



ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO: AGUA E INGENIERÍA

World Federation of Engineers Organizations
Working Group on Water



WFEO / FMOI



LEAVE
NO ONE
BEHIND

Marzo, 2021

AGRADECIMIENTOS

El presente documento es el resultado del esfuerzo colectivo realizado por el Grupo de Trabajo sobre el Agua de la Federación Mundial de Organizaciones de Ingenieros (FMOI). La autoría del informe y las contribuciones recibidas son las siguientes.

Autores

Instituto de la Ingeniería de España: Ignacio González-Castelao
icastelao@ceig.eu

Federación Mundial de Organizaciones de Ingenieros: Tomás Sancho

Los autores de este documento agradecen a todos los miembros del Grupo de Trabajo sobre el Agua y al resto de personas citadas a continuación su valiosa contribución, constructivos comentarios y sugerencias durante el proceso de redacción y revisión de este documento.

Contribuciones

Otras contribuciones (cuestionarios)

Esta publicación tiene fines divulgativos, educativos o no lucrativos, no estando sujeta a un uso comercial.

Imágenes de la portada:

| | | |
|---|---|---|
| A | B | C |
| D | E | F |
| G | | |
| H | | |

A: Photo by [Broken Window Theory](#) on [Foter.com](#) / [CC BY-NC-SA](#)

E: Photo by [mmmmmmrob](#) on [Foter.com](#) / [CC BY-NC-SA](#)

F: Photo by [Bill Tanata](#) on [Foter.com](#) / [CC BY-NC-ND](#)

G: Photo by [Bernal Saborio G. \(berkuspic\)](#) on [Foter.com](#) / [CC BY-SA](#)

H: Photo by [Malinda Rathnayake](#) on [Foter.com](#) / [CC BY](#)

Mapa del océano: Athelstan Spilhaus. Atlas of the World with Geophysical Boundaries, 1991. Cartographie: Clara Dealberto.

Contenido

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | Introducción | 1 |
| 1.1 | El Grupo de Trabajo sobre el Agua de la Federación Mundial de Organizaciones de Ingenieros..... | 1 |
| 1.2 | Objetivos | 1 |
| 2 | El agua, un recurso transversal. | 3 |
| 3 | Agua y Cambio Climático..... | 8 |
| 4 | Agua, adaptación e ingeniería..... | 19 |
| 4.1 | Medidas de adaptación relacionadas con la oferta-demanda de agua. | 23 |
| 4.2 | Medidas de adaptación frente a fenómenos meteorológicos extremos..... | 40 |
| 4.3 | Medidas de adaptación frente a la subida del nivel de mar. | 45 |
| 5 | Conclusiones | 50 |
| 6 | Bibliografía y referencias..... | 54 |
| 7 | Índice de ilustraciones..... | 57 |
| 8 | Índice de tablas. | 63 |

1 Introducción

1.1 El Grupo de Trabajo sobre el Agua de la Federación Mundial de Organizaciones de Ingenieros.

Ante la creciente importancia del agua en la agenda mundial y su carácter transversal a todos los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, la Federación Mundial de Organizaciones de Ingenieros (FMOI) aprobó en 2018, coincidiendo con la celebración del su cincuenta aniversario, la creación del Grupo de Trabajo sobre el Agua (WGoW).

Este Grupo de Trabajo, auspiciado conjuntamente por el “Instituto de la Ingeniería de España” y la “Ordem dos Engenheiros” de Portugal, abarca todas las iniciativas de la FMOI en materia de ingeniería del agua y sus relaciones con los órganos y organismos de las Naciones Unidas, principalmente con ONU-Agua y la UNESCO. Su actividad se enmarca en el ámbito de la contribución de la ingeniería a los Objetivos de Desarrollo Sostenibles.

La labor del Grupo de Trabajo comprende el trienio 2019-2021, existiendo el compromiso de elaborar tres documentos temáticos. Dos de ellos ya han sido entregados: “Gestión de sequías e inundaciones: mejores prácticas y contribución de la ingeniería” (2019) y “Alcanzando el ODS 6 (Objetivos del agua): Contribución de la ingeniería” (2021).

Con el presente trabajo se cierra el compromiso adquirido por el Grupo de Trabajo de Agua, habiéndose alcanzado los objetivos inicialmente previstos.

1.2 Objetivos

El agua es un bien universal indispensable para la vida, cuya cantidad y calidad afecta a muchos sectores, lo que otorga a este recurso una dimensión social, ambiental y económica. Es un bien que no conoce fronteras.

El ciclo del agua es una parte esencial del clima, entendiendo por este el conjunto de condiciones atmosféricas que caracterizan una región. Cualquier cambio en el clima tiene consecuencias sobre el ciclo del agua y viceversa. El agua transmite muchos de los impactos del cambio climático a la sociedad.

A gran escala, las previsiones actuales sobre el cambio climático indican un aumento de temperatura terrestre, lo que conlleva una mayor presencia de vapor de agua en la atmósfera y, por ende, un aumento anual de la precipitación global media. Los fenómenos meteorológicos extremos aumentarán en frecuencia, duración e intensidad. El agua dulce no sólo se verá afectada en su cantidad, sino también en su calidad.

El cambio climático también afecta a la criosfera y al nivel del mar, que aumentará debido, principalmente, a la expansión de su volumen por la dilatación térmica, pero también por el derretimiento de los glaciares.

Las tendencias climáticas y sus efectos indicados a escala global tienen un mayor grado de incertidumbre cuando bajamos a una escala regional, local o de cuenca.

Los distintos escenarios de cambio climático previstos afectan a todos los seres vivos y de forma más directa al ser humano, pero especialmente a su modelo de vida actual. Situación que se verá agravada por el crecimiento previsto de la población mundial. No se trata de salvar la tierra sino a nosotros mismos, a los demás seres vivos y nuestra forma de vida.

Realizar esta tarea conlleva, entre otros, la adopción de medidas de mitigación y adaptación en las que los ingenieros y la ingeniería desarrolla un papel importante.

El objetivo de este documento es, precisamente, identificar aquellas alternativas de adaptación al cambio climático que los ingenieros y la ingeniería pueden aportar en el ámbito del agua. Estas actuaciones permitirán cooperar en alcanzar la Agenda de Desarrollo Sostenible 2030. Desarrollo que no sólo debe ser sostenible, sino también inteligente e integrador.

En el primer capítulo del libro “El agua, un recurso transversal” se analiza el carácter transversal de los recursos hídricos, describiéndose las sinergias y conflictos del Objetivo de Desarrollo Sostenible “6 – Agua y saneamiento” con el resto de los objetivos y también su relación con la ingeniería.

Antes de abarcar las medidas de adaptación hay que conocer los escenarios de cambio a los que nos enfrentamos. Por ello, en el apartado “Agua y cambio climático” se ha creído conveniente resumir las principales afecciones del cambio climático que tengan un impacto directo o indirecto sobre el agua.

Las principales medidas de adaptación se relacionan en el capítulo “Agua. Adaptación e ingeniería”, habiéndose agrupado en tres categorías: medidas de adaptación relacionadas con la oferta-demanda, frente a fenómenos meteorológicos extremos y las relacionadas con la subida del nivel del mar. A lo largo de este apartado, también se describen experiencias, ejemplos y buenas prácticas de adaptación que la ingeniería ha aportado en el ámbito del agua.

2 El agua, un recurso transversal.

El agua es uno de los recursos naturales de mayor importancia para la vida, la formación de distintos tipos de paisajes y ecosistemas y para el desarrollo. Por ello, sólo una gestión eficaz y eficiente de este recurso puede permitir alcanzar las metas de las tres dimensiones del desarrollo sostenible (social, ambiental y económica).

El Objetivo de Desarrollo Sostenible “6 - Agua y saneamiento” (ODS6) está interrelacionado con la agenda completa 2030. Los vínculos existentes entre este ODS y el resto pueden producir sinergias positivas, pero también generar conflictos. No obstante, la mayor parte de las relaciones del ODS6 con el resto de los ODSs son positivas porque alcanzar sus metas posibilita que se logren las del resto de objetivos.

La forma en que interactúan estos vínculos no es estática, sino que puede variar entre regiones, países o incluso de una cuenca fluvial a otra.

La planificación y la gestión integrada de recursos hídricos y del territorio son el escenario de encuentro de estas relaciones entre los distintos objetivos y metas, así como el marco donde resolver los potenciales conflictos mediante la participación de todas las partes interesadas.



Ilustración 2-1: Relación entre Objetivos y Dimensiones del Desarrollo Sostenible basado en información publicada por UN-Water (UN-Water, 2016).

La dimensión social del agua es más significativa en los objetivos de erradicación de la pobreza y del hambre. No obstante, también hay estrechos vínculos entre el ODS6 y el resto de las dimensiones sociales del desarrollo sostenible. (UN-Water, 2016)

Garantizar el acceso a los servicios WASH (agua, saneamiento e higiene), la existencia de recursos hídricos sostenibles y de calidad y una gestión integrada de los mismos es fundamental en esta dimensión social. Asimismo, la inversión en agua y saneamiento produce significativos retornos en lo social y en lo económico. Los beneficios superan el costo de una

intervención de 3 a 6 veces. La Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Banco Mundial indican que el rendimiento económico mundial del gasto en saneamiento es de 5,50 dólares por cada dólar invertido (UN-Water, 2015).

La existencia de fenómenos meteorológicos extremos, como las sequías o inundaciones, olas de calor o frío, y ciclones, aumentan la vulnerabilidad de las sociedades y economías.

El acceso al agua es fundamental para la actividad económica mundial. Los bienes y servicios producidos generan una huella hídrica y su intercambio o comercio producen un mercado de agua virtual entre distintos territorios, regiones o países.

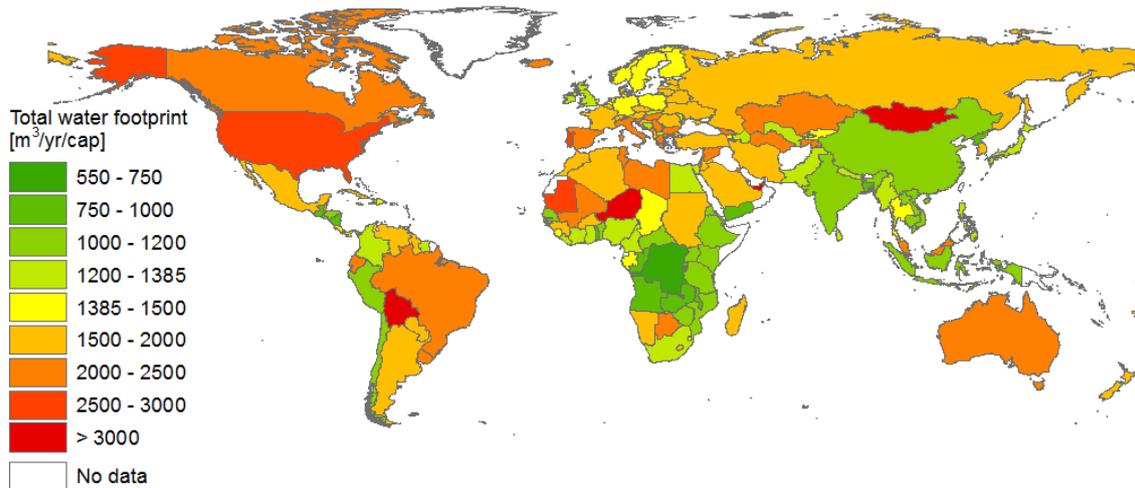


Ilustración 2-2: La huella hídrica de consumo total por país (m³/año per cápita). Los países mostrados en verde tienen una huella hídrica menor que la media mundial; los países mostrados en amarillo-rojo tienen una huella hídrica mayor que la media mundial (Mekonnen & Hoekstra, 2011).

Los consumidores y productores pueden tener un gran impacto en la cantidad y calidad del agua.

Aproximadamente, una quinta parte de la huella hídrica mundial se destina a la exportación. Los países industrializados tienen huella hídrica en el rango de 1.250-2.850 m³/y per cápita, mientras que los países en desarrollo muestran un rango mucho mayor de 550-3.800 m³/y per cápita (Mekonnen & Hoekstra, 2011).

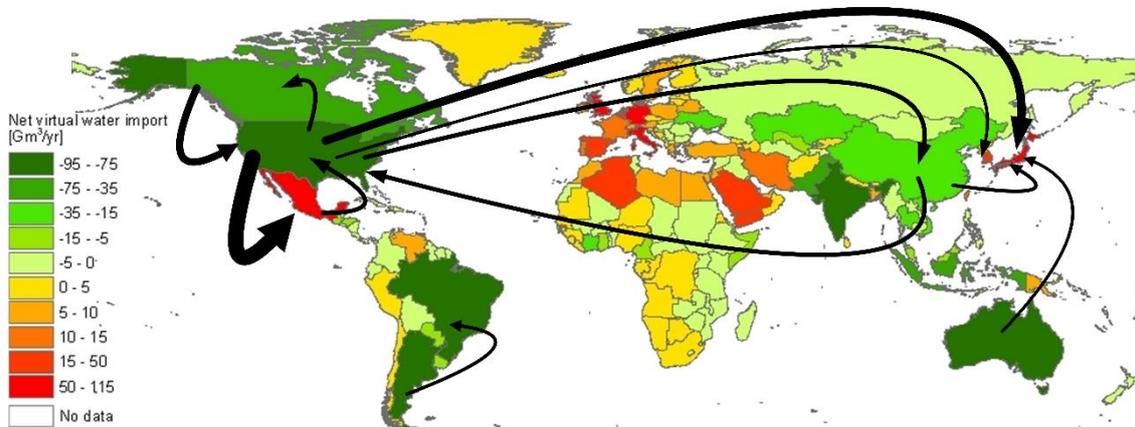


Ilustración 2-3: Balance de agua virtual por país y dirección de los flujos brutos de agua virtual relacionados con el comercio de productos agrícolas e industriales durante el periodo 1996-2005. Sólo se muestran los mayores flujos brutos (> 15 Gm³/año); cuanto más gorda es la flecha, mayor es el flujo de agua virtual (Mekonnen & Hoekstra, 2011).

Para alcanzar un desarrollo social y económico sostenible es imprescindible disociar este desarrollo de la degradación del medio ambiente y de sus recursos naturales. Por ello, las metas de productividad económica, crecimiento, industrialización y urbanización se deben lograr de una forma integrada con otras metas de esos objetivos, así como de otros sectores, para evitar cualquier potencial conflicto con las metas de calidad y usos del agua y ecosistemas acuáticos.

Las interrelaciones entre el ODS6 y la dimensión ambiental de la Agenda 2030 es, junto a la social, la más visible de todas.

Los ecosistemas son los receptores finales de las aguas residuales de las ciudades e industrias, así como de la escorrentía que proviene de la agricultura y de las áreas urbanas. Por ello se debe tener un especial cuidado en su protección para que estos ecosistemas puedan realizar su función.

De todas las relaciones entre objetivos y metas mencionadas, se desprende que el agua es un multiplicador de oportunidades en la consecución de la Agenda 2030, pero también lo es de los riesgos. El incremento de la población mundial y el desarrollo suponen un mayor acceso a los servicios básicos y a otros bienes y servicios por parte de la sociedad. Esto debe realizarse de un modo sostenible para que no aumente la contaminación sobre el agua y la polución de los ecosistemas. Asimismo, los fenómenos meteorológicos extremos no sólo tienen consecuencias económicas y sociales, sino que la gestión que se haga de estos fenómenos afecta a la calidad y cantidad de los recursos hídricos. Estos escenarios se verán amplificados por los efectos del cambio climático ya que el agua, al ser un recurso transversal, es el agente que transmite muchos de los impactos del cambio climático a la sociedad.

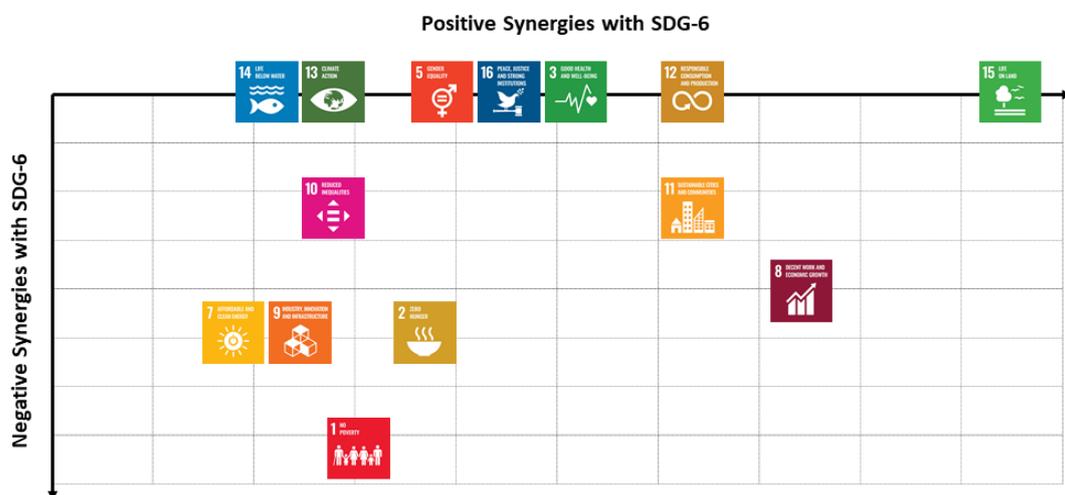


Ilustración 2-4: Sinergias positivas y negativas (conflictos) de los ODSs con el ODS-6. En el eje horizontal se expresan las sinergias positivas (las sinergias aumentan de izquierda a derecha) y en el vertical las negativas/conflictos (las sinergias se incrementan de arriba abajo). El gráfico se ha elaborado en base a la información de UN-Water (UN-Water, 2016)

Como ya se ha comentado anteriormente, sólo una planificación y gestión integrada de recursos hídricos y del territorio que sea inclusiva y participativa permitirá no sólo una asignación justa, eficiente y sostenible de los recursos hídricos entre todos los sectores, incluyendo los ecosistemas, sino que disminuirá los riesgos y posibilitará la priorización de

actuaciones que permitan alcanzar los objetivos de la Agenda 2030. Una gestión de recursos hídricos adecuada que además tenga en consideración los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos.

Los ingenieros y la ingeniería proporcionan conocimiento, bienes e infraestructuras básicas tanto para la sociedad como para el medio ambiente, proporcionando crecimiento y desarrollo sostenible.

| | How new technology and innovations are reshaping engineering | Engineering for humanity: responsive design for greater liveability | Fostering diversity and inclusion | Preparing the next generation of engineers | Engineering leadership, governance and influence | Our changing climate: mitigation, resilience and adaptation |
|---|--|---|-----------------------------------|--|--|---|
| 1 NO POVERTY | ● | ● | | | ● | |
| 2 ZERO HUNGER | | ● | | | | |
| 3 GOOD HEALTH AND WELL-BEING | | ● | | | | ● |
| 4 QUALITY EDUCATION | | ● | ● | ● | ● | |
| 5 GENDER EQUALITY | | | ● | | ● | |
| 6 CLEAN WATER AND SANITATION | ● | | | | | ● |
| 7 AFFORDABLE AND CLEAN ENERGY | ● | | | | | ● |
| 8 DECENT WORK AND ECONOMIC GROWTH | | | | | ● | |
| 9 INDUSTRY, INNOVATION AND INFRASTRUCTURE | ● | | | | | |
| 10 REDUCED INEQUALITIES | | ● | ● | | | ● |
| 11 SUSTAINABLE CITIES AND COMMUNITIES | | ● | | | | |
| 12 RESPONSIBLE CONSUMPTION AND PRODUCTION | ● | ● | | | ● | |
| 13 CLIMATE ACTION | ● | | | | ● | ● |
| 14 LIFE BELOW WATER | ● | | | | | ● |
| 15 LIFE ON LAND | ● | | | | ● | ● |
| 16 PEACE, JUSTICE AND STRONG INSTITUTIONS | | | ● | | | |
| 17 PARTNERSHIPS FOR THE GOALS | | | ● | ● | | |

Ilustración 2-5: Tabla indicativa de diferentes temas en los que los ingenieros y la ingeniería puede contribuir a alcanzar un desarrollo sostenible y su relación con los ODSs. Realizado en base a información obtenida del World Engineers Convention 2019.

La Federación Mundial de Organizaciones de Ingenieros (FMOI) cuenta con distintos comités y grupos de trabajo comprometidos con la responsabilidad de acción que tienen los ingenieros, tanto personal como profesionalmente, con el logro de los objetivos de desarrollo sostenible. Este compromiso se refleja en el documento “WFEO Engineering 2030. A Plan to advance the achievement of the UN Sustainable Development Goals through engineering” (World Federation of Engineering Organizations; Division of Science Policy and Capacity Building - Natural Sciences Sector, 2018).

Asimismo, con motivo del día mundial de la ingeniería para el desarrollo sostenible 2021, la FMOI ha participado en el reciente informe de la UNESCO “Engineering for Sustainable Development” (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, and International Center for Engineering Education, 2021).

3 Agua y Cambio Climático

El clima es el conjunto de condiciones atmosféricas que caracterizan una región, siendo el ciclo del agua una parte esencial del mismo y un conector climático. El agua forma parte del clima y, por lo tanto, de su cambio, existiendo así una superposición entre los desafíos hídricos y climáticos.

A tenor de las evidencias existentes, es probable que la influencia humana haya repercutido en el ciclo del agua global desde 1960. (Stocker, y otros, 2013)

Si bien la cantidad total de agua (suma de los estados sólido, líquido y gaseoso) ha permanecido constante a lo largo de millones de años, el cambio climático modificará su reparto actual en términos físicos, espaciales y temporales.

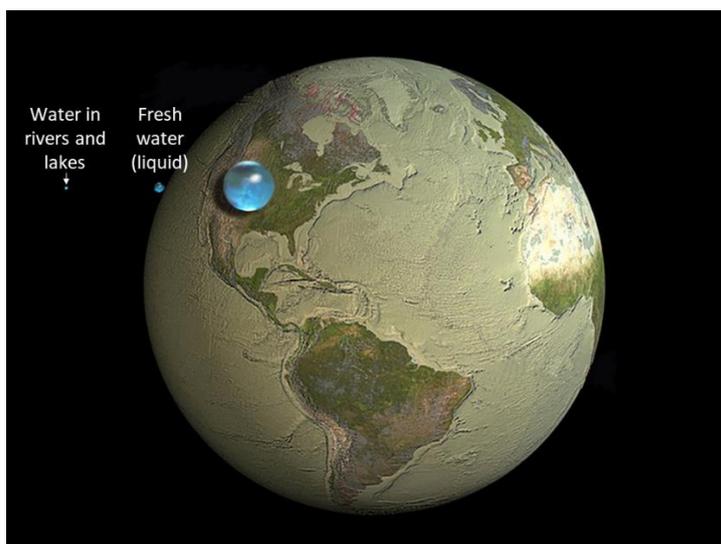


Ilustración 3-1: Las esferas azules representan las cantidades relativas de agua terrestre en comparación con el tamaño de la Tierra. El volumen de la esfera más grande representa el total de agua que hay en, sobre y por encima de la Tierra (1.385 km de diámetro). La esfera de agua dulce (líquido) representa el agua subterránea, de pantanos, ríos y lagos (272,8 km de diámetro). La esfera más pequeña representa el agua de los ríos y lagos (56,2 kilómetros de diámetro). Imagen realizada en base a una Ilustración de U.S. Geological Survey (Perlman, Cook, Hole, Woods, & Nieman., 2016).

