

3

Vínculos entre el cambio climático y los recursos hídricos: impactos y respuestas

3.1 Impactos observados del cambio climático

3.1.1 Efectos observados resultantes de cambios en la criosfera

Se han documentado efectos de los cambios experimentados por la criosfera respecto de casi todos sus componentes, con evidencia firme de que, en general, responden a la reducción de las masas de nieve y hielo por efecto de un mayor calentamiento.

3.1.1.1 *Glaciares de montaña y casquetes de hielo, mantos de hielo y plataformas de hielo*

Se han documentado efectos de los cambios experimentados por los glaciares y casquetes de hielo de montaña en términos de escorrenría (Kaser et al., 2003; Box et al., 2006), estados del tiempo peligrosos (Haeberli and Burn, 2002), y aumento de agua dulce en el océano (Bindoff et al., 2007). Empieza a haber también evidencia de que se está operando una elevación de la corteza terrestre en respuesta a la reciente fusión de glaciares en Alaska (Larsen et al., 2005). Este aumento del hielo fundido, al igual que la mayor duración de la estación de deshielo de los glaciares, generaría inicialmente un aumento de la escorrenría fluvial y crestas de caudal, mientras que a largo plazo (a escalas decenales o seculares) la escorrenría de los glaciares disminuiría (Jansson et al., 2003). Se han detectado ya indicios de que la escorrenría ha aumentado en decenios recientes, por efecto de la fusión de los glaciares en los Andes tropicales y en los Alpes. [GTI 4.6.2; GTII 1.3.1.1]

Está comenzando ya la formación de lagos, a medida que los glaciares se retiran de morrenas prominentes de la Pequeña Era Glacial (PEG) en varias cadenas montañosas escarpadas, y particularmente en el Himalaya (véase el Recuadro 5.4), en los Andes y en los Alpes. La fusión de los hielos subterráneos amenaza también desestabilizar las morrenas de la Pequeña Era Glacial. Los lagos glaciales conllevan, pues, una gran amenaza potencial de crecidas por desbordamiento. Las instituciones estatales de los respectivos países han emprendido obras de protección de gran magnitud, y varios de esos lagos han sido ya sólidamente protegidos mediante presas o drenados; es, sin embargo, necesaria una vigilancia continua, ya que sigue habiendo varias decenas de lagos glaciales potencialmente peligrosos en el Himalaya (Yamada, 1998) y en los Andes (Ames, 1998), y varios más en otras cadenas montañosas del mundo. [GTII 1.3.1.1]

La retracción de los glaciares ocasiona grandes cambios en el paisaje, que afectan a las condiciones de vida y al turismo local en muchas regiones montañosas del mundo (Watson and Haeberli, 2004; Mölg et al., 2005). En la Figura 5.10 pueden verse los efectos de la retracción del glaciar Chacaltaya sobre el paisaje local y la industria del esquí. El calentamiento da lugar a un mayor deshielo de los glaciares durante la primavera y el verano, particularmente en áreas de ablación, con la consiguiente pérdida de cubierta de nieve estacional, que ocasiona a una mayor exposición de las grietas superficiales, que a su vez

pueden afectar, por ejemplo, a las operaciones en las pistas de nieve, de lo que ya se ha tenido noticia en la Península Antártica (Rivera et al., 2005). [GTII 1.3.1.1]

3.1.1.2 *Cubierta de nieve y suelo congelado*

Debido a la menor extensión y permanencia de la cubierta de nieve, los caudales fluviales máximos de la primavera se han adelantando entre una y dos semanas en los últimos 65 años en América del Norte y en el norte de Eurasia. Hay también evidencia de un aumento del caudal de base durante los inviernos en el norte de Eurasia y en América del Norte, y se ha podido medir una tendencia a la disminución de la nieve en latitudes bajas, que está afectando a las superficies de esquí. [GTII 1.3.1.1]

La menor extensión de suelo estacionalmente congelado y de permafrost y el aumento de espesor de la capa activa han dado lugar a:

- desaparición de lagos por drenaje en el interior del permafrost, detectada en Alaska (Yoshikawa and Hinzman, 2003) y Siberia (véase la Figura 5.12) (Smith et al., 2005);
- un menor número de días aptos para viajar en vehículo por las carreteras heladas de Alaska; y
- una mayor erosión de la costa ártica (por ejemplo, Beaulieu and Allard, 2003).

