

Guía para la adaptación de los sistemas de agua urbana al cambio climático

AUTORES

Antonio Figueroa Abrio

Director del Estudio Agua y Territorio.

Ángela Lara García

Profesora del Departamento de Geografía Humana de la Universidad de Sevilla.

Luis A. Babiano Amelibia

Gerente de la Asociación Española de Operadores Públicos de Abastecimiento y Saneamiento.

Paola Rodolfi

Estudio Agua y Territorio.

Álvaro Jiménez García

Técnico Superior de Medio Ambiente. Diputación de Badajoz.

Antonio Ramírez Ramírez

Técnico de proyectos de AEOPAS.

Antonio Figueroa Abrio
Ángela Lara García
Luis A. Babiano Amelibia
Paola Rodolfi
Álvaro Jiménez García
Antonio Ramírez Ramírez

Guía para la adaptación de los sistemas de agua urbana al cambio climático



Sevilla, 2025

Comité editorial de la Editorial Universidad de Sevilla:

Araceli López Serena
(Directora)

Elena Leal Abad
(Subdirectora)

Concepción Barrero Rodríguez

Rafael Fernández Chacón

María Gracia García Martín

María del Pópulo Pablo-Romero Gil-Delgado

Manuel Padilla Cruz

Marta Palenque

María Eugenia Petit-Breuilh Sepúlveda

Marina Ramos Serrano

José-Leonardo Ruiz Sánchez

Antonio Tejedor Cabrera

Ficha catalográfica:

Figuerola Abrio, A. y Lara García, A., Babiano Amelibia, L., Rodolfi, P., Jiménez García, A. y Ramírez Ramírez A. *Guía para la adaptación de los sistemas de agua urbana al cambio climático*. Asociación Española de Operadores Públicos de Abastecimiento y Saneamiento y Editorial Universidad de Sevilla. Sevilla. 2025.

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información y sistema de recuperación, sin permiso escrito de la Asociación Española de Operadores Públicos de Abastecimiento y Saneamiento y la Editorial Universidad de Sevilla.

Colabora: Secretaría de Estado de Medio Ambiente*



© Asociación Española de Operadores Públicos de Abastecimiento y Saneamiento, 2025

Edificio Porta Sevilla Módulo 138,
c/ Dr. González Caraballo, 1 - 41020 Sevilla

Tlfs.: 955 40 85 06

Correo electrónico: info@aeopas.org

Web: <https://www.aeopas.org/>

© Editorial Universidad de Sevilla 2025

c/ Porvenir, 27 - 41013 Sevilla.

Tlfs.: 954 487 447; 954 487 451

Correo electrónico: info-eus@us.es

Web: <https://editorial.us.es>

Responsable de la edición: Luis A. Babiano Amelibia

© de los textos: los autores, 2025.

© de las imágenes: los propietarios, 2025.

ISBN: 978-84-472-3154-6

DOI: <https://dx.doi.org/10.12795/9788447231546>

Diseño, maquetación y

realización electrónica: Antonio Ramírez Ramírez. Técnico de proyectos de AEOPAS.

***La Secretaría de Estado de Medio Ambiente, del Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico, del Gobierno de España, ha colaborado en la impresión de la presente publicación y en la celebración del acto de presentación con el objetivo de apoyar la difusión de la Guía para la adaptación de los sistemas de agua urbana al cambio climático.**

Índice

Prólogos	1
1. Introducción	9
1.1. Objeto de la guía	11
1.2. Contenido de la guía	12
1.2.1. Nuevos paradigmas para la adaptación del cambio climático del ciclo urbano del agua	13
1.2.2. Propuesta de un marco de referencia inicial para la adaptación del ciclo urbano del agua	14
2. Agua y cambio climático	17
2.1. Riesgos hidroclimáticos: conceptos centrales	20
2.1.1. Definición de riesgo desde la perspectiva del cambio climático	20
2.1.2. Componentes de los riesgos hidroclimáticos	22
2.2. Cambio climático: situación de partida a la luz del Sexto informe del IPPC	27
2.3. El cambio climático sobre la esfera del agua	31
2.4. Implicaciones del cambio climático en el sistema de agua urbana	36
2.4.1. Impactos del cambio climático asociados a lluvias torrenciales e inundaciones	38
2.4.2. Impactos del cambio climático asociados a la sequía y escasez de agua	41
2.4.3. Efectos del cambio climático asociados a las temperaturas extremas y las olas de Calor	44
2.5. Nuevos paradigmas para la adaptación al cambio climático de los sistemas de agua urbana	47
2.5.1. La Directiva Marco del Agua y los principios de restauración ambiental	50
2.5.2. Garantía del derecho humano al agua y el saneamiento en el contexto de cambio climático	53
2.5.3. Las ciudades sensibles al agua	56
2.5.4. Servicios ecosistémicos y soluciones basadas en la naturaleza	60

3. Marco institucional de la gestión urbana del agua y el cambio climático	63
3.1. Fundamentos estratégicos y legales de la adaptación	66
3.1.1. La arquitectura estratégica de la adaptación de los sistemas de agua urbana	66
3.1.2. Claves del marco legal de la adaptación de los sistemas de agua urbana	72
3.2. Objetivos y líneas estratégicas de adaptación de los sistemas de agua urbana al cambio climático	81
3.3. Agua, cambio climático y servicios: mapa competencial	94
3.3.1. Marco Internacional	95
3.3.2. Marco Europeo	96
3.3.3. Marco Nacional	97
3.4. Conclusiones	98
 4. Actuaciones para la adaptación del cambio climático en los sistemas de agua urbana	 101
4.1. Propuesta de un marco de actuación para la adaptación de los sistemas de agua urbana al cambio climático	104
4.1.1. Fase I. Diseño del proceso	107
Sesión participada 1: hoja de ruta	108
Resultados	108
4.1.2. Fase 2. Caracterización de la situación de partida	109
4.1.3. Fase 3. Evaluación de riesgos hidroclimáticos	110
Sesión participada 2: Diagnóstico participado	113
Resultados	114
4.1.4. Fase 4. Plan de adaptación al cambio climático	114
Sesión participada 3: Definición del plan de actuación	118
Resultado	119
4.1.5. Fase 5. Implementación, evaluación y seguimiento	120
4.1.6. Plan de seguimiento, control y evaluación	120
4.2. Opciones de adaptación	121
4.2.1. Opciones de adaptación blandas	124
4.2.2. Opciones de adaptación verdes	144
4.2.3. Opciones de adaptación grises	158

5. Fenómenos climáticos y derecho humano al agua respuestas técnicas y culturales desde la gestión pública	173
5.1. Introducción	175
5.2. El análisis de los impactos del cambio climático en Europa	178
5.2.1. El caso de Francia: de la emergencia hídrica a la planificación estructural	179
5.2.2. El caso de Países Bajos: vulnerabilidad urbana en un sistema tecnificado	181
5.2.3. El caso de Alemania: impactos extremos en un modelo hídrico fragmentado	183
5.2.4. El caso de Italia: alternancia de extremos en un ciclo hidrológico alterado	186
5.2.5. Otros casos en el sur y este de Europa: tendencias convergentes	187
5.2.6. El caso español. Evaluación de la Gestión del Agua en España según los Informes de la Comisión Europea.	189
Estado de las aguas en España	190
Recomendaciones específicas para España	191
5.2.7. Conclusiones	192
5.3. El agua frente a la emergencia climática: un reto estructural para los operadores públicos de agua	192
5.4. Respuestas institucionales ante los fenómenos hidrológicos extremos: revisión crítica	195
5.5. Dimensión cultural de la gestión del agua y arquetipos sociales ante el riesgo	198
La necesidad de co-creación	201
5.6. Hacia una transición hidrológica justa: propuestas normativas, financieras y sociales	202
5.7. Conclusión: un nuevo paradigma para los sistemas de agua urbana	205
Anexo I. Detalle del marco institucional	209
I.I. Marco estratégico de los sistemas de agua urbana y cambio climático	211
I.I.I. Marco internacional y comunitario	211
I.I.II. Marco nacional	219
I.II. Marco normativo en relación al cambio climático y los sistemas de agua urbana	237
I.II.I. Legislación internacional y de la Unión Europea	238
I.II.II. Legislación nacional	248

	Página
Anexo II. Buenas prácticas	261
Plan de mitigación y adaptación al cambio climático del municipio de Arteixo	263
Fuentes públicas de agua potable ACASA	268
Proyecto <i>SeGuía</i>	269
Plan Emergencia Climática EMASESA	270
La adaptación al ciclo integral del agua en EMASESA	270
La experiencia de EMALCSA en la reducción del consumo urbano de agua	271
Una estrategia integral para un consumo más eficiente	271
Un modelo de gobernanza sostenible	272
Una buena práctica replicable	273
Digitalización del ciclo integral del agua en Vitoria-Gasteiz (Smart AMVISA)	274
Plan Local de Aguas Regeneradas de Chiclana de la Frontera	278
Ordenanza municipal de gestión sostenible de reutilización del agua en Calviá	279
Observatorio del Agua de Terrassa	280
Plan Depura, Badajoz	282
Los SUDS en Barcelona: hacia una gestión resiliente y sostenible del agua pluvial	283
Un cambio de paradigma en la gestión de las aguas pluviales	283
Soluciones adaptadas al contexto mediterráneo	284
Integración normativa y planificación urbana	285
Beneficios ambientales y climáticos	286
Reducción de la huella de carbono en Xabia	287
EMAYA impulsa la descarbonización del ciclo del agua	288
Barcelona impulsa la reutilización de aguas grises	291
Aljarafesa impulsa el proyecto: “Agua inteligente, futuro sostenible”	292
Anexo III. Bibliografía	295
Anexo IV. Acrónimos	305
Anexo V. Índice de tablas y figuras	311
V.I. Índice de tablas	313
V.II. Índice de figuras	315

PRÓLOGOS



Hugo Morán Fernández

Secretario de Estado de Medio Ambiente.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

El cambio climático no es una amenaza lejana, sino una realidad presente que afecta a todos los rincones del planeta sin excepción. Estamos viendo cómo sus impactos alteran de manera profunda nuestro entorno, transformando los patrones climáticos, intensificando los eventos meteorológicos extremos y poniendo en riesgo recursos esenciales como el agua. En España, un país con una realidad territorial diversa, una climatología altamente variable y con una presión creciente sobre los recursos hídricos, la adaptación al cambio climático no es una opción, sino una necesidad inaplazable.

La crisis climática nos ha colocado en una encrucijada en la que no podemos seguir gestionando el agua con los mismos criterios de hace 30 años. Los modelos tradicionales de planificación hidrológica han de evolucionar hacia enfoques que incorporen la incertidumbre climática como un elemento central en la toma de decisiones. Esto implica revisar cómo captamos, distribuimos, utilizamos y depuramos el agua, garantizando la protección de los ecosistemas acuáticos y las masas de agua, que son nuestras fuentes de suministro. En un contexto de que cada gota cuente en un contexto en el que la escasez se convierte en un factor estructural de nuestra realidad.

Uno de los grandes retos es la necesidad de transitar hacia un modelo de gestión hídrica más resiliente, capaz de anticiparse a los problemas en lugar de reaccionar a ellos cuando ya es tarde. Debemos adelantarnos a las crisis mediante una planificación proactiva que nos permita adaptarnos a los efectos de las sequías y las inundaciones antes de que se conviertan en una crisis irreversible.

La gestión de la demanda de agua es un elemento esencial dentro de esta nueva visión. No podemos seguir centrando la gestión del agua únicamente en el aumento de la oferta en un contexto de recursos decrecientes, sino que debemos impulsar políticas que promuevan un uso más eficiente y racional del agua. Es imprescindible mejorar la eficiencia en todos los sectores, desde el regadío hasta los usos urbanos y la industria, fomentando tecnologías innovadoras, infraestructuras más eficientes y una cultura del ahorro de agua. El desarrollo de tarifas progresivas, el control de pérdidas en las redes de distribución y la implantación de sistemas inteligentes de monitorización del consumo son herramientas clave para garantizar que el agua disponible se utilice de manera sostenible y equitativa.

En este sentido, es fundamental reforzar las infraestructuras hídricas para hacerlas más eficientes, minimizar las pérdidas en la red de distribución y fomentar el uso de fuentes alternativas como la reutilización de aguas regeneradas. También es imprescindible apostar por soluciones basadas en la naturaleza, como la restauración de humedales o la protección de los ecosistemas fluviales, que desempeñan un papel esencial en la regulación natural del agua y en la recarga de los acuíferos.

No menos importante es el papel de la ciudadanía y los actores locales en esta transformación. La adaptación al cambio climático requiere la implicación de todos: administraciones públicas, empresas, comunidades locales y cada uno de nosotros como consumidores responsables. Es necesario consolidar un modelo de gobernanza que integre el conocimiento científico con la toma de decisiones políticas y la acción ciudadana. La ciencia nos ha mostrado con claridad los riesgos a los que nos enfrentamos; ahora nos corresponde consolidar políticas e inversiones que nos permitan garantizar un futuro sostenible en el ámbito del agua.

Esta guía es una herramienta esencial en este camino. Proporciona un marco de referencia para que los operadores de los sistemas de agua urbana puedan implementar estrategias de adaptación eficaces, promoviendo un uso más eficiente y sostenible de los recursos hídricos. Es el resultado de un esfuerzo colaborativo que refleja el compromiso del Gobierno de España y del conjunto de actores públicos y privados en asegurar la resiliencia de nuestros sistemas hídricos frente a los desafíos climáticos.

En este desafío, la única alternativa viable es la acción decidida y coordinada. La adaptación al cambio climático no es solo una tarea técnica o administrativa; es una responsabilidad colectiva para garantizar el derecho al agua y la sostenibilidad de nuestro entorno en un mundo que está cambiando aceleradamente. Esta guía nos ofrece un camino a seguir, y ahora nos corresponde a todos convertir sus propuestas en realidades tangibles.



Asociación Española de Operadores
Públicos de Abastecimiento y Saneamiento

Francisco Buenavista García
Presidente de la AEOPAS

Los sistemas urbanos de agua se encuentra en un momento crucial de transformación. Las presiones del cambio climático sobre los sistemas de abastecimiento y saneamiento son cada vez más evidentes: episodios de sequía más prolongados, fenómenos de lluvias torrenciales que desbordan infraestructuras, una creciente degradación de la calidad del agua y una demanda que sigue en aumento. Estos retos nos obligan a replantear por completo la gestión del agua en nuestras ciudades y pueblos, avanzando hacia un modelo basado en la resiliencia y la sostenibilidad.

Los operadores públicos de abastecimiento y saneamiento desempeñamos un papel clave en esta transición. Nuestra responsabilidad no se limita a garantizar el acceso al agua potable y el adecuado tratamiento de las aguas residuales, sino que debemos convertirnos en agentes activos de la adaptación al cambio climático. Ya no basta con mantener las infraestructuras existentes; es imprescindible adoptar enfoques innovadores que nos permitan anticiparnos a los problemas y garantizar la seguridad hídrica en un contexto de creciente incertidumbre.

Para ello, es necesario implementar nuevas estrategias basadas en la gestión del riesgo y la resiliencia. Esto significa desarrollar planes de adaptación específicos para cada municipio, optimizar la eficiencia de las redes de distribución para minimizar pérdidas, apostar por la reutilización del agua regenerada y fomentar la digitalización de los sistemas de gestión, de manera que podamos monitorizar en tiempo real el estado de los recursos hídricos y tomar decisiones más informadas.

El paradigma de la resiliencia nos invita a repensar el agua urbana como un sistema dinámico y adaptable, capaz de responder de manera flexible a los desafíos climáticos. En este sentido, es fundamental priorizar soluciones basadas en la naturaleza, como la recuperación de humedales urbanos, la restauración de ríos y la implantación de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), que permiten gestionar mejor las lluvias torrenciales y reducir el impacto de las inundaciones.

También debemos avanzar hacia una mayor circularidad en la gestión del agua. La reutilización de aguas regeneradas para riego urbano, la captación de aguas pluviales y la reducción de consumos energéticos en las plantas de tratamiento son estrategias que no solo refuerzan la resiliencia del sistema, sino que también contribuyen a la sostenibilidad ambiental y económica de los servicios públicos.

Sin embargo, la adaptación al cambio climático de los sistemas de agua urbana no puede depender únicamente de avances tecnológicos o cambios en la infraestructura. Se necesita un enfoque integral que incluya una gobernanza más participativa, en la que las administraciones, los operadores públicos y la ciudadanía trabajemos juntos para construir modelos de gestión más democráticos y eficaces. La transparencia, la educación y la sensibilización social son pilares esenciales para lograr una transición justa hacia un nuevo modelo de gestión del agua.

Esta guía es una herramienta fundamental en este proceso. Proporciona un marco de referencia para que los operadores públicos de abastecimiento y saneamiento podamos implementar estrategias de adaptación eficaces, avanzando hacia un modelo de gestión del agua que no solo garantice el derecho al agua y al saneamiento, sino que también refuerce la capacidad de nuestras ciudades y pueblos para hacer frente a los impactos del cambio climático.

Estamos ante una gran oportunidad para transformar la manera en que gestionamos el agua en nuestros pueblos y ciudades. La adaptación no puede esperar; debemos actuar con decisión, innovación y una visión a largo plazo. Porque solo a través de una gestión resiliente y sostenible de los sistemas de agua urbana podremos garantizar que este recurso esencial siga estando disponible para las generaciones presentes y futuras.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objeto de la guía

Esta guía tiene como objetivo proporcionar a los operadores y agentes interesados un marco de actuación para desarrollar estrategias y medidas de adaptación del cambio climático en la esfera de los sistemas de agua urbana. En efecto, el cambio climático ya está produciendo una serie de efectos sobre el planeta con incidencia directa sobre el ciclo hidrológico y, por consiguiente, en los sistemas de agua urbana. Se espera que durante las próximas décadas los impactos del cambio climático se agudicen e incrementen, por lo que resulta de gran interés contar con una guía de adaptación como ésta, máxime cuando se trata de un ámbito en el que, debido fundamentalmente a la naturaleza del marco competencial de carácter local y su aproximación a la escala supramunicipal, no suelen contar con este tipo de documentos.

De ahí el interés y la necesidad de editar una guía que contribuya a tratar las complejas relaciones entre las políticas municipales y los sistemas de agua urbana, donde se plantee un marco de gestión y planificación para hacer frente al reto de la emergencia climática mediante el buen uso del agua en los sistemas urbanos y las zonas rurales adyacentes, con una visión clara de adaptación con propuestas de directrices, objetivos y orientaciones al tiempo que se ofrece experiencias de referencia que puedan ser de utilidad para los operadores públicos.

¿A quién va dirigida la guía? Esta guía está dirigida a los operadores públicos responsables de los servicios municipales del ciclo integral del agua de uso urbano, que quieran poner en marcha medidas y acciones de adaptación al cambio climático basadas en la gestión del riesgo. La guía ofrece un conjunto de herramientas para poner en marcha distintas actuaciones a diversas escalas en el ámbito del abastecimiento, el saneamiento y la depuración.

1.2. Contenido de la guía

La presente guía aborda las principales relaciones entre los sistemas urbanos del agua y los efectos del cambio climático en clave de adaptación. Desde la perspectiva del ciclo hidrológico, los ecosistemas acuáticos, los riesgos climáticos como las sequías o las inundaciones son temas profusamente estudiados, si bien, en el ámbito del ciclo urbano del agua y bajo una perspectiva integral, no se han identificado muchas experiencias recientes.

La gestión del ciclo urbano del agua en el contexto del cambio climático requiere una comprensión clara de los riesgos hidroclimáticos. El concepto central sobre el que pivota la Guía se basa en la definición de riesgo climático realizada por el IPPC (2022) y la Oficina Española de Cambio Climático (OECC, 2022), ampliando y desarrollando los componentes, desde la propia definición de *peligro hidroclimático* (las lluvias torrenciales, sequías o temperaturas extremas) hasta la noción de *vulnerabilidad*, adoptando la definición ya empleada por muchos autores a partir de Adger (2006).

Aplicado al ciclo urbano del agua, la Guía realiza una primea aportación a la identificación y caracterización de los posibles impactos del cambio climático con perspectiva integradora. Si bien existen multitud de trabajos que abordan de manera sectorial las relaciones entre peligros climáticos y elementos del ciclo urbano (fuentes de suministro, infraestructuras, servicio de abastecimiento, etc. no hemos encontrado trabajos actualizados que aborden este planteamiento a escala del ciclo urbano del agua e integrando los riesgos hidroclimáticos. La guía sistematiza una propuesta de caracterización de los posibles riesgos asociados a las lluvias torrenciales y las inundaciones, las sequías y la escasez y las temperaturas extremas y olas de calor, identificando **grupos de impactos** (servicios ecosistémicos, infraestructuras y usuarios), **factores de vulnerabilidad** (estado de las masas de agua, ocupación de zonas inundables, sectores productivos dependientes de recursos en contextos de escasez, etc.), **interacciones** (contaminación de fuentes de abastecimiento por desbordamientos de las redes de

saneamiento y escorrentía urbana, daños en infraestructuras, interrupciones y cortes de servicios, etc.) e **impactos principales** (deterioro de la calidad del agua, disminución de recursos hídricos, pérdida de vidas humanas, cortes de suministro, daños económicos y materiales, etc.).

1.2.1. Nuevos paradigmas para la adaptación del cambio climático del ciclo urbano del agua

La adaptación al cambio climático en la esfera del ciclo urbano del agua, en los términos que plantea la guía, implica transitar desde sistemas de gestión a *salvo de fallos* – “*fail-safe*” – (Nikolopoulos et al., 2022) a sistemas *preparados para fallar* – “*safe to fail*” – (Ahern, 2011; Butler et al., 2017). En efecto, los primeros se corresponden con sistemas robustos, que ponen énfasis en el control de los fenómenos físicos y que están diseñados para afrontar cualquier evento extremo, actual o futuro. Frente a este planteamiento, el enfoque “*safe to fail*” está centrado en generar una mayor *resiliencia* y permite incrementar *la capacidad de adaptación* frente a las situaciones de riesgo, incorporando en los análisis de escenarios cierto grado de incertidumbre (Fletcher et al., 2017; Nikolopoulos et al., 2022; Stakhiv, 2011).

Bajo este enfoque, las estrategias de adaptación avanzan hacia modelos que introducen la comprensión de las dimensiones ambientales, sociales e institucionales, en lo que se conoce como el **paradigma de la resiliencia**, donde la *vulnerabilidad*, la *exposición* y la *adaptación* emergen como conceptos clave (Ahern, 2011; IPCC, 2022; Nikolopoulos et al., 2022).

Esta visión se completa con la incorporación de una serie de grandes orientaciones alrededor de la Directiva Marco del Agua y los principios de la restauración ambiental, la garantía del Derecho Humano al Agua y el Saneamiento, el marco de las ciudades sensibles al agua, los servicios ecosistémicos y las soluciones basadas en la naturaleza (Figura 1).

1.2.2. Propuesta de un marco de referencia inicial para la adaptación del ciclo urbano del agua



Figura 1. Orientaciones de la Guía de Adaptación al Cambio Climático en el Ciclo Urbano del Agua. Elaboración propia.

El marco institucional de adaptación del ciclo urbano del agua está definido por una serie de planes, programas y estrategias, como el Pacto Verde Europeo, el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) o las Orientaciones Estratégicas Agua y Cambio Climático, así como un amplio conjunto de normas, entre ellas la Directiva Marco del Agua (DMA), la Directiva de Inundaciones, las Directivas sobre Aguas de Consumo y el Reglamento de Calidad del Agua de Consumo. La Guía realiza una propuesta de síntesis de este

marco, estableciendo un conjunto de objetivos, directrices y orientaciones que configuran la arquitectura para definir estrategias de adaptación. No obstante, su implementación enfrenta importantes dificultades.

Una de las principales barreras es la ausencia de un marco legislativo estatal en España que concrete estos principios en la gestión del ciclo urbano del agua. A pesar de la existencia de instrumentos como los Planes de Sequía, los Planes Integrales de Gestión de los Sistemas de Saneamiento, los Planes Estructurales de Control de Fugas o los Planes Sanitarios del Agua, estos se aplican de forma desarticulada y sin una visión unificada de adaptación y resiliencia. La falta de una regulación específica que estructure la planificación hídrica urbana desde un enfoque de integral, de riesgo y sostenibilidad, impide una implementación efectiva de medidas que integren los desafíos climáticos, comprometiendo la capacidad de adaptación de los sistemas urbanos de agua.

A partir de aquí, la elaboración de un marco de actuación para afrontar la necesaria adaptación del ciclo urbano del agua al cambio climático se entiende como la oportunidad para proponer un nuevo paradigma de planificación de actuaciones desde una perspectiva integral del ciclo urbano del agua (Franco-Torres et al., 2021), adoptando para ello un enfoque de mejora de la resiliencia frente al cambio climático (Kirshen et al., 2018).

Basándose en estos principios, la Guía, tomando como referencia las bases metodológicas de la Directiva Marco del Agua, la Gestión Integrada del ciclo urbano del agua, la evaluación de riesgos, la participación y la gobernanza, realiza una propuesta de marco de actuación para la adaptación al cambio climático. La propuesta se estructura en base a las cinco fases identificadas como los pasos fundamentales de un proceso de planificación integral para la adaptación al cambio climático del ciclo urbano del agua, incluyendo una serie de sesiones de participación que habrán de incorporarse sucesivamente en el transcurso del proceso de planificación. De este modo, se modifica el reparto convencional de atribuciones propio del enfoque tecnocrático de gestión, evolucionando hacia una toma de decisiones participada que incorpore una nueva cultura de organización capaz de afrontar el principio de incertidumbre como elemento esencial de la gestión de riesgos (Fletcher et al., 2017; Nikolopoulos et al., 2022; Stakhiv, 2011).

El cambio climático impone nuevos desafíos a la gestión del ciclo urbano del agua, exigiendo un enfoque de adaptación que priorice la protección de las fuentes de suministro, la resiliencia de los sistemas urbanos y la sostenibilidad de los recursos hídricos. En este contexto, la Guía de AEOPAS se presenta como una herramienta para la planificación de estrategias de adaptación, proporcionando un marco metodológico basado en la evaluación de riesgos hidrológicos, la integración de soluciones basadas en la naturaleza y el fortalecimiento de la gobernanza en la gestión del agua. Su enfoque reconoce la interdependencia entre fenómenos extremos, vulnerabilidad y capacidad de respuesta, planteando un modelo que trasciende la lógica tradicional de infraestructura rígida para adoptar una planificación flexible ante la incertidumbre.

A pesar de la existencia de un potente marco institucional a nivel europeo y nacional, la ausencia de un marco regulador específico para la planificación hidrológica del ciclo urbano del agua en España dificulta la implementación de estas estrategias de forma coordinada y efectiva. La Guía propone superar esta fragmentación mediante un enfoque integral de gestión del agua, en el que la recuperación de las masas de agua, la planificación del riesgo, la participación social y la resiliencia sean ejes centrales.

2. AGUA Y CAMBIO CLIMÁTICO

Las relaciones entre el cambio climático y el agua han sido ampliamente estudiadas y analizadas en informes y trabajos de referencia a nivel internacional. Documentos como los informes de evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), los estudios temáticos de diversos organismos de Naciones Unidas¹², la Evaluación Europea de Riesgos Climáticos (EUCRA) o las *Orientaciones Estratégicas de Agua y Cambio Climático* elaboradas por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico ofrecen un marco de análisis detallado sobre los impactos del cambio climático en los sistemas hídricos.

Sin embargo, en el ámbito de los sistemas de agua urbana, la evaluación del impacto del cambio climático se ha abordado de manera fragmentada, enfocándose en su incidencia sobre elementos aislados del ciclo. Los estudios y documentos existentes suelen centrarse en riesgos específicos, como sequías, inundaciones o temperaturas extremas, y en sus efectos sobre aspectos concretos, como el abastecimiento, las infraestructuras o la salud pública. Esta aproximación sectorial ha dificultado una visión integrada del problema, impidiendo comprender las interacciones entre los distintos componentes de los sistema de agua urbana y limitando el desarrollo de estrategias de adaptación eficaces frente a los desafíos climáticos.

Por ello, este capítulo aborda las relaciones entre el agua y el cambio climático con una visión estructurada y desde una perspectiva sistémica. En primer lugar, se realiza una caracterización de los riesgos hidroclimáticos, definiendo sus componentes clave y su evolución en el tiempo. A continuación, se define la situación de partida, fundamentada en los datos más recientes del Sexto Informe de Evaluación del IPCC (IPCC, 2022) y la evaluación europea del riesgo climático³, que permite contextualizar los impactos del cambio climático en la esfera del agua. Finalmente, se analizan las implicaciones concretas de estos cambios sobre el sistema de agua urbana, identificando los principales efectos sobre los servicios ecosistémicos, las infraestructuras y servicios y los usuarios.

1 Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: agua y cambio climático de la UNESCO.

2 Climate Change Adaptation and Integrated Water Resources Management (2015) del Programa de las Naciones Unidas Para el Desarrollo.

3 European Climate Risk Assessment, 2024.

2.1. Riesgos hidroclimáticos: conceptos centrales

La diversidad, complejidad y dinámica en la definición y aplicación de los conceptos relacionados con los riesgos hidroclimáticos (vulnerabilidad, exposición y sensibilidad), se han reflejado en la evolución de estos términos tanto en los debates académicos, como en la bibliografía oficial de referencia elaborada por las instituciones competentes, desde el IPCC a la Oficina Española de Cambio Climático (en adelante OECC).

De este modo, para poder profundizar adecuadamente en las consecuencias del cambio climático en la esfera del agua, es condición necesaria realizar un breve análisis de la evolución y definición de estos conceptos clave relativos a la perspectiva de riesgo aplicada al cambio climático.

2.1.1. Definición de riesgo desde la perspectiva del cambio climático

El riesgo climático ha sido definido tradicionalmente en la literatura más técnica como una combinación del **peligro** y de la **vulnerabilidad**. La primera como el fenómeno climático que representa una amenaza (lluvias torrenciales, sequías, olas de calor, etc.), y la segunda identificada con la *exposición* física de personas y/o bienes a estos fenómenos naturales (Saurí, 2003). A finales de los 80s y principios de los 90s aparecen los primeros trabajos que incorporan la denominada **sociología del riesgo** (Beck, 1992), en los que, sin negar que el riesgo está vinculado a fenómenos físicos, se plantea que el desastre resulta de la combinación del riesgo con factores sociales, institucionales y políticos (Hewitt, 1997; Mileti, 1999).

El riesgo comienza entonces a interpretarse más como un proceso histórico que como la consecuencia de un fenómeno natural aislado en el tiempo y en el espacio (Hewitt, 1997), y que surge incluso antes que el agente climático que

desencadena el desastre, de la interacción entre el sistema natural y el sistema humano (Saurí, 2003). El IPCC, ya en su informe especial de 2012 señalaba:

“La naturaleza y la gravedad de los impactos debidos a fenómenos climáticos extremos no dependen solo de los propios fenómenos sino también de la exposición y la vulnerabilidad. (...) Los fenómenos climáticos extremos, la exposición y la vulnerabilidad están influenciados por una amplia gama de factores, incluidos el cambio climático antropogénico, la variabilidad natural del clima y el desarrollo socioeconómico. La gestión de riesgos de desastre y la adaptación al cambio climático se centran en la reducción de la exposición y la vulnerabilidad y el aumento de la resiliencia a los posibles impactos adversos de los fenómenos climáticos extremos.”
(IPCC, 2012, p.2)

Este informe reconoce, además, que los fenómenos relacionados con el cambio climático producen eventos extraordinarios, pero no necesariamente desastres; estos se dan cuando estos eventos afectan a población vulnerable expuesta a ellos, avanzando en la necesidad de enfocarse en los procesos de desarrollo y sus implicaciones sobre la vulnerabilidad (Birkmann 2013; Vargas y Paneque, 2017).

Actualmente, el IPCC (2022) y la OECC (2022) definen el **riesgo** como la posibilidad de que se produzcan consecuencias adversas para los sistemas humanos o ecológicos, siendo esas consecuencias lo que denominamos *impactos*. Las consecuencias adversas incluyen impactos sobre la vida, los medios de subsistencia, la salud y el bienestar, los activos económicos, sociales y culturales, la infraestructura, los servicios, los ecosistemas y las especies. Tal y como se refleja en las figuras 1 y 2, en el contexto del cambio climático, el **riesgo climático** puede entenderse como el resultado de interacciones dinámicas entre los **peligros** relacionados con el clima y la **exposición** y la **vulnerabilidad** de los sistemas humanos y ecológicos afectados por aquellos. El 6º informe del IPCC (2022) presta especial atención a la naturaleza intrínsecamente compleja del **riesgo climático** y sus componentes, que incluyen retroalimentaciones, efectos en cascada, comportamientos no lineales y potenciales imprevistos. La naturaleza dinámica del

riesgo y de sus determinantes es una dimensión importante de la complejidad, introduciéndose ahora también como nuevo factor las **respuestas** (IPCC, 2022). Para poder comprender adecuadamente esta conceptualización, definiremos y analizaremos cada una de las componentes del riesgo climático.

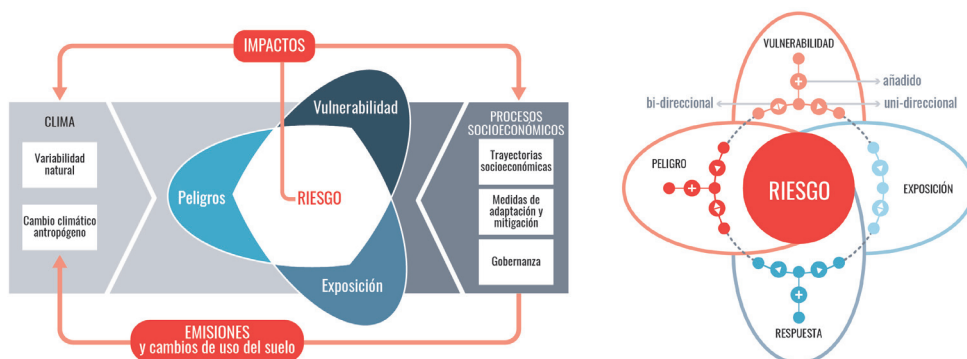


Figura 2 y 3. Esquemas explicativos de los componentes del riesgo. Fuente: IPCC (AR5, 2014) / (AR6, 2022).

2.1.2. Componentes de los riesgos hidroclimáticos

El **peligro o amenaza** se define como la ocurrencia potencial de un evento o tendencia física, natural o inducida por el ser humano, que puede causar la pérdida de vidas, daños u otros impactos. En nuestro caso, el término se refiere a **peligros hidroclimáticos**, como las lluvias torrenciales, sequías o temperaturas extremas. Los peligros se ven afectados por los cambios actuales y futuros del clima, incluida la alteración de la variabilidad climática y los cambios en la frecuencia e intensidad de los fenómenos extremos. El **peligro climático** suele provenir de un evento extremo, de carácter coyuntural, que puede ser característico del clima de una zona, ahora intensificado por el cambio climático. Sobre el **peligro** carecemos de capacidad de intervenir, más allá de las políticas de mitigación del cambio climático a largo plazo.

La interacción de estos **peligros climáticos** con condiciones de **vulnerabilidad** y **exposición** de los sistemas humanos será lo que genere posibles

impactos. Como hemos indicado previamente, el concepto de **vulnerabilidad** ha ido evolucionando en el tiempo, definiéndose actualmente, en este contexto, como la propensión o predisposición de las personas, ecosistemas y los bienes y servicios (económicos, sociales o culturales) a ser afectados negativamente por el cambio climático (IPCC, 2022). A partir de Adger (2006) muchos autores definen la **vulnerabilidad** como combinación de tres componentes:

- **exposición a la amenaza climática**, que se refiere a la presencia de personas, ecosistemas, funciones, servicios o activos en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente (como por ejemplo la localización de urbanizaciones en zonas inundables);
- **sensibilidad o susceptibilidad al daño**, entendida como las condiciones propias de los sistemas que condicionan el grado en que pueden verse afectados por el cambio climático (relacionadas, por ejemplo, con las condiciones socio-económicas de la población);
- **capacidad de afrontar el daño y de adaptarse**, entendiendo la primera como los recursos y habilidades para la gestión del riesgo a corto y medio plazo (como planes de emergencia o infraestructuras de defensa); y la segunda, como el proceso de ajuste al clima real o previsto y a sus efectos para moderar los daños o aprovechar las oportunidades beneficiosas (como actuaciones de restauración fluvial).

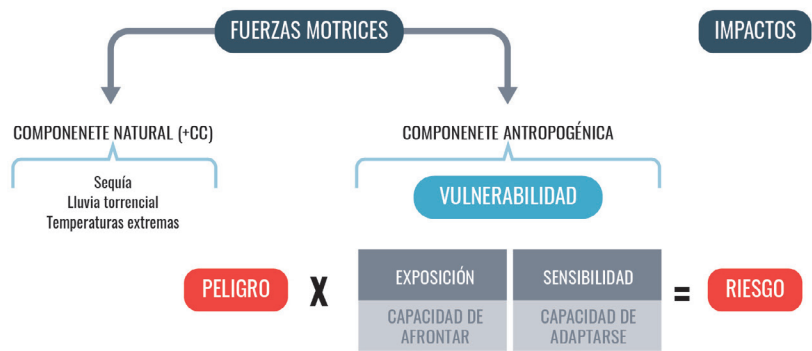


Figura 4. Componentes del riesgo frente al cambio climático. Fuente: adaptado de Martín y Paneque (2022).

Estas componentes, a su vez, se caracterizan a través de sus dimensiones social, física, institucional, económica y tecnológica, cuya concreción dependerá en gran medida del **riesgo** respecto al que estemos realizando este análisis. Como se observa en la figura 2 y 3, desde el 5º informe del IPCC (2014), este organismo identifica la **exposición** como componente diferenciado respecto a la **vulnerabilidad**, si bien el último informe insiste en las interacciones entre estos factores (IPCC, 2022).

En cualquier caso, la **vulnerabilidad** y la **exposición** suelen tener un carácter estructural, agravado a veces por procesos socio-económicos y relacionados con el uso del territorio y los recursos. Los procesos de expansión urbana, por ejemplo, han implicado en las últimas décadas una mayor **exposición** a riesgos hidroclimáticos, debido al incremento de la demanda de agua o la ocupación de zonas inundables. A la vez, y muy especialmente tras la crisis de 2008, se han intensificado situaciones de **vulnerabilidad** socio-económica, tanto en la población como a nivel institucional, donde la capacidad de inversión se ha visto mermada. Todo ello, combinado con la intensificación de los **peligros** como consecuencia del cambio climático, ha contribuido a un incremento generalizado de los **riesgos** hidroclimáticos y sus **impactos**.

Para poder analizar estos fenómenos resulta clave, y no siempre sencillo, distinguir claramente entre **peligro**, **vulnerabilidad**, **riesgo** e **impactos**. De lo expuesto hasta ahora se deduce que los **impactos** pueden derivarse de la ocurrencia de **riesgos** hidroclimáticos. Estos resultan de una combinación del fenómeno natural, el **peligro**, intensificado ahora por el cambio climático, y de la componente antropogénica del riesgo, relacionada con factores de **vulnerabilidad** (y como parte de ella la **exposición**), de carácter estructural, y sobre la cual sí existe capacidad de intervención. Sin pretender ser exhaustivos, en la tabla 1 se proporcionan algunos ejemplos que podrían ayudar a ilustrar estos conceptos.

Peligro	Factores de vulnerabilidad	Riesgo	Impactos
Sequía	Nivel de pérdidas en la red. Demandas por encima de los recursos disponibles Pobreza hídrica.	Escasez de agua.	Deterioro de la calidad del agua. Incremento de los costes de explotación. Cortes de suministro. Afecciones a la salud humana.
Lluvias torrenciales	Ocupación de zonas inundables. Impermeabilización de suelos.	Inundación fluvial. Inundación pluvial.	Pérdida de vidas humanas. Daños económicos. Transmisión de enfermedades por desbordamientos del saneamiento.
Temperaturas extremas	Efecto Isla de Calor Urbana. Edad, género, pobreza, enfermedades... Exposición al sol.	Olas de calor.	Incremento de la evapotranspiración. Disminución de recursos hídricos disponibles. Deterioro de la calidad del agua. Afecciones a la salud humana (Golpes de calor, etc).

Tabla 1. Ejemplos de factores de vulnerabilidad e impactos de cada uno de los riesgos hidroclimáticos.

Como resultado de la combinación de los factores de **vulnerabilidad**, los **riesgos** pueden variar entre comunidades y también entre personas dentro de las sociedades, dependiendo, por ejemplo, de las desigualdades que se superponen y de factores específicos del contexto como la cultura, el género, la discapacidad o las redes socio-institucionales (Carr & Thompson, 2014), así como de las condiciones geográficas y de la distribución espacial.

De este modo, las políticas de **adaptación** al cambio climático se enfocarán especialmente en la reducción de las condiciones de **exposición y vulnerabilidad** de aquellos elementos susceptibles de sufrir un mayor **impacto** como consecuencia de determinados **riesgos**. Resulta clave, por lo tanto, realizar una adecuada evaluación de la **vulnerabilidad** y la **exposición** para poder identificar y priorizar aquellas áreas y grupos para los que las medidas de **adaptación** resultan más necesarias y urgentes.

Por otra parte, la naturaleza compleja del riesgo hace que las **respuestas** que se den puedan generar a su vez nuevos riesgos, incrementar los existentes o generar efectos no deseados en otras partes del sistema, en el fenómeno que conocemos como la **maladaptación**. Esta **maladaptación** puede incluir el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, el aumento de la vulnerabilidad al cambio climático, mayor desigualdad o disminución del bienestar actual o futuro (OECC, 2022). Ejemplos de ello serían los aires acondicionados, por su alto consumo energético debido, entre otros factores, a un bajo aislamiento de las edificaciones, o la intensificación del riesgo de inundación sobre poblaciones aguas abajo como consecuencia de la canalización de cursos de agua.

Del mismo modo, también se pueden producir interacciones entre las **respuestas** que generen co-beneficios para otros objetivos, tales como la salud y el bienestar, a la vez que mejoran la adaptación al cambio climático (IPCC, 2022), como podrían ser los tejados verdes o la restauración de cauces fluviales.

2.2. Cambio climático: situación de partida a la luz del Sexto informe del IPCC

El cambio climático constituye una de las mayores amenazas globales, con efectos observados y proyectados que transforman el sistema climático y los recursos hídricos. Según el Sexto Informe del IPCC, las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI) han elevado las temperaturas globales en 1.09°C desde la era preindustrial. Este aumento, acelerado desde la década de 1970, ha desencadenado cambios profundos en la temperatura, las precipitaciones, los ecosistemas y la criosfera.

El año 2023 fue el más cálido registrado en más de 100,000 años, con una temperatura media 1.48°C por encima de los niveles preindustriales. Europa, el continente que se calienta más rápido, muestra un ritmo de incremento térmico doble que la media global desde los años 80. Este calentamiento ha intensificado eventos extremos como olas de calor, sequías y lluvias torrenciales, y ha alterado la distribución de las precipitaciones. Estas tendencias se reflejan en un aumento del nivel del mar (3.7 mm/año entre 2006-2018) y en la acidificación de los océanos.

En España, las temperaturas medias han aumentado en 1.7°C desde la era preindustrial. Los años más cálidos han ocurrido en el siglo XXI, con eventos extremos cada vez más frecuentes. Entre 1961-1990 y 1981-2010, las áreas con clima semiárido crecieron en 30,000 km², afectando regiones como Castilla-La Mancha, el sureste peninsular y el valle del Ebro.

La precipitación ha mostrado una reducción global moderada, con un adelanto de las lluvias primaverales y una disminución significativa en verano. Además, la temperatura superficial del Mediterráneo ha aumentado 0.34°C por década desde los años 80, mientras que el nivel del mar en las costas españolas ha subido hasta 3.6 mm/año.

Otro de los principales indicadores de cambio tiene que ver con la disminución de los caudales medios de los ríos, que en el período 1966-2005, ha sido de 1,45% por año, con reducciones que se concentran durante la primavera y el verano (PNACC 2021-2030).

Tal como se reconoce en el informe de evaluación de riesgos de la UE, Europa se enfrenta a fenómenos climáticos extremos peores de lo previsto, en un contexto de importantes cambios sociales y económicos y aumento de la exposición y la vulnerabilidad.

Nos enfrentamos a un futuro incierto y complejo.

Las distintas simulaciones climáticas indican que el clima global seguirá cambiando en el futuro y el ritmo del cambio dependerá de la evolución de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, que estará vinculado a su vez a los supuestos socioeconómicos, los niveles de control de la contaminación del aire y los niveles de mitigación del cambio climático (figura 5).

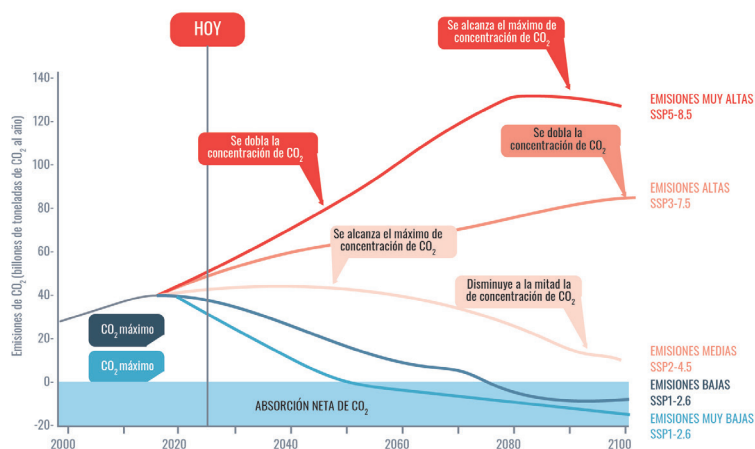


Figura 5. Evolución de las emisiones futuras. Fuente: Elaboración propia a partir de la Guía Resumida del Sexto Informe de Evaluación del IPCC, Grupo I.

Los cambios proyectados en escenarios futuros exacerbaban aquellos que se han observado y registrado durante décadas. La temperatura global en un futuro próximo aumentará en el mejor de los casos en 1,5 °C (2021-2040), mientras que en el largo plazo (2081-2100) el aumento se sitúa entre los 1.4 °C y 2.7 °C y hasta los 4.4 °C en el peor de los escenarios.

En el peor de los escenarios, los cambios proyectados dibujan un escenario climático en España en el que se extenderá el clima desértico y semiárido de tipo cálido por la mitad oriental de la Península Ibérica y en la cornisa cantábrica se generalizará el clima mediterráneo.

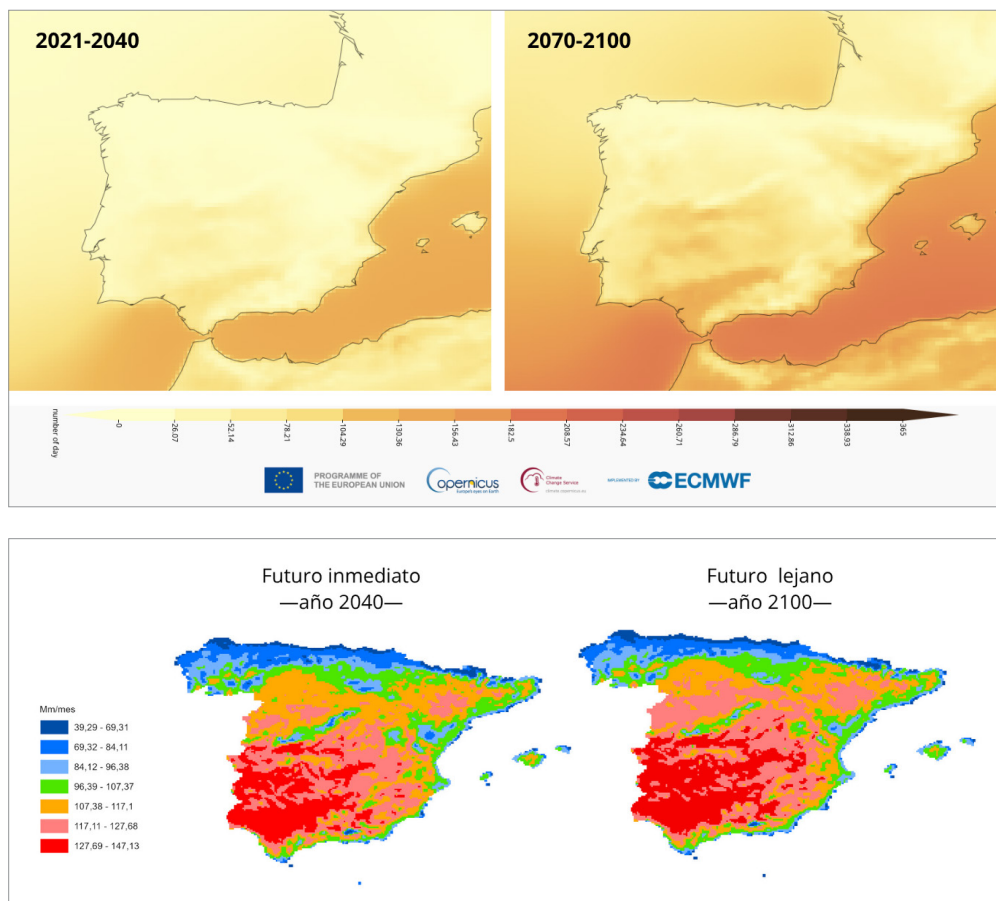


Figura 6. Imagen superior: Evolución del número de noches tropicales en la península ibérica 2040-2100. Cordex -EUR-II-Climatology-RCP8.5. Fuente: Atlas Climático Interactivo Copernicus y elaboración propia. Imagen inferior: Evolución de la evapotranspiración entre 2040-2100 en la España peninsular y las Islas Baleares. Cordex -EUR-II-Climatology-RCP8.5. Fuente: Visor de escenarios de cambio climático de la Adaptatecca y elaboración propia.

En la situación actual el cambio climático ya está provocando impactos sobre ecosistemas, el sistema socioeconómico y la calidad de vida de los seres humanos y en un futuro a medio plazo ¿cuáles serán los riesgos e impactos predecibles?

Los peligros relacionados con el clima, como lluvias torrenciales, sequías o temperaturas extremas, interactúan con factores de riesgo no climáticos, tales como la fragmentación de ecosistemas, la contaminación, prácticas agrícolas insostenibles, el actual modelo de gestión y uso del agua, los patrones de uso del suelo, la creciente urbanización o las desigualdades sociales (figura 7). Esta interacción pone en riesgo la seguridad alimentaria, la salud pública, los ecosistemas, la infraestructura y la economía de Europa. Los impactos climáticos pueden propagarse en cascada de un sistema o región a otro, afectando tanto a Europa como al resto del mundo, y viceversa. Estas cascadas de riesgo climático pueden generar desafíos a nivel sistémico que afectan a sociedades enteras, siendo los grupos sociales vulnerables los más afectados.

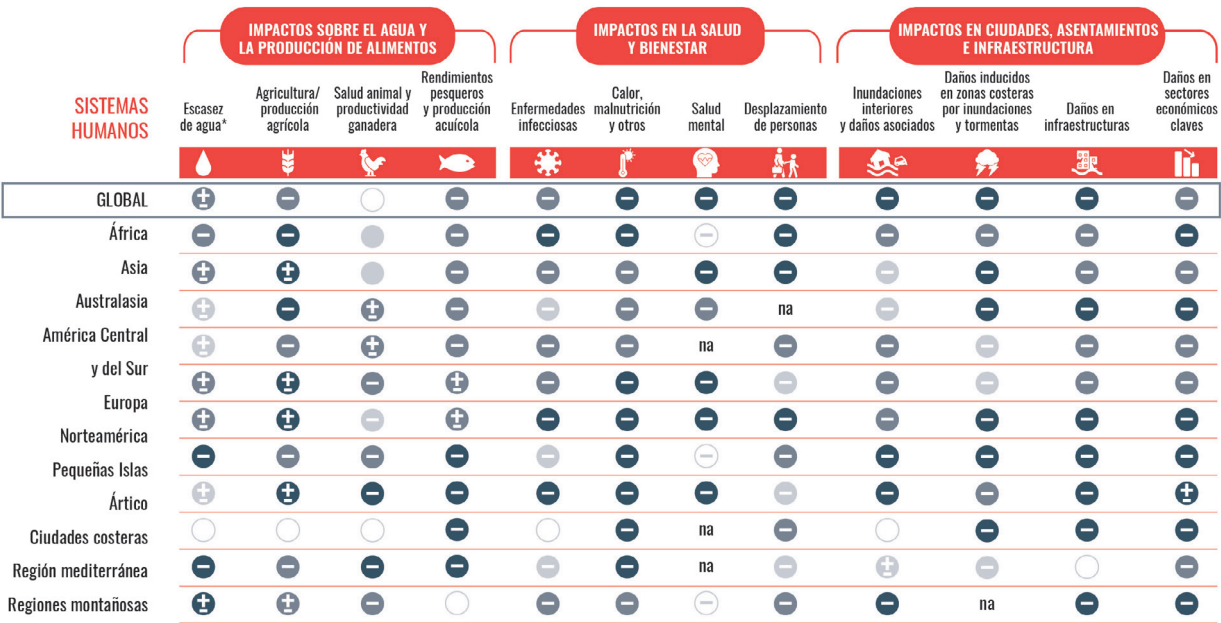


Figura 7. Impactos observados del cambio climático en sistemas humanos. Fuente: Elaboración propia a partir del Informe Grupo de Trabajo II del IPCC (2022).

2.3. El cambio climático sobre la esfera del agua

El ciclo hidrológico del agua es el movimiento natural y continuo de este recurso a través del sistema climático en sus varias formas, líquida, sólida y gaseosa entre el océano, la atmósfera, criosfera y el suelo, que constituyen las reservas de agua de la tierra.

El cambio climático puede alterar el ciclo hidrológico de varias maneras como un aumento en la nubosidad y cambio en los flujos de calor, que resultan en mayor evapotranspiración y eventos de precipitaciones extremas, más frecuentes e intensas (sequía, tormentas e inundaciones). Además, el cambio climático puede resultar en un cambio significativo en la distribución espacial y temporal de las precipitaciones, que se traducen en importantes desafíos, sin precedentes, en la gestión de la disponibilidad de los recursos hídricos a escala global, regional y local.

El sexto informe del IPCC (AR6) conecta los elementos climáticos y el ciclo hidrológico (Figura 8) como se visualiza en la siguiente figura (Fuente: datos del IPCC y elaboración propia).

Los cambios proyectados sobre la esfera del agua de acuerdo con el sexto informe del IPCC (AR6) incluyen un aumento de la humedad atmosférica ya que el calentamiento del aire contribuye a la retención de humedad, 2-3% por cada aumento de grado centígrado. Esto resulta en precipitaciones extremas, pero que no necesariamente se traducen en una frecuencia de precipitaciones regular. Al contrario, el cambio climático alterará los patrones de distribución de las precipitaciones, con zonas más secas y otras más húmedas. El cambio de temperatura también afectará a la evaporación y a la humedad del suelo. El cambio proyectado en la humedad del suelo aumentará y disminuirá dentro del rango del 20%, aunque se espera el predominio de la tendencia a suelos más secos, respecto a suelos más húmedos. Por su parte, la criosfera (glaciares, nieve, permafrost), es uno de los indicadores más sensibles al cambio climático, y la tendencia desde finales del siglo XX a inicios del siglo XXI ha mostrado una rápida disminución de estos recursos.

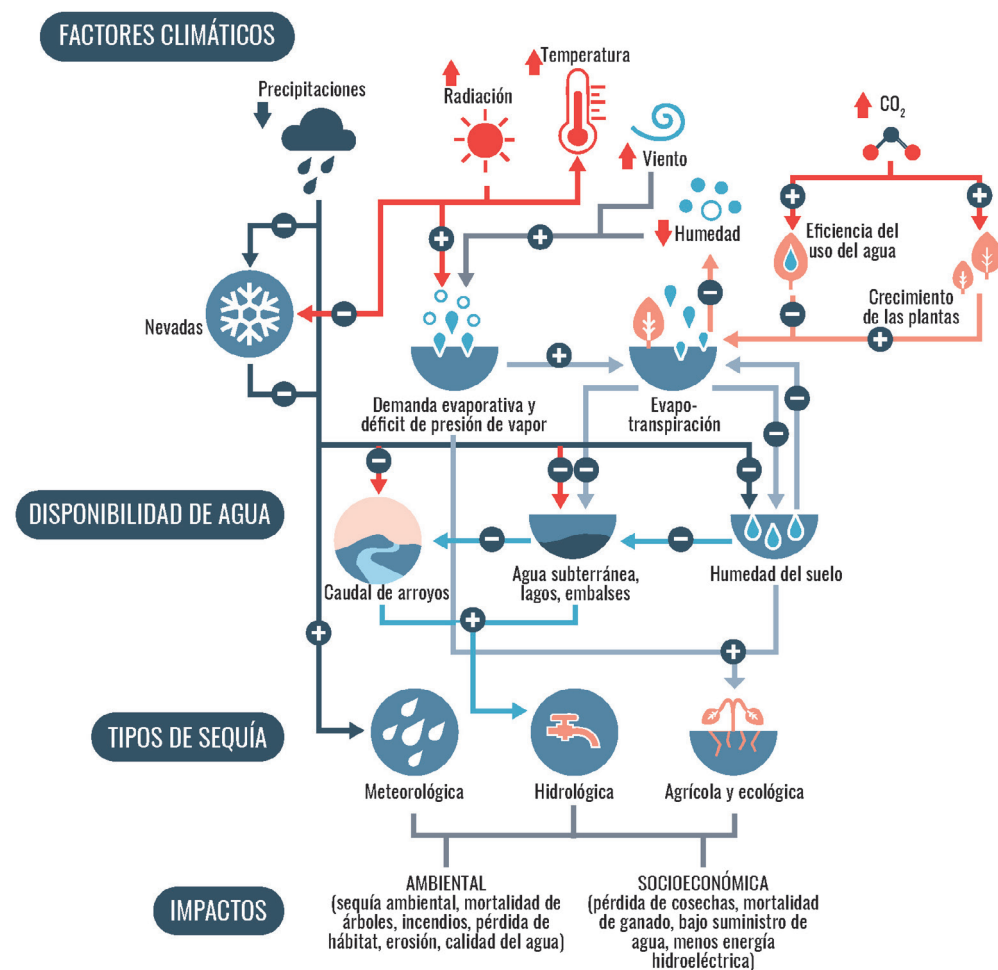


Figura 8. Factores climáticos que impulsan la sequía, efectos sobre la disponibilidad de agua e impactos. Adaptado del adaptado del Sexto Informe IPCC, 2021.

Estos cambios afectan a elementos claves del ciclo hidrológico como son:

- i los caudales de los ríos, que son fundamentales para mantener los ecosistemas acuáticos y de ribera;
- ii la escasez de recursos hídricos para el consumo humano y para las actividades económicas y sociales que dependen de la disponibilidad de este recurso, como la agricultura y
- iii el aumento del riesgo y la frecuencia de eventos extremos como las inundaciones y las sequías.

Dentro del territorio español, las proyecciones sobre el ciclo del agua no difieren de las resultantes del AR6 del IPCC. Alimentando los modelos hidrológicos con los datos derivados de las proyecciones de cambio climático, las principales tendencias identificadas sobre el ciclo del agua de acuerdo con lo analizado en el PNACC son:

- **Aumento de la evapotranspiración potencial en todo el territorio.**
- **Disminución de los caudales medios de los ríos**, con disminuciones para la mayoría de las cuencas, mayores a medida que avanza el siglo y en los escenarios de mayores emisiones. Las proyecciones resultan más desfavorables en las cuencas andaluzas y en las islas.
- **Disminución de la recarga de los acuíferos:** según un estudio realizado por la Comisión Europea, se estima que, para un calentamiento global de 2°C, la recarga de los acuíferos en el país podría reducirse en 3.272 hm³/año, lo que equivaldría a un 15% de la cantidad de agua que anualmente se extrae para los regadíos desde ríos y acuíferos.
- **Incremento de sequías:** las proyecciones climáticas muestran un futuro en el que las sequías serían más largas y frecuentes. Las sequías de 2 años de duración serían más frecuentes y lo mismo ocurriría con las sequías de 5 años de duración.

- **Lluvias torrenciales e inundaciones:** la reducción de las precipitaciones medias anuales no conlleva necesariamente una disminución de los extremos, de hecho, se prevé un aumento de los episodios de lluvias torrenciales e inundaciones en algunas zonas. Estas precipitaciones, debido a su escasa duración, no favorecen la recarga de acuíferos, lo que reduce su efecto regulador del ciclo hidrológico.

Los cambios producidos sobre el ciclo hidrológico a causa del cambio climático, han resultado en una serie de impactos ambientales, sociales y económicos (figura 9). Algunos de estos impactos ya se están observando en el presente, mientras que otros, a través de varios modelos y análisis, se proyectan y/o intensifican en el futuro.

Los impactos proyectados relacionados al ciclo hidrológico, según el sexto informe del IPCC (AR6) se clasifican en impactos sobre los ecosistemas acuáticos y biodiversidad, la seguridad hídrica, la salud y el bienestar, las ciudades, asentamientos e infraestructuras, y los sectores socioeconómicos.

El cambio climático está transformando, sin lugar a duda, el ciclo del agua, con consecuencias tanto para los ecosistemas y la biodiversidad, como también para la sociedad.

El calentamiento global resulta en un aumento de la evaporación que se traduce en eventos extremos como las lluvias torrenciales en algunas regiones, mientras que en otras ocurre lo opuesto y se exponen a períodos de sequía cada vez más duraderos.

Los ecosistemas acuáticos se ven alterados en sus propiedades biológicas, químicas y físicas, produciendo un desplazamiento de especies y una alteración de hábitats significativa. Ello va acompañado de una alteración de los caudales de los ríos del cual depende el equilibrio del ecosistema acuático y los servicios ecosistémicos que ofrece.

La escasez de los recursos hídricos trae consecuencias devastadoras para la población, con el aumento de la inseguridad hídrica, la reducción en la disponibilidad de alimentos, el aumento de enfermedades relacionadas al agua, y también la pérdida económica en varios sectores. Por otra parte, el exceso de precipitaciones expone a la población, sobre todo a los grupos más vulnerables, a mayores riesgos de inundaciones y sus consecuencias ambientales, sociales y económicas.

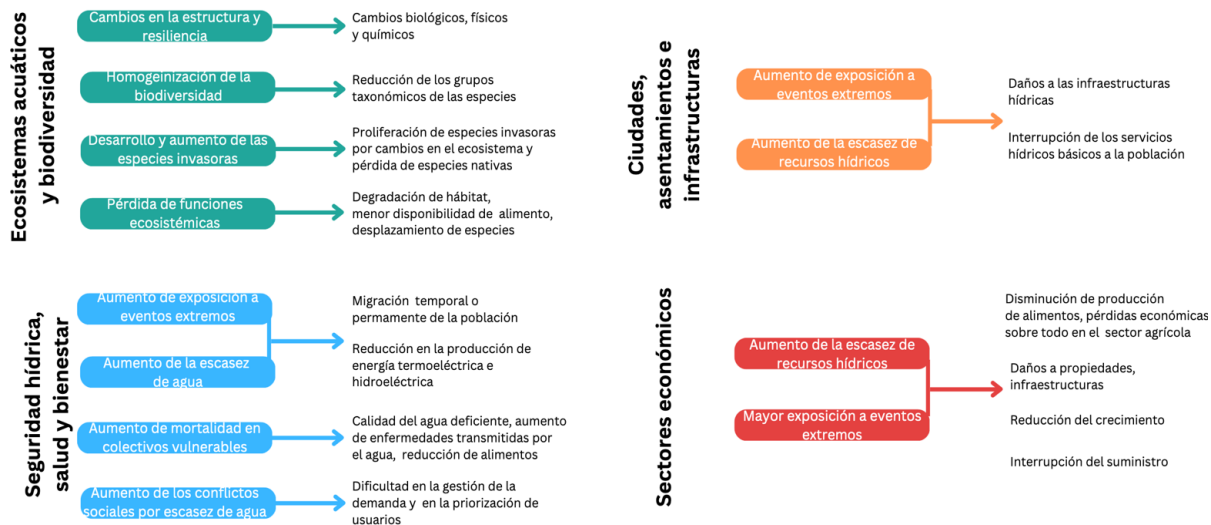


Figura 9. Principales interacciones e impactos del cambio climático en los grupos de evaluación del Sexto Informe del IPCC (AR6) y sus vínculos con el agua. Elaboración propia.

Abordar estos impactos requiere de un enfoque multi-disciplinar y de coordinación entre todos los actores involucrados, para desarrollar las medidas de adaptación necesarias para hacer frente a lo que ya estamos observando y a lo que está proyectado por venir con relación a los impactos sobre el ciclo del agua.

RECURSOS DE INTERÉS

IPCC Sexto Informe (AR6) <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>

European Climate Risk Assessment- Orientaciones Estratégicas https://adaptecca.es/sites/default/files/documentos/european_climate_risk_assessment_report_unedited.pdf

Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) 2021-2030 <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/plan-nacional-adaptacion-cambio-climatico.html>

UNESCO Desarrollo de los Recursos Hídricos – Agua y Cambio Climático 2020 <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373611>

2.4. Implicaciones del cambio climático en el sistema de agua urbana

La disponibilidad de agua, la provisión y uso de recursos hídricos y su correcto tratamiento y depuración en los asentamientos urbanos es una condición fundamental para garantizar el pleno disfrute de la vida y de todos los derechos humanos, así como contribuir al desarrollo socioeconómico y mejorar la salud y el bienestar social de las poblaciones.

El sistema de agua urbana, entendido como el complejo proceso que garantiza el acceso al agua y el saneamiento en los sistemas urbanos y los asentamientos y su correcta depuración, está igualmente expuesto a los efectos del cambio climático sobre el ciclo hidrológico y los impactos asociados (figura 10). Efectivamente, los actuales cambios en el régimen de temperaturas y en los patrones de precipitación que afectan a la escorrentía superficial, la evapotranspiración y recarga subterránea tienen implicaciones directas en las fuentes de abastecimiento y en la disponibilidad de recursos hídricos, que se agudizan con los fenómenos meteorológicos extremos (sequías, lluvias torrenciales y temperaturas extremas) y las presiones e impactos ya existentes en las distintas masas de agua.

Todo ello se manifiesta en una serie de impactos de diversa consideración sobre el sistema de agua urbana y sus distintas fases, desde la captación, tratamiento y distribución en alta, el abastecimiento en baja, el saneamiento y la depuración, hasta vertido final al medio. Consecuentemente, los efectos del cambio climático sobre el agua también se manifiestan en la provisión de los servicios del ciclo y los distintos usos urbanos.

Tal como ya se mencionó en los apartados precedentes, los principales peligros climáticos y riesgos asociados que impactarán sobre el sistema de agua urbana están vinculados con la agudización de los fenómenos meteorológicos extremos, lluvias torrenciales e inundaciones fluviales y pluviales, por un lado, y sequías y escasez de recursos, por otro, y los episodios de altas temperaturas que dan como lugar a episodios de olas de calor.

Para abordar los efectos del cambio sobre el sistema de agua urbana, la presente Guía propone un esquema de análisis que se basa y toma como referencia los grupos de impacto definidos en el Sexto Informe del IPCC y en la Evaluación de los Efectos del Cambio Climático en Europa y que se sintetiza de la siguiente manera:

- **Masas de agua y ecosistemas:** se corresponden con las fuentes de captación y suministro de recursos hídricos, representadas por las distintas masas de agua recogidas en la planificación hidrológica como lagos, ríos y aguas subterráneas.
- **Infraestructuras, ciudades y asentamientos urbanos:** se incluyen las infraestructuras y los servicios de los sistemas de agua urbana vinculados con la captación y potabilización, el abastecimiento en baja, el saneamiento, la depuración, reutilización y vertido al medio y sus vínculos con el diseño urbano.
- **Usuarios del agua:** se corresponde con los usos del agua vinculados al ciclo urbano, que comprenden el abastecimiento doméstico, las distintas actividades económicas, los usos vinculados a los equipamientos y zonas verdes públicas y, de forma particular, los colectivos vulnerables y la población en riesgo de exclusión social.

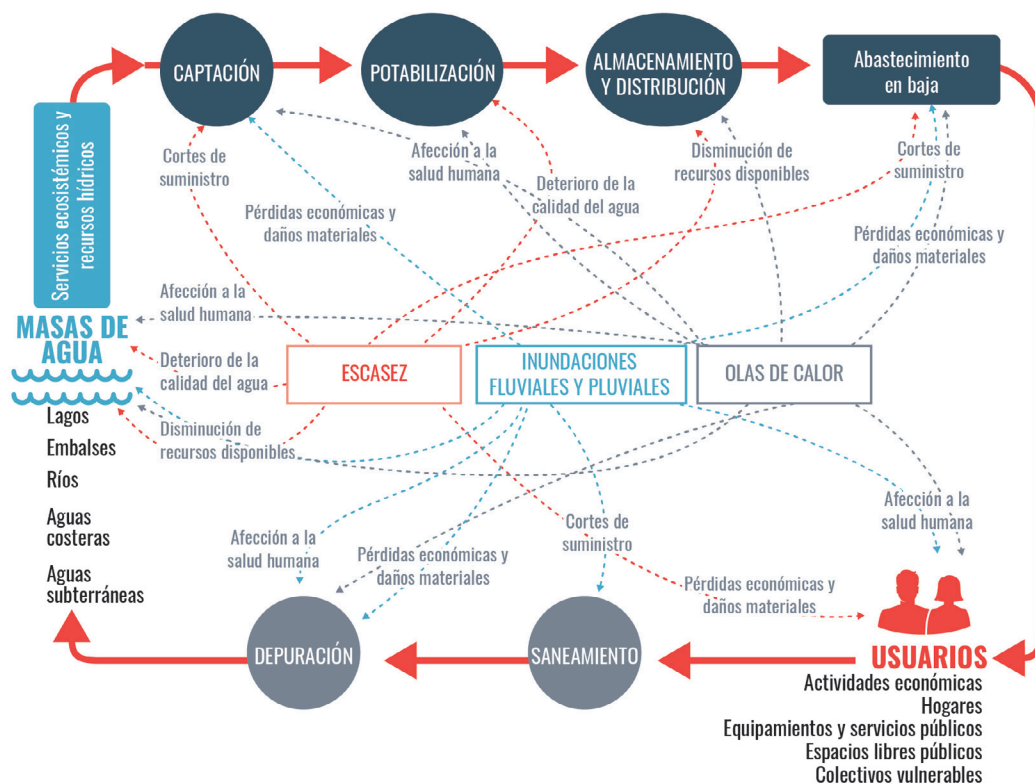


Figura 10. Relaciones de los riesgos hidroclimáticos con el sistema de agua urbana. Elaboración propia.

2.4.1. Impactos del cambio climático asociados a lluvias torrenciales e inundaciones

Las inundaciones derivadas de fenómenos meteorológicos extremos representan una de las principales amenazas del cambio climático para los sistemas hídricos y urbanos (tabla 2). Su impacto va más allá del aumento del caudal de los ríos o la acumulación de agua en entornos urbanos, ya que generan una serie de efectos en cascada que comprometen la calidad del agua, la funcionalidad de

las infraestructuras y la salud pública. En el contexto de los sistemas de agua urbana, estas inundaciones pueden alterar significativamente el abastecimiento, el saneamiento y la depuración, exponiendo a la población y a los ecosistemas a riesgos ambientales y sanitarios.

Las inundaciones de carácter pluvial y fluvial vinculadas a fenómenos meteorológicos extremos pueden tener un impacto severo en los ecosistemas acuáticos y terrestres. La carga contaminante procedente de sedimentos, aguas residuales urbanas y otras sustancias tóxicas que llega a ríos, lagos, embalses o aguas subterráneas durante episodios de inundaciones es un factor clave de deterioro de la calidad del agua, afectando a la biodiversidad y la salud de los ecosistemas acuáticos. Además, los ecosistemas costeros y de humedales pueden ser particularmente vulnerables, ya que las inundaciones alteran sus ciclos naturales y pueden llevar a la pérdida de hábitats críticos.

En el ámbito de los sistemas de agua urbana, las lluvias torrenciales, en función de la intensidad, la duración y las condiciones locales pueden causar inundaciones pluviales y fluviales significativas que afectan directamente a las infraestructuras críticas, como estaciones de potabilización, redes de distribución de agua potable y sistemas de saneamiento. Las infraestructuras urbanas, en particular, son vulnerables a la sobrecarga durante estos eventos, lo que puede llevar al fallo de estaciones de bombeo, la obstrucción de alcantarillas y la contaminación de los suministros de agua potable. Estos daños incrementan los costes de reparación y mantenimiento, además de interrumpir los servicios básicos, afectando la vida cotidiana de la población.

Además de los daños a infraestructuras, otro de los efectos de las inundaciones está vinculado con el corte y la interrupción de servicios básicos como el abastecimiento de agua potable y la depuración. Estas interrupciones pueden afectar tanto a usuarios domésticos como a servicios públicos y actividades económicas, además de afectar negativamente a los ecosistemas receptores (ríos, humedales, aguas costeras) de aguas residuales no depuradas debido a los daños en las infraestructuras.

Otro de los potenciales efectos de las inundaciones extraordinarias está relacionado con la salud pública y la propagación de enfermedades transmitidas por el agua. Las infraestructuras de saneamiento que se ven afectadas por inundaciones pueden liberar aguas residuales no tratadas en las fuentes de agua

potable, lo que aumenta el riesgo de brotes de enfermedades e infecciones gastrointestinales. Además, las condiciones húmedas y los estancamientos de agua que resultan de las inundaciones pueden favorecer la proliferación de vectores como mosquitos, aumentando la incidencia de enfermedades.

Grupo de impacto	Factores de vulnerabilidad	Interacción	Impacto principal
Servicios ecosistémicos.	Masas de agua en mal estado.	Contaminación de los recursos hídricos causada por el desbordamiento de las infraestructuras de agua y saneamiento.	Deterioro de la calidad del agua y afecciones a la salud humana.
		Contaminación de las aguas superficiales y subterránea asociada a episodios extraordinarios de inundaciones y/o escorrentía urbana.	Deterioro ecológico de ecosistemas acuáticos y masas de agua.
Infraestructuras y servicios.	Infraestructuras de abastecimiento, saneamiento y depuración en zonas inundables. Sistemas de drenaje inadecuados.	Daños y averías en sistemas de captación en alta.	Cortes de suministro
		Daños y averías en el sistema de abastecimiento.	Cortes de suministro.
		Afección a la movilidad urbana debido al aumento de las incidencias en las redes de saneamiento.	
		Daños en EDAR y EBAR causados por los arrastres de los materiales retenidos en los colectores.	Pérdidas económicas y daños materiales.
		Incremento en el consumo de energía (aireación, bombeos de elevación y pluviales) y de reactivos asociados al proceso.	
		Inundaciones ante el fallo de suministro eléctrico o la falta de la capacidad de bombeo.	Deterioro del servicio.
		Interrupción en servicios y daños en infraestructuras urbanas.	
		Incremento de los costes por los daños materiales en las infraestructuras (fallos electromecánicos, etc.).	Pérdidas económicas y daños materiales.
		Contaminación de las aguas superficiales y subterránea asociada a episodios extraordinarios de inundaciones y/o escorrentía urbana.	

Grupo de impacto	Factores de vulnerabilidad	Interacción	Impacto principal
Usuarios	Ubicación de edificaciones en zonas de riesgo.	Daños en edificaciones residenciales por inundaciones.	
	Localización de servicios esenciales en zonas inundables.	Daños a propiedades e infraestructuras urbanas.	Pérdidas económicas y daños materiales.
	Exposición de colectivos vulnerables.	Interrupción de servicios esenciales (colegios, hospitales, centros de día, etc.).	Afecciones sobre la salud y la calidad de vida.
		Accidentes.	Afecciones sobre la salud y pérdidas humanas.

Tabla 2. Relación de peligros, grupos de impacto e interacciones de las inundaciones con los sistemas de agua urbana.

2.4.2. Impactos del cambio climático asociados a la sequía y escasez de agua

Las sequías y la escasez de agua son fenómenos cada vez más frecuentes e intensos en el contexto del cambio climático, con consecuencias significativas tanto para los ecosistemas acuáticos como para los sistemas de abastecimiento urbano. La reducción de los recursos hídricos no solo compromete la cantidad de agua disponible, sino que también deteriora su calidad, afectando la biodiversidad y los servicios ecosistémicos esenciales. En el ámbito de los sistemas de agua urbana, la disminución de caudales y reservas impacta directamente en la capacidad de abastecimiento, el saneamiento y la calidad del agua potable, generando desafíos tanto para la gestión de infraestructuras como para la garantía del suministro a la población y las actividades económicas. Se recoge a continuación una breve caracterización de los riesgos climáticos asociados a las sequías en el sistema de agua urbana (tabla 3).

Las sequías prolongadas y las situaciones de escasez pueden ejercer una presión importante sobre los ecosistemas acuáticos, disminuyendo la calidad y cantidad de agua disponible, que afecta negativamente a la biodiversidad y la salud de los hábitats naturales. La disminución de los niveles de agua en ríos y embalses puede llevar a una mayor concentración de nutrientes, lo que promueve la eutrofización y el crecimiento de algas nocivas, tal como se ha observado en muchas zonas destinadas a abastecimiento urbano. Estos procesos pueden alterar la estructura y función de los ecosistemas, reduciendo su capacidad para proporcionar servicios esenciales como la purificación del agua, la regulación del clima y la protección de la biodiversidad.

La sequía prolongada también puede afectar gravemente las infraestructuras de abastecimiento de agua y saneamiento. La disminución del caudal de los ríos y las reservas en embalses junto con el agotamiento de las reservas de agua subterránea pueden limitar el suministro de agua para las plantas de tratamiento, reduciendo su capacidad operativa.

Los servicios del ciclo urbano también pueden experimentar impactos de gran relevancia. La escasez de agua tiene un impacto directo en la capacidad de abastecer de agua potable a los usuarios domésticos y las actividades económicas. Además, la reducción del volumen de agua disponible puede comprometer la calidad del agua potable, ya que las fuentes de agua se ven más afectadas por la contaminación.

Grupo de impacto	Factores de vulnerabilidad	Interacción	Impacto principal
Servicios ecosistémicos	Masas de agua en mal estado.	Incremento de la contaminación de las masas de agua por procesos de eutrofización y desarrollo de algas	Deterioro de la calidad del agua
		Proliferación de algas en embalses y ríos con zonas de captación para consumo humano	
		Afección a la fauna y a la flora por la disminución de los recursos embalsados	Disminución de recursos hídricos
		Incremento del uso de aguas subterráneas	
		Disminución de la cantidad de agua disponible por la reducción de los niveles piezométricos de los acuíferos	

Grupo de impacto	Factores de vulnerabilidad	Interacción	Impacto principal
Infraestructuras y servicios	Fuentes de suministro en mal estado cuantitativo y cualitativo. Infraestructuras de abastecimiento y tratamiento en precario.	Aumento de la concentración de contaminantes gaseosos en las EDAR y redes de saneamiento, incrementando la corrosión, los impactos por olores y los costes económicos para su control	Daños en infraestructuras
		Proliferación de fitoplancton y la propagación de patógenos, restringiendo el uso de embalses para agua potable y recreación.	Deterioro de la calidad del agua y afecciones a la salud humana
		Disminución de la calidad del agua por alteración de los recursos en embalses (aumento metales pesados, turbidez, materia orgánica, etc.)	
		Establecimiento de restricciones en el uso de agua para familias, comercios e industrias por la reducción del volumen de agua embalsado	Incumplimiento DHA
		Incremento de los costes de explotación (potabilización, controles analíticos, consumos energéticos de bombeos, etc.)	Pérdidas económicas y daños materiales
		Disminución de la cantidad de agua disponible por la reducción de los niveles piezométricos de los acuíferos	
Usuarios	Ausencia de instrumentos de planificación del riesgo. Existencia de sectores económicos hidro-intensivos. Dependencia de sectores estratégicos como la agricultura o el turismo..	Aumento de enfermedades transmitidas por el agua.	Afecciones a la salud humana
		Reducción de la disponibilidad de agua	Cortes de suministro
		Aumento de la demanda de riego	Disminución de recursos hídricos
		Tensiones sociales por las diferentes demandas urbanas del recurso	Incumplimiento DHA

Tabla 3. Relación de peligros, grupos de impacto e interacciones de las sequías y la escasez con los sistemas de agua urbana.

2.4.3. Efectos del cambio climático asociados a las temperaturas extremas y las olas de Calor

Las temperaturas extremas y las olas de calor, cada vez más frecuentes e intensas debido al cambio climático, ejercen un impacto profundo en las fuentes de abastecimiento, las infraestructuras hídricas y la salud humana (tabla 4). Estos eventos no solo alteran la estabilidad de los ecosistemas acuáticos, sino que también afectan la calidad del agua y la capacidad de los sistemas urbanos para garantizar un suministro seguro y eficiente. En el ámbito de los sistemas de agua urbana, el aumento de temperaturas intensifica la evaporación, reduce la disponibilidad de recursos hídricos y genera condiciones propicias para la proliferación de microorganismos nocivos. Además, los efectos en la salud pública y la demanda energética agravan la presión sobre los sistemas de abastecimiento y saneamiento.

Las temperaturas extremas y las olas de calor pueden desestabilizar los ecosistemas acuáticos, alterando las temperaturas del agua y provocando estratificación en lagos y embalses. Estos cambios pueden afectar negativamente a las especies acuáticas sensibles y favorecer el crecimiento de cianobacterias y algas verdiazules, que no solo deterioran la calidad del agua, sino que también pueden ser tóxicas para la fauna y flora locales. Además, la evaporación intensificada durante las olas de calor puede reducir significativamente los volúmenes de agua disponibles, exacerbando la escasez hídrica y afectando a los ecosistemas dependientes del agua.

En el caso de las infraestructuras, este fenómeno puede contribuir al deterioro de plantas de potabilización y depuración de aguas residuales. Así, el aumento de la temperatura puede acelerar la proliferación de patógenos y algas en las plantas de tratamiento de agua, lo que compromete la calidad del agua tratada. Además, las temperaturas extremas pueden afectar la eficiencia de los procesos de tratamiento, obligando a las plantas a utilizar más energía para mantener los niveles de servicio. Esto puede aumentar los costos operativos y la vulnerabilidad de las infraestructuras a fallos técnicos.

Otra importante dimensión de las temperaturas extremas y las olas de calor es su impacto en la salud humana mediante un aumento en la incidencia de enfermedades, que además pueden exacerbar las condiciones de salud preexis-

tentes, especialmente en poblaciones vulnerables como la población anciana y las personas con enfermedades crónicas. Además, el calor extremo favorece la propagación de enfermedades transmitidas por vectores. La combinación de estrés térmico y mayor exposición a enfermedades puede tener un impacto grave en la salud pública.

El aumento de las temperaturas y las olas de calor también puede contribuir a elevar la demanda de agua, lo que puede poner una presión adicional sobre los sistemas de suministro de agua, especialmente en áreas ya afectadas por la escasez. Los usuarios urbanos pueden enfrentar restricciones en el uso del agua para actividades no esenciales, lo que puede afectar la calidad de vida. Además, las olas de calor pueden aumentar los costes de la energía debido al mayor uso de sistemas de refrigeración, lo que afecta tanto a los hogares como a las empresas. Los sectores económicos que dependen del agua, como la agricultura y la industria, también pueden enfrentar desafíos significativos debido a la combinación de escasez de agua y temperaturas extremas.

Grupo de impacto	Factores de vulnerabilidad	Interacción	Impacto principal
Servicios ecosistémicos	Masas de agua en mal estado.	Desarrollo de algas verdi-azules	Deterioro de la calidad del agua y afecciones a la salud humana
		Cambios en la tª y estratificación en lagos	
		Alteración del régimen de caudales e impactos en ecosistemas asociados	
		Eutrofización y oscurecimiento de las aguas	
		Aumento de la presencia de cianobacterias en los embalses	Disminución de recursos hídricos
		Aumento de la evaporación y salinidad del agua	

Grupo de impacto	Factores de vulnerabilidad	Interacción	Impacto principal
Infraestructuras y servicios		Aumento de patógenos en plantas de tratamiento de agua y redes de distribución	Afecciones a la salud humana
		Aceleración de la transmisión de enfermedades infecciosas	
		Aumento de la distribución de huéspedes y vectores	
		Aumento de la transmisión y propagación de la resistencia los antimicrobianos	
Usuarios		Incremento de la demanda de recursos hídricos	Disminución de recursos hídricos

Tabla 4. Relación de peligros, grupos de impacto e interacciones de las temperaturas extremas y las olas de calor con los sistemas de agua urbana.

RECURSOS DE INTERÉS

Climate Change Adaptation and Integrated Water Resources Management <https://unepdhi.org/wp-content/uploads/sites/2/2020/05/Cap-Net-CCA-and-IWRM-December-2018.pdf>

Responding to climate change impacts on human health in Europe: focus on floods, droughts and water quality <https://www.eea.europa.eu/publications/responding-to-climate-change-impacts/>

Water resources across Europe — confronting water stress: an updated assessment <https://www.eea.europa.eu/publications/water-resources-across-europe-confronting>

Guía para la evaluación de riesgos asociados al cambio climático https://adaptecca.es/sites/default/files/documentos/miteco_guia_evaluacion_riesgos_cambio_climatico_2023.pdf

Plataforma sobre adaptación al cambio climático en España <https://adaptecca.es/>

Guía sobre análisis de vulnerabilidad en el ciclo industrial del agua https://www.itccanarias.org/web/images/pdfs/Publicaciones/MACCLIMA_-_Guia_sobre_analisis_de_vulnerabilidad_ciclo_industrial_del_agua.pdf

2.5. Nuevos paradigmas para la adaptación al cambio climático de los sistemas de agua urbana

La gestión de los sistemas de agua urbana se enfrenta en la actualidad a importantes retos que el entorno social y biofísico imponen, especialmente aquellos que se producen como consecuencia de los procesos de urbanización del territorio. Entre ellos, cambios en la capacidad de infiltración del suelo, aparición de nuevas demandas o focos de contaminación puntual, que degradan el estado de las masas de agua y por ende de los ecosistemas acuáticos, afectando a los servicios ecosistémicos que estos proporcionan. En un contexto de cambio climático, donde se evidencia la intensificación del riesgo de inundaciones, escasez de agua y olas de calor, se hace necesaria la adopción de estrategias que mejoren la resiliencia de las ciudades, como elemento fundamental en la adaptación climática, donde la gestión del agua resulta un vector clave (Arrojo & Del Moral, 2023).

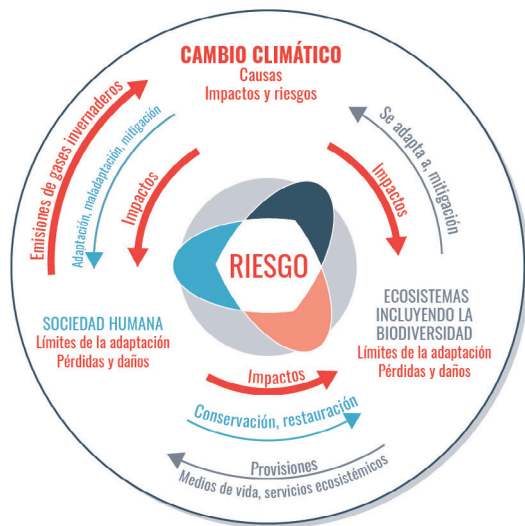
Los sistemas de agua experimentan constantes variaciones en las condiciones de contexto (cambio climático, crecimiento urbano, patrones de consumo o incluso tecnologías disponibles), que introducen un importante grado de incertidumbre respecto al futuro. Esto afecta especialmente al caso que nos ocupa, el sistema de agua urbana, cuyas infraestructuras cuentan con ciclos de vida que se prolongan a lo largo de décadas, en los que deben operar bajo estas condiciones cambiantes.

Hasta ahora, se han realizado grandes esfuerzos por tratar de diseñar sistemas de gestión de los sistemas de agua urbana **a salvo de fallos** – “*fail-safe*” – (Nikolopoulos et al., 2022), es decir, preparados para afrontar cualquier evento extremo, actual o futuro. Para ello, se ha planificado un importante sistema de infraestructuras dimensionado en base a la previsión de la evolución de las condiciones de contorno. Este enfoque se basa, por un lado, en previsiones que, como hemos mencionado, resultan cada vez más inciertas, especialmente en lo que se refiere a la intensidad y recurrencia de los fenómenos climáticos. Por otra parte, estas soluciones suponen grandes inversiones para proporcionar la sufi-

ciente robustez al sistema que permita afrontar con garantía estas situaciones de riesgo (Butler et al., 2017a; Özerol et al., 2020). Estas actuaciones, que requieren importantes esfuerzos de financiación en los grandes sistemas, no pueden ser acometidas por sistemas medianos y pequeños, que suelen resultar así más vulnerables al riesgo (Birkmann et al., 2016). Por todo ello, se hace cada vez más necesario adoptar medidas que permitan a los sistemas estar **preparados para fallar** –“*safe to fail*”– (Ahern, 2011a; Butler et al., 2017b), es decir, que generen una mayor **resiliencia** y permitan incrementar la **capacidad de adaptación** frente a las situaciones de riesgo, incorporando en los análisis de escenarios cierto grado de incertidumbre (Fletcher et al., 2017; Nikolopoulos et al., 2022; Stakhiv, 2011).

Bajo este enfoque, las estrategias para afrontar las consecuencias de los riesgos climáticos, basadas en el control de los fenómenos físicos y en la robustez de los sistemas, avanzan hacia modelos que introducen la comprensión de las dimensiones ambientales, sociales e institucionales (figura 11), en lo que se conoce como el paradigma de la **resiliencia**, donde la **vulnerabilidad**, la **exposición** y la **adaptación** emergen como conceptos clave (Ahern, 2011b; Cutter, 1996; IPCC, 2014, 2022; Nikolopoulos et al., 2022; Short et al., 2012). La literatura científica relativa a la definición del riesgo está avanzando en relación con las interacciones de factores climáticos, medioambientales y humanos que pudieran traducirse en impactos y desastres, prestando especial atención al importante papel que desempeñan los factores no climáticos en la determinación del riesgo y los impactos que derivan del mismo.

(A) Principales interacciones y...



La hélice de riesgo muestra que el riesgo surge de la superposición de:

■ Riesgos climáticos ■ Vulnerabilidad ■ Exposición

...de los sistemas humanos, los ecosistemas y su biodiversidad

(B) Opciones para reducir los riesgos climáticos y generar resiliencia ...

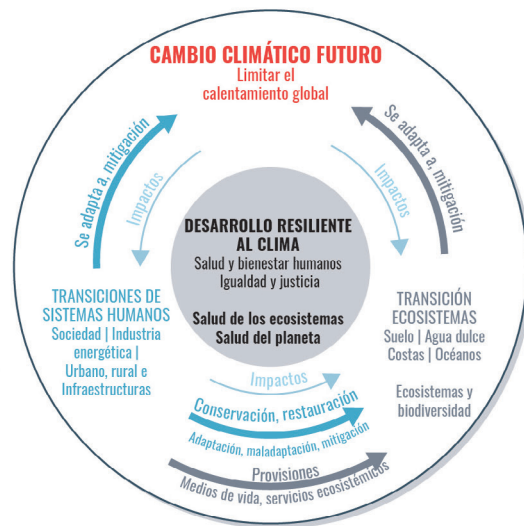


Figura 11. Transición hacia el modelo de gestión resiliente del cambio climático: clima, ecosistemas y sociedad como sistemas acoplados. Fuente: Elaboración propia a partir del Informe Grupo de Trabajo II del IPCC (2022).

Aplicando estos principios al sistema de agua urbana, desde el enfoque de las **ciudades sensibles al agua** (Brown et al., 2016) se propone que las intervenciones que se realicen en el espacio urbano incorporen nuevos objetivos encaminados a la protección de los ecosistemas acuáticos, mediante la integración de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) o la gestión integrada de los recursos hídricos. La incorporación de procesos de participación proporciona además conocimiento local y una mayor democratización en la toma de decisiones, crucial en un contexto de incertidumbre. Son estos principios, orientados a mejorar la **resiliencia** del sistema gracias al incremento de la flexibilidad y adaptación a las condiciones del medio, los que rigen el modelo de gestión propuesto en este trabajo, cuyos fundamentos se exponen a continuación.

2.5.1. La Directiva Marco del Agua y los principios de restauración ambiental

La gestión de los recursos naturales, y más concretamente el agua, viene experimentando un importante cambio de paradigma en las últimas décadas, resultado de una reorientación de objetivos, metodologías, aproximaciones conceptuales y profundos cambios institucionales (agentes implicados, marco normativo), que se han venido aplicando de manera cada vez más generalizada (Pita López et al., 2014).

Estos cambios se concretan en lo que podríamos denominar un modelo de gestión socio-ecosistémica del agua (Madrid et al., 2013). En este modelo, los recursos naturales no se entienden desde una perspectiva meramente productivista, de máxima explotación y aprovechamiento, sino como parte de un ecosistema a conservar y restaurar, que proporciona el capital natural necesario para satisfacer las necesidades humanas a través de los servicios ecosistémicos, entendidos estos como todos los beneficios que las poblaciones humanas obtienen de estos ecosistemas (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

En el caso del agua, este cambio de modelo ha venido motivado, entre otros, por la aprobación de la Directiva 2000/60/CE, conocida como la Directiva Marco de Agua (DMA). Ante el deterioro progresivo de los ecosistemas acuáticos en Europa como consecuencia de las presiones a las que se ven sometidos, la DMA establece en su artículo 1 como objetivo fundamental el establecimiento de un marco de protección de las aguas que: **“a) prevenga todo deterioro adicional y proteja y mejore el estado de los ecosistemas acuáticos y, con respecto a sus necesidades de agua, de los ecosistemas terrestres y humedales directamente dependientes de los ecosistemas acuáticos; b) promueva un uso sostenible del agua basado en la protección a largo plazo de los recursos hídricos disponibles; (...) e) contribuya a paliar los efectos de las inundaciones y sequías”**. Con ello, la norma pretende que se garantice **“el suministro suficiente de agua superficial o subterránea en buen estado, tal como requiere un uso del agua sostenible, equilibrado y equitativo”**. Estos principios se encuentran también reflejados en la trasposición de esta norma al ordenamiento jurídico español a través del TR de la Ley de Aguas (2001). No obstante, se hace necesaria una adaptación de esta Ley de cara a una mejor incorporación del enfoque de riesgo, y más concretamente, de los retos que el cambio climático impone.

La DMA entiende que es primordial alcanzar el buen estado ecológico de los ecosistemas acuáticos como mecanismo para garantizar que estos sigan proporcionando los servicios ecosistémicos necesarios para la sociedad, tales como el abastecimiento de agua, en términos de cantidad y de calidad, pero también la protección frente a los riesgos de sequía e inundación, cada vez más intensificados por el cambio climático. La DMA se convierte así en uno de los primeros instrumentos normativos que incorpora un enfoque de riesgo, y consecuentemente, frente a la incertidumbre, los principios de prudencia, participación, anticipación y adaptación.

Se apuesta, por tanto, por la recuperación del buen estado de los ecosistemas acuáticos como estrategia de resiliencia para la adaptación a los riesgos derivados del cambio climático (sistemas “preparados para fallar”), frente al enfoque más tradicional, basado en la predicción de los fenómenos y la transformación los sistemas hídricos de cara a alcanzar el objetivo de un mayor control y robustez (sistemas “a salvo de fallos”) (Nikolopoulos et al., 2022). Este enfoque de la DMA es el marco de lo que se conoce como el **nuevo paradigma** para la gestión del agua urbana (Franco-Torres et al. 2021).

Para alcanzar estos objetivos, la DMA aplica el marco metodológico de análisis causal denominado por sus siglas en inglés FPSIR (fuerzas motrices, presión, estado, impacto y respuesta), que ha sido desarrollado por la Agencia Europea de Medio Ambiente (2006) para describir las interacciones entre la actividad humana y el medio ambiente. Según este marco de análisis, las actividades humanas ejercen presiones sobre el ambiente que modifican la cantidad y calidad de los recursos naturales, pudiendo así provocar cambios en el estado del recurso. El programa de medidas a adoptar, las **respuestas**, no se destinan únicamente a tratar de paliar los **impactos**, sino que se basan en la identificación previa de las actividades que generan presiones sobre las masas de agua, explicando así el posible origen de su deterioro por los efectos de las actividades humanas. De este modo, se adopta una estrategia que prioriza la reducción de las presiones, como mecanismo para la mejora del estado de las masas de agua y así reducir los posibles **impactos**.

Aplicar este marco al estudio de los **riesgos hidroclimáticos** supone identificar aquellas fuerzas motrices y presiones que se traducen en una intensificación de la **exposición** y la **vulnerabilidad** frente a estos riesgos (figura 15).

De este modo, desde el paradigma de la robustez, donde las **respuestas** del sistema tienen como objetivo hacer frente a los **impactos**, el marco FPSIR avanza hacia el paradigma de la **resiliencia**, donde las **respuestas** están centradas en la reducción de las **presiones** y sus **fuerzas motrices**, adoptando estrategias de **adaptación** que mejoran el estado de las masas de agua y por tanto la capacidad del sistema de mantener los servicios ecosistémicos cuando se enfrenta a una situación de **peligro** climático, reduciendo así desde el origen la consecución de posibles **impactos**, en la línea con el art.1e de la DMA (figura 12).



Figura 12. Transición a la gestión resiliente mediante la aplicación del marco FPSIR a la gestión de riesgos hidrolimáticos.

Este enfoque de preservación de los ecosistemas orientado a la prevención para la gestión de riesgos está cada vez más presente en la legislación europea, y a través de su trasposición, en la de los estados miembros como España. Ejemplos de ello son la Directiva 2007/60/CE relativa a la Evaluación y Gestión de los Riesgos de Inundaciones, la Directiva 2020/2184 de Calidad de las Aguas Destinadas al Consumo Humano, la revisión de la Directiva sobre el Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas o la reciente Ley de Restauración de la Naturaleza (2023) (ver capítulo 3).

No obstante, la ausencia hasta ahora de un marco legal a nivel estatal para la regulación de los sistemas de agua urbana hace que los principios y procedimientos de la DMA no se hayan concretado para su aplicación en la escala urbana. Si bien existen ciertas obligaciones relacionadas, por ejemplo, con situaciones excepcionales, como los Planes de Emergencia por Sequía, no existe un marco legal que defina los procesos para la planificación integral de los sistemas de agua urbana desde una perspectiva de gestión del riesgo.

En este sentido, la elaboración de planes para la adaptación al cambio climático de la gestión de los sistemas de agua urbana supone una oportunidad única para la incorporación de la perspectiva del riesgo y la implementación de los principios de la DMA en el caso de los sistemas de gestión de los sistemas de agua urbana.

2.5.2. Garantía del derecho humano al agua y el saneamiento en el contexto de cambio climático

El acceso básico al agua potable y al saneamiento es un componente esencial del derecho a un nivel de vida adecuado y una condición indispensable para el disfrute de otros derechos como el derecho a la alimentación, a la salud, a la vivienda o a un medio ambiente sano. Así lo reconoció la Asamblea General de Naciones Unidas en su Resolución A/RES/64/292, de julio de 2010, que establece que **“el derecho al agua potable y el saneamiento es un derecho humano esencial para el pleno disfrute de la vida y de todos los derechos humanos”**, convirtiéndose los derechos humanos al agua y el saneamiento (DHAS) en obligaciones jurídicamente vinculantes para todos los estados partes en el Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales (PIDESC), como es el caso de España.

En este marco, en diciembre de 2020 se aprobó la Directiva (UE) 2020/2184 del Parlamento europeo y del Consejo relativa a la Calidad de las Aguas Destinadas al Consumo Humano, más conocida como Directiva de Aguas Potables (DAP). Si bien es cierto que la directiva no menciona de manera explícita los DHAS, adopta los principios normativos de calidad, disponibilidad, accesibilidad, asequibilidad y aceptabilidad que el reconocimiento de estos derechos implica.

El Relator Especial de la ONU para los DHAS, Pedro Arrojo, viene insistiendo en la necesidad de asumir un enfoque de derechos humanos en la gestión de aguas, que garantice sostenibilidad y gobernanza democrática, sobre la base de garantizar la prioridad en el uso de los recursos disponibles de mayor calidad y menor coste para el abastecimiento de la población (Arrojo & Del Moral, 2023). En esta línea, la protección de las masas de agua de las que se obtiene el recurso para el consumo humano es una pieza fundamental en la DAP. Siguiendo recomendaciones de la OMS, la nueva normativa apuesta por la adopción de un enfoque orientado a la gestión de riesgos, basado en la acción preventiva tanto de protección de las zonas de captación, como de todo el proceso de almacenamiento, potabilización y transporte hasta el consumidor, debiendo favorecer la disminución de la contaminación de los territorios en los que se sitúan las captaciones (Del Moral, 2018). Su transposición al ordenamiento jurídico español se realiza a través del RD 3/2023 por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro, que ha permitido la mejora de algunos aspectos de la DAP relacionados con los criterios normativos para la implementación del DHAS, incluido su reconocimiento explícito.

En España, aunque los avances técnicos y organizativos de los sistemas de agua urbana han sido importantes en las últimas décadas y los servicios de agua y saneamiento están prácticamente garantizados, determinados usos productivos generan, directa o indirectamente, ciertos impactos sobre la calidad y la cantidad de las fuentes de agua, que ponen en riesgo su garantía y afectan a su condición de Derecho Humano, especialmente en el caso de pequeñas y medianas poblaciones (Schmidt et al., 2022).

Todo ello, a pesar de que, en la Ley de Aguas (2001) y el resto de normativa vigente, está claramente establecida la prioridad del abastecimiento urbano frente al resto de usos del agua, si bien dicha prioridad legal en muchos casos no se cumple (Schmidt et al., 2022). Y son estas circunstancias las que afectan especialmente a pequeñas y medianas poblaciones, con sistemas de abastecimiento menos robustos, cuyas zonas de captación frecuentemente no están adecuadamente identificadas o protegidas en los planes hidrológicos, y donde la

capacidad de interlocución de los municipios con los organismos de cuenca es a veces insuficiente.

Las respuestas por parte de las administraciones se dirigen principalmente a hacer frente a los impactos, por medio de la instalación de plantas desnitrificadoras, la conexión con sistemas de abastecimiento regionales, o el cambio o reprofundización de los pozos de captación (Arrojo & Del Moral, 2023). Por otra parte, los costes de las medidas a adoptar son aplicados habitualmente sobre las tarifas urbanas, en lugar de cargarlos sobre los causantes de los problemas, ignorando el principio de “quien contamina paga” de la DMA y poniendo en riesgo el principio de asequibilidad que implica el enfoque del DHAS. En pocos casos se aplica un enfoque de prevención y resiliencia, con medidas dirigidas a las presiones y a las fuerzas motrices.

El cambio climático en curso está agravando el impacto de estos procesos de sobreexplotación y contaminación de las fuentes de agua sobre los DHAS de las poblaciones que se han venido abasteciendo de ellos. Por ello, en el informe que el Relator publicó en 2022 sobre los DHAS bajo las perspectivas vigentes de cambio climático, insistió en la importancia de acabar con la sobreexplotación de los recursos hídricos, especialmente de los acuíferos, no sólo para garantizar su sostenibilidad, sino para integrar en la gestión de los mismos su función como reserva estratégica para gestionar ciclos extraordinarios de sequía, asumiendo un enfoque de derechos humanos que ponga y gestione en máxima prioridad los abastecimientos de agua potable (Arrojo, 2022).

En esta misma línea, adoptar el principio de prevención del riesgo de la DMA y la DAP implicaría un cambio de enfoque en la gestión de esta problemática en cuanto al tipo de medidas que se aplican, que deberían dirigirse preferentemente hacia las fuerzas motrices, con el fin de resolver los problemas de forma eficaz, eficiente y duradera. Según Arrojo y Del Moral (2023), para garantizar la prioridad real del abastecimiento urbano frente al resto de usos, especialmente en el actual contexto de cambio climático, es necesario aplicar medidas que vayan dirigidas a las **fuerzas motrices** (preferentemente) y a las **presiones**. Los autores proponen en concreto las siguientes medidas:

- Mejora en la gobernanza de los abastecimientos.
- Establecimiento y aplicación de perímetros de protección adecuados.
- Control estricto sobre fuentes contaminantes.
- Reducción de la presión sobre la cantidad de agua.
- Medidas basadas en la naturaleza.
- Aplicación del principio de quien contamina paga.
- Fomento de buenas prácticas agrícolas y ganaderas.

2.5.3. Las ciudades sensibles al agua

Actualmente asistimos a un proceso en el cual la gestión de los sistemas de agua urbana están viendo comprometida su capacidad para hacer frente a los nuevos retos a los que debe enfrentarse la gestión del agua en las ciudades, como la presión sobre los recursos hídricos, el crecimiento de la población urbana y la expansión de los procesos urbanizadores o el envejecimiento de las infraestructuras, todos ellos agravados como consecuencia de los impactos del cambio climático (Sharma et al., 2016). En el caso de las ciudades medianas y pequeñas, estas se enfrentan además a retos específicos en comparación con las grandes ciudades (Birkmann et al., 2016; Özerol et al., 2020):

- Recursos humanos insuficientes para desarrollar y aplicar una estrategia integral de adaptación al cambio climático.
- Falta de estudios especializados para abordar los retos climáticos de forma integrada.

- Escaso presupuesto y pocas oportunidades para abordar grandes inversiones.
- Capacidad limitada de acceso a los programas de investigación y financiación relacionados con el clima.
- Menor autonomía debido a la dependencia y menor capacidad de incidencia en los niveles superiores de la administración.

No obstante, en los últimos años se han realizado interesantes avances en relación con las propuestas que, desde una perspectiva innovadora, afrontan los nuevos retos de la gestión de los sistemas de agua urbana, y que se han reflejado en investigaciones y documentos estratégicos a nivel europeo. Entre ellos destacan los proyectos SWITCH (***Managing water for the city of the future***) coordinado por el *Institute of Water Education* (UNESCO-IHE) entre 2006 y 2011, el proyecto TRUST (***Transition to the urban water services of the future***), liderado por el *IWW Water Centre* (Alemania) entre 2011 y 2015, o más recientemente el proyecto CATCH (***Water sensitive Cities: the Answer To CHallenges of extreme weather events***), un proyecto del *Interreg North Sea Region* (2017-2023). Estos trabajos pretenden así replantear los antiguos paradigmas de la gestión del agua urbana y desarrollar nuevas estrategias y herramientas metodológicas, así como soluciones tecnológicas, adaptadas a los requerimientos propios del momento actual.

Estos proyectos comparten el objetivo principal de generar una base de conocimiento para alcanzar la sostenibilidad y minimizar los efectos ambientales de los sistemas de agua urbana sin comprometer la calidad del servicio. Estos enfoques a menudo se basan en conceptos como la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH), la Gestión Integrada de Aguas Urbanas (GIAU), o el Diseño Urbano Sensible al Agua (WSUD en inglés).

El marco de **Ciudades Sensibles al Agua** se presenta así como perspectiva global de la resiliencia urbana enfocada en el agua en donde se integran todos estos conceptos (Brown et al., 2016; Lara, 2018; Özerol et al., 2020; Sharma et al., 2016; Suárez López et al., 2014). Este marco impulsa un nuevo modelo de planifi-

cación urbana que se adapte a las características de su contexto natural y social, protegiendo los ecosistemas naturales y optimizando el uso de los recursos hídricos. Con este objetivo, se trata de rescatar y preservar los procesos propios del ciclo natural del agua para ser reproducidos, en la medida de lo posible, en el ciclo urbano, manteniendo los niveles de calidad del servicio a la vez que se minimizan los impactos hidrológicos del proceso de urbanización (Lara, 2018; Suárez López et al., 2014)

Las Ciudades Sensibles al Agua funcionan bajo tres principios, o «pilares», de acción (Özerol et al., 2020):

- Las ciudades como comunidades y redes sensibles al agua.
- Las ciudades como cuencas hidrográficas. El sistema hídrico urbano suele formar parte de una cuenca hidrográfica mayor, y el proceso urbanizador provoca la impermeabilización y transformación del sistema hídrico natural en detrimento de la región circundante.
- Las ciudades como proveedoras de servicios ecosistémicos. Los recursos hídricos y las infraestructuras verdes urbanas sirven para múltiples propósitos y funciones, proporcionando servicios ecosistémicos.

Para la consecución de los objetivos de la Ciudad Sensible al Agua, se debe desarrollar un nuevo enfoque del diseño urbano que integre espacios dedicados al agua y promueva la implantación de alternativas tecnológicas sostenibles, fortaleciendo así una nueva cultura del agua en el ámbito urbano que ponga en valor y proteja este recurso, de manera que esa transformación cultural llegue tanto a las instituciones como a la sociedad. Todo ello implicará enfrentar las limitaciones y barreras existentes a nivel socio-cultural, institucional, administrativo, educativo, técnico y financiero, para superar los arraigados paradigmas urbanos y de gestión del agua del siglo XX (Brown & Farrelly, 2009; Ferguson et al., 2013; Franco-Torres, Kvålshaugen, et al., 2021; Nikolopoulos et al., 2022).

Para ello se propone fomentar una perspectiva multidisciplinar, donde la participación de un amplio espectro de profesionales permita la cooperación de

distintas capacidades y saberes en el ámbito de la gestión participada, el diseño de infraestructuras y la arquitectura del paisaje.

El nuevo enfoque propuesto se caracteriza por potenciar los siguientes rasgos:

- Incorporación del enfoque de riesgo y el principio de prudencia, que implica actuar sobre las fuerzas motrices y las presiones, con el objetivo de preservar el buen estado de las masas de agua y garantizar así los servicios ecosistémicos, especialmente el abastecimiento humano.
- Consolidación del principio, ya actualmente bien establecido, de gestión integrada de las fases de abastecimiento y saneamiento, a lo que se añade mayor atención a la integración de las aguas pluviales, la red de drenaje, los espacios públicos, la vegetación, la infiltración y las aguas subterráneas.
- Consideración de todos los componentes de los sistemas de agua urbana como partes de un conjunto único, y énfasis en que todas las administraciones e instituciones interesadas deben involucrarse en garantizar que esa integración se consiga.
- Sustitución, como resultado de esta integración reforzada, de los diseños lineales de entrada y salida del sistema por funcionamientos circulares, de reutilización y recirculación, que reducen entradas y salidas a este mismo sistema.
- Aplicación del principio de adaptación de calidades, incorporando recursos alternativos para la satisfacción de demandas menos exigentes (inodoros, riesgo de zonas verdes, limpieza, etc.).
- Preferencia por las tecnologías innovadoras y flexibles, con especial énfasis en las soluciones basadas en la naturaleza, seleccionadas en base a una evaluación integral del ciclo del agua y a la sostenibilidad a largo plazo del sistema en conjunto.

- Potenciación de la integración de los ciclos del agua y la energía –producción mediante energías renovables, reducción de consumos energéticos, captación de CO₂–.
- Integración en la gestión del sistema de agua urbana de criterios de eficiencia y responsabilidad de costes, combinados con los principios normativos del DHAS: calidad, disponibilidad, accesibilidad, asequibilidad y aceptabilidad.
- Puesta en práctica de nuevas formas de participación pública que garanticen transparencia y participación ciudadana efectiva y proactiva.
- Adopción de un enfoque de resiliencia de los sistemas frente al cambio climático, especialmente en lo que se refiere a la gestión de riesgos hidrológicos, adaptando el conjunto de las estrategias anteriores a las condiciones del contexto físico y social del área de trabajo.

2.5.4. Servicios ecosistémicos y soluciones basadas en la naturaleza

La planificación para la adaptación del CUA al cambio climático pasa por la aplicación de los principios de la DMA al ámbito urbano, referidos principalmente a la protección y mejora de las masas de agua para garantizar los servicios ecosistémicos, tales como el abastecimiento humano o la protección frente a los riesgos, que se concreta en el enfoque de las Ciudades Sensibles al Agua.

Según establece la Ley Europea del Clima, aprobada en junio de 2021, en su Consideración 32:

“La mejora de las capacidades de adaptación y de resiliencia, teniendo en cuenta los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, contribuye a minimizar las consecuencias del cambio climático, a abordar los efectos inevitables de manera

socialmente equilibrada y a mejorar las condiciones de vida en las zonas afectadas. Prepararse con suficiente tiempo a dichas consecuencias es eficiente en términos de costes y también puede reportar considerables beneficios colaterales para los ecosistemas, la salud y la economía. En concreto, las soluciones basadas en la naturaleza pueden ser beneficiosas para la mitigación del cambio climático, la adaptación a este y la protección de la biodiversidad.”

Las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) se sitúan de este modo como apuesta prioritaria de las instituciones nacionales e internacionales para mejorar la resiliencia de las ciudades frente a los riesgos hidrológicos (UICN, 2020; EC, 2013; UN-CBD, 2016; WHO 2016, EC, 2016; Faivre et al.2017). En esta línea se encuentran la mencionada **Ley europea de Restauración de la Naturaleza** (2023), así como la **Estrategia Europea de Infraestructura Verde: mejora del capital natural de Europa** (2013), o en el caso español, la **Estrategia Nacional de Infraestructura Verde y de la Conectividad y Restauración Ecológicas** (2020).

Las SbN están inspiradas y respaldadas por la naturaleza y utilizan o imitan los procesos naturales para contribuir a la gestión mejorada del agua. Una SbN puede implicar la conservación o rehabilitación de los ecosistemas naturales y/o la mejora o creación de procesos naturales en ecosistemas modificados o artificiales, proporcionando simultáneamente beneficios a los seres humanos y a la biodiversidad (UICN 2020). La renaturalización de cauces urbanos, los sistemas de drenaje urbano sostenible o la depuración mediante humedales artificiales son ejemplos claros de la contribución de las SbN a la recuperación del ciclo hidrológico en las ciudades y a la adaptación del sistema de agua urbana frente a los riesgos hidrológicos (Bowler et al., 2010; Bush & Doyon, 2019; Frantzeskaki & McPhearson, 2022; Guerrero et al., 2016; Gutiérrez et al., 2017; Juvillà Ballester, 2019; Kabisch et al., 2017; Yang & Lee, 2021).

Además de los beneficios directos, las SbN tienen un impacto social transformador y contribuyen a la innovación social en las ciudades, cambiando la percepción y las relaciones entre los seres humanos y la naturaleza en los contextos urbanos contribuyendo a acelerar las transiciones ecológicas en las ciudades (Frantzeskaki et al., 2017; Gutiérrez et al., 2017).

Pero siendo sus ventajas generalmente aceptadas, la realidad es que su implementación se encuentra con dificultades que se enmarcan en las que afronta el proceso más general de transición ecológica (Davies & Laforzezza, 2019; Frantzeskaki et al., 2017; Kabisch et al., 2017). Si bien existen experiencias en la aplicación de SbN en todo el mundo, y en muchos casos se demuestran incluso como más rentables en términos de coste-eficiencia (Davies & Laforzezza, 2019; European Commission, 2015; Lique et al., 2016), la mayoría de las ciudades siguen realizando grandes inversiones en sistemas convencionales y los planes de acción frente al cambio climático siguen priorizando medidas infraestructurales para mejorar la robustez del sistema frente a estos riesgos. No obstante, existen múltiples estudios que demuestran que las barreras para la implementación de estos nuevos sistemas son mucho más fuertes a nivel socio-institucional que tecnológico, y que recomiendan estrategias de trabajo coordinado con el conjunto de actores sociales e institucionales para generar visiones compartidas sobre la ciudad del futuro (Brown & Farrelly, 2009; Doménech et al., 2021; Ferguson et al., 2013).

Algunas de las barreras detectadas en este proceso están relacionadas con problemas de inercia y fragmentación institucional, falta de visión común, falta de definición de responsabilidades, dependencia de patrones tecnológicos, ausencia de incentivos desde el punto de vista político, capacidad limitada de participación activa por parte de la sociedad, y falta de experiencia en la gestión de procesos integrales (Brown & Farrelly, 2009; Davies & Laforzezza, 2019; Kabisch et al., 2017; Lara & Moral, 2022). Para facilitar la incorporación de SbN se requiere de enfoques de gobernanza colaborativa, la puesta en valor de conocimientos locales y el impulso colectivo de iniciativas de transición, así como de la participación de agentes de cambio que sirvan de catalizadores de estos procesos de transformación (Frantzeskaki et al., 2017).

En este sentido, avanzar hacia un nuevo modelo de gestión del CUA desde este enfoque adaptativo implica apostar por mejorar la gobernanza del agua, con especial atención a la colaboración entre administraciones (confederaciones hidrográficas, gobiernos autonómicos, ayuntamientos, entidades gestoras del CUA...), así como entre diferentes departamentos de una misma administración, permitiendo coordinar políticas urbanísticas, ambientales, de gestión del verde urbano con las del CUA.