La tierra se ha ido calentando fruto del aumento del balance energético (energía entrante menos energía saliente). El calor/energía que se ha añadido al planeta ha sido absorbido por los océanos (93% considerando la totalidad de la profundidad del océano y cerca del 64% considerando sólo la capa superior -0 a 700 m-), la fusión del hielo (3%), el calentamiento de los continentes (3%) y el calentamiento de la atmósfera (1%).

Esto ha provocado que la temperatura media global de la superficie terrestre haya aumentado desde finales del siglo XIX, 0,89°C durante el periodo 1901-2012. La zona de la atmósfera donde se desarrollan los procesos meteorológicos y climáticos (troposfera), también se ha calentado, produciéndose un incremento de la cantidad de vapor de agua en ella. La humedad específica ha aumentado tanto sobre la tierra como sobre los océanos. Con cada grado adicional de temperatura del aire, la atmósfera puede retener en torno a un 7% más de vapor de agua. Teniendo esto en consideración, las previsiones de aumento de la cantidad media de vapor de agua en la atmósfera están entre un 5% y un 25% para finales del siglo XXI (Stocker, y otros, 2013).

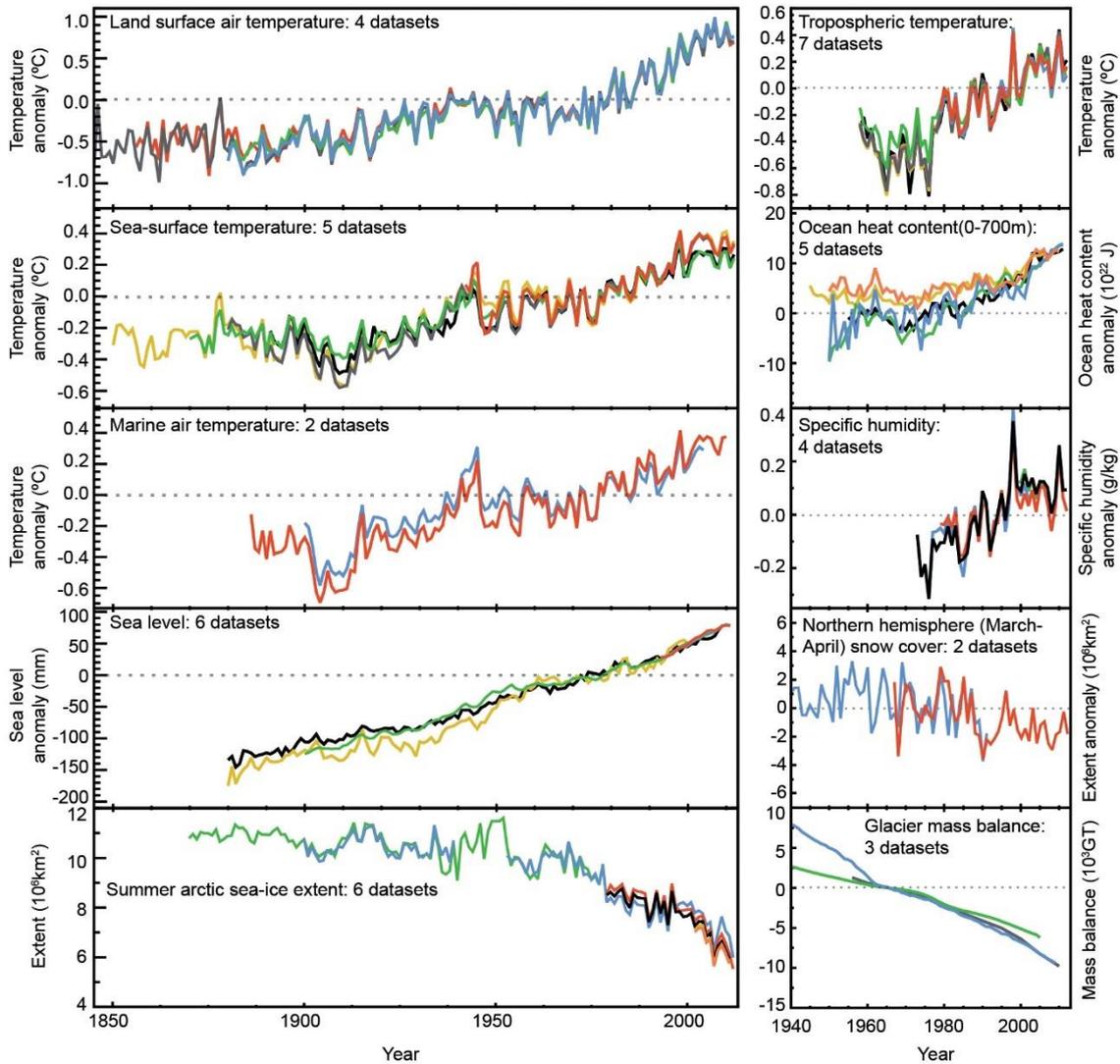


Ilustración 3-2: Indicadores de un clima global cambiante. Ilustración del informe del IPCC, 2013: Cambio Climático 2013 (Stocker, y otros, 2013).

El aumento de la temperatura no sólo incrementará la humedad atmosférica, sino que provocará a largo plazo un aumento de la precipitación global. Este incremento será del orden del 1 al 3% por cada °C (Stocker, y otros, 2013).

En general los aguaceros serán más intensos y frecuentes, generando más crecidas, y, sin embargo, períodos secos más prolongados entre episodios de lluvia, lo que generan más sequías.

La variación espacial de las precipitaciones será significativa, en algunas regiones la precipitación aumentará, en otras disminuirá y otras no sufrirán cambios significativos.

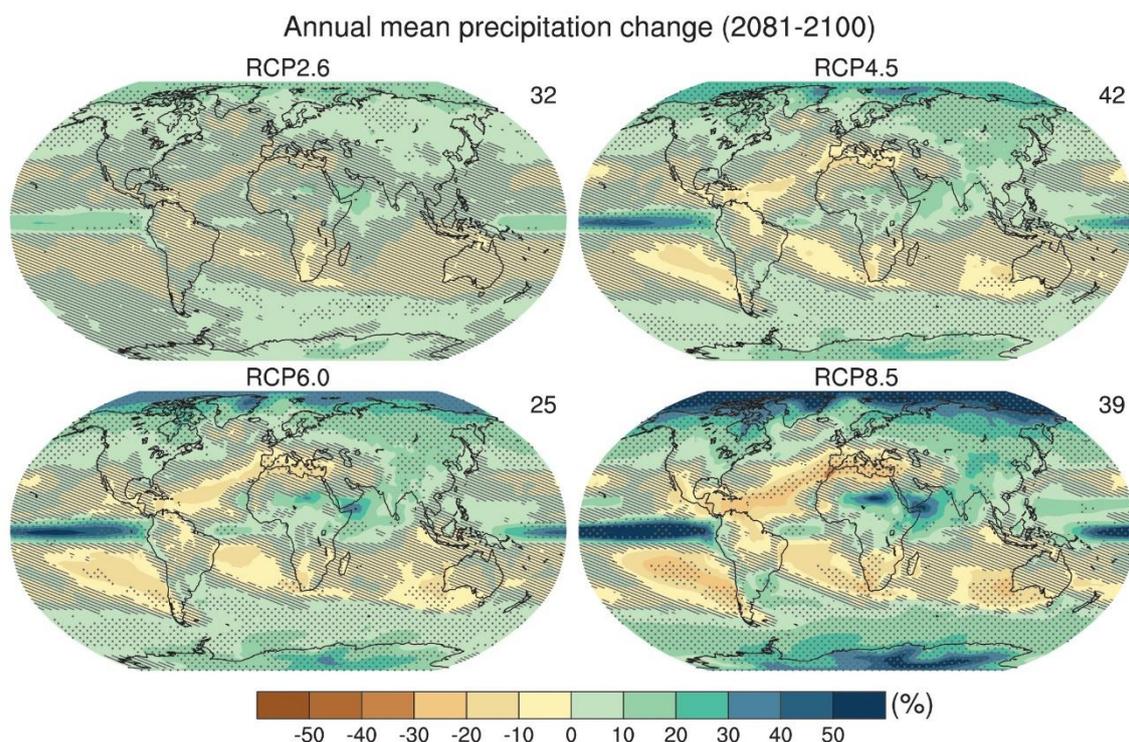


Ilustración 3-3: Mapas de los resultados de los modelos múltiples para los escenarios RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 en 2081-2100 de la variación porcentual de las precipitaciones medias. Los cambios se muestran en relación con 1986-2005. Ilustración del informe del IPCC, 2013: Cambio Climático 2013 (Stocker, y otros, 2013).

Los fenómenos meteorológicos extremos, como sequías e inundaciones, aumentarán en frecuencia, duración e intensidad. El agua dulce no sólo se verá afectada en su cantidad, sino también en su calidad.

El cambio climático también afecta a la criosfera y al nivel del mar, que aumentará debido, principalmente, a la expansión de su volumen por la dilatación térmica, pero también por el derretimiento de los glaciares (hoy en día este último es la principal causa del aumento del nivel del mar). La contribución de la expansión térmica al incremento del nivel del mar es del orden del 30% al 50% del total y los glaciares del 15% al 35% (Stocker, y otros, 2013).

La expansión térmica del océano puede estar comprendida entre 0,2 a 0,6 m por cada °C. Debido a la lentitud en la transferencia de calor desde la superficie de los océanos a las aguas profundas, el calentamiento del océano continuará produciéndose durante siglos. A finales de siglo XXI se espera que el 50% de la energía sea absorbida en los primeros 700 metros de profundidad y el 85% en los primeros 2000 metros. En cambio, la contribución del derretimiento de los glaciares (el volumen equivalente actual es de 0,43 m de nivel del mar) al aumento del nivel del mar disminuirá con el tiempo al disminuir su volumen (Stocker, y otros, 2013).

Los escenarios más pesimistas de los considerados en la ilustración 3-4 significan, respecto a los más optimistas, que los seres vivos tendrían que aumentar su velocidad de adaptación a estas nuevas situaciones. Para muchas especies, el cambio puede ser más rápido que su velocidad de adaptación, e incluso para el ser humano, por ejemplo, el límite máximo de estrés térmico al que puede adaptarse se ha puesto en duda con un aumento de 7 °C.

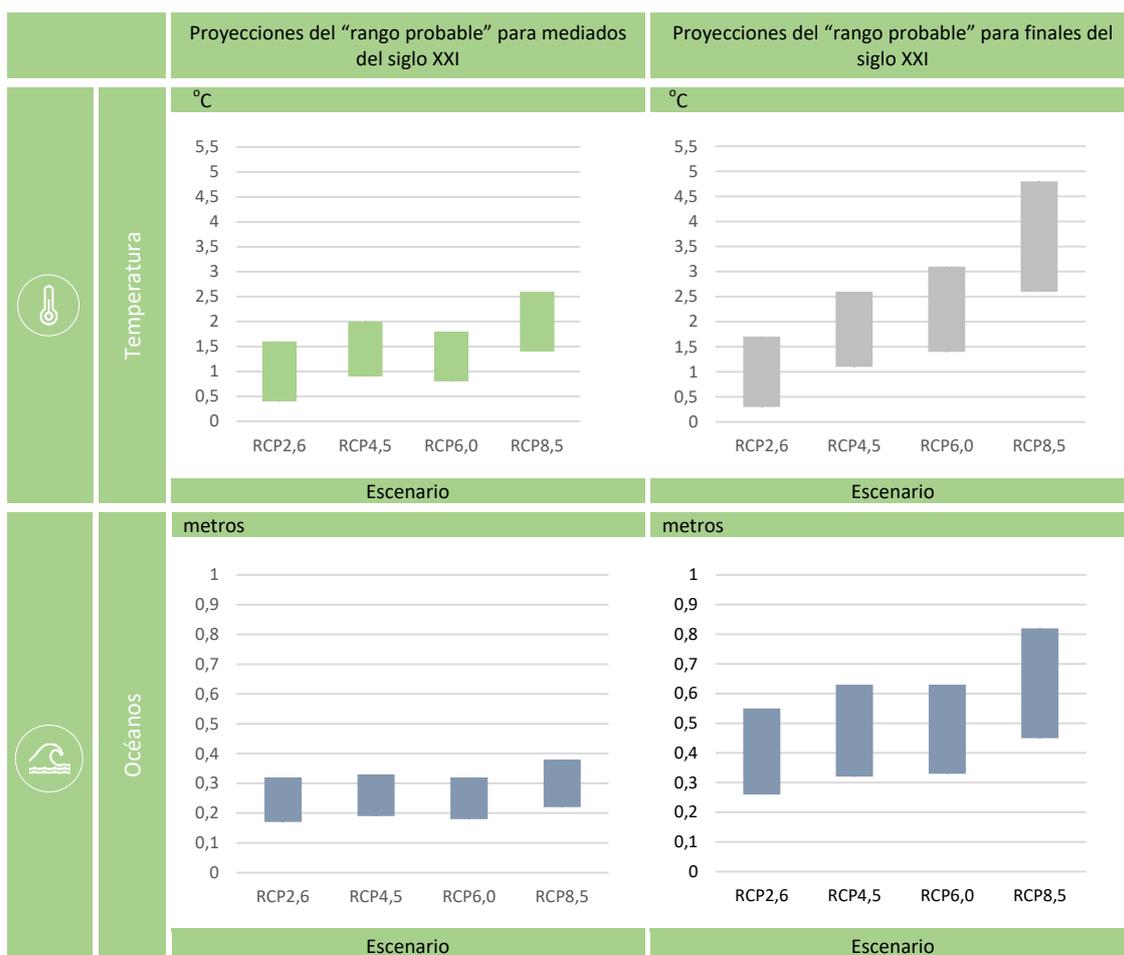


Ilustración 3-4: Proyecciones de "rango probable" de la temperatura media global del aire en la superficie y de la elevación media mundial del nivel del mar para mediados (2046-2065) y finales (2081-2100) del siglo XXI, en relación con el periodo de referencia 1986-2005. Gráfica realizada en base a datos del informe IPCC 2013 (Stocker, y otros, 2013).

Los escenarios de "rango probable" reflejados en la ilustración 3-4 son medias globales, por lo que a nivel regional o local las tendencias pueden ser más atenuadas o pronunciadas (ilustraciones 3-5 y 3-6).

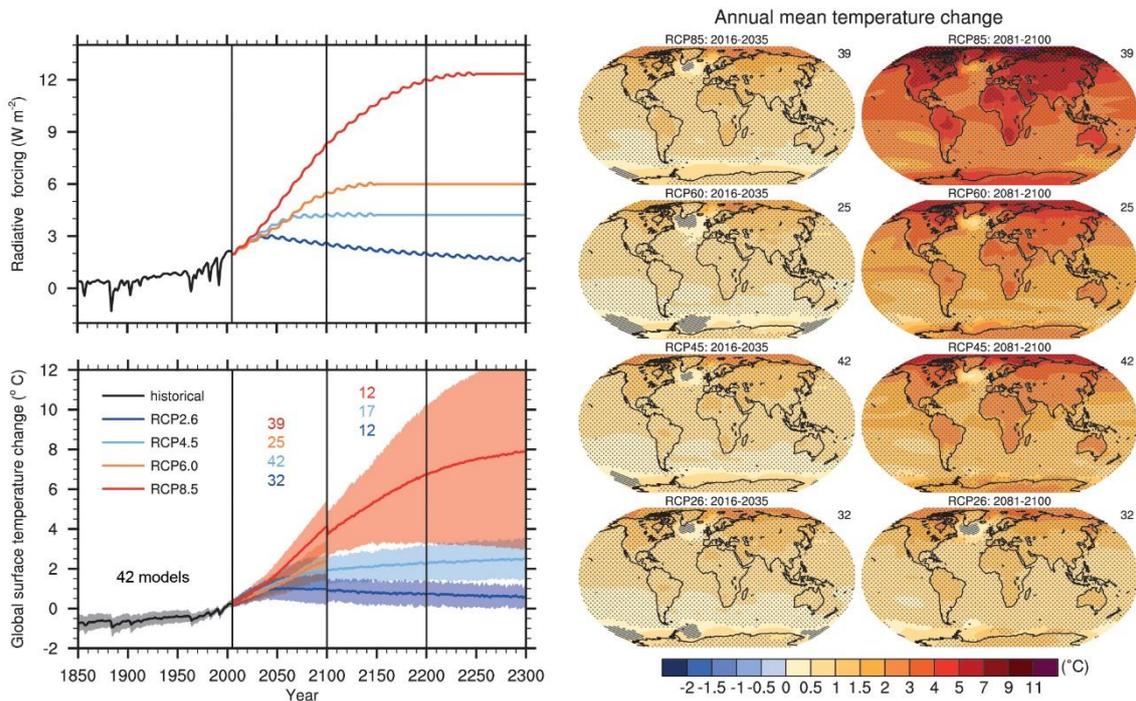


Ilustración 3-5: (Arriba a la izquierda) Forzamiento radiactivo medio total para los cuatro escenarios RCP basados en el modelo de balance energético MAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change). (Abajo a la izquierda) Serie temporal de las anomalías de la temperatura media anual del aire en superficie (en relación con 1986-2005). Mapas: Promedio de conjuntos multimodelos del cambio de la temperatura media anual del aire en superficie (en comparación con el periodo base de 1986-2005) para 2016-2035 y 2081-2100, para RCP2.6, 4.5, 6.0 y 8.5. Ilustración del informe del IPCC, 2013 (Stocker, y otros, 2013).

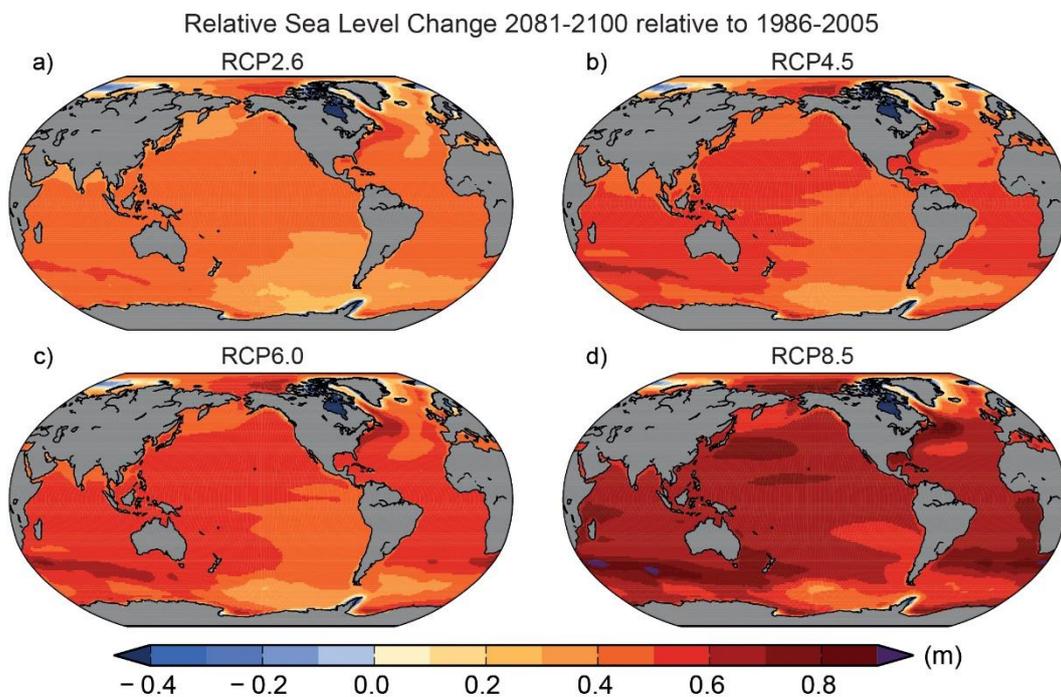


Ilustración 3-6: Cambio medio regional neto del nivel del mar (metros) evaluado a partir de 21 modelos CMIP5 para los escenarios RCP (a) 2,6, (b) 4,5, (c) 6,0 y (d) 8,5 entre 1986-2005 y 2081-2100. Ilustración del informe del IPCC, 2013 (Stocker, y otros, 2013).

Los componentes del sistema climático, relacionados con el ciclo del agua, que se espera que varíen y el sentido de su variación en un planeta más cálido se representan en la tabla 3-1.

| | | | |
|---|---|---|------------------------------|
|  Aumento | La temperatura superficial del mar |  Disminución | La zona de hielo marino. |
| | La temperatura del aire en el mar. | | La capa de nieve. |
| | La temperatura del aire en los km más bajos (troposfera). | | El volumen de los glaciares. |
| | El contenido de calor del océano. | | |
| | El nivel del mar. | | |
| | La cantidad de vapor de agua. | | |
| | La temperatura sobre tierra. | | |

Tabla 3-1: Componentes del sistema climático que se espera que varíen y el sentido de su variación en un planeta más cálido.

Estos escenarios suponen una amenaza para la gestión de los recursos hídricos, un aumento del riesgo de eventos relacionados con el clima y una afección clara a la calidad de los servicios de agua y saneamiento en todo el mundo.

En las tablas 3-2 y 3-3, se resumen los principales efectos a corto y largo plazo del cambio climático sobre los elementos relacionados con el agua descritos en distintas publicaciones del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). A largo plazo son más relevantes los forzamientos externos y a corto las inercias actuales.

Cabe señalar que en las estimaciones sobre estos efectos contempladas en estas publicaciones existen incertidumbres, tanto en los escenarios de desarrollo, como en los modelos y en la escala. También, las interacciones entre energía, tierra, agua y biodiversidad son cada vez más complejas. Esto significa que las tendencias climáticas y sus efectos, aunque sean claras a nivel global, tienen un mayor grado de incertidumbre cuando se baja a escala regional, local, de cuenca o micro. Asimismo, la certidumbre a largo plazo puede ocasionar incertidumbre a corto plazo. Por ello, el desafío está en cómo saber gestionar la incertidumbre a nivel local ya que ésta puede afectar a los territorios y a la población de forma diferente. Todo ello, añade una complejidad adicional al ámbito de gestión de los recursos hídricos.

| | | | |
|---|-----------------------|--|------------------------------------|
|  | Temperatura | La anomalía de la temperatura media global en superficie para el período 2016-2035 esté en el rango de 0,3 °C a 0,7 °C (en relación con el período de referencia 1986-2005). | Probable/Nivel de confianza medio. |
| | | Aumento en la mayoría de las regiones de la frecuencia de días y noches cálidos. | Probable. |
| | | Disminución en la mayoría de las regiones de la frecuencia de días y noches frías. | Probable. |
|  | Ciclo del agua | Aumento de la evaporación en muchas regiones. | Probable. |
| | | Aumentos de la humedad específica cerca de la superficie. | Muy probable. |
| | | Aumento de la frecuencia e intensidad de las precipitaciones sobre las zonas terrestres. | Probable. |
| | | Aumento de la precipitación media zonal en latitudes elevadas y en algunas zonas de latitudes medias. | Muy probable. |
| | | Disminución de la precipitación en las zonas subtropicales. | Más probable que improbable. |
| | | Referente a las previsiones sobre los cambios proyectados de la humedad del suelo y las escorrentías superficiales. | Nivel de confianza bajo. |
| | | Proyecciones a corto plazo de las trayectorias de las tormentas | Nivel de confianza bajo. |

| | | | |
|---|-----------|---|-----------------------------------|
| | | en el hemisferio norte y la intensidad de estas. | |
| | | Proyecciones a escala de cuenca sobre los cambios en la intensidad y frecuencia de los ciclones tropicales en todas las cuencas hasta la mitad del siglo XXI. | Nivel de confianza bajo. |
|  | Océanos | Aumento de las temperaturas medias globales superficiales y promediadas verticalmente del océano. | Muy probable |
| | | Aumento de la salinidad en los próximos decenios en las zonas tropicales y, especialmente, en las subtropicales del Atlántico, y disminución en la zona occidental del Pacífico. | Probable |
| | | Disminución de la salinidad en la zona occidental del Pacífico en los próximos decenios. | Probable |
| | | Reducción de la circulación meridional de retorno del Atlántico para el año 2050. | Probable |
|  | Criosfera | Durante el mes de septiembre se produzca una situación de océano Ártico prácticamente sin hielo (una extensión de hielo marino inferior a 106 km ² durante al menos cinco años consecutivos) antes de la mitad del siglo XXI. | Probable/Nivel de confianza medio |
| | | El manto de hielo marino del Ártico seguirá menguando y reduciendo su espesor, y que se reducirá el manto de nieve en primavera en latitudes altas y el permafrost casi superficial conforme aumente la temperatura media global en superficie. | Muy probable |
| | | Disminuciones a corto plazo de la extensión y el volumen del hielo marino del Antártico. | Nivel de confianza bajo |

Tabla 3-2: Resumen de las principales proyecciones de cambio a corto plazo (hasta mediados del siglo XXI) referentes a la temperatura, ciclo del agua, circulación atmosférica, océanos y criosfera. En la última columna de la tabla se indica la probabilidad/nivel de confianza de las proyecciones. El término "Muy Probable" significa una probabilidad del 90-100%, "Probable" una probabilidad del 66-100% y "Más Probable que Improbable" del >50-100%. En nivel de confianza está relacionado con la evidencia y nivel de acuerdo (Stocker, y otros, 2013).

| | | | |
|---|----------------|---|------------------------------|
|  | Temperatura | Los cambios promediados a nivel global sobre zonas terrestres serán mayores que sobre los océanos a finales del siglo XXI en un factor que es probable que se encuentre en el rango de 1,4 a 1,7. | Nivel de confianza muy alto. |
| | | El Ártico será la región que experimentará un mayor calentamiento. | Nivel de confianza muy alto. |
| | | Conforme vaya aumentando la temperatura media global, se producirán temperaturas extremas calientes más frecuentes y frías menos frecuentes en la mayoría de las zonas continentales. Estos cambios son previsibles para episodios definidos como extremos a escalas temporales diarias y estacionales. | Prácticamente seguro |
| | | En la mayoría de las regiones, los episodios de altas temperaturas que actualmente ocurren cada 20 años serán más frecuentes a finales del siglo XXI (duplicando como mínimo su frecuencia, e incluso convirtiéndose en numerosas regiones en eventos anuales o bianuales) y los actuales episodios de bajas temperaturas cada 20 años serán cada vez menos frecuentes. | Probable |
|  | Ciclo del agua | El aumento de la temperatura media global en superficie provocará un aumento de la precipitación global a largo plazo. | Prácticamente seguro |
| | | Conforme aumenten las temperaturas globales, se agudizará el contraste de la precipitación media anual entre las regiones secas y las húmedas y el contraste entre la estación húmeda y la seca en la mayor parte del mundo. | Nivel de confianza alto |
| | | A finales de siglo muchas regiones áridas y semiáridas de latitudes medias y subtropicales experimentarán menos precipitaciones. | Probable |
| | | En muchas regiones húmedas de latitudes medias aumentarán las precipitaciones. | Probable |

| | | | |
|---|-------------------------|---|----------------------------------|
| | | Globalmente, y para episodios de precipitación de corta duración, es probable que conforme aumenten las temperaturas se produzcan más tormentas individuales intensas y menos tormentas débiles. | Probable |
| | | La intensidad de los episodios de precipitaciones extremas aumentará con el calentamiento, a un ritmo que supera ampliamente el de la precipitación media. | Nivel de confianza alto |
| | | La mayor parte de las masas terrestres de latitudes medias y en regiones tropicales húmedas, se producirán episodios de precipitaciones extremas más intensos y frecuentes. | Muy probable |
| | | Para finales de siglo, y en el escenario RCP8,5, se producirán reducciones de la escorrentía anual en zonas del sur de Europa, Oriente Medio y África austral y aumentos en latitudes altas del hemisferio norte. | Probable |
|  | Circulación atmosférica | En el escenario RCP8,5 es probable que a finales del siglo XXI se produzca un desplazamiento de las corrientes de latitudes medias de aproximadamente entre 1 y 2 grados hacia los polos en ambos hemisferios (nivel de confianza medio), siendo más leve el desplazamiento en el hemisferio Norte. | Probable/Nivel de confianza bajo |
| | | Sigue habiendo incertidumbres sustanciales, y por tanto un nivel de confianza bajo, en las proyecciones de cambios en las trayectorias de las tormentas, especialmente en la cuenca del Atlántico Norte. | Nivel de confianza bajo. |
|  | Océanos | La tasa media de la elevación del nivel medio global del mar durante el siglo XXI excederá la tasa observada durante el período 1971-2010. | Muy probable |
| | | La elevación del nivel medio global del mar seguirá produciéndose después de 2100. | Prácticamente seguro |
| | | A finales del siglo XXI, el cambio del nivel del mar presentará un patrón marcadamente regional, que dominará sobre la variabilidad y es probable que muchas regiones experimenten desviaciones sustanciales respecto al cambio medio global | Probable |
| | | Aproximadamente un 95% del océano experimentará una elevación regional relativa del nivel del mar, y que la mayoría de las regiones que experimenten un descenso del nivel del mar estarán situadas cerca de glaciares actuales, o ya desaparecidos, y de mantos de hielo. | Muy probable |
| | | Los cambios del nivel local del mar se desviarán en más del 10% y del 25% de la proyección media global hasta un 30% y un 9% de las zonas oceánicas, respectivamente, lo cual indica que las variaciones espaciales pueden ser importantes. | Muy probable |
| | | En el futuro es muy probable que se produzca un aumento significativo en la ocurrencia de valores extremos del nivel del mar y que, al igual que para observaciones pasadas, dicho aumento sea principalmente consecuencia de un aumento en el nivel medio del mar. | Probable |
| | | Las proyecciones indican que aproximadamente el 70% de las líneas de costa en todo el mundo experimentarán un cambio relativo del nivel del mar de un 20% respecto al cambio del nivel medio global del mar. | Muy probable |
|  | Criósfera | El manto de nieve en el hemisferio norte se reducirá globalmente conforme las temperaturas aumenten a lo largo del próximo siglo | Muy probable |
| | | Retroceso de la extensión del permafrost | Prácticamente seguro |
| | | Las proyecciones reflejan que para el final del siglo XXI la zona con permafrost cercana a la superficie disminuirá entre el 37% (RCP2,6) y el 81% (RCP8,5) | Nivel de confianza medio |
| | | Para el año 2100, la proyección de RCP2,6 indica la desaparición del 15% al 55% del volumen actual de los glaciares, y la de RCP8,5 indica del 35% al 85%. | Nivel de confianza medio |

| | | |
|--|--|--------------------------|
| | Reducción media de la extensión del hielo marino del Ártico para 2081-2100, en comparación con 1986-2005, que va desde el 8% para RCP6,2 al 34% para RCP8,5 en febrero, y del 43% para RCP2,6 al 94% para RCP8,5 en septiembre. | Nivel de confianza medio |
| | El escenario RCP8,5 contempla condiciones en las que antes de mediados de siglo el océano Ártico estará casi libre de hielo (extensión de hielo inferior a 106 Km ² durante al menos 5 años consecutivos) en el mes de septiembre. | Nivel de confianza medio |
| | En el Antártico, la proyección media apunta a una disminución de la extensión del hielo marino que va desde el 16% para RCP2,6 al 67% para RCP8,5 en febrero, y desde el 8% para RCP2,6 al 30% para RCP8,5 en septiembre para el período 2081-2100 en comparación con el período 1986-2005 | Nivel de confianza bajo |
| | Las proyecciones de la zona cubierta de nieve en primavera en el hemisferio norte para el final del siglo XXI oscilan entre una disminución del 7% [3 a 10]% (RCP2,6) y de 25% [18 a 32]% (RCP8,5). | Nivel de confianza medio |

Tabla 3-3: Resumen de las principales proyecciones de cambio a largo plazo (a partir de mediados del siglo XXI en adelante) referentes a la temperatura, ciclo del agua, circulación atmosférica, océanos y criosfera. En la última columna de la tabla se indica la probabilidad/nivel de confianza de las proyecciones. El término “Prácticamente seguro” significa una probabilidad del 99-100%, “Muy Probable” una probabilidad del 90-100%, y “Probable” una probabilidad del 66-100%. En nivel de confianza está relacionado con la evidencia y nivel de acuerdo (Stocker, y otros, 2013).

Los cambios en la circulación atmosférica son importantes para el cambio climático local, ya que podrían producir cambios mayores o menores en el clima de una región determinada que en otras regiones.

En la ilustración 3-7 se reflejan algunas de las variaciones espaciales del ciclo del agua que figuran en las tablas anteriores.

Annual mean hydrological cycle change (RCP8.5: 2081-2100)

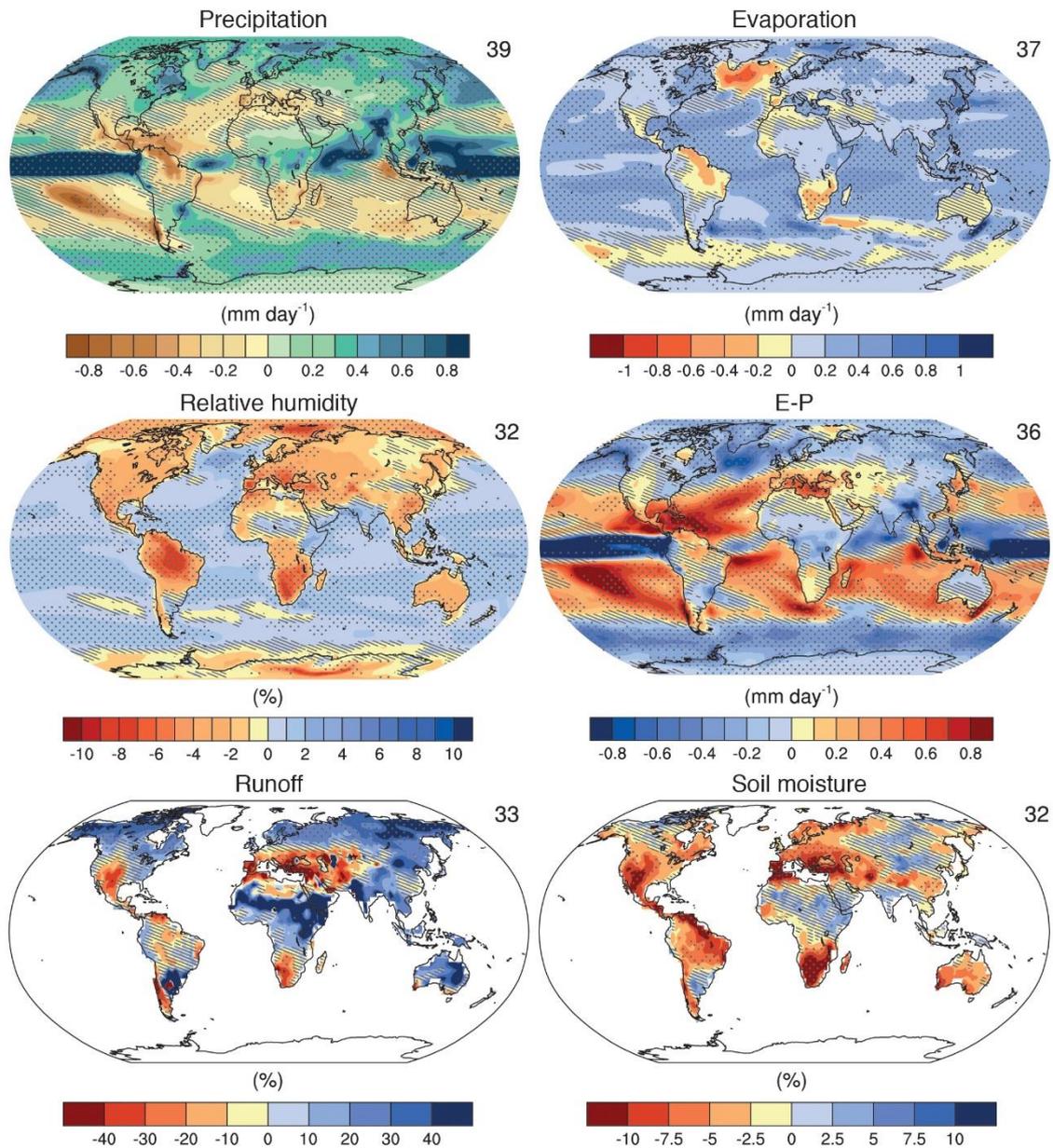


Ilustración 3-7: Cambios medios anuales en la precipitación (P), la evaporación (E), la humedad relativa, $E - P$, la escorrentía y la humedad del suelo para 2081-2100 en relación con 1986-2005 bajo la senda de concentración representativa RCP8.5. Ilustración del informe del IPCC, 2013 (Stocker, y otros, 2013).

En cuanto a los fenómenos meteorológicos hay que tener en cuenta que un valor climático extremo varía en función del lugar. La incertidumbre climática, con una alteración importante de los patrones temporales y espaciales de las precipitaciones, supondrá un previsible incremento del riesgo de sequías, que serán más frecuentes, largas e intensas, y de inundaciones, con crecidas más frecuentes y caudales máximos más elevados.

| | | | |
|--|---|--|---|
|  Aumento | Episodios de precipitación intensa. |  Disminución | Sequías en América del Norte central y Australia noroccidental. |
| | Sequías en el Mediterráneo y en África Occidental. | | |
| | Periodos de calor y olas de calor. | | |
| | Días y noches calientes. | | |
| | Ciclones tropicales más intensos en el Atlántico Norte. | | Días y noches fríos. |

Tabla 3-4: Tendencias de la frecuencia (o intensidad) de varios valores climáticos extremos

Los escenarios descritos anteriormente de incremento de temperaturas y reducción de caudales favorecerán procesos de eutrofización y el aumento de la concentración de los contaminantes. La reducción del oxígeno disuelto en las aguas, debido al incremento de temperatura y los procesos de eutrofización, pondrá en peligro las condiciones de vida de numerosas especies acuáticas. También, el aumento de lluvias torrenciales vendrá acompañado del arrastre de sedimentos y contaminantes y, adicionalmente, el incremento del nivel del mar favorecerá procesos de intrusión salina en las zonas costeras (Ministry for Ecological Transition and the Demographic Challenge, 2020).

4 Agua, adaptación e ingeniería.

El cambio climático afecta a distintos sectores, pero el sector del agua es prioritario en cuanto a acometer medidas de adaptación. La mayor parte de los gobiernos han identificado el agua y sus sectores relacionados como peligros climáticos clave y como opciones prioritarias de adaptación (UNFCCC, 2016)

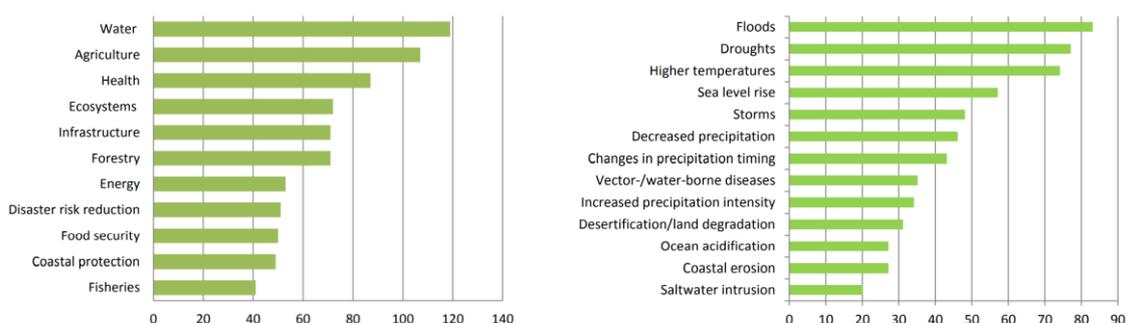


Ilustración 4-1: La gráfica de la izquierda refleja las áreas y sectores prioritarios para las acciones de adaptación identificados por distintos países en el componente de adaptación. El principal sector es el del agua y el resto de las áreas están relacionadas indirectamente con el agua, salvo la reducción del riesgo de desastres que está ligada al agua directamente. En la gráfica de la derecha se señalan los principales riesgos climáticos identificados en el componente de adaptación. La práctica totalidad de ellos están relacionadas de forma directa o indirecta con el agua, salvo el de altas temperaturas. En ambos gráficos se indican el número de países que se refieren a cada sector. Fuente: (UNFCCC, 2016)

Asimismo, las acciones prioritarias en materia de agua para la adaptación planteadas por distintos países se refieren principalmente a aquellas relacionadas con la gestión y la gobernanza (70%), creación de infraestructuras (68%), gestión de recursos hídricos (63%) y medidas de conservación de ecosistemas e infraestructuras (51%) (Global Water Partnership, 2018).

En el presente apartado se presentan distintas medidas que puede aportar la ingeniería para adaptarse a los efectos del clima previsto sobre el agua, con el fin de moderar el daño o aprovechar las oportunidades beneficiosas. Cabe señalar que algunas de las medidas que se indican también pueden producir importantes resultados de mitigación.

El cambio climático afectará a los recursos hídricos en su disponibilidad, usos, calidad del agua y de los ecosistemas y probabilidad de ocurrencia de sequías e inundaciones. No obstante, también existen otros factores no climáticos que tienen incidencia sobre el agua.

La oferta de agua dulce se va a ver afectado por estos cambios y las medidas de adaptación tendrán que hacer posible alcanzar unas demandas que se verán fuertemente incrementadas, principalmente por el aumento de la población y el modelo de desarrollo (factores incluidos en los distintos modelos de cambio climático).

Por tanto, estas medidas han de plantearse tanto desde el punto de vista de la oferta (obtención del recurso) como de la demanda (usuario del recurso). Es importante precisar que el término “demanda” abarca a todos los seres vivos y sus ecosistemas, y no sólo al ser humano. La gestión del recurso debe realizarse desde una visión holística e integradora. No hay que olvidar que los ecosistemas naturales son la base del suministro de agua.

La protección y regeneración de los recursos hídricos debe acompañarse de la protección y restauración de la biodiversidad y de los servicios ecosistémicos que ofrecen a la sociedad los sistemas hídricos.

El equilibrio entre oferta y demanda sólo se podrá alcanzar mediante una adecuada planificación y gestión integrada de los recursos hídricos y del territorio que tenga en consideración los riesgos, efectos y vulnerabilidades climáticas, permitiendo así crear sistemas resilientes y estrategias de adaptación a largo plazo sobre las garantías hídricas, objetivos medioambientales e infraestructuras hidráulicas. Asimismo, debe contar con la participación de todas las partes interesadas, incluso aquellas que no tienen “voz”, como el medioambiente y las generaciones futuras.

La gobernanza (y el fortalecimiento institucional) debe facilitar la creación de estructuras de gestión y gobierno, así como un marco regulador que permita alcanzar este equilibrio y que, junto con la existencia de una adecuada financiación, se puedan acometer, operar y mantener las medidas planificadas. Aunque el presente documento se centra en las medidas de adaptación que la ingeniería puede proporcionar, una buena gobernanza y la disponibilidad de una financiación adecuada son imprescindibles.

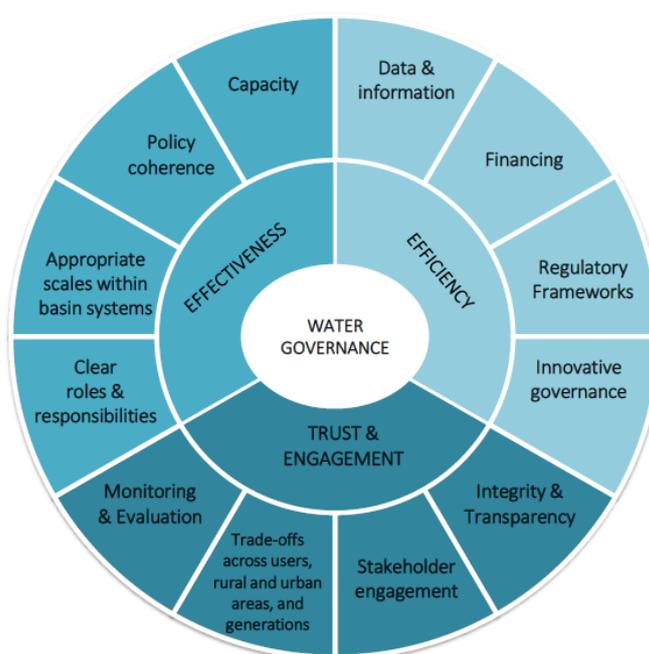


Ilustración 4-2: Principios de la OCDE sobre la Gobernanza del Agua para contribuir a la mejorar del "Ciclo de la Gobernanza del Agua", desde el diseño de las políticas hasta su aplicación. Ilustración de la OCDE (OECD, 2015).

Sin estos tres pilares (planificación y gestión de los recursos hídricos y del territorio, gobernanza y financiación), difícilmente se podrá garantizar la seguridad hídrica de las actividades socioeconómicas y los ecosistemas, ni las asignaciones justas de agua. Es importante que los ingenieros y la ingeniería estén presentes, o al menos representados, en estos tres pilares y no sólo en alguno de ellos.

En 2018, sólo el 60% de los países (de 172) reconocían que se encontraban en etapas incipientes de la aplicación de un enfoque de gestión integrada de recursos hídricos.

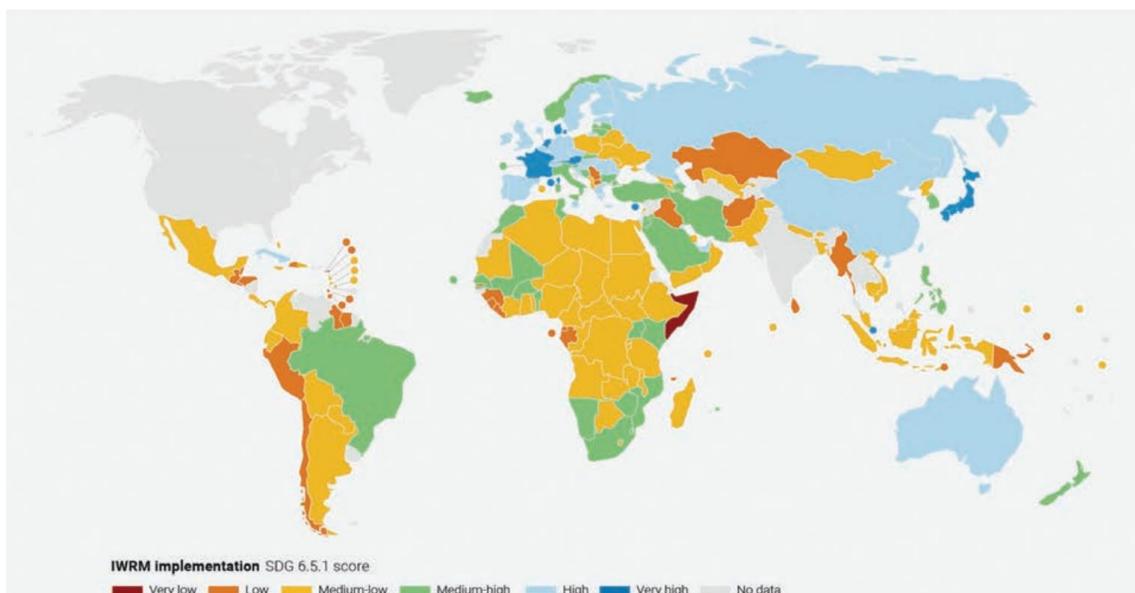


Ilustración 4-3: Niveles de aplicación de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos en los países. Ilustración del GWP (Global Water Partnership, 2018).

Sólo una cuarta parte de los países que planifican las medidas de adaptación relacionadas con el agua han adoptado o priorizado un enfoque de gestión integrada de recursos hídricos (Global Water Partnership, 2018).

Teniendo en consideración que hay 263 cuencas de lagos y ríos transfronterizas en territorio de 145 países y aproximadamente 300 acuíferos transfronterizos (UN-Water, s.f.), la gobernanza sobre la gestión integrada de estos recursos hídricos se hace más compleja, haciéndose esencial la cooperación entre países. Esta cooperación se hace especialmente imprescindible en las zonas vulnerables a los impactos del cambio climático y en las que hay escasez de agua. Esto ocurre también con los humedales que se extienden a lo largo de las fronteras y que prestan servicios esenciales.

La escasez de agua puede deberse a una limitación de la fuente, al incremento de la demanda, a la falta de otros tipos de recursos o a desafíos institucionales. También, un incremento de las precipitaciones no tiene por qué significar una mayor disponibilidad de agua.

Existen incertidumbres a nivel local sobre los efectos climáticos en el ciclo del agua, si bien las tendencias a escala global son claras. En el escenario de incertidumbre, parece razonable que se acometan primero aquellas actuaciones que sean independientes del cambio climático o que generen co-beneficios, o incluso implementar medidas de adaptación de forma escalonada, gradual o por fases. En algunas bibliografías estas medidas se denominan de “no arrepentimiento” o “bajo arrepentimiento”, si bien esta terminología no parece muy acertada ya que una actuación que se acometa en el marco de una adecuada planificación nunca puede ser considerada como de “arrepentimiento”. La incertidumbre relacionada con futuros escenarios significa que se debe hacer todo lo posible para adoptar enfoques flexibles o resilientes, centrándose en acciones a corto plazo, con bajo índice de incertidumbre.

En la medida de lo posible, las medidas de adaptación deben ser objeto de un análisis coste-beneficio, siendo prioritarias, en todo caso, las medidas orientadas al ahorro de agua y reducción del consumo, la diversificación de las fuentes de recurso, la mejora del estado de las masas de agua y los ecosistemas acuáticos, la mejora de la conectividad ecológica, la adaptación de las infraestructuras hidráulicas a los nuevos escenarios y la eficiencia energética,

incorporando las energías renovables al esquema conjunto de uso de agua y energía, como medio de reducir los costes de explotación de la generación y transporte de recursos como las aguas regeneradas y desaladas (Ministry for Ecological Transition and the Demographic Challenge, 2020).

Hay que resaltar que las estrategias de adaptación también deben basarse en el conocimiento (bigdata, etc.) para poder avanzar en una adecuada toma de decisiones.

En el presente documento, las medidas de adaptación al cambio climático que los ingenieros y la ingeniería pueden aportar en el ámbito del agua se han agrupado en tres áreas:

- Medidas de adaptación relacionadas con la oferta-demanda de agua.
- Medidas de adaptación frente a fenómenos meteorológicos extremos.
- Medidas de adaptación frente a la subida del nivel de mar.

A continuación, se describen cada una de estas medidas, bien sean estructurales o no estructurales. Las medidas físicas que se indican abarcan tanto las denominadas, no muy acertadamente, infraestructuras grises como verdes. Es importante resaltar que estas últimas, llamadas también soluciones basadas en la naturaleza, no son más que soluciones tradicionales, ya aplicadas con anterioridad por distintas ramas de la ingeniería, en las que un mayor conocimiento técnico y científico de los comportamientos naturales ha permitido una mejor comprensión de los ecosistemas y por lo tanto de las funciones que estos desarrollan. Esto favorece el diseño de propuestas medioambientalmente más ventajosas con un grado de certidumbre mayor sobre su eficacia y eficiencia, es decir, un mayor grado de certidumbre en sus resultados. Este tipo de soluciones funcionan cuando las condiciones ambientales son apropiadas para un determinado ecosistema. La colaboración transversal entre distintas ramas de la ingeniería ha facilitado el empleo de estas soluciones.

4.1 Medidas de adaptación relacionadas con la oferta-demanda de agua.

La oferta de agua es la cantidad de este recurso, proporcionado por distintas fuentes, existente en una región o cuenca durante un periodo de tiempo determinado. Parte de esta agua es extraída por el ser humano para satisfacer su demanda, tanto para el abastecimiento como para la producción de alimentos, bienes y servicios (actividades sociales y económicas).

El agua extraída (recursos convencionales y no convencionales) es almacenada, transportada, tratada y distribuida al lugar de demanda, si bien en este trayecto y procesos ocurren pérdidas o fugas que devuelven el agua al sistema, pero no en su lugar de origen. Una vez consumida o usada, el agua puede retornar al sistema contaminada o ser tratada para devolverla en condiciones ambientalmente aceptables incluso para su uso posterior (reutilización). En la ilustración 4-4 se esquematiza el proceso descrito.

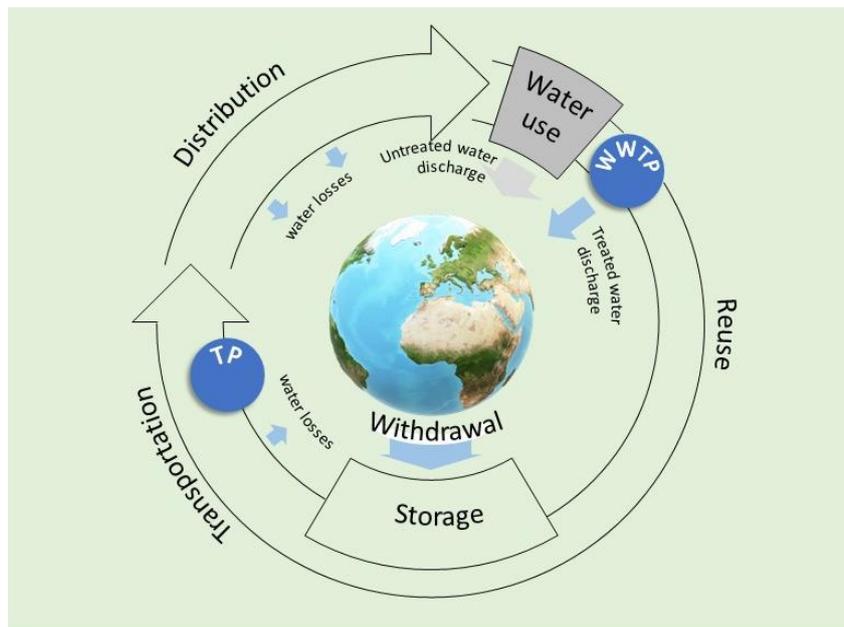


Ilustración 4-4: Ciclo del uso del recurso agua por el ser humano desde su extracción hasta su retorno al medio (TP: Planta de tratamiento, WWTP: Planta de tratamiento de aguas residuales).

En los distintos escenarios indicados en apartados anteriores, el cambio climático afectará a la oferta de agua en su disponibilidad, cantidad y calidad. La demanda se verá afectada principalmente por el incremento de la población mundial y los patrones de consumo que genera el modelo de desarrollo actual. La extracción de agua para uso doméstico se ha incrementado más de un 600% en los últimos 50 años, estando previsto que la necesidad de agua en 2030 sean un 50% superior a la actual.

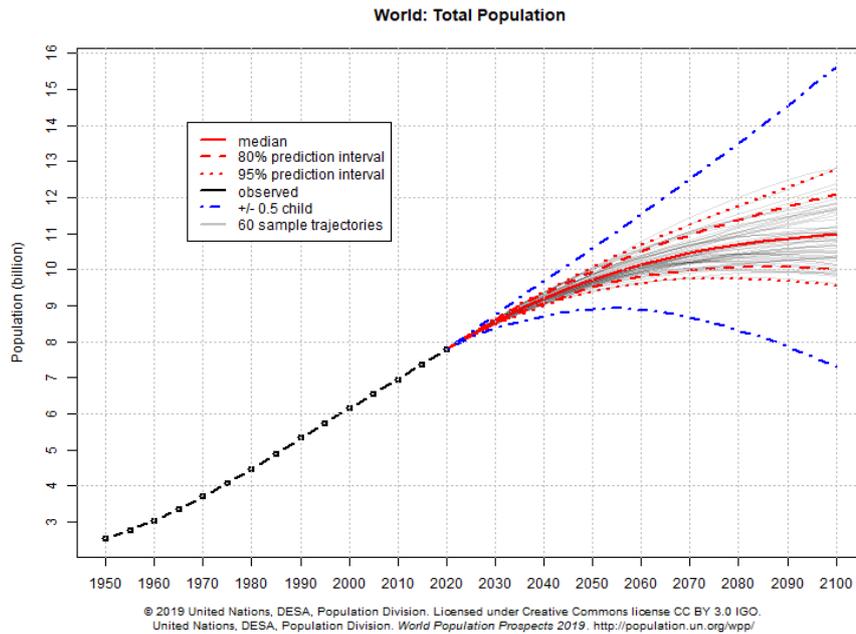
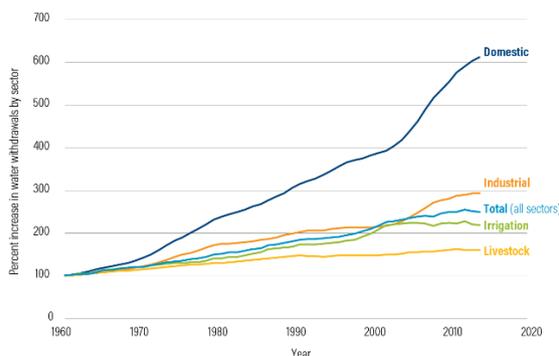
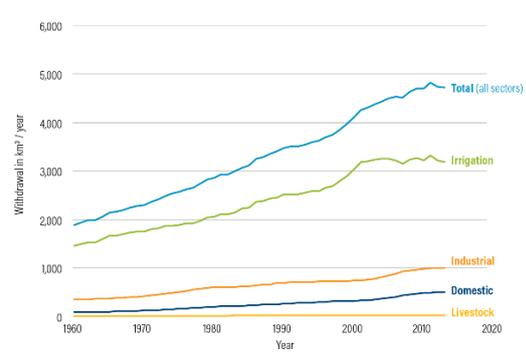


Ilustración 4-5: En el gráfico se muestran las estimaciones y las proyecciones probabilísticas de la población total para los países. Las proyecciones de población se basan en las proyecciones probabilísticas de la fecundidad total y la esperanza de vida al nacer. Estas proyecciones probabilísticas de la fecundidad total y de la esperanza de vida al nacer se han realizado con un modelo jerárquico bayesiano. Las cifras muestran la mediana probabilística y los intervalos de predicción del 80% y el 95% de las proyecciones probabilísticas de población, así como la variante alta y baja (determinista) (+/- 0,5 hijos). Fuente: Naciones Unidas, DESA (United Nations, 2019)

Domestic water withdrawals increased more than 600% since the 1960s



Water withdrawals by sector, 1960-2014



Source: Authors. AQUEDUCT WORLD RESOURCES INSTITUTE

Ilustración 4-6: Evolución de las extracciones de agua por sectores (doméstico, industrial, ganadero y riego). Fuentes: WRI-Aqueduct (World Resource Institute, 2020).

El equilibrio entre una oferta mermada en cantidad y calidad, y una demanda en aumento sólo se podrá alcanzar mediante una adecuada planificación y gestión integrada de los recursos hídricos y del territorio.

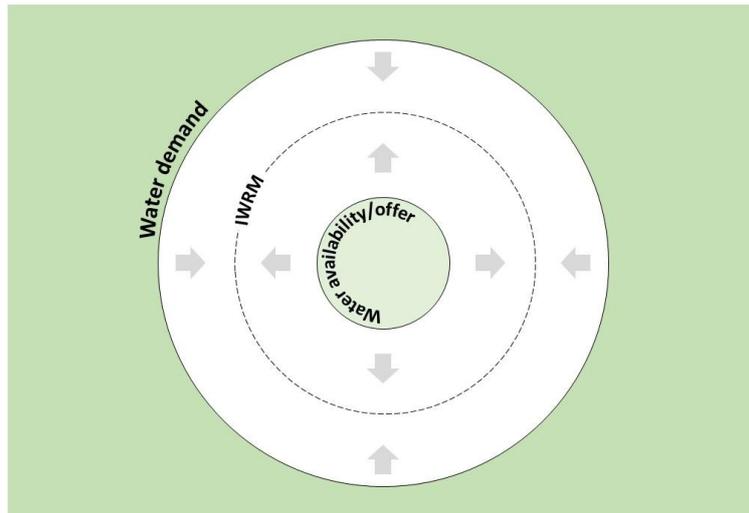


Ilustración 4-7: Sólo una gestión integrada de recursos hídricos y del territorio que sea participativa y que tenga en consideración los efectos del cambio climático podrá optimizar la oferta de recursos priorizando las demandas.

Se han identificado siete medidas de adaptación que los ingenieros y la ingeniería pueden aportar para permitir un aumento de la cantidad de recursos y una mejora de su calidad desde el punto de vista de la oferta. Desde el punto de vista de la demanda se proponen cinco medidas de adaptación enfocadas a un menor consumo de agua.

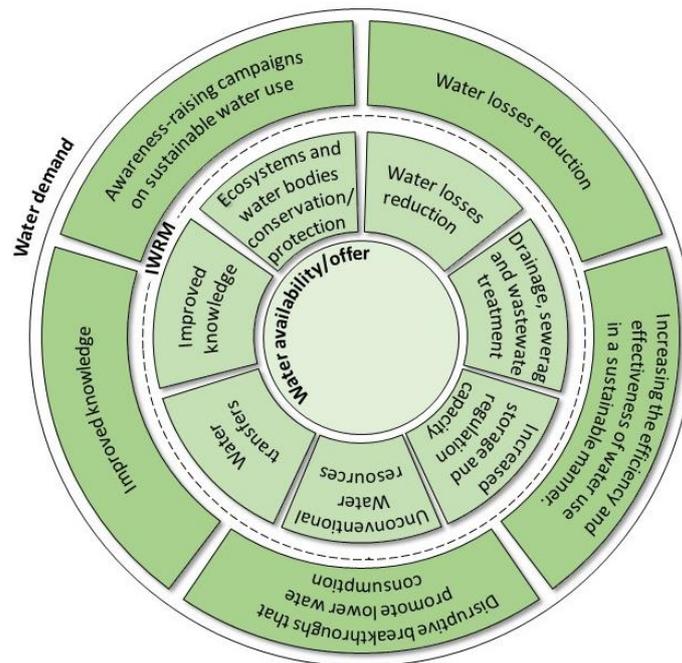


Ilustración 4-8: El punto de equilibrio entre la oferta y la demanda de agua se alcanza en la gestión integrada de recursos hídricos. Las medidas de adaptación que los ingenieros y la ingeniería pueden aportar son un total de doce. Siete corresponden a medidas enfocadas al incremento de recursos (aumento de la oferta) y cinco encaminadas a fomentar un ahorro en el uso del agua (disminución de la demanda).

Medidas de adaptación relacionadas con la oferta.

El incremento del conocimiento junto con la protección y conservación de los ecosistemas y masas de agua son dos medidas prioritarias de adaptación.

Un mayor conocimiento, junto con sistemas de información y análisis (datos de satélites, redes de comunicación, análisis bigdata, inteligencia artificial, etc.), contribuyen a una mejor gestión de las incertidumbres y toma de decisiones. Una mejora en la toma de datos meteorológicos (satélites, estaciones meteorológicas, etc.) facilita al establecimiento de predicciones más acertadas y una mayor precisión de estas.

Los datos obtenidos por los satélites permiten, entre otras, realizar la vigilancia y seguimiento ambiental, facilitar el análisis y los pronósticos meteorológicos, la investigación climática y predicciones, mediciones globales de la temperatura superficial marina, sondeos atmosféricos de la temperatura y la humedad, dinámica oceánica, y el análisis de la vegetación.

Los sistemas de información de calidad de las aguas, tanto superficiales como profundas, permiten facilitar la gestión de los recursos hídricos, así como la toma de decisiones tempranas en episodios de contaminación, sobreexplotación de acuíferos, etc.

Estas redes también son importantes para el seguimiento de los efectos del cambio climático, especialmente en las masas no alteradas por la acción humana directa.

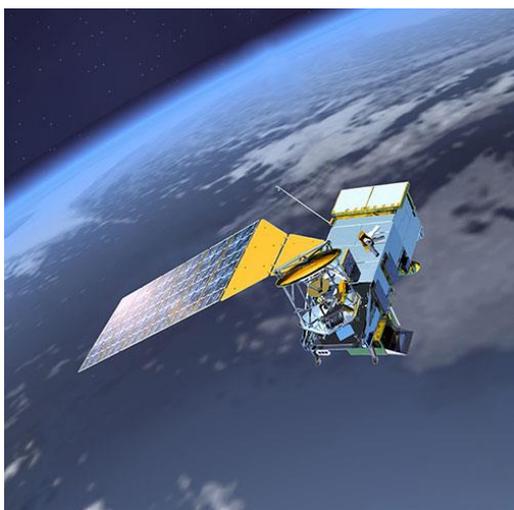


Ilustración 4-9: La información procedente de satélites se ha convertido en indispensable como fuente de información para la mejora del conocimiento, el establecimiento de predicciones y toma de decisiones (en la imagen izquierda el satélite POES -Polar Operational Environmental Satellite). Los sistemas automáticos de información de calidad de las aguas (SHAI) proporcionan una valiosa ayuda en tiempo real sobre la contaminación de la calidad de las aguas superficiales, permitiendo actuaciones inmediatas de alerta frente a episodios de contaminación, así como tener efectos disuasorios frente a vertidos intencionados (en la imagen de la derecha sistema SAICA).

Los modelos hidrológicos del pasado ya no son guías precisas para la formulación de la política de aguas, como las proyecciones de disponibilidad anual y la frecuencia de las sequías e inundaciones. La mejora del conocimiento sobre los usos del agua (información sobre consumos reales, pérdidas en la red, evaporación, retornos de regadío, etc.) y los datos proporcionados por estos sistemas de información permiten un mejor análisis y formulación de nuevas políticas.

La cuenca como unidad se ajusta mejor a la gestión de aguas superficiales y subterráneas, pero nuevos conocimientos han permitido poner de manifiesto las “cuencas atmosféricas”, también conocidas como “cuencas de precipitación”.

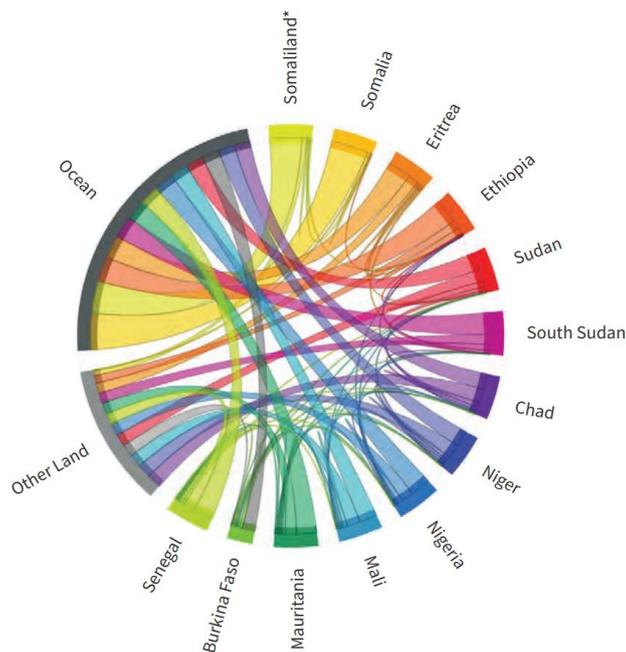


Ilustración 4-10: Fuentes o cuencas de precipitación para la región del Sahel. Nota: La anchura del flujo corresponde a la fracción de precipitación recibida en el país/territorio. El color de un flujo corresponde al país/territorio en el que ese flujo de humedad cae como precipitación. Cuando dos países/territorios intercambian humedad entre sí, el color de ese flujo corresponde al país con la mayor fracción (neta) recibida como precipitación. Empezando por el océano, los países/territorios se enumeran en el sentido de las agujas del reloj, de este a oeste. Ilustración de WWDR (WWAP (United Nations World Water Assessment Programme)/UN-Water, 2018).

** Somalilandia es una región autónoma de Somalia, sujeta al Gobierno Federal Somalí*

La protección y conservación de los humedales, meandros, riberas, masas de aguas superficiales y subterráneas (esta última indispensable en los casos de sequías -pozos de sequía-), la eliminación de vegetación invasiva no autóctona y el mantenimiento de toda la infraestructura natural en su origen es fundamental (repercute) para tener una mejor calidad y cantidad del recurso. Estas medidas de protección y conservación deberían de estar claramente incentivada en la determinación del precio del agua (quien contamina paga), así como la protección estratégica de terrenos.



Ilustración 4-11: La protección y conservación de humedales tiene co-beneficios (en la imagen de la izquierda se muestran los humedales de l'Albufera en Valencia, España). A pesar de sus diferencias, todas las zonas ribereñas poseen algunas características ecológicas similares, ayudan a controlar la contaminación de fuentes no puntuales y los árboles y la vegetación de estas zonas estabilizan las orillas de los arroyos y reducen la velocidad del agua de las crecidas (en la imagen de la derecha la ribera del río Nueces en Texas-USA)

Cuadro 4.1: Humedales artificiales de decantación en el Delta del Ebro, Tarragona, España.



En el Delta del Ebro, el agua procedente del río es utilizada en el cultivo extensivo del arroz y, posteriormente, vertida en las lagunas y bahías. Durante este proceso, el agua incorpora un conjunto de elementos contaminantes (nutrientes, materia en suspensión, plaguicidas, etc.) que provoca un descenso en la calidad del agua de los medios receptores. Este hecho se traduce en afecciones a los ecosistemas naturales existentes y a las actividades económicas que allí se desarrollan

La formación de humedales de depuración supone la aplicación de sistemas que utilizan el suelo, la vegetación acuática y los microorganismos asociados a los mismos para eliminar los contaminantes del agua.



Estos sistemas de tratamiento se denominan “blandos” por no tener toda la eficacia de los tratamientos tradicionales de depuración de agua. No obstante, su ventaja añadida es la creación de espacios de gran valor ecológico, restaurando zonas de gran potencial para el establecimiento de fauna y permitiendo su integración dentro de itinerarios de visita, de manera que se fomenta la actividad lúdica y educativa en la zona del Parque Natural.

La construcción de humedales artificiales en el Delta del Ebro, tienen el objetivo de mejorar la calidad del agua circulante por los desagües, antes de su vertido en la laguna y su salida definitiva a las bahías. Además, esta construcción lleva asociado el acondicionamiento de zonas de recreo y motas transitables para uso exclusivo de peatones y bicicletas.



En la imagen superior, esquema de funcionamiento de un humedal artificial/filtro verde: 1-Flujo subsuperficial, 2- Flujo Superficial y 3-Laguna renaturalizada.

Anteriormente se ha indicado que cuando existen incertidumbre sobre la afección del cambio climático a los recursos hídricos, es oportuno realizar medidas que no supongan un “arrepentimiento” posterior, es decir, que consigan beneficios independientemente del cambio climático. Medidas de este tipo son la reducción de pérdidas de agua, la mejora del drenaje, las redes de saneamiento y el tratamiento de las aguas residuales. La reducción de pérdidas en los sistemas de almacenamiento (pérdidas por evaporación) y distribución (fugas de agua) permitirá un aumento de los recursos disponibles.

A nivel mundial, las pérdidas de agua en las redes de suministro de agua potable ascienden a 130 km³ al año (International Water Association). Otros organismos estiman las pérdidas en sistemas urbanos en 50 km³ al año (Kingdom, Liemberger, & Marin, 2006), valor inferior, pero sigue siendo muy revelador.

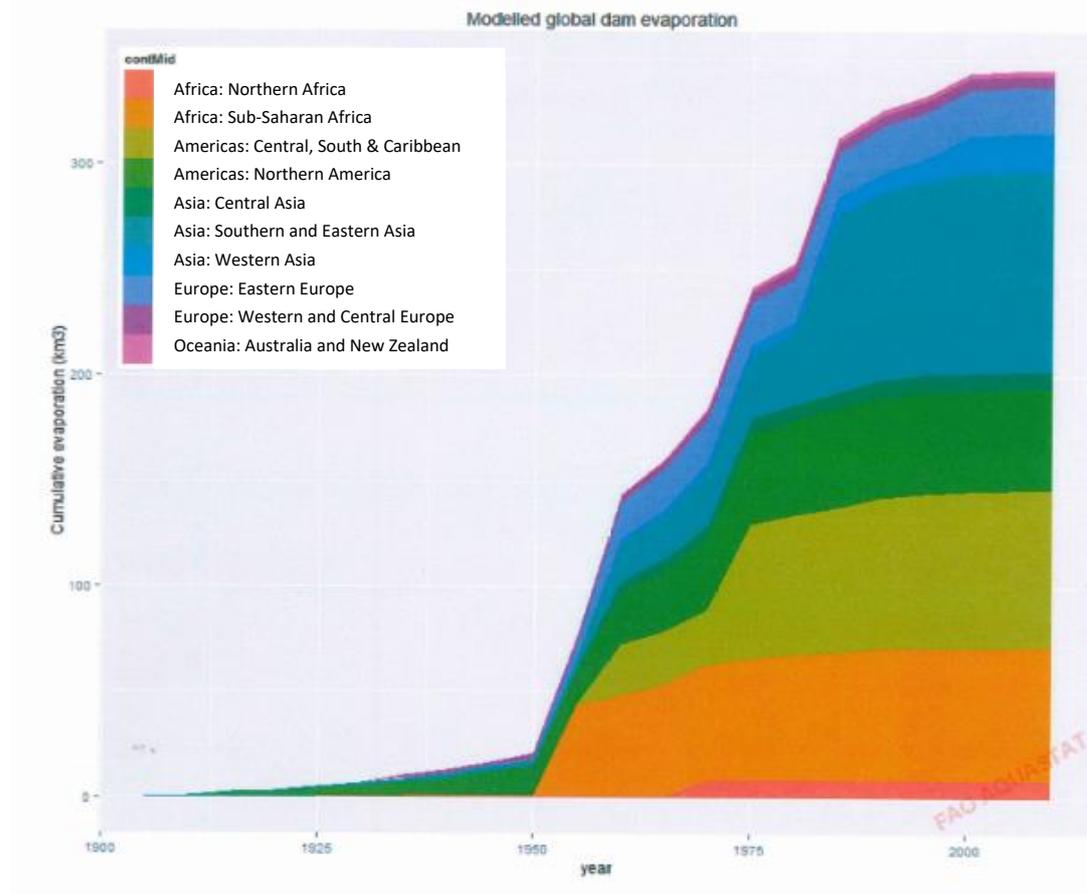


Ilustración 4-12: Estimación de la evaporación en lagos artificiales y embalses por regiones. Fuente: FAO-AQUASTAT



Ilustración 4-13: Las pérdidas de agua por evaporación en lagos y embalses suponen más de 350 km³ al año. Una de las posibles soluciones a esto es la cubrición de parte de la superficie embalsada con paneles solares, cumpliendo así una doble función: la reducción de pérdidas y el aprovechamiento energético (Imagen de la planta fotovoltaica flotante en el embalse de Sierra Brava en España).

Las medidas de mejora del drenaje y redes de saneamiento permiten, junto con el tratamiento de las aguas residuales, un retorno en un estado aceptable de calidad de las aguas al medio ambiente. Los drenajes sostenibles urbanos (instalación de vegetación en las azoteas, pavimentos drenantes, etc.) permiten, mediante la evapotranspiración o infiltración, una disminución de la escorrentía superficial y, por lo tanto, una disminución en la necesidad de tratamiento de estas aguas si fueran incorporadas a la red de saneamiento y posterior tratamiento o menor contaminación si no fueran tratadas.



Ilustración 4-14: La instalación de vegetación en las azoteas genera un gran número de co-beneficios. Además de reducir y frenar la escorrentía de las aguas pluviales en entornos urbanos, producen oxígeno, proporcionan sombra y reducen el calor en las ciudades (en la imagen de la izquierda el ayuntamiento de Chicago, USA y a la derecha ACROS-Fukuoka Prefectural International Hall, Japón).

En todo el mundo, alrededor del 60% de las personas están conectadas a un sistema de alcantarillado, 4200 millones de personas carecen de saneamiento gestionado de forma segura y cerca del 80% de las aguas residuales se vierten al medio ambiente sin un tratamiento adecuado (WWAP-United Nations World Water Assessment Programme-, 2017).

Se calcula que cada año se producen 380 km³ de aguas residuales en todo el mundo y se prevé que aumente a 470 km³ en 2030 y a 575 km³ en 2050 (UN-Water, 2020).

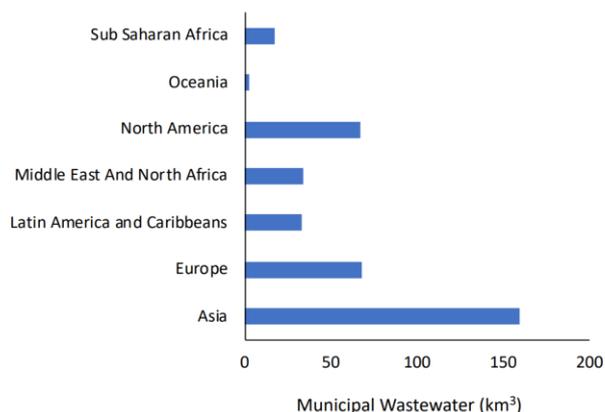


Ilustración 4-15: Estimación de la producción de aguas residuales municipales por regiones. Se calcula que cada año se producen 380 km³ de aguas residuales en todo el mundo. Ilustración de UN-Water (UN-Water, 2020)

La mejora de estos servicios es independiente del cambio climático. Sólo desde el punto de vista de la salud humana y del medio ambiente este aspecto resulta prioritario. La descomposición de los productos de desecho acumulados en las aguas residuales supone un 1,3 % de la emisión de gases de efecto invernadero. El tratamiento de las aguas residuales además de ser una medida de adaptación, lo es de mitigación, permitiendo además generar energía en el proceso. Aunque la principal fuente de contaminación difusa (no puntual) es la que proviene de las tierras cultivadas o industriales, el tratamiento de las aguas residuales urbanas es muy importante. La mejora en los sistemas de saneamiento debe estar acompañada también de medidas de reducción de generación de aguas residuales por parte de los usuarios tanto urbanos, como industriales como agrícolas.



Ilustración 4-16: El vertido de aguas residuales sin tratar es uno de los problemas medioambientales más relevantes que además reduce el bienestar humano y el desarrollo social y económico. A esta situación hay que superponerle el deterioro en la calidad del agua provocada por el cambio climático, por lo que avanzar en los sistemas de saneamiento es prioritario. Cada país tiene una problemática distinta en cuanto a cómo acometer este reto, no es lo mismo la situación de los países no desarrollados o algunos en vías de desarrollo que los desarrollados. (En la imagen derecha la planta de tratamiento de aguas residuales de Morigasaki, Japón. Foto: Banco Mundial / Mónica Tijero).

La monitorización continua de la calidad de las aguas en los ríos aguas arriba de los puntos de vertido de las estaciones depuradoras, permite hacer un tratamiento “a la carta” de las aguas residuales con el fin de que la calidad de las aguas tratadas se ajuste en cada momento a las necesidades del río.



Ilustración 4-17: Los humedales artificiales/filtros verdes son elementos cada vez más empleado como sistemas de depuración para mejorar la calidad de las aguas. Por lo general, los humedales se construyen para proporcionar un tratamiento secundario y terciario de las aguas residuales y mejorar la calidad del agua local a través de sus procesos geoquímicos y biológicos naturales inherentes a un ecosistema de humedales. En la imagen de la izquierda creación de humedal artificial y en la derecha humedal artificial en el Delta del Ebro, España.

El incremento de la capacidad de almacenamiento y regulación es importante para aumentar la oferta y que esta esté disponible en el momento requerido por la demanda. La captación de agua de lluvia (técnicas de micro captación, captación externa al terreno de cultivo, cultivos en terrazas, techos y otras áreas de escurrimiento, etc.), los embalses, la construcción o restauración de humedales, la recarga de los acuíferos y la prospección y extracción de aguas subterráneas son las principales bases de esta medida. En cuanto a los embalses, en algunas bibliografías se indica que son una importante fuente de generación de gases efecto invernadero. Esta aseveración debe ser analizada puntualmente y no tratada como una generalidad ya que depende de la carga orgánica presente en los ríos, las medidas de eliminación de la vegetación que se hayan realizado antes del llenado del embalse y también, en caso de producirse, ocurre durante el periodo de maduración del embalse.





Ilustración 4-18: Los escenarios de cambio climático prevén un aumento en la variabilidad temporal, espacial y de intensidad de las precipitaciones. Ante esta situación, se incrementa la necesidad de aumentar la captación y almacenamiento de agua. Esto se puede realizar mediante la captación y almacenamiento de agua de lluvia (imagen superior izquierda -retención de agua con bordos semicirculares- y derecha -recogida de agua de lluvia-), embalses (imagen intermedia izquierda -embalse costero de Plover Cove en Hong Kong- y derecha -presa de Uzquiza en España-), creación de espacios de retención de aguas (en la imagen inferior izquierda paisaje de retención de agua de Tamera, Portugal) y recarga de acuíferos (en la imagen inferior derecha sistema de balsas de recarga de acuíferos en California, USA).

El empleo de recursos no convencionales como la reutilización, desalación de agua de mar o salobre, o la captación de agua atmosférica cada vez está más extendido en regiones que tienen escasez de agua. Estos nuevos recursos permiten liberar otros (no siempre cuantificados económicamente) y diversificar las fuentes. La reutilización de aguas y la desalación han sido tradicionalmente aguas caras, debido principalmente al consumo energético empleado en el proceso. Este aspecto ha variado sustancialmente en los últimos años, lo que ha permitido un uso más extendido de estos nuevos recursos, incluido la agricultura de alto valor añadido en el caso de la desalación (invernaderos, etc.).





Ilustración 4-19: Los recursos no convencionales son imprescindibles en aquellas zonas donde la escasez de agua se ha hecho estructural o cuando es necesario liberar otros recursos hídricos para fines medioambientales, etc. La captación de agua de niebla puede aportar entre 2 a 10 l/m² al día (en la imagen superior izquierda mallas de captación de niebla en Chile). Los tratamientos para la reutilización de aguas permiten reutilizar el recurso principalmente para la agricultura, aunque algunos países como en Namibia se usa para abastecimiento (en la imagen superior derecha planta de reutilización de aguas de New Goreangab, Namibia). La desalación por ósmosis inversa ha crecido exponencialmente durante las últimas décadas debido, fundamentalmente, a la drástica reducción del consumo energético (en la imagen inferior planta desaladora de Torrevieja -240.000 m³/día-, España).

Teniendo en consideración que más de 600 millones de personas (alrededor del 10% de la población mundial) viven en zonas costeras que están a menos de 10 metros sobre el nivel del mar y que casi 2.400 millones de personas (alrededor del 40% de la población mundial) viven a menos de 100 km (60 millas), parece que la desalación continuará siendo un recurso indispensable en el futuro (UN, 2017).

Además de los citados, hay también otros tipos de recursos no convencionales como la reutilización de las aguas del drenaje agrícola, consistente en la reutilización del agua salina hasta que sea inutilizable para cualquier actividad económica en lugar de su eliminación o vertido previo. Otro recurso es la recolección de la humedad atmosférica mediante la siembra de nubes, práctica que está extendida en algunos países. Existen también distintas iniciativas, hoy en día inviables, que no se han llegado a materializar como el uso del agua de lastre de los barcos o la recogida de icebergs en las regiones árticas y transportados a zonas con escasez de agua (UN-Water, 2020).

La última de las siete medidas de adaptación contempladas desde el punto de vista de la oferta es la transferencia de recursos entre regiones o cuencas. Esta medida se materializa principalmente mediante los trasvases de agua de zonas con recursos a otras con escasez.

La tendencia que señalan los diferentes modelos para predecir el cambio climático muestra no sólo la necesidad de una mayor capacidad de regulación, sino también de una mayor movilización de los recursos hídricos. Por lo tanto, aumentará la necesidad y la oportunidad tanto de las regulaciones como de las conexiones de las cuencas.

En determinadas situaciones los trasvases son imprescindibles porque no hay otra solución menos costosa (económica, social y ambiental), pero sí es cierto que muchas veces generan conflictos entre territorios que resultan difíciles de gestionar, provocando una alta conflictividad social y política. Los problemas ambientales deben estar bien evaluados en este tipo de soluciones.

Este tipo de infraestructuras hidráulicas requieren un largo periodo de maduración y algunas de las lecciones aprendidas son las siguientes:

- El contexto socioeconómico debe conocerse muy bien previamente.
- Los acuerdos políticos y de usuarios son necesarios, se hacen acuerdos y tienen elementos legales que dan seguridad a la operación.
- Requiere sabiduría para estimar la capacidad de la cuenca cedente y los efectos en la zona de captación, de modo que no se ponga en peligro el desarrollo futuro de la cuenca cedente ni perjudiquemos el equilibrio socioeconómico o medioambiental, y tampoco generemos un exceso de expectativas en la cuenca receptora.
- En general es aconsejable trasvasar sólo un pequeño porcentaje del recurso disponible
- Se debe promover el desarrollo en la cuenca cedente, no sólo en la receptora
- Una vez construidas, se necesitan instancias y organismos que gestionen estas grandes infraestructuras con un buen soporte técnico y una buena gestión del sistema.



Ilustración 4-20: Traslase de agua Sur-Norte en el condado de Xichuan, Nanyang, Henan, China.

De forma instintiva la transferencia de recursos hídricos se asocia a los trasvases porque el agua es transportada de un lugar a otro de forma directa y visible, pero la realidad es que esta transferencia se puede realizar de muchas otras formas mediante la importación y exportación de productos, bienes y servicios (agua virtual). En algunas bibliografías se indica como una medida de adaptación la recolocación de industrias a otras zonas que tengan mayor cantidad de recursos hídricos. Esta alternativa puede ser una solución sobre el papel, pero los costes sociales son muy elevados.

En la siguiente la tabla 4-1 se resumen las medidas de adaptación descritas desde el punto de vista de la oferta.

| | | |
|--|---|--|
| Medidas de adaptación desde el punto de vista de la oferta | Mejora del conocimiento (sistemas de información y análisis de datos para la mejora en la toma de decisiones) | Sistemas de obtención de datos meteorológicos para la mejora de predicciones (satélites, etc.). |
| | | Redes de seguimiento para la caracterización y seguimiento del estado cuantitativo y cualitativo de las masas de agua. |
| | | Redes de información hidrológica en tiempo real. |
| | | Sistemas de información de la calidad sanitaria de las aguas como medida de prevención de la salud de la población. |
| | | Mejor conocimiento de los procesos naturales y |

| | | |
|--|--|---|
| | | cómo estos pueden mejorar la calidad y cantidad de agua |
| | | Sistemas que permitan la mejora en el conocimiento sobre los usos del agua. |
| | | Redes de seguimiento de los efectos del cambio climático en las masas de agua (especialmente en las no alteradas por la acción humana directa). |
| | | Sistemas de información de la calidad del agua de consumo y de baño. |
| | | Sistemas que permitan el manejo de incertidumbres y riegos. |
| | Protección y conservación de los ecosistemas y masas de agua (permiten una mejora cuantitativa y cualitativa del agua reduciendo los tratamientos posteriores) | Protección de la infraestructura natural en su origen (prácticas agrícolas sostenibles). |
| | | Protección y regeneración de humedales y meandros. |
| | | Eliminación de vegetación invasiva no autóctona |
| | | Protección estratégica de terrenos |
| | | Revegetación (incluyendo reforestación y conversión forestal) |
| | | Creación de zonas ribereñas de amortiguación |
| | | Reconexión de los ríos y las llanuras de inundación |
| | | Restauración de riberas (incluyendo corredores de ribera) |
| | Reducción de pérdidas de agua | Sistemas que permitan la reducción de pérdidas de evaporación en embalses. |
| | | Sombreado de las vías fluviales |
| | | Sistemas de detección de fugas en las redes de agua. |
| | Mejora del drenaje, saneamiento y tratamiento de aguas residuales | Dotar de instalaciones de saneamiento básicas a los hogares |
| | | Incrementar los sistemas de saneamiento mejorado |
| | | Construcción y mejora de redes de saneamiento |
| | | Implantación sistemas de drenaje sostenible en ciudades (azoteas verdes, pavimentos drenantes). |
| | | Implementar instalaciones de tratamiento de las aguas residuales |
| | Incremento de la capacidad de almacenamiento y regulación | Espacios verdes de biorretención o infiltración |
| | | Embalses |
| | | Construcción de humedales artificiales (restauración o construcción) |
| | | Recarga artificial de acuíferos (bombeos o balsas de infiltración, pavimentos permeables, etc.) |
| | | Recolección/captación de agua de lluvia |
| | | Aumento de la capacidad de regulación mediante balsas y depósitos |
| | Recursos no convencionales | Prospecciones y extracción de aguas subterráneas |
| | | Captación de humedad atmosférica |
| | | Desalación |
| | | Reutilización (de aguas tratadas o aguas de drenaje agrícola) |
| | | Extracción de aguas subterráneas confinadas en formaciones geológicas profundas en tierra o en acuíferos marinos |
| | Transferencia de recursos | Incremento de la precipitación mediante la siembra de nubes |
| | | Trasvases |
| | | Agua virtual (importación/exportación) |

Tabla 4-1: Principales medidas de adaptación al cambio climático desde el punto de vista de la oferta de agua que los ingenieros y la ingeniería pueden aportar para permitir un aumento de la cantidad de recursos y una mejora de su calidad.

Medidas de adaptación relacionadas con la demanda.

En cuanto a la demanda, se han identificado cinco medidas de adaptación encaminadas todas ellas a disminuir el consumo de agua.

La realización de campañas de concienciación sobre el uso sostenible del agua es una labor en la que los ingenieros debemos de participar activamente. Especialmente en la promoción de prácticas de reducción de agua para el riego (modificación de los calendarios de cultivo, combinaciones de cultivos, métodos de riego, etc.) ya que más del 70% de agua se destina a este uso.

Al igual que ocurría con las medidas indicadas para la oferta de agua, el aumento del conocimiento es imprescindible para la toma de decisiones en lo referente a la oportunidad (temporal, espacial, cuantitativa y cualitativa) del consumo de agua. El empleo de sistemas que detecten la necesidad de riego de los cultivos, la erosión del suelo o los cambios en los usos del suelo, entre otros, pueden permitir el establecimiento de cultivos altamente profesionalizados.

Otra medida de adaptación de la demanda es el aumento de la eficacia y eficiencia del uso del agua, tanto en los procesos industriales como en los cultivos (modernización de regadíos, desarrollo de cultivos resistentes a las sequías, sal y plagas, etc.). Mediante esta medida se busca un aumento de la productividad del recurso. Aquí se incluye también la reutilización del agua en los procesos industriales o incluso el intercambio de derechos de agua (mercados de agua). Este último permite aumentar la productividad del recurso mediante su empleo en otros lugares, no condicionando así el desarrollo socioeconómico. Los embalses pueden almacenar recursos asignados en el tiempo que no son utilizables en el destino, y las conexiones de cuenca pueden llevar el agua de forma segura y eficaz desde las zonas cedentes a las receptoras. El intercambio de derechos de agua es una medida que permite afrontar también las situaciones de sequía.



Ilustración 4-21: La agricultura es el mayor consumidor de agua (70% del total). Los sistemas de riego por goteo (imagen izquierda) y los cultivos hidropónicos (imagen derecha) son un ejemplo de sistemas más eficientes en el consumo de agua en la agricultura.

La reducción de pérdidas también es relevante, principalmente en la agricultura, mediante la reducción de la evaporación en las balsas y depósitos, y fugas en la red de distribución. La reducción de pérdidas permite disminuir la necesidad de captación de agua (bombeos, etc.), su tratamiento y distribución.



Ilustración 4-22: Dado el gran número de balsas existentes, fundamentalmente para riego, la cubrición de las mismas es fundamental para evitar pérdidas por evaporación, tanto mediante cubiertas continuas flotantes (imagen izquierda) como discontinuas, como bolas flotantes (imagen derecha). Estos sistemas ofrecen otras ventajas adicionales, evitan la proliferación de algas, alargan la vida útil de la balsa y reducen la salinidad del agua.

La última medida, y tal vez la más importante, son todos aquellos avances que permitan disociar el desarrollo del uso del agua o cambios disruptivos que fomenten un menor consumo de agua. Estos adelantos permitirán no sólo liberar recursos, sino que el agua no sea un factor limitante para el desarrollo. Desarrollo que con el incremento de población previsto requerirá de más alimentos y bienes. Como ejemplo de este tipo de avances están los alimentos cultivados en laboratorio (carne clonada, claras de huevos artificiales, etc.). Este tipo de cambios disruptivos son los que propician un aumento de la biocapacidad del planeta.



Ilustración 4-23: Sólo aquellos avances disruptivos que permitan un ahorro drástico de agua en los procesos productivos (industria, agricultura y ganadería) es lo que realmente podrá disminuir el consumo de agua. Un ejemplo de esto son las carnes cultivadas en laboratorio. El consumo mundial de carne en 2019 ascendió a 325 millones de toneladas (OCDE-FAO). Si tenemos en cuenta que para producir tan solo un kilo de carne de vaca es necesario gastar 15.000 litros de agua, y que la carne cultivada consume un 90% menos de agua (además de necesitar un 60% menos de energía y reduce la cantidad de terreno requerida en un 95%). En la imagen superior derecha la primera hamburguesa artificial creada en laboratorio a partir de células madre de vaca (año 2013, 142 gramos y costó 250 mil euros). En 2020, Singapur autorizó el consumo de carne sintética de pollo. La industria aeroespacial ha empleado novedosos sistemas de reutilización del 100% aguas para las estancias de astronautas en el espacio, así como la creación de nuevos materiales. Con el paso del tiempo, estos avances se han implementado en el sector del agua.

En la siguiente tabla 4-2 se resumen las medidas de adaptación descritas.

| | | |
|---|---|--|
| Medidas de adaptación desde el punto de vista de la demanda | Campañas de concienciación en el uso sostenible del agua | Promoción de prácticas sostenibles en el uso de agua doméstica |
| | | Promoción de prácticas autóctonas para un uso sostenible del agua. |
| | | Reducción en la demanda de riego: mediante modificaciones de los calendarios de cultivo, combinaciones de cultivos, métodos de riego y superficies plantadas |
| | | Prácticas agrícolas sostenibles |
| | Aumento del conocimiento | Sistemas que detecten la necesidad de riego de los cultivos (medición de la humedad del suelo, etc.) |
| | | Control de la erosión del suelo |
| | | Cambios en los usos del suelo |
| | | Cultivos altamente profesionalizados |
| | Incrementar la eficacia y eficiencia de forma sostenible del uso del agua | Modernización de regadíos |
| | | Cultivos en invernaderos |
| | | Cultivos resistentes a las sequías, sal y plagas |
| | | Mejora de los procesos industriales (reciclaje del agua en los procesos industriales, reutilización, etc.) |
| | | Medidas que permitan una disminución de la cantidad de agua residuales generadas |
| | | Equipos domésticos que fomenten un menor consumo de agua |
| | Reducción de pérdidas de agua | Cesión/intercambio de derechos de agua para no limitar el desarrollo socioeconómico |
| | | Reducción de pérdidas por evaporación en balsas y depósitos no cubiertos. |
| | Avances disruptivos que fomenten un menor consumo de agua | Reducción de fugas de agua en las redes de distribución de los usuarios o industrias. |
| | | Alimentos cultivados en laboratorio |
| | | Medidas que permitan ahorros en el consumo de agua en la agricultura y que sean sostenibles. |

Tabla 4-2: Principales medidas de adaptación al cambio climático desde el punto de vista de la demanda de agua que los ingenieros y la ingeniería pueden aportar.

4.2 Medidas de adaptación frente a fenómenos meteorológicos extremos.

Por extremos climáticos se consideran principalmente las temperaturas extremas, olas de calor y episodios cálidos, valores extremos de precipitación y ciclones. En el caso de algunos extremos climáticos, como sequías, inundaciones y olas de calor, deben combinarse varios factores para que se produzca un episodio extremo (Stocker, y otros, 2013).

Que un fenómeno meteorológico sea catastrófico no depende exclusivamente del valor extremo que haya tomado el elemento climático (precipitación, temperatura, viento, presión, etc.) sino que depende de otros factores como la geomorfología de la zona afectada, la distribución de la población, los usos del suelo, las prácticas inadecuadas e intervenciones humanas en el territorio, la ocupación de los cauces y las llanuras de inundación, etc. Muchos de ellos, causados en mayor parte por motivos económicos o sociales, pueden condicionar el carácter catastrófico de un fenómeno extremo de cierta habitualidad (Mata, 2001).

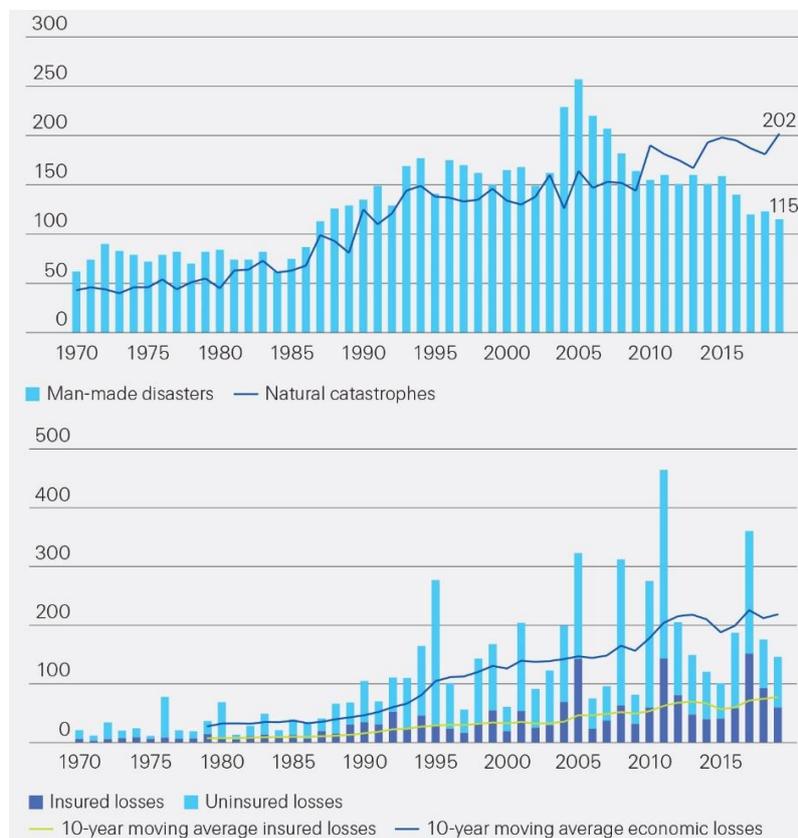


Ilustración 4-24: Número de eventos catastróficos ocurridos entre 1970 y 2019 tanto por causas naturales como provocadas por el hombre (imagen superior) y coste de las pérdidas (USD billion, 2019 prices, imagen inferior). Fuente Swiss Re Institute (Bever & Gloor, 2020).

Al realizar todas estas intervenciones, la sociedad tiene que asumir los riesgos que desencadenan estos fenómenos en los bienes, servicios y en las personas, bien mejorando las infraestructuras para que soporten valores extremos de muy baja frecuencia o bien de una forma pasiva mediante la contratación de seguros, que cubran los riesgos ocasionados.

Las medidas de adaptación ante episodios extremos futuros, de mayor intensidad y frecuencia que los actuales, no varían mucho respecto a las medidas que actualmente se están llevando a cabo.

Tradicionalmente, estos fenómenos extremos se han tratado como situaciones de emergencia o críticas. En el presente, estas políticas están cambiando en todo el mundo, pasando de un enfoque de gestión de crisis a otro basado en la gestión de riesgos o en la gestión adaptativa.

La ingeniería juega un papel muy importante en la estimación del tiempo de ocurrencia de los fenómenos naturales, las zonas afectadas, los riesgos y daños potenciales, la definición de acciones de adaptación, las mejores opciones de evacuación a zonas no afectadas, así como para garantizar los usos esenciales del agua y limitar el impacto en las sequías, y desarrollar planes de gestión de riesgos.

El Grupo de Trabajo sobre Agua de la Federación Mundial de Organizaciones de Ingenieros redactó en 2019 el documento “Buenas prácticas en la gestión de sequías e inundaciones: La contribución de los ingenieros” (Estrela & Sancho, 2019). En este documento se indican diversas medidas de adaptación. A modo de resumen, en la tabla 4-3 se relacionan las medidas contempladas en esta publicación.

| | | |
|---|---|---|
| Medidas frente al riesgo de inundaciones | Medidas estructurales | Diques y presas de laminación y depósitos de tormentas, |
| | | Canales de derivación |
| | | Terraplenes y diques |
| | | Modificación de canales |
| | | Drenaje de infraestructuras lineales |
| | | Drenaje sostenible (techos verdes y pavimentos drenantes) |
| | | Espacios verdes (biorretención e infiltración) |
| | | Conservación y restauración de humedales |
| | | Construcción de humedales artificiales |
| | | Re/forestación y conservación forestal. |
| | | Zonas ribereñas de amortiguación |
| | | Reconexión de los ríos y las llanuras de inundación |
| | | Establecimiento de desvíos de inundación |
| | Restauración hidrológica y medidas en zonas inundables | |
| Medidas no estructurales o de gestión: prevención, alerta y respuesta | Medidas de adaptación para los bienes potencialmente afectados, para mitigar los daños | |
| | Medidas de prevención: gestión del suelo y planificación urbana | |
| | Medidas de aviso: sistemas de alerta de inundaciones | |
| | Medidas de respuesta: protección civil y seguro de inundaciones | |
| Medidas frente a los riesgos de la sequía | Gestión integrada de los recursos hídricos | |
| | Planes de gestión de sequías | |
| | Medidas de gestión y control: asignación de recursos, ahorro de agua y cesión/intercambio temporal de derechos de agua. | |
| | Medidas medioambientales | |
| | Sistema de alerta y control de la sequía | |
| | Seguros agrícolas | |

Tabla 4-3: Resumen de las medidas frente a los riesgos de inundación y sequía contempladas en el informe del grupo de agua de la de la Federación Mundial de Organizaciones de Ingenieros, "Buenas prácticas en la gestión de sequías e inundaciones: La contribución de los ingenieros" (Estrela & Sancho, 2019).

Una de las principales incertidumbres de estos fenómenos se debe al desconocimiento del futuro escenario hidrometeorológico. La tecnología y la innovación son esenciales en esto, así como para la evaluación y la gestión de los riesgos.

Las medidas estructurales abordan la ejecución de obras de infraestructura que inciden en los mecanismos de generación, acción y propagación de las crecidas, alterando sus características hidrológicas o características hidráulicas. Entre estas están las que reducen la magnitud y frecuencia de las inundaciones, como las presas de laminación de avenidas o los canales de desvío hacia canales alternativos o hacia el mar. Otras medidas modifican el nivel de las inundaciones, como terraplenes y diques y muros de protección u otras actuaciones en la sección del canal. También están aquellas que modifican la duración de la crecida, como las obras de drenaje obras de las infraestructuras lineales (carreteras, ferrocarriles, ...).

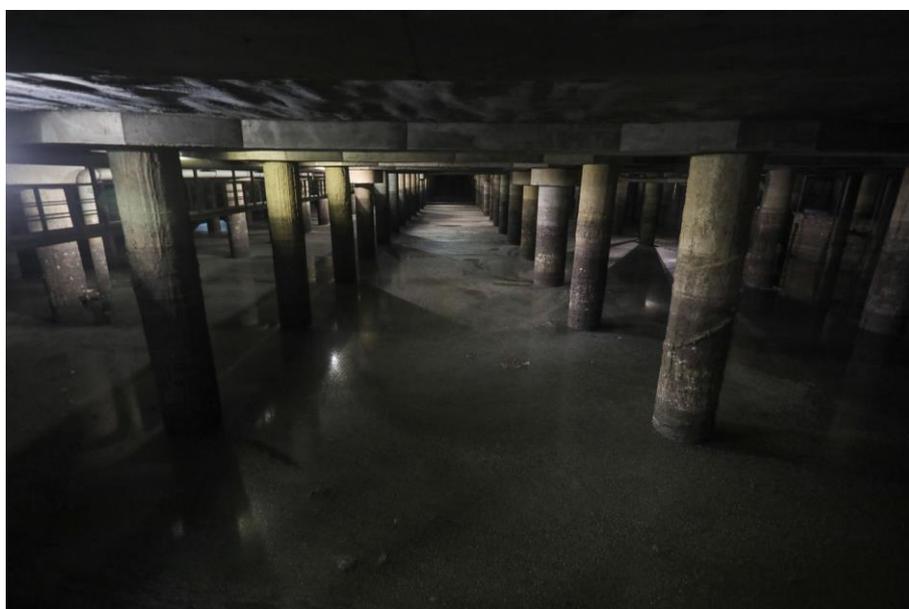


Ilustración 4-25: Los tanques de tormentas retienen las primeras aguas de lluvia hasta que las depuradoras van teniendo capacidad para tratarlas. Una vez depurada, el agua puede ser vertida de nuevo a los ríos en las mejores condiciones sin que suponga una amenaza ecológica para el caudal (en la imagen el tanque de tormentas de 400.000 m³ de capacidad de Arroyofresno, Madrid, España. Fotografía Kike Para).

Las cuencas que albergan numerosas infraestructuras de protección contra las inundaciones han perdido, en muchos casos, la conexión entre los ríos y las llanuras de inundación. Las medidas de retención natural del agua intentan alcanzar los objetivos de gestión del agua mediante la restauración de la naturaleza y sus funciones. Este tipo de infraestructuras no sólo permiten protección frente a inundaciones, sino que generan múltiples beneficios como el aumento de la biodiversidad, la mitigación de los gases de efecto invernadero, etc. Entre las medidas utilizadas para el control de inundaciones se encuentran el establecimiento de franjas de protección, la mejora de la cobertura del suelo mediante la conservación y la reforestación, el control de la erosión mediante diques transversales, la eliminación de barreras transversales para el desarrollo de las inundaciones y los sistemas urbanos de drenaje sostenible. También, la creación de pequeños diques o humedales que funcionen como zonas de retención de agua.



Ilustración 4-26: Los ríos cada vez están más encauzados artificialmente, habiéndose producido una desconexión de los ríos con sus llanuras de inundación. Estas extensiones de terreno son fundamentales en la gestión de episodios de inundaciones (en la imagen de la izquierda, llanura de inundación del Colville River, Alaska -fotografía: Joel Sartore/National Geographic-). Las medidas naturales de retención de agua reducen el riesgo de inundaciones y almacenan agua para los periodos secos (imagen de la derecha, medida natural de retención en Miętno, Polonia).

Los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) son un enfoque alternativo del drenaje urbano cuyo principio es contener y almacenar la escorrentía en origen (tejados, zonas impermeables, jardines, plazas, carreteras...). Estos sistemas se pueden considerar como un complemento de las redes de drenaje convencionales, y ayudan a controlar la escorrentía urbana utilizando técnicas que replican el comportamiento de la naturaleza. Los SUDS son capaces de alcanzar tres objetivos: reducir el volumen total de la escorrentía infiltrando parte de ella, mejorar la calidad del agua tratando física y biológicamente la escorrentía y atenuar y reducir los caudales máximos, evitando las inundaciones aguas abajo.



Depósitos de infiltración



Depósitos de retención



Cunetas verdes



Techos verdes



Zanjas de infiltración



Biorretención



Bandas de filtración



Pozo de infiltración



Humedales



Pavimentos permeables

Ilustración 4-27: Distintos sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS).

Las medidas frente a los riesgos de sequía están basadas en la gestión integrada de recursos hídricos, así como el establecimiento de planes y medidas de gestión (asignación de recursos, ahorro de agua y cesión/intercambio temporal de derechos de agua), control y sistemas de alerta de sequías. En situación de sequía, las medidas medioambientales también son fundamentales.

En la citada publicación del Grupo de Trabajo sobre Agua de la Federación Mundial de Organizaciones de Ingenieros se encuentran más detalles de cada una de las medidas indicadas.

4.3 Medidas de adaptación frente a la subida del nivel de mar.

Los principales riesgos que provoca la subida del nivel del mar son las inundaciones, aumento de la erosión costera, pérdida y cambio de los ecosistemas costeros, salinización de los suelos, acuíferos y aguas superficiales, e impedimento para el drenaje. Estos riesgos producen impactos directos sobre la tierra y sus usos, la pérdida de los servicios ecosistémicos costeros y marinos, daños a las personas, actividades humanas, bienes y servicios.

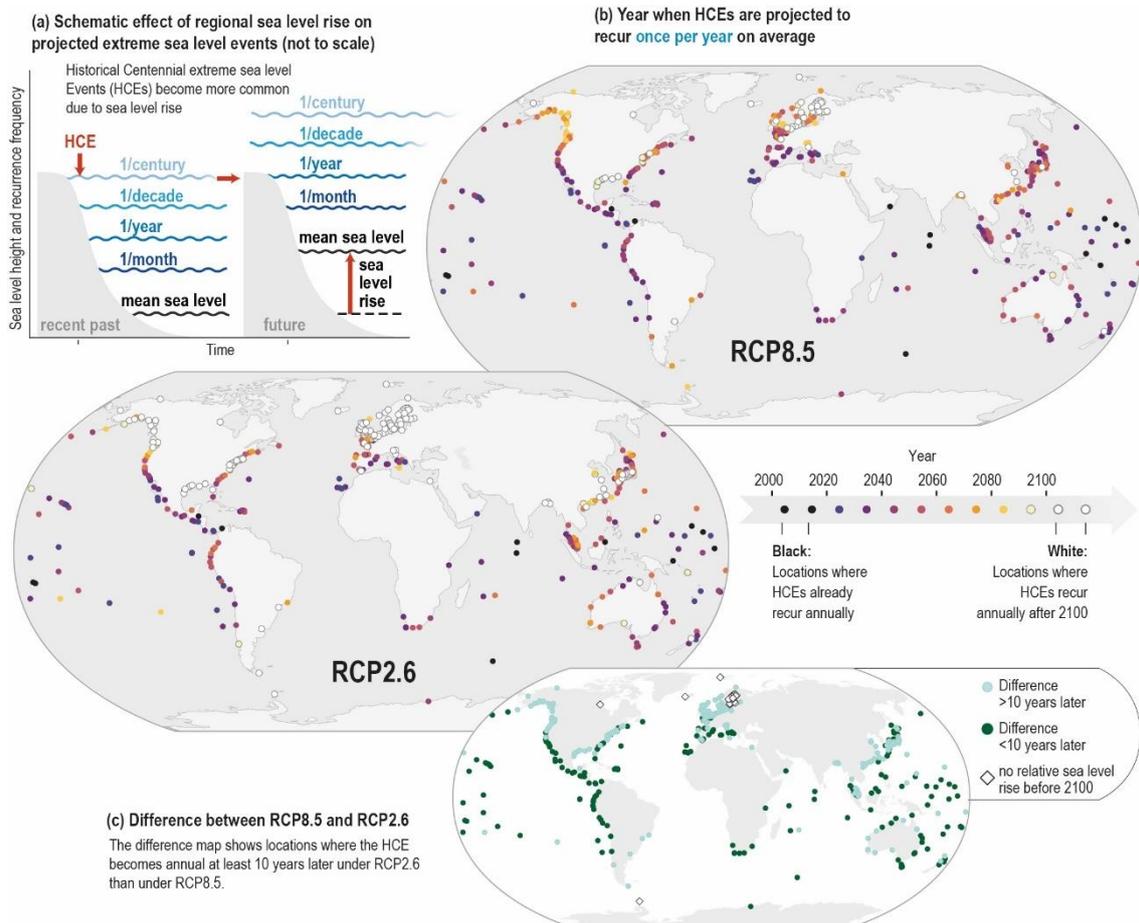


Ilustración 4-28: Efecto de la subida regional del nivel del mar en los fenómenos extremos del nivel del mar en lugares costeros. (a) Ilustración esquemática de los eventos extremos del nivel del mar y su recurrencia media en el pasado reciente (1986-2005) y en el futuro. Como consecuencia de la subida media del nivel del mar, se prevé que los fenómenos locales del nivel del mar que históricamente se producían una vez por siglo (eventos centenarios históricos, HCE) se repitan con mayor frecuencia en el futuro. (b) El año en el que se espera que los HCEs (eventos históricos centenarios de nivel del mar extremo) se repitan una vez al año de media bajo RCP8.5 y RCP2.6, en las 439 localizaciones costeras individuales en las que el registro observacional es suficiente. La ausencia de un círculo indica la imposibilidad de realizar una evaluación debido a la falta de datos, pero no indica la ausencia de exposición y riesgo. Cuanto más oscuro sea el círculo, antes se espera que se produzca esta transición. El rango probable es de ± 10 años para los lugares en los que se espera esta transición antes de 2100. Los círculos blancos (el 33% de las localizaciones bajo RCP2.6 y el 10% bajo RCP8.5) indican que no se espera que los HCE se repitan una vez al año antes de 2100. (c) Indicación de los lugares en los que se prevé que esta transición de los HCE a eventos anuales se produzca más de 10 años después bajo el RCP2.6 en comparación con el RCP8.5. Ilustración del IPCC (Pörtner, y otros, 2019)

Los ecosistemas costeros se ven afectados por la subida del nivel del mar y otros cambios oceánicos relacionados con el clima, pero también por los efectos adversos de las actividades humanas en el océano y en la tierra. Las megaciudades costeras, las islas atolón urbanas, los deltas densamente poblados y las comunidades del Ártico son un ejemplo de la presión que el ser humano ejerce sobre los ecosistemas. Al mismo tiempo, la protección costera es muy

eficaz y rentable para las ciudades, pero no para las zonas rurales menos densamente pobladas.

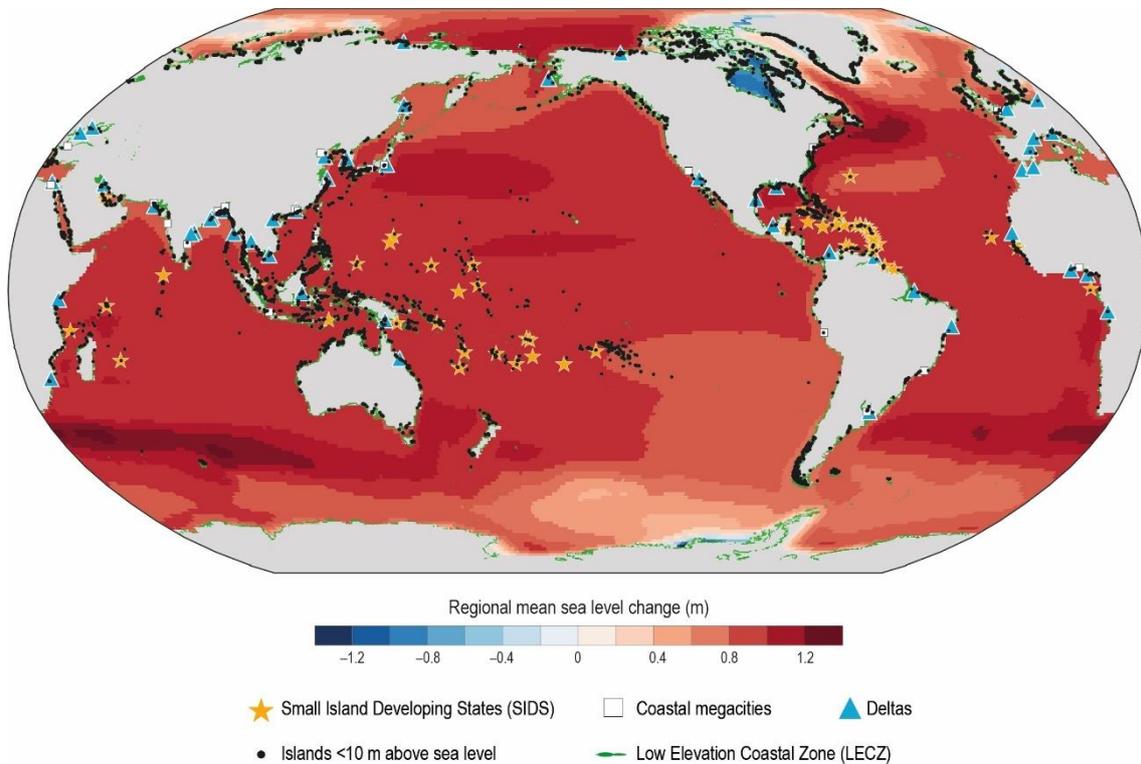


Ilustración 4-29: Distribución global de las islas y costas de baja altitud (LLIC) particularmente en riesgo por el aumento del nivel del mar. Este mapa considera la Zona Costera de Baja Elevación, islas con una elevación máxima de 10 m sobre el nivel del mar (Weigelt et al., 2013), los Pequeños Estados Insulares en Desarrollo, las megaciudades costeras (ciudades con más de 10 millones de habitantes, a menos de 100 km de la costa y con un máximo de 50 m sobre el nivel del mar) y los deltas. Los cambios regionales del nivel del mar se refieren a las proyecciones según el RCP8.5 (2081-2100) Ilustración del IPCC (Pörtner, y otros, 2019)

Dado que el nivel del mar va a continuar subiendo independientemente de las medidas de mitigación que se acometan, parece que la adaptación es prioritaria. Hay que tener en cuenta que 10% de la población mundial vive entre 1 y 10 m sobre el nivel del mar.

Además, la capacidad de los sistemas morfológicos y ecológicos para proteger los asentamientos humanos y las infraestructuras mediante la atenuación de los eventos de subida del nivel del mar y la estabilización de las costas se está perdiendo progresivamente debido a la reducción del espacio costero, la contaminación, la degradación del hábitat y la fragmentación.

Las principales medidas de adaptación son la protección y el avance costero, y la adecuación o la retirada de la costa (ver Tabla 4-4). Todos los tipos de respuestas tienen papeles importantes y sinérgicos que desempeñar en la integración y la conservación de los recursos naturales.