[GTII 1.3.1.1, Capítulo 15]

3.1.2 Hidrología y recursos hídricos

3.1.2.1 *Cambios en los sistemas hídricos superficiales y subterráneos*

Desde las fechas del TIE, se han realizado numerosos estudios sobre las tendencias de los caudales fluviales durante el siglo XX, desde la escala de cuenca hasta la escala mundial. En algunos se han detectado tendencias apreciables respecto a ciertos indicadores del caudal fluvial, y en otros se han evidenciado vínculos estadísticamente significativos con las tendencias de la temperatura o de la precipitación; sin embargo, no se ha tenido noticia de ninguna tendencia homogénea a nivel mundial. Son muchos, con todo, los estudios que no han identificado tendencias o que no han conseguido disociar los efectos de las variaciones de temperatura y precipitación de los efectos de la intervención humana en las cuencas hidrográficas (por ejemplo, cambios de uso de la tierra, o construcción de embalses). En algunas regiones, la variación interanual del caudal fluvial está también muy influida por las pautas de la circulación atmosférica en gran escala asociadas a ENOA, ONA y otros sistemas de variabilidad que operan a escalas decenales y multidecenales. [GTII 1.3.2.1]

A escala mundial, hay evidencias de una pauta bastante coherente de cambio de la escorrenría anual, que en algunas regiones se manifestaría en un aumento (Tao et al., 2003a, b, respecto a China; Hyvarinen, 2003, respecto a Finlandia; Walter et al., 2004, respecto a Estados Unidos de América), particularmente en latitudes superiores, y en otras en una disminución, por ejemplo en partes del África occidental, sur de Europa y sur de América Latina (Milly et al., 2005). Labat et al. (2004) cifraron en un 4% el

aumento de la escorrentía total mundial por cada 1°C de aumento de la temperatura durante el siglo XX, con una variación regional en torno a esa tendencia, pero el dato ha sido puesto en duda, debido a los efectos de los dinamizantes no climáticos sobre la escorrentía y al error sistemático que conlleva el escaso número de puntos con datos (Legates et al., 2005). Gedney et al. (2006) ofrecieron la primera evidencia plausible de que el forzamiento por CO₂ provoca un aumento de la escorrentía debido al efecto de las elevadas concentraciones de CO₂ sobre la fisiología de las plantas, aunque es difícil encontrar evidencias que refuercen esa relación. La metodología utilizada para identificar tendencias puede influir también en los resultados, dado que, si se omiten los efectos de la correlación entre cuencas fluviales, podría sobreestimarse el número de cuencas hidrográficas que exhiben tendencias apreciables. (Douglas et al., 2000). [GTII 1.3.2.1]

El flujo subterráneo en acuíferos poco profundos forma parte del ciclo hidrológico, y resulta afectado por la variabilidad y el cambio climático por efecto de procesos de recarga (Chen et al., 2002) y por la intervención humana en numerosos lugares (Petheram et al., 2001). [GTII 1.3.2.1] Los niveles subterráneos de numerosos acuíferos del mundo han experimentado una tendencia decreciente durante los últimos decenios [GTII 3.2, 10.4.2], aunque ello se debe, por lo general, al bombeo de agua subterránea a un mayor ritmo que la recarga, y no a una disminución freática relacionada con el clima. Puede haber regiones en que, como sucede en el suroeste de Australia, el aumento del agua subterránea refleja no sólo un aumento de la demanda, sino también una disminución de la recarga procedente del agua superficial, vinculada al clima (Government of Western Australia, 2003). En la región superior de un acuífero carbonatado de las proximidades de Winnipeg, Canadá, los hidrógrafos situados en pozos poco profundos no revelan tendencias claras, aunque sí variaciones por períodos de 3 a 4 años, correlacionadas con los cambios de la temperatura y de la precipitación anuales (Ferguson and George, 2003). La falta de datos y la reacción extremadamente lenta de los sistemas freáticos al carácter variable de la recarga hacen que no se hayan observado cambios relacionados con el clima respecto a la recarga de agua subterránea. [GTII 1.3.2, 3.2]

En los niveles lacustres no se ha identificado, hasta el momento, ninguna tendencia coherente a nivel mundial. Mientras que algunos niveles lacustres han aumentado de nivel en Mongolia y China (Xinjiang) en respuesta a un mayor deshielo de la nieve y del hielo, otros lagos de China (Qinghai), Australia, África (Zimbabue, Zambia y Malawi), América del Norte (Dakota del Norte) y Europa (Italia central) han disminuido de nivel debido al efecto conjunto de la sequía, el calentamiento y las actividades humanas. En las áreas de permafrost del Ártico el reciente calentamiento ha dado lugar, con el comienzo del deshielo, a la formación temporal de lagos que pierden rápidamente agua debido a la degradación del permafrost (por ejemplo, Smith et al., 2005). Se ha tenido noticia de un efecto similar en el Ártico: la formación de un lago sobre un témpano de hielo (en otros términos, un lago epitempánico¹²), que desapareció al hundirse el témpano de hielo (Mueller et al., 2003).

El permafrost y los lagos epitempánicos se examinan en detalle en Le Treut et al. (2007). [GTII 1.3.2.1]

3.1.2.2 Calidad del agua

Durante los últimos decenios se ha podido observar un calentamiento de los lagos y ríos vinculado al clima. [GTII 1.3.2] En consecuencia, los ecosistemas de agua dulce han experimentado cambios que se manifiestan en términos de proporción relativa de sus especies, abundancia de organismos, productividad, y desplazamientos fenológicos (en particular, una migración más temprana de sus peces). [GTII 1.3.4] Debido al calentamiento, numerosos lagos han experimentado también una estratificación prolongada, con disminuciones de la concentración de nutrientes en su capa superficial [GTII 1.3.2] y un agotamiento prolongado del oxígeno en capas más profundas. [GTII, Recuadro 4.1] Debido a la presencia de importantes impactos antropógenos no relacionados con el cambio climático, no hay evidencia de tendencias coherentes relacionadas con el clima en otros parámetros de calidad del agua (por ejemplo, salinidad, patógenos o nutrientes) en lagos, ríos o aguas subterráneas. [GTII 3.2]

Estructura térmica de los lagos

Se ha tenido noticia de un aumento de las temperaturas del agua en los lagos en respuesta a unas condiciones más cálidas (Tabla 3.1). En la sección 2.1.2 y en Le Treut et al. (2007) se aborda el tema de la menor permanencia de la cubierta de hielo y de las disminuciones de espesor del hielo lacustre y fluvial. La dinámica del fitoplancton y la productividad primaria han resultado también alteradas, a la par que los cambios en las condiciones físicas de los lagos. [GTII 1.3.4.4, Figura 1.2, Tabla 1.6] Desde los años 60, las temperaturas del agua en superficie han aumentado entre 0,2 y 2,0°C en los lagos y ríos de Europa, América del Norte y Asia. Paralelamente al calentamiento de las aguas superficiales, la temperatura de las aguas profundas (que refleja las tendencias a largo plazo) ha incrementado entre 0,2 y 0,7°C, desde los comienzos del siglo XX, la temperatura de las aguas profundas (que refleja las tendencias a largo plazo) en los grandes lagos del África oriental (Edward, Alberto, Kivu, Victoria, Tanganica y Malawi). El aumento de temperatura del agua y la mayor duración de las estaciones sin hielo influyen en la estratificación térmica y en la hidrodinámica interna de los lagos. En los años más calidos, las temperaturas del agua en superficie son superiores, la pérdida de agua por evaporación aumenta, la estratificación estival se adelanta, y las termoclinas descienden de nivel. En varios lagos de Europa y América del Norte, el periodo de estratificación se ha adelantado hasta 20 días y se ha prolongado entre 2 y 3 semanas, con una mayor estabilidad térmica. [GTII 1.3.2.3]

Química

El aumento de la estratificación reduce el movimiento del agua a lo largo de la termoclina, inhibiendo el movimiento ascendente y el mezclado del agua, que aportan nutrientes esenciales a la red alimentaria. En ciertos lagos de Europa y del África oriental ha habido una disminución de nutrientes en aguas superficiales, con el consiguiente aumento de concentración en aguas profundas,

¹² Masa de agua, en su mayor parte dulce, atrapada tras una plataforma de hielo.

debido al aumento de la estabilidad térmica. Numerosos lagos y ríos presentan una mayor concentración de sulfatos, cationes básicos y sílice, y una mayor alcalinidad y conductividad vinculadas a una meteorización más acentuada de los silicatos, sulfatos de calcio y magnesio y carbonatos en sus cuencas. Por el contrario, cuando el aumento de la temperatura mejora el crecimiento vegetativo y el desarrollo del suelo en ciertos ecosistemas alpinos, la alcalinidad disminuye debido a una mayor aportación de ácidos orgánicos (Karst-Riddoch et al., 2005). En un lago subalpino de Canadá, el deshielo glacial incrementó la aportación de sustancias organocloradas (que habían sido transportadas por la atmósfera al glaciar, donde habían quedado almacenadas) (Blais et al., 2001). [GTII 1.3.2.3]

El aumento de la temperatura afecta también a los procesos químicos internos de los lagos (Tabla 3.1; véanse también en la Tabla SM1.3 del GTII otros cambios observados en las propiedades químicas del agua). Ha habido disminuciones del nitrógeno inorgánico disuelto, por efecto de una mayor productividad del fitoplancton (Sommaruga-Wograth et al., 1997; Rogora et al., 2003), de un aumento de la salinidad de los lagos, y de aumentos del pH en lagos de aguas blandas (Psenner and Schmidt, 1992). La menor solubilidad ocasionada por el aumento de las temperaturas contribuyó cuantiosamente al 11-13% de disminución de la concentración de aluminio (Vesely et al., 2003), mientras que en los lagos con temperaturas de agua más altas aumentaron la metilación y los niveles de mercurio en los peces (Bodaly et al., 1993). En el lago Baikal de Rusia se ha documentado una disminución del contenido de silicio relacionada con el calentamiento a nivel regional. En Japón, los

datos de calidad del agua de 27 ríos de ese país parecen indicar también un deterioro de las características químicas y biológicas, debido al aumento de la temperatura del aire. [GTII 1.3.2.3]

Erosión y sedimentación

La erosión producida por el agua ha aumentado en numerosas áreas del mundo, en gran parte a consecuencia de los cambios antropógenos de uso de la tierra. Por carecerse de datos, no hay evidencia a favor o en contra de que la erosión y el transporte de sedimentos hayan experimentado en el pasado cambios relacionados con el clima. [GTII 3.2]

3.1.2.3 Crecidas

Los procesos de crecida están influidos por diversos procesos climáticos y no climáticos que originan crecidas fluviales, crecidas repentinas, inundaciones urbanas, inundaciones de la red de alcantarillado, crecidas por desbordamiento de lagos glaciales (véase el Recuadro 5.4) y crecidas costeras. Son procesos causantes de crecidas la precipitación intensa y/o prolongada, el deshielo de nieve, la rotura de presas, o la menor capacidad de transporte por la presencia de obstáculos de hielo, por deslizamientos de tierra o a causa de crecidas ocasionadas por tormentas. Las crecidas dependen de la intensidad, volumen, fechas, fase (lluvia o nieve) de la precipitación, así como del estado previo de los ríos y de sus cuencas de drenaje (por ejemplo, presencia de nieve y hielo, carácter y estado del suelo (helado o no, saturado o no), de la humedad, de la tasa y fechas del deshielo de la nieve o del hielo, de la urbanización, y de la existencia de diques, presas o embalses. La intervención humana en las llanuras inundables y la ausencia de planes de respuesta

Tabla 3.1: Cambios observados en términos de escorrentía/caudal, de niveles lacustres y de crecidas/sequías. [GTII, Tabla 1.3]

Factor medioambiental	Cambios observados	Periodo de tiempo	Ubicación
Escorrentía/caudal	Incremento anual de 5%, incremento invernal de 25-90%, incremento del caudal básico invernal debido a un aumento del deshielo y de la fusión del permafrost.	1935–1999	Cuenca de drenaje ártica: Ob, Lena, Yenisey, Mackenzie
	Adelanto en una o dos semanas del caudal máximo debido a un deshielo más temprano por efecto del calentamiento.	1936–2000	Oeste de América del Norte, Nueva Inglaterra, Canadá, norte de Eurasia
Crecidas	Más crecidas catastróficas de frecuencia (0,5-1%) debido al adelanto del deshielo fluvial y a lluvias intensas	Años recientes	Ríos árticos de Rusia
Sequías	Disminución de un 29% del caudal diario máximo anual debido al aumento de temperatura y a una mayor evaporación sin cambios de precipitación.	1847–1996	Sur de Canadá
	Sequías producidas por veranos secos y anormalmente cálidos relacionados con el calentamiento del Pacífico tropical occidental y del Índico en años recientes.	1998–2004	Oeste de Estados Unidos de América
Temperatura del agua	Aumento de 0,1 a 1,5°C en los lagos	40 años	Europa, América del Norte, Asia (100 estaciones)
	Aumento de 0,2 a 0,7°C en los lagos (aguas profundas)	100 años	África oriental (6 estaciones)
Química del agua	Disminución de nutrientes debida a una creciente estratificación o a periodos de crecimiento más prolongados en lagos y ríos	100 años	América del Norte, Europa, Europa oriental, África oriental (8 estaciones)
	Creciente deterioro de las cuencas o de los procesos internos en lagos y ríos	10-20 años	América del Norte, Europa (88 estaciones)

frente a las crecidas agravan la posibilidad de ocasionar daños. [GTII 3.4.3] El aumento de intensidad de la precipitación y otros cambios climáticos igualmente observados (por ejemplo, una acentuación de las pautas meteorológicas del viento del oeste en Europa durante los inviernos, causante de sistemas de bajas presiones muy lluviosos que suelen ocasionar crecidas (Kron and Berz, 2007)) indican que el cambio climático podría haber influido ya en la magnitud y frecuencia de las crecidas. [GTII 3.2] El Resumen para responsables de políticas del 4IE del Grupo de Trabajo I concluyó que es *probable* que a finales del siglo XX haya aumentado la frecuencia de episodios de precipitación intensa en la mayoría de las áreas, y que es *más probable que improbable* que haya habido una contribución humana a esa tendencia. [GTI, Tabla RRP-2]

En los últimos diez años (1996-2005) se ha duplicado en todo el mundo el número de grandes crecidas catastróficas por decenio respecto del acaecido entre 1950 y 1980, mientras que sus pérdidas económicas se han multiplicado por cinco (Kron and Berz, 2007). En la tendencia creciente de los daños causados por crecidas han predominado los factores socioeconómicos, como el crecimiento económico, el aumento de población y de riqueza concentrados en áreas vulnerables, y los cambios de uso del suelo. El desastre natural más frecuente en numerosas regiones han sido las crecidas, que han afectado en promedio a 140 millones de personas cada año (WDR, 2003, 2004). En Bangladesh, durante la crecida de 1998, se inundó un 70% de la superficie del país aproximadamente (frente a un valor medio de 20-25%) (Mirza, 2003; Clarke and King, 2004). [GTII 3.2]

Los daños producidos por las crecidas han aumentado más rápidamente que la población o que el crecimiento económico, por lo que habrá que tener en cuenta otros factores, entre ellos el cambio climático (Mills, 2005). La evidencia observacional apunta claramente a una aceleración continua del ciclo hídrico (Huntington, 2006). [GTII 3.4.3] La frecuencia de los episodios de precipitación intensa ha aumentado, lo cual concuerda con el calentamiento y con los aumentos observados del vapor de agua atmosférico. [GTI RRP, 3.8, 3.9] Sin embargo, no se aprecia ningún aumento generalizado de las tendencias documentadas respecto a los grandes caudales fluviales. Aunque Milly et al. (2002) identificaron, en base al análisis de datos de cuencas hidrográficas, un aumento aparente de la frecuencia de “grandes” crecidas (período de retorno >100 años) en la mayor parte del planeta, estudios subsiguientes han aportado una evidencia menos amplia. Kundzewicz et al. (2005) identificaron aumentos (en 27 lugares) y disminuciones (en 31 lugares), y no apreciaron ninguna tendencia en las restantes 137 cuencas de las 195 examinadas en todo el mundo. (2005) [GTII 1.3.2.2]

3.1.2.4 Sequías

El término sequía puede hacer referencia a la sequía meteorológica (precipitación bastante inferior al promedio), hidrológica (caudales fluviales bajos y niveles bajos en ríos, lagos y aguas subterráneas), agrícola (humedad del suelo baja) o medioambiental (combinación de las anteriores). Los efectos socioeconómicos de las sequías pueden provenir de la interacción entre las condiciones naturales y ciertos factores humanos, como los cambios de uso de la tierra, de la cubierta

de suelo, o de la demanda y uso de agua. Una demanda de agua excesiva puede exacerbar el impacto de la sequía. [GTII 3.4.3]

Desde los años 70, las sequías se han hecho más comunes, particularmente en las áreas tropicales y subtropicales. El Resumen para responsables de políticas del 4IE del Grupo de Trabajo I concluyó que es *probable* que la superficie afectada por la sequía haya aumentado desde los años 70, y que es *más probable que improbable* que haya habido una contribución humana a esa tendencia. [GTI, Tabla RRP-2] La disminución de la precipitación sobre tierra firme y el aumento de las temperaturas, que han incrementado la evapotranspiración y reducido la humedad del suelo, son factores importantes que han contribuido a la aparición de sequías en un mayor número de regiones, según el Índice Palmer de Severidad de Sequías (PDSI) (Dai et al., 2004b). [GTII 3.3.4]

Las regiones que han experimentado sequías parecen estar determinadas en gran medida por los cambios de la temperatura de la superficie del mar, especialmente en los trópicos, por efecto de los consiguientes cambios de la circulación atmosférica y de la precipitación. En el oeste de Estados Unidos de América, la disminución de los bancos de nieve y la subsiguiente disminución de la humedad del suelo parecen ser también factores determinantes. En Australia y Europa se han inferido vínculos directos con el calentamiento mