42.11	13	68.42
		2071-2100	19	100	18	94.74	13	68.42
TIPO 9	112	2011-2040	104	92.86	86	76.79	56	50
		2041-2070	111	99.11	50	44.64	56	50
		2071-2100	112	100	38	33.93	61	54.46
TIPO 10	5	2011-2040	5	100	5	100	4	80
		2041-2070	5	100	0	0	4	80
		2071-2100	5	100	2	40	5	100
TIPO 12	56	2011-2040	50	89.29	28	50	35	62.5
		2041-2070	55	98.21	39	69.64	36	64.29
		2071-2100	56	100	50	89.29	36	64.29



Tipología	Nº total masas	Periodo	Temperatura media anual		Amplitud térmica anual		Caudal medio anual	
			Nº masas	% masas	Nº masas	% masas	Nº masas	% masas
TIPO 13	15	2011-2040	10	66.67	13	86.67	7	46.67
		2041-2070	13	86.67	13	86.67	8	53.33
		2071-2100	15	100	11	73.33	8	53.33
TIPO 14	7	2011-2040	7	100	4	57.14	7	100
		2041-2070	7	100	2	28.57	7	100
		2071-2100	7	100	0	0	7	100
TIPO 16	15	2011-2040	15	100	6	40	15	100
		2041-2070	15	100	6	40	15	100
		2071-2100	15	100	14	93.33	15	100
TIPO 17	12	2011-2040	12	100	12	100	12	100
		2041-2070	12	100	12	100	12	100
		2071-2100	12	100	9	75	12	100
TIPO 18	28	2011-2040	28	100	7	25	17	60.71
		2041-2070	28	100	10	35.71	18	64.29
		2071-2100	28	100	24	85.71	17	60.71

33. El mayor porcentaje de masas de agua que incumplen los rangos se obtiene para la variable temperatura media anual, tanto para los tres periodos como para todas las tipologías. En el caso de la amplitud térmica media anual, hay diferencia entre tipologías y entre periodos dentro de una misma tipología. Sin embargo, el caso del caudal es similar, pero menos acusado, que el de la temperatura media anual (en general el porcentaje de masas de agua que incumplen es elevado, independientemente de la tipología y del periodo).

3.5.5 Recomendaciones

34. El primer objetivo es la aplicación de la metodología propuesta en todo el territorio nacional. Además, la evaluación de los efectos del cambio climático sobre el estado ecológico de las masas de agua, en este caso de la categoría ríos, se debe realizar mediante un conjunto de indicadores biológicos que incluyen no sólo la fauna bentónica, sino también otros grupos como son el fitobentos y macrófitos, así como la fauna ictiológica.

35. Se requiere mantener actualizada la base de datos que recoge la información obtenida por las redes de seguimiento biológicas de todas las cuencas, y para todos los elementos de calidad, así como elaborar los atlas de distribución de los taxones identificados, con la información ambiental asociada. Sobre esta información, se aplicaría la metodología del

Óptimo Robusto para definir los óptimos ecológicos y rangos de tolerancia de los taxones para las variables ambientales.

36. Respecto a las predicciones de la temperatura del agua para cada masa de agua en los escenarios y proyecciones futuras, deben utilizarse las curvas obtenidas para cada tipología mediante los modelos de transferencia de temperaturas aire-agua. Igualmente, deben obtenerse las variables de caudal para dichas masas proporcionadas por la evaluación de los recursos hídricos en régimen natural.
37. Mediante la aplicación del análisis de los óptimos ecológicos frente a simulaciones de incrementos sucesivos de temperaturas del agua, se detectarían aquellas familias o taxones existentes en el territorio nacional con rangos más restrictivos frente a cambios graduales en la temperatura del agua, obteniéndose el valor indicador de las mismas. Esta metodología permite seleccionar aquellas variables ambientales y los taxones más sensibles a las mismas en los que enfocar el mayor esfuerzo de seguimiento a partir de los datos obtenidos en las redes de control biológico, funcionando como sensores tempranos de posibles efectos o tendencias provocados por el cambio climático.
38. Como variables independientes o predictoras, además de la temperatura del agua y los caudales mensuales estimados en cada punto de la red biológica, se considerará la posibilidad de incorporar otras variables.
39. Una vez obtenidas las predicciones de los mapas de distribución de los macroinvertebrados bentónicos para los horizontes propuestos (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100), se deberá calcular el estado ecológico en el futuro y estimar los posibles efectos del cambio climático sobre el mismo, determinándose si se debe proceder a una redefinición de las condiciones de referencia para cada tipología de la masa de agua considerando la influencia del cambio climático, así como revisar los valores de EQR y límites entre clases de estado ecológico.
40. Se recomienda analizar el riesgo de no cumplir en los escenarios futuros con los límites establecidos para las variables de la tipología a la que pertenecen para la totalidad de las masas de agua del territorio nacional, información de gran interés además para futuros trabajos encaminados a revisar la caracterización ecológica actual y las variables y sus rangos que la definen.
41. La aplicación de esta metodología general propuesta, se recomienda que se realice con los dos escenarios de emisiones utilizados en la evaluación de los recursos hídricos, A2 y B2, así como con el modelo ECHAM4, y para los tres periodos temporales considerados en el siglo XXI: 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100. Posteriormente, se consideraría la posibilidad de aplicarlo con otros escenarios o modelos si se considera adecuado. En la aplicación para todo el territorio nacional se trabajaría con la última regionalización disponible que haya sido utilizada en la evaluación de los recursos hídricos para escenarios futuros (la actual con aplicación disponible al cálculo de los recursos hídricos corresponde al 3º informe de evaluación del IPCC de 2001), ya que estos son la fuente principal de entrada de datos hidrológicos en los modelos predictivos a utilizar.
42. Finalmente, sería deseable abordar en un futuro cercano el desarrollo y aplicación de este tipo de metodologías a otras categorías de masas de agua como son los lagos y aguas de transición, además de los embalses y otras masas de agua artificiales o muy modificadas.



4 EQUIPO DE TRABAJO

Dentro del CEDEX, el desarrollo de los trabajos objeto de la encomienda ha estado a cargo del Centro de Estudios Hidrográficos y en su realización han participado las siguientes personas:

- Actuación 1: Efecto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural.
 - Área de Recursos Hídricos
 - D. Javier Álvarez Rodríguez, Coordinador de Programa Técnico Científico.
 - D. Luis Miguel Barranco Sanz, Director de Programa.
 - D^a. Ángela Potenciano de Las Heras, Personal de Investigación.
 - Área de Ingeniería de Sistemas
 - D. Luis Quintas Ripoll, Jefe del Área de Ingeniería de Sistemas.
 - D^a María del Carmen Ángel Martínez, Directora de Programa.
- Actuación 2: Efectos potenciales del cambio climático en las demandas de agua y estrategias de adaptación.
 - Área de Gestión Sostenible Agua y Territorio
 - D. Julián Martínez Beltrán, Jefe del Área de Gestión Sostenible Agua y Territorio.
 - D. Joaquín Rodríguez Chaparro, Jefe del Área de Gestión Sostenible Agua y Territorio hasta el año 2009.
 - D. José Ramón García Vilches, Coordinador de Programa Técnico Científico.
 - D^a. Esther Carazo Rivera, Directora de Programa.
 - D. Carlos Notario Bodelón, Director de Programa.
 - D^a. María Comes Gracia, Técnico Superior.
 - D. Julio Menéndez López, Jefe Sección Técnica.
 - D^a. Arancha de Benita Harguindey, Personal de Investigación.
- Actuación 3: Efecto del cambio climático en los recursos hídricos disponibles en los sistemas de explotación.
 - Área de Estudios y Planificación
 - D. Ángel García Cantón, Jefe del Área de Estudios y Planificación.
 - D. Manuel Luna Machicado, Coordinador de Programa Técnico Científico.
 - D^a Paula Pascual Bernáldez, Directora de Programa.
 - D. Antonio Parrondo Álvarez, Técnico Superior.
 - D. Diego Arza Fernández, Técnico Auxiliar de Ensayos.
 - D. Rafael Díaz Pérez, Ayudante Técnico.
 - D^a María Alba Solans Verdú, Personal de Investigación.



- D^a María Estrella Alonso Tejedor, Personal de Investigación.
- Área de Ingeniería de Sistemas
 - D^a María del Carmen Ángel Martínez, Directora de Programa.
- Actuación 4: Efecto del cambio climático en el estado ecológico de las masas de agua.
 - Área de Medio Ambiente Hídrico
 - D. Manuel Toro Velasco, Jefe del Área de Medio Ambiente Hídrico.
 - D^a. María Peg Cámara, Jefe de Sección Técnica.
 - D. Sergio Velasco Ayuso, Personal de Investigación.
 - D^a. Elena Cristóbal Rodríguez, Personal de Investigación.

Madrid, diciembre de 2012

El autor del informe,

Fdo.: D. Antonio Jiménez Álvarez
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Director de Estudios de Agua y Medio Ambiente



REFERENCIAS

CYII, 2007. *Microcomponentes y factores explicativos del consumo doméstico de agua en la Comunidad de Madrid*. Preparado por Cubillo F., Ibañez, J.C., Moreno, T. y Ortega, S. Cuadernos de I+D+i, Dirección de Innovación e Ingeniería del Canal de Isabel II. Madrid. 2007.

Elith J. et al., 2006. *Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data*. *Ecography*, 29(2): 129-151. 2006.

FAO, 2006. *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Versión española del "FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56". Roma. 2006.

MIMAM, 2000a. *Libro blanco del agua en España*. Ministerio de Medio Ambiente. 2000.

MIMAM, 2000b. *Plan Hidrológico Nacional: Análisis de los sistemas hidráulicos*. Ministerio de Medio Ambiente. 2000.

R Development Core Team, 2011. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. 2011. ISBN 3-90051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.