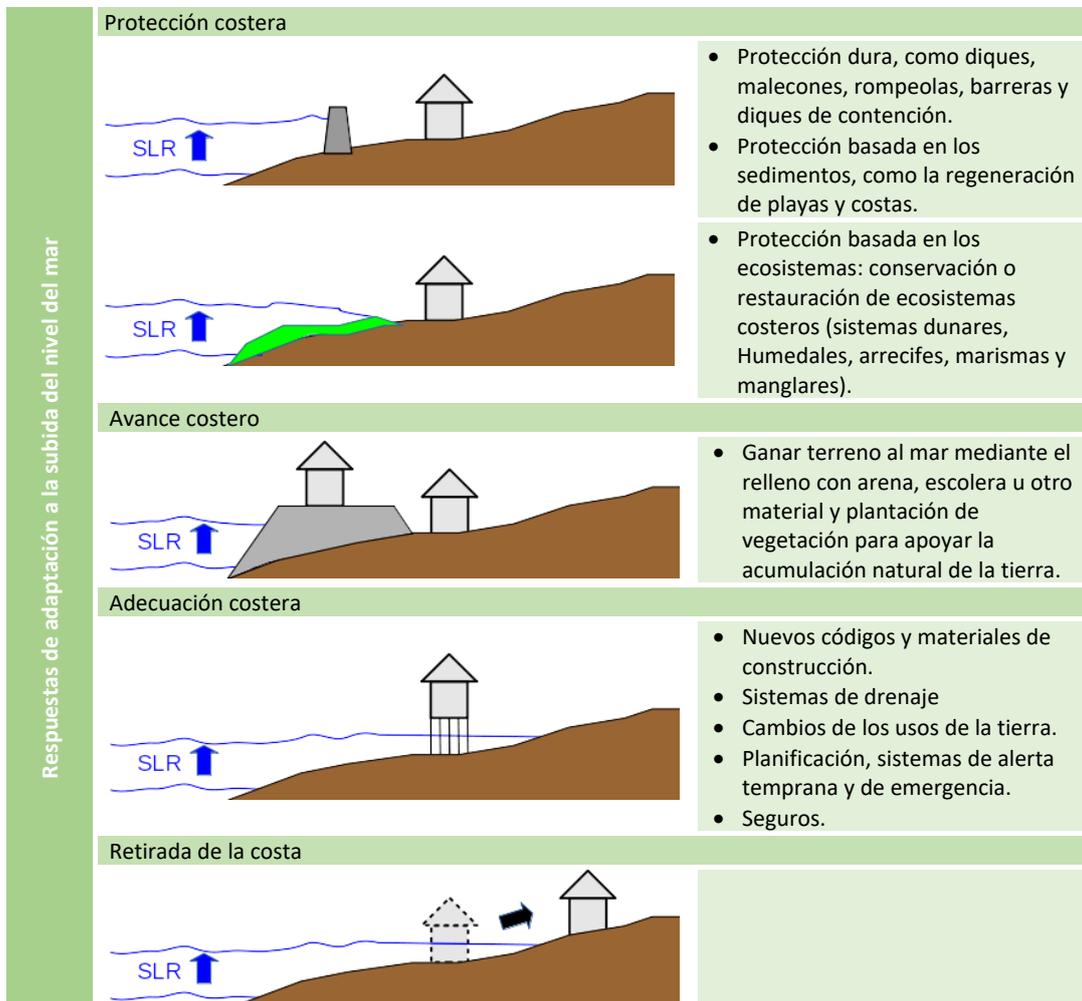


Tabla 4-4: Principales respuestas de adaptación a la subida del nivel del mar (Pörtner, y otros, 2019).

Las medidas de protección costera evitan la propagación hacia el interior del aumento del nivel del mar, reduciendo el riesgo y los impactos. Esto también ocurre con el avance costero. Ambas medidas pueden ser rentable para las ciudades, pero no asequible para las zonas rurales y más pobres.



Ilustración 4-30: La conservación, restauración o creación artificial de ecosistemas costeros juegan un papel importante en la adaptación al cambio climático (en la imagen superior izquierda un sistema dunar y en la derecha dique de arrecife artificial de Narrowneck, Australia).



Ilustración 4-31: Medidas de protección mediante la construcción de diques fijos (en la imagen de la izquierda The Surge Barrier en Louisiana, Nueva Orleans, USA) y móviles (en la imagen de la derecha la barrera de Maeslant Kering, Países Bajos).

Los principales inconvenientes del avance costero son la salinización de las aguas subterráneas, el aumento de la erosión y la pérdida de ecosistemas y hábitats costeros, y el crecimiento de la llanura de inundación costera. A nivel mundial, se calcula que en los últimos 30 años se han ganado unos 33.700 km² de terreno al mar (aproximadamente un 50% más de lo que se ha perdido).

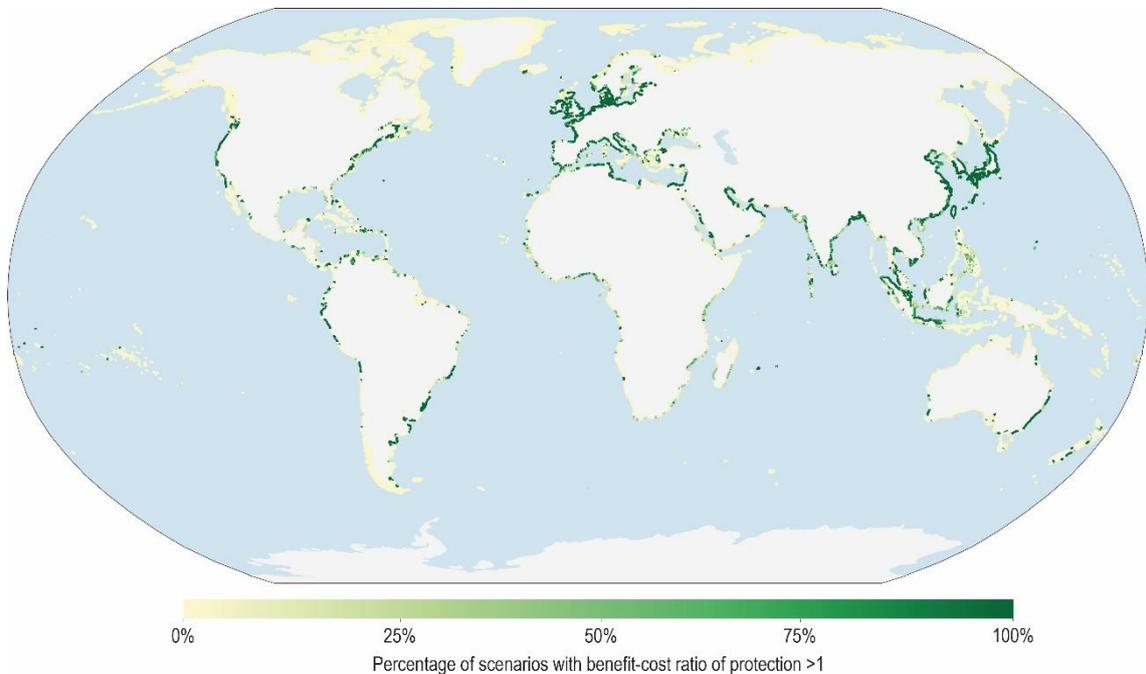


Ilustración 4-32: Bajo escenarios de subida del nivel del mar (SLR) de 0,3 a 2,0 m es económicamente eficiente proteger el 13 % de la línea costera mundial, lo que corresponde al 90 % de la población mundial de las llanuras aluviales. En la imagen se muestra la solidez económica de la protección costera bajo escenarios de SLR de 0,3-2,0 m, las cinco Vías Socioeconómicas Compartidas (SSP) y tasas de descuento de hasta el 6%. Las costas están coloreadas según el porcentaje de escenarios en los que la relación beneficio-coste de la protección (reducción del riesgo de inundación dividido por el coste de la protección) es superior a 1. Ilustración de Global Environmental Change (Lincke & Hinkel, 2019).

Las respuestas de adaptación basadas en los ecosistemas (EbA) proporcionan una combinación de beneficios de protección y avance basados en la gestión sostenible, la conservación y la restauración de los ecosistemas. Permiten disminuir la erosión costera y atenuar del oleaje, actuando como obstáculos y proporcionando espacio de retención. Este tipo de soluciones funcionan cuando las condiciones ambientales son apropiadas para un determinado ecosistema y requieren una mayor superficie que las soluciones tradicionales. Hay que tener en cuenta que los manglares, las marismas y los arrecifes se encuentran a lo largo de entre el 40 y el 50% de las costas del mundo.

Las soluciones híbridas, que combinan medidas estructurales junto con EbA como los bosques de manglares frente a los diques, o construir mejoras ecológicas en las estructuras de ingeniería puede proporcionar una solución eficaz.

La adaptación o adecuación pretende la habitabilidad (de la población, actividades humanas, ecosistemas, etc.) en las zonas costeras intentando reducir los riesgos y vulnerabilidades a pesar de los riesgos. Las medidas que se contemplan no sólo son estructurales, sino que también son las relacionadas con el establecimiento de nuevos códigos de edificación, mejor planificación, establecimiento de sistemas de previsión y alerta temprana, etc.

Las medidas de adecuación pueden ser eficientes en aquellos lugares donde se esperan pequeñas subidas del nivel del mar.



Ilustración 4-33: Medidas de adecuación costera.

La retirada de la costa evita el riesgo al trasladar las personas y bienes fuera de la zona de peligro. Esto se puede hacer de forma permanente o temporal, voluntaria o involuntariamente (migración, desplazamiento o reubicación). Esta medida es una solución efectiva, pero tiene una alta problemática social y política.

Las medidas de adaptación frente a la subida del nivel del mar no sólo han de ser físicas y ecológicas, sino también sociales, de gobernanza, económicas y del conocimiento. Estas últimas han de permitir gestionar la incertidumbre para los responsables de la toma de decisiones.

5 Conclusiones

El agua es uno de los recursos naturales de mayor importancia para la vida, la formación de distintos tipos de paisajes y ecosistemas y para el desarrollo. Es un recurso transversal que afecta a las tres dimensiones del desarrollo sostenible: la social, la ambiental y la económica.

Los distintos escenarios de cambio climático previstos suponen una amenaza para la disponibilidad de los recursos hídricos, tanto cuantitativa como cualitativa. La incertidumbre climática, con una alteración importante de los patrones temporales y espaciales de las precipitaciones, supondrá un previsible incremento de los fenómenos meteorológicos extremos. El aumento de la temperatura global continuará elevando el nivel del mar fruto de la expansión térmica y el derretimiento de los glaciares.

Nuestros recursos hídricos se ven amenazados por el cambio climático, pero principalmente por las actividades humanas, fruto del incremento de la población y el modo de vida actual que están agotando no sólo los recursos que nos proporciona la Tierra, sino también los ecosistemas y la biodiversidad. El índice planeta vivo muestra una tasa media de disminución del tamaño de la población de especies del 68% entre 1970 y 2016. Gracias a los cambios en la tecnología, en las prácticas de gestión de la tierra, etc. la biocapacidad mundial ha aumentado aproximadamente un 28% en los últimos 60 años, pero para vivir seguimos necesitando actualmente 1,56 veces más de Tierra que la que tenemos (WWF, 2020).

La protección de las fuentes de agua en origen mediante el mantenimiento de la infraestructura natural es imprescindible para tener una mejor calidad y cantidad del recurso. Dos terceras partes de la humanidad dependen de recursos hídricos renovables que provienen de bosques y montañas, donde se generan 57% y 28% del agua superficial del planeta, respectivamente. Los ríos, lagos y humedales sanos proporcionan multitud de beneficios a las personas en todo el mundo: para la agricultura, industria, para beber y mucho más. Y son el hogar de uno de cada diez animales conocidos. A pesar de ello, la biodiversidad de los sistemas de agua dulce disminuye a un ritmo mayor que la de océanos y bosques. El Índice del Planeta Vivo de Agua Dulce señala que se ha producido un 84% de disminución media en las especies de agua dulce desde 1970 y actualmente una de cada tres especies está en peligro de extinción (WWF, 2020).

Los ingenieros y la ingeniería ofrecen, a la sociedad y al medio ambiente, distintas medidas de adaptación a estos cambios relacionados con el agua. Estas abarcan desde proporcionar nuevas fuentes de información que faciliten el conocimiento para la formulación de nuevas políticas y mejora en la toma de decisiones, hasta la ejecución de infraestructuras que permitan tanto la conservación y protección de las fuentes de agua como la garantía y seguridad en el suministro. También medidas de tratamiento para la reutilización del recurso o retorno del agua al medio en condiciones medioambientales adecuadas, así como planes, sistemas de alerta o medidas de protección frente a fenómenos meteorológicos extremos y subida del nivel del mar.

La ingeniería también proporciona soluciones cada vez más eficaces y eficientes en el tratamiento y uso del agua, así como en el mantenimiento, restauración y conservación de la infraestructura natural para tener una mejor calidad y cantidad del recurso. Todas estas medidas son las que han colaborado en el incremento de la biocapacidad del planeta.

Las tendencias climáticas a nivel global son claras, pero tienen un mayor grado de incertidumbre a escala regional o local. Asimismo, la certidumbre a largo plazo puede ocasionar incertidumbre a corto plazo. Por ello, el desafío está en cómo saber gestionar la incertidumbre a nivel local ya que ésta puede afectar a los territorios, los ecosistemas y a la población de forma diferente. En esta complicada tarea, la ingeniería ha desempeñado y continuará desempeñando un papel importante.

Desde un punto de vista de la oferta y demanda de agua, la planificación y gestión integrada de los recursos hídricos y del territorio es un pilar fundamental para crear sistemas resilientes y estrategias de adaptación a largo plazo sobre las garantías hídricas, objetivos medioambientales e infraestructuras hidráulicas. Garantizando así la seguridad hídrica y un reparto justo del recurso.

Cualquier medida de adaptación ha de estar precedida por el conocimiento, mediante la recogida y análisis de información (satélites, big data, inteligencia artificial, etc.) para poder avanzar en una adecuada toma de decisiones.

La gobernanza debe facilitar la creación de estructuras de gestión y gobierno, así como un marco regulador que permita el desarrollo de las medidas planificadas, junto con la existencia de una adecuada financiación. Estos dos pilares, gobernanza y financiación, son también imprescindibles y en ellos los ingenieros deben estar presentes, o al menos representados.

Si tenemos en consideración que el 60% de los flujos mundiales de agua dulce traspasan las fronteras nacionales y que hay aproximadamente 300 acuíferos transfronterizos, la gobernanza sobre la gestión integrada de estos recursos hídricos se hace más compleja, haciéndose esencial la cooperación entre países.

Ante las incertidumbres a escala regional o local de la acción del cambio climático sobre los recursos hídricos, parece razonable que se acometan primero aquellas medidas de adaptación que generen co-beneficios con independencia de los patrones climáticos futuros, o incluso implementarlas de forma gradual o por fases. Como se ha comentado anteriormente, el cambio climático es un factor más que se suma a los acuciantes problemas actuales del ODS6.

Algunas de estas medidas son la disminución de la contaminación del agua mediante el tratamiento de las aguas residuales, la reducción de las pérdidas de agua, la protección y conservación de los ecosistemas y las masas de agua (humedales, aguas subterráneas y superficiales, etc.), la mejora de regadíos, así como la reutilización. Actuaciones todas ellas que pueden ser consideradas tanto de adaptación como de mitigación.

La medida de adaptación que más se identifica con la economía circular del agua es la reutilización, que disminuye la presión por la utilización del agua de otras fuentes y en zonas costeras supone un incremento neto de la disponibilidad de recursos.

Además de la reutilización, la ingeniería facilita otros recursos no convencionales en aquellas zonas de escasez, como la captación de agua atmosférica y la desalación de agua de mar o salobre. Los avances tecnológicos (ósmosis inversa) han permitido que la desalación sea una técnica cada vez más asequible y con menor impacto ambiental, esto hace que su uso se haya extendido más allá del abastecimiento, a la agricultura. Teniendo en consideración que alrededor del 40% de la población mundial vive a menos de 100 km (60 millas) de la costa, parece que desalación de agua de mar continuará siendo un recurso indispensable en zonas de costa con escasez de recursos convencionales.

La contribución de la ingeniería a un mayor conocimiento técnico y científico de los comportamientos naturales ha permitido una mejor comprensión de los ecosistemas y por lo tanto de las funciones que estos desarrollan. Aportando así, cuando las condiciones ambientales son apropiadas para un determinado ecosistema, nuevas soluciones medioambientalmente más ventajosas con un grado de certidumbre mayor sobre su eficacia y eficiencia. Este es el caso de los humedales artificiales o filtros verdes, los drenajes urbanos sostenibles, espacios verdes de biorretención o infiltración, entre otros.

La ingeniería es garantía de poder obtener un agua sana que sea apta para cada uno de los distintos usos a los que se destina. Las infraestructuras de captación, transporte y distribución facilitan la disponibilidad del recurso, y las innovaciones en los sistemas de tratamiento garantizan un suministro de calidad. También los trasvases han permitido que el agua no sea un factor limitante de desarrollo de muchas regiones, manteniendo así la población en el territorio.

Los fenómenos meteorológicos extremos serán cada vez más intensos y frecuentes fruto del cambio climático. No obstante, las catástrofes que pueden provocar no dependen exclusivamente del valor extremo que haya tomado el elemento climático (precipitación, temperatura, viento, etc.) sino que depende de otros factores como la geomorfología de la zona afectada la distribución de la población, los usos del suelo, las prácticas inadecuadas e intervenciones humanas en el territorio, la ocupación de los cauces y las llanuras de inundación, etc. Muchos de ellos, causados en mayor parte por motivos económicos o sociales, pueden condicionar el carácter catastrófico de un fenómeno extremo de cierta habitualidad.

Frente a las sequías e inundaciones, la ingeniería contribuye con soluciones de adaptación estructurales y no estructurales, desde planes y medidas de gestión, sistemas de alerta y respuesta hasta elementos de almacenamiento y retención (embalses, humedales, reconexión de los ríos a las llanuras de inundación, desvíos de inundación, tanques de tormenta, etc.).

La subida del nivel del mar provoca inundaciones, aumento de la erosión costera, pérdida y cambio de los ecosistemas costeros, salinización de los suelos, acuíferos y aguas superficiales, e impedimento para el drenaje. Estos riesgos producen impactos directos sobre la tierra y sus usos, la pérdida de los servicios ecosistémicos costeros y marinos, daños a las personas, actividades humanas, bienes y servicios. No hay que olvidar que en la actualidad un 10% de la población mundial vive entre 1 y 10 m sobre el nivel del mar.

Ante esta situación, la ingeniería aporta medidas de protección, avance o adecuación costera. La protección y avance costeros evitan la propagación hacia el interior del aumento del nivel del mar, reduciendo el riesgo y los impactos. Esta protección puede estar basada en los ecosistemas, en sedimentos (regeneración de playas, costa o dunas) o diques. La adecuación pretende la habitabilidad (de la población, actividades humanas, ecosistemas, etc.) en las zonas costeras intentando reducir los riesgos y vulnerabilidades a pesar de la existencia de riesgos.

El cambio climático no impacta en todos los lugares de la misma manera, ni todos los países tienen las mismas necesidades ni nivel de desarrollo. Ante estos desafíos la ingeniería es capaz de aportar la mejor respuesta a cada caso concreto. Las medidas de adaptación descritas son fruto de la transversalidad entre las distintas ramas de la ingeniería, que han sabido adaptar los conocimientos científicos a las necesidades de la sociedad y el medio ambiente. Contribuyendo así a un desarrollo sostenible, inteligente e integrador.

6 Bibliografía y referencias.

- Abell, R. e. (2017). *Beyond the Source: The Environmental, Economic and Community Benefits of Source Water Protection*. Arlington, VA, USA: The Nature Conservancy.
- Bevere, L., & Gloor, M. (2020). *Sigma 2/2020: Natural catastrophes in times of economic accumulation and climate change*. Swiss Re Institute.
- Bill and Melinda Gates Foundation. (2021). *Gates Foundation*. Obtenido de Gates Foundation: <https://www.gatesfoundation.org/>
- Browder, G., Ozment, S., Rehberger, I., Gartner, T., & Lange, G.-M. (2019). *Integrating green and grey*. Washington: World Resources Institute and World Bank Group.
- Commission of the European Communities. (2007). *Green Book: Adapting to climate change in Europe: options for EU action*. Brussels: Commission of the European Communities.
- CONAMA. (2019). *Water and Circular Economy*. Fundación Conama.
- Estrela, T., & Sancho, T. (2019). *Best Practice on drought and flood management: Engineer's contribution*. World Federation of Engineers Organizations.
- European Commission. (22 de November de 2016). *Sustainable development: EU announces its priorities*. Obtenido de https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_16_3883
- European Environment Agency. (2009). *Climate change and water adaptation issues*. Madrid: Ministry of the Environment and Rural and Marine Environment .
- Global Water Partnership. (2018). *Preparing to Adapt: The Untold Story of Water in Climate Change Adaptation Processes*.
- International Water Association. (2021). *World Water Loss Day*. Obtenido de World Water Loss Day: <https://www.worldwaterlossday.org/>
- International Water Association. (s.f.). *World water loss day*. Obtenido de <https://www.worldwaterlossday.org/>
- Kingdom, B., Liemberger, R., & Marin, P. (2006). *The Challenge of Reducing Non-Revenue Water (NRW) in Developing Countries. How the Private Sector Can Help: A Look at Performance-Based Service Contracting*. Washington, DC: The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank.
- Lincke, D., & Hinkel, J. (2019). Economically robust protection against 21st century sea-level rise. *Global Environmental Change*, 67-73.
- Mata, C. A. (2001). Fenómenos climáticos extremos. *Física y Sociedad*.
- Mekonnen, M., & Hoekstra, A. (2011). *National water footprint accounts: The green, blue and grey water footprint of production and consumption, Value of Water Research Report Series No. 50*. Delft: UNESCO-IHE Institute for Water Education .
- Ministry for Ecological Transition and the Demographic Challenge. (2020). *National climate change adaptation plan*. Madrid.
- OECD. (2015). *OECD Principles on Water Governance*.

- OECD/The World Bank/UN Environment. (2018). *Financing Climate Futures: Rethinking Infrastructure*. Paris: OECD.
- Perlman, H., Cook, J., Hole, Woods, & Nieman., A. (16 de July de 2016). *usgs.gov*. Obtenido de https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/how-much-water-there-earth?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects
- Platform for adaptation to climate change in Spain: AdapteCCa*. (s.f.). Obtenido de AdapteCCa: <https://www.adaptecca.es/en/what-is-adaptecca>
- Pörtner, H.-O., Roberts, D., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., . . . (eds.), N. W. (2019). *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. IPCC.
- PwC. (s.f.). *Water management in Spain*. Madrid: PwC.
- Stocker, T., Qin, D., Plattne, G.-K., M. T., Allen, S., Boschung, J., . . . (eds.), P. M. (2013). *IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. , Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Alexander, L., Allen, S., . . . P. (2013). *Technical Summary. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.: Cambridge University Press.
- UN. (2017). *The Ocean Conference*., (pág. 7). New York.
- UNESCO, UN-Water. (2020). *World Water Development Report 2020: Water and Climate Change*. Paris: UNESCO.
- UNFCCC. (2016). *Aggregate effect of the intended nationally determined contributions: an update. United Nations Framework Convention on Climate Change*. New York.
- United Nations. (2019). *United Nations: Department of Economic and Social Affairs: Population Dynamics*. Obtenido de United Nations: Department of Economic and Social Affairs: <https://population.un.org/wpp/Graphs/Probabilistic/POP/TOT/900>
- United Nations. (2021). *UN-Water SDG 6 Data Portal*. Obtenido de UN-Water SDG 6 Data Portal: <https://www.sdg6data.org/>
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, and International Center for Engineering Education. (2021). *Engineering for Sustainable Development*. Paris: UNESCO.
- UN-Water. (2015). *Means of Implementation: A focus on Sustainable Development Goals 6 and 17*.
- UN-Water. (2016). *Water and Sanitation Interlinkages across the 2030 Agenda for Sustainable Development*. Geneva.
- UN-Water. (2020). *UN-Water Analytical Brief on Unconventional Water Resources*. Geneva.
- UN-Water. (s.f.). *Transboundary Waters*. Obtenido de UN-Water: <https://www.unwater.org/water-facts/transboundary-waters/>

- World Resource Institute. (10 de February de 2020). *Blog: World Resource Institute*. Obtenido de World Resource Institute: <https://www.wri.org/blog/2020/02/growth-domestic-water-use>
- World Bank Group. (2021). *Understanding poverty: water*. Obtenido de Understanding poverty: water: <https://www.bancomundial.org/es/topic/water/overview>
- World Federation of Engineering Organizations. (s.f.). *Working Group on Water* . Obtenido de World Federation of Engineering Organizations. Web site: <http://www.wfeo.org/working-group-on-water/>
- World Federation of Engineering Organizations; Division of Science Policy and Capacity Building - Natural Sciences Sector. (2018). *WFEO Engineering 2030. A Plan to advance the achievement of the UN Sustainable Development Goals through engineering*. Paris.
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme)/UN-Water. (2018). *The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions for Water*. Paris: UNESCO.
- WWAP-United Nations World Water Assessment Programme-. (2017). *The United Nations World Water Development Report 2017. Wastewater: The Untapped Resource*. Paris: UNESCO.
- WWF. (2020). *LIVING PLANETREPORT 2020 - Bending the curve of biodiversity loss*. Gland, Switzerland: WWF.

7 Índice de ilustraciones.

| | |
|---|----|
| Ilustración 2-1: Relación entre Objetivos y Dimensiones del Desarrollo Sostenible basado en información publicada por UN-Water (UN-Water, 2016)..... | 3 |
| Ilustración 2-2: La huella hídrica de consumo total por país ($m^3/año$ per cápita). Los países mostrados en verde tienen una huella hídrica menor que la media mundial; los países mostrados en amarillo-rojo tienen una huella hídrica mayor que la media mundial (Mekonnen & Hoekstra, 2011). | 4 |
| Ilustración 2-3: Balance de agua virtual por país y dirección de los flujos brutos de agua virtual relacionados con el comercio de productos agrícolas e industriales durante el periodo 1996-2005. Sólo se muestran los mayores flujos brutos ($> 15 Gm^3/año$); cuanto más gorda es la flecha, mayor es el flujo de agua virtual (Mekonnen & Hoekstra, 2011). | 4 |
| Ilustración 2-4: Sinergias positivas y negativas (conflictos) de los ODSs con el ODS-6. En el eje horizontal se expresan las sinergias positivas (las sinergias aumentan de izquierda a derecha) y en el vertical las negativas/conflictos (las sinergias se incrementan de arriba abajo). El gráfico se ha elaborado en base a la información de UN-Water (UN-Water, 2016) | 5 |
| Ilustración 2-5: Tabla indicativa de diferentes temas en los que los ingenieros y la ingeniería puede contribuir a alcanzar un desarrollo sostenible y su relación con los ODSs. Realizado en base a información obtenida del World Engineers Convention 2019. | 6 |
| Ilustración 3-1: Las esferas azules representan las cantidades relativas de agua terrestre en comparación con el tamaño de la Tierra. El volumen de la esfera más grande representa el total de agua que hay en, sobre y por encima de la Tierra (1.385 km de diámetro). La esfera de agua dulce (líquido) representa el agua subterránea, de pantanos, ríos y lagos (272,8 km de diámetro). La esfera más pequeña representa el agua de los ríos y lagos (56,2 kilómetros de diámetro). Imagen realizada en base a una ilustración de U.S. Geological Survey (Perlman, Cook, Hole, Woods, & Nieman., 2016). | 8 |
| Ilustración 3-2: Indicadores de un clima global cambiante. Ilustración del informe del IPCC, 2013: Cambio Climático 2013 (Stocker, y otros, 2013)..... | 9 |
| Ilustración 3-3: Mapas de los resultados de los modelos múltiples para los escenarios RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 en 2081-2100 de la variación porcentual de las precipitaciones medias. Los cambios se muestran en relación con 1986-2005. Ilustración del informe del IPCC, 2013: Cambio Climático 2013 (Stocker, y otros, 2013)..... | 10 |
| Ilustración 3-4: Proyecciones de “rango probable” de la temperatura media global del aire en la superficie y de la elevación media mundial del nivel del mar para mediados (2046-2065) y finales (2081-2100) del siglo XXI, en relación con el periodo de referencia 1986-2005. Gráfica realizada en base a datos del informe IPCC 2013 (Stocker, y otros, 2013)..... | 11 |
| Ilustración 3-5: (Arriba a la izquierda) Forzamiento radiativo medio total para los cuatro escenarios RCP basados en el modelo de balance energético MAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change). (Abajo a la izquierda) Serie temporal de las anomalías de la temperatura media anual del aire en superficie (en relación con 1986-2005). Mapas: Promedio de conjuntos multimodelos del cambio de la temperatura media anual del aire en superficie (en comparación con el periodo base de 1986-2005) para 2016-2035 y 2081-2100, para RCP2.6, 4.5, 6.0 y 8.5. Ilustración del informe del IPCC, 2013 (Stocker, y otros, 2013). | 12 |
| Ilustración 3-6: Cambio medio regional neto del nivel del mar (metros) evaluado a partir de 21 modelos CMIP5 para los escenarios RCP (a) 2,6, (b) 4,5, (c) 6,0 y (d) 8,5 entre 1986-2005 y 2081-2100. Ilustración del informe del IPCC, 2013 (Stocker, y otros, 2013). | 12 |

| | |
|--|----|
| Ilustración 3-7: : Cambios medios anuales en la precipitación (P), la evaporación (E), la humedad relativa, E - P, la escorrentía y la humedad del suelo para 2081-2100 en relación con 1986-2005 bajo la senda de concentración representativa RCP8.5. Ilustración del informe del IPCC, 2013 (Stocker, y otros, 2013). | 17 |
| Ilustración 4-1: La gráfica de la izquierda refleja las áreas y sectores prioritarios para las acciones de adaptación identificados por distintos países en el componente de adaptación. El principal sector es el del agua y el resto de las áreas están relacionas indirectamente con el agua, salvo la reducción del riesgo de desastres que está ligada al agua directamente. En la gráfica de la derecha se señalan los principales riesgos climáticos identificados en el componente de adaptación. La práctica totalidad de ellos están relaciones de forma directa o indirecta con el agua, salvo el de altas temperaturas. En ambos gráficos se indican el número de países que se refieren a cada sector. Fuente: (UNFCCC, 2016) | 19 |
| Ilustración 4-2: Principios de la OCDE sobre la Gobernanza del Agua para contribuir a la mejorar del "Ciclo de la Gobernanza del Agua", desde el diseño de las políticas hasta su aplicación. Ilustración de la OCDE (OECD, 2015). | 20 |
| Ilustración 4-3: Niveles de aplicación de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos en los países. Ilustración del GWP (Global Water Partnership, 2018). | 21 |
| Ilustración 4-4: Ciclo del uso del recurso agua por el ser humano desde su extracción hasta su retorno al medio (TP: Planta de tratamiento, WWTP: Planta de tratamiento de aguas residuales). | 23 |
| Ilustración 4-5: En el gráfico se muestran las estimaciones y las proyecciones probabilísticas de la población total para los países. Las proyecciones de población se basan en las proyecciones probabilísticas de la fecundidad total y la esperanza de vida al nacer. Estas proyecciones probabilísticas de la fecundidad total y de la esperanza de vida al nacer se han realizado con un modelo jerárquico bayesiano. Las cifras muestran la mediana probabilística y los intervalos de predicción del 80% y el 95% de las proyecciones probabilísticas de población, así como la variante alta y baja (determinista) (+/- 0,5 hijos). Fuente: Naciones Unidas, DESA (United Nations, 2019) | 24 |
| Ilustración 4-6: Evolución de las extracciones de agua por sectores (doméstico, industrial, ganadero y riego). Fuentes: WRI-Aqueduct (Worl Resource Institute, 2020). | 24 |
| Ilustración 4-7: Sólo una gestión integrada de recursos hídricos y del territorio que sea participativa y que tenga en consideración los efectos del cambio climático podrá optimizar la oferta de recursos priorizando las demandas..... | 25 |
| Ilustración 4-8: El punto de equilibrio entre la oferta y la demanda de agua se alcanza en la gestión integrada de recursos hídricos. Las medidas de adaptación que los ingenieros y la ingeniería pueden aportar son un total de doce. Siete corresponden a medidas enfocadas al incremento de recursos (aumento de la oferta) y cinco encaminadas a fomentar un ahorro en el uso del agua (disminución de la demanda)..... | 25 |
| Ilustración 4-9: La información procedente de satélites se ha convertido en indispensable como fuente de información para la mejora del conocimiento, el establecimiento de predicciones y toma de decisiones (en la imagen izquierda el satélite POES -Polar Operational Envirnomental Satellite). Los sistemas automáticos de información de calidad de las aguas (SHAI) proporcionan una valiosa ayuda en tiempo real sobre la contaminación de la calidad de las aguas superficiales, permitiendo actuaciones inmediatas de alerta frente a episodios de contaminación, así como tener efectos disuasorios frente a vertidos intencionados (en la imagen de la derecha sistema SAIH). | 26 |
| Ilustración 4-10: Fuentes o cuencas de precipitación para la región del Sahel. Nota: La anchura del flujo corresponde a la fracción de precipitación recibida en el país/territorio. El color de un | |

flujo corresponde al país/territorio en el que ese flujo de humedad cae como precipitación. Cuando dos países/territorios intercambian humedad entre sí, el color de ese flujo corresponde al país con la mayor fracción (neta) recibida como precipitación. Empezando por el océano, los países/territorios se enumeran en el sentido de las agujas del reloj, de este a oeste. Ilustración de WWDR (WWAP (United Nations World Water Assessment Programme)/UN-Water, 2018). 27

Ilustración 4-11: La protección y conservación de humedales tiene multi beneficios genera grandes co-beneficios (en la imagen de la izquierda se muestran los humedales de l’Albufera en Valencia, España). A pesar de sus diferencias, todas las zonas ribereñas poseen algunas características ecológicas similares, ayudan a controlar la contaminación de fuentes no puntuales y los árboles y la vegetación de estas zonas estabilizan las orillas de los arroyos y reducen la velocidad del agua de las crecidas (en la margen de la derecha la ribera del río Nueces en Texas-USA)..... 27

Ilustración 4-12: Estimación de la evaporación en lagos artificiales y embalses por regiones. Fuente: FAO-AQUASTAT..... 29

Ilustración 4-13: Las pérdidas de agua por evaporación en lagos y embalses suponen más de 350 km³ al año. Una de las posibles soluciones a esto es la cubrición de parte de la superficie embalsada con paneles solares, cumpliendo así una doble función: la reducción de pérdidas y el aprovechamiento energético (Imagen de la planta fotovoltaica flotante en el embalse de Sierra Brava en España)..... 30

Ilustración 4-14: La instalación de vegetación en las azoteas genera un gran número de co-beneficios. Además de reducir y frenar la escorrentía de las aguas pluviales en entornos urbanos, producen oxígeno, proporcionan sombra y reducen el calor en las ciudades (en la imagen de la izquierda el ayuntamiento de Chicago, USA y a la derecha ACROS-Fukuoka Prefectural International Hall, Japón). 30

Ilustración 4-15: Estimación de la producción de aguas residuales municipales por regiones. Se calcula que cada año se producen 380 km³ de aguas residuales en todo el mundo. Ilustración de UN-Water (UN-Water, 2020) 31

Ilustración 4-16: El vertido de aguas residuales sin tratar es uno de los problemas medioambientales más relevantes que además reduce el bienestar humano y el desarrollo social y económico. A esta situación hay que superponerle el deterioro en la calidad del agua provocada por el cambio climático, por lo que avanzar en los sistemas de saneamiento es prioritario. Cada país tiene una problemática distinta en cuanto a cómo acometer este reto, no es lo mismo la situación de los países no desarrollados o algunos en vías de desarrollo que los desarrollados. (En la imagen de la izquierda “baño” significa “toilet” y la imagen de la derecha es la planta de tratamiento de aguas residuales de Morigasaki, Japón. Foto: Banco Mundial / Mónica Tijero). 31

Ilustración 4-17: Los humedales artificiales/filtros verdes son elementos cada vez más empleado como sistemas de depuración para mejorar la calidad de las aguas. Por lo general, los humedales se construyen para proporcionar un tratamiento secundario y terciario de las aguas residuales y mejorar la calidad del agua local a través de sus procesos geoquímicos y biológicos naturales inherentes a un ecosistema de humedales. En la imagen de la izquierda creación de humedal artificial en y la derecha humedal artificial en el Delta del Ebro, España.32

Ilustración 4-18: Los escenarios de cambio climático prevén un aumento en la variabilidad temporal, espacial y de intensidad de las precipitaciones. Ante esta situación, se incrementa la necesidad de aumentar la captación y almacenamiento de agua. Esto se puede realizar mediante la captación y almacenamiento de agua de lluvia (imagen superior izquierda - recogida de agua de lluvia- y derecha -retención de agua con bordos semicirculares-), embalses

(imagen intermedia izquierda -embalse costero de Plover Cove en Hong Kong- y derecha - presa de Uzquiza en España-), creación de espacios de retención de aguas (en la imagen inferior izquierda paisaje de retención de agua de Tamera, Portugal) y recarga de acuíferos (en la imagen inferior derecha sistema de balsas de recarga de acuíferos en California, USA). 33

Ilustración 4-19: Los recursos no convencionales son imprescindibles en aquellas zonas donde la escasez de agua se ha hecho estructural o cuando es necesario liberar otros recursos hídricos para fines medioambientales, etc. La captación de agua de niebla puede aportar entre 2 a 10 l/m² al día (en la imagen superior izquierda mallas de captación de niebla en Chile). Los tratamientos para la reutilización de aguas permiten reutilizar el recurso principalmente para la agricultura, aunque algunos países como en Namibia se usa para abastecimiento (en la imagen superior derecha planta de reutilización de aguas de New Goreangab, Namibia). La desalación por ósmosis inversa ha crecido exponencialmente durante las últimas décadas debido, fundamentalmente, a la drástica reducción del consumo energético (en la imagen inferior planta desaladora de Torre Vieja, España). 34

Ilustración 4-20: Trasvase de agua Sur-Norte en el condado de Xichuan, Nanyang, Henan, China. 35

Ilustración 4-21: La agricultura es el mayor consumidor de agua (70% del total). Los sistemas de riego por goteo (imagen izquierda) y los cultivos hidropónicos (imagen derecha) son un ejemplo de sistemas más eficientes en el consumo de agua en la agricultura. 37

Ilustración 4-22: Dado el gran número de balsas existentes, fundamentalmente para riego, la cobertura de las mismas es fundamental para evitar pérdidas por evaporación, tanto mediante cubiertas continuas flotantes (imagen izquierda) como discontinuas, como bolas flotantes (imagen derecha). Estos sistemas ofrecen otras ventajas adicionales, evitan la proliferación de algas, alargan la vida útil de la balsa y reducen la salinidad del agua. 38

Ilustración 4-23: Sólo aquellos avances disruptivos que permitan un ahorro drástico de agua en los procesos productivos (industria, agricultura y ganadería) es lo que realmente podrá disminuir el consumo de agua. Un ejemplo de esto son las carnes cultivadas en laboratorio. El consumo mundial de carne en 2019 ascendió a 325 millones de toneladas (OCDE-FAO). Si tenemos en cuenta que para producir tan solo un kilo de carne de vaca es necesario gastar 15.000 litros de agua, y que la carne cultivada consume un 90% menos de agua (además de necesitar un 60% menos de energía y reduce la cantidad de terreno requerida en un 95%). En la imagen superior derecha la primera hamburguesa artificial creada en laboratorio a partir de células madre de vaca (año 2013, 142 gramos y costó 250 mil euros). En 2020, Singapur autorizó el consumo de carne sintética de pollo. También sustituto del huevo a base de plantas. La industria aeroespacial ha empleado novedosos sistemas de reutilización del 100% aguas para las estancias de astronautas en el espacio, así como la creación de nuevos materiales. Con el paso del tiempo, estos avances se han implementado en el sector del agua. 38

Ilustración 4-24: Número de eventos catastróficos ocurridos entre 1970 y 2019 tanto por causas naturales como provocadas por el hombre (imagen superior) y coste de las pérdidas (USD billion, 2019 prices, imagen inferior). Fuente Swiss Re Institute (Bevere & Gloor, 2020). 40

Ilustración 4-25: Los tanques de tormentas retienen las primeras aguas de lluvia hasta que las depuradoras van teniendo capacidad para tratarlas. Una vez depurada, el agua puede ser vertida de nuevo a los ríos en las mejores condiciones sin que suponga una amenaza ecológica para el caudal (en la imagen el tanque de tormentas de 400.000 m³ de capacidad de Arroyofresno, Madrid, España. Fotografía Kike Para). 42

Ilustración 4-26: Los ríos cada vez están más encauzados artificialmente, habiéndose producido una desconexión de los ríos con sus llanuras de inundación, extensiones de terreno

que son fundamentales en la gestión de episodios de inundaciones (en la imagen de la izquierda, llanura de inundación del Colville River, Alaska -fotografía: Joel Sartore/National Geographic-). Las medidas naturales de retención de agua reducen el riesgo de inundaciones y almacenan agua para los periodos secos (imagen de la derecha, medida natural de retención en Miętne, Polonia)..... 43

Ilustración 4-27: Distintos sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS)..... 43

Ilustración 4-28: Efecto de la subida regional del nivel del mar en los fenómenos extremos del nivel del mar en lugares costeros. (a) Ilustración esquemática de los eventos extremos del nivel del mar y su recurrencia media en el pasado reciente (1986-2005) y en el futuro. Como consecuencia de la subida media del nivel del mar, se prevé que los fenómenos locales del nivel del mar que históricamente se producían una vez por siglo (eventos centenarios históricos, HCE) se repitan con mayor frecuencia en el futuro. (b) El año en el que se espera que los HCEs (eventos históricos centenarios de nivel del mar extremo) se repitan una vez al año de media bajo RCP8.5 y RCP2.6, en las 439 localizaciones costeras individuales en las que el registro observacional es suficiente. La ausencia de un círculo indica la imposibilidad de realizar una evaluación debido a la falta de datos, pero no indica la ausencia de exposición y riesgo. Cuanto más oscuro sea el círculo, antes se espera que se produzca esta transición. El rango probable es de ± 10 años para los lugares en los que se espera esta transición antes de 2100. Los círculos blancos (el 33% de las localizaciones bajo RCP2.6 y el 10% bajo RCP8.5) indican que no se espera que los HCE se repitan una vez al año antes de 2100. (c) Indicación de los lugares en los que se prevé que esta transición de los HCE a eventos anuales se produzca más de 10 años después bajo el RCP2.6 en comparación con el RCP8.5. Ilustración del IPCC (Pörtner, y otros, 2019)..... 45

Ilustración 4-29: Distribución global de las islas y costas de baja altitud (LLIC) particularmente en riesgo por el aumento del nivel del mar Este mapa considera la Zona Costera de Baja Elevación, islas con una elevación máxima de 10 m sobre el nivel del mar (Weigelt et al., 2013), los Pequeños Estados Insulares en Desarrollo , las megaciudades costeras (ciudades con más de 10 millones de habitantes, a menos de 100 km de la costa y con un máximo de 50 m sobre el nivel del mar) y los deltas. Los cambios regionales del nivel del mar se refieren a las proyecciones según el RCP8.5 (2081-2100) Ilustración del IPCC (Pörtner, y otros, 2019) 46

Ilustración 4-30: La conservación, restauración o creación artificial de ecosistemas costeros juegan un papel importante en la adaptación al cambio climático (en la imagen superior izquierda un sistema dunar y en la derecha dique de arrecife artificial de Narrowneck, Australia). 47

Ilustración 4-31: Medidas de protección mediante la construcción de diques fijos (en la imagen de la izquierda The Surge Barrier en Louisiana, Nueva Orleans, USA) y móviles (en la imagen de la derecha la barrera de Maeslant Kering, Países Bajos). 48

Ilustración 4-32: Bajo escenarios de subida del nivel del mar (SLR) de 0,3 a 2,0 m es económicamente eficiente proteger el 13 % de la línea costera mundial, lo que corresponde al 90 % de la población mundial de las llanuras aluviales. En la imagen se muestra la solidez económica de la protección costera bajo escenarios de SLR de 0,3-2,0 m, las cinco Vías Socioeconómicas Compartidas (SSP) y tasas de descuento de hasta el 6%. Las costas están coloreadas según el porcentaje de escenarios en los que la relación beneficio-coste de la protección (reducción del riesgo de inundación dividido por el coste de la protección) es superior a 1. Ilustración de Global Environmental Change (Lincke & Hinkel, 2019). 48

Ilustración 4-33: Medidas de adecuación costera. 49

8 Índice de tablas.

| | |
|---|----|
| Tabla 3-1: Componentes del sistema climático que se espera que varíen y el sentido de su variación en un planeta más cálido..... | 13 |
| Tabla 3-2: Resumen de las principales proyecciones de cambio a corto plazo (hasta mediados del siglo XXI) referentes a la temperatura, ciclo del agua, circulación atmosférica, océanos y criosfera. En la última columna de la tabla se indica la probabilidad/nivel de confianza de las proyecciones. El término “Muy Probable” significa una probabilidad del 90-100%, “Probable” una probabilidad del 66-100% y “Más Probable que Improbable” del >50-100%. En nivel de confianza está relacionado con la evidencia y nivel de acuerdo (Stocker, y otros, 2013)..... | 14 |
| Tabla 3-3: Resumen de las principales proyecciones de cambio a largo plazo (a partir de mediados del siglo XXI en adelante) referentes a la temperatura, ciclo del agua, circulación atmosférica, océanos y criosfera. En la última columna de la tabla se indica la probabilidad/nivel de confianza de las proyecciones. El término “Prácticamente seguro” significa una probabilidad del 99-100%, “Muy Probable” una probabilidad del 90-100%, y “Probable” una probabilidad del 66-100% . En nivel de confianza está relacionado con la evidencia y nivel de acuerdo (Stocker, y otros, 2013). | 16 |
| Tabla 3-4: Tendencias de la frecuencia (o intensidad) de varios valores climáticos extremos .. | 18 |
| Tabla 4-1: Principales medidas de adaptación al cambio climático desde el punto de vista de la oferta de agua que los ingenieros y la ingeniería pueden aportar para permitir un aumento de la cantidad de recursos y una mejora de su calidad. | 37 |
| Tabla 4-2: Principales medidas de adaptación al cambio climático desde el punto de vista de la demanda de agua que los ingenieros y la ingeniería pueden aportar..... | 39 |
| Tabla 4-3: Resumen de las medidas frente a los riesgos de inundación y sequía contempladas en el informe del grupo de agua de la de la Federación Mundial de Organizaciones de Ingenieros, “Buenas prácticas en la gestión de sequías e inundaciones: La contribución de los ingenieros” (Estrela & Sancho, 2019)..... | 42 |
| Tabla 4-4: Principales respuestas de adaptación a la subida del nivel del mar (Pörtner, y otros, 2019). | 47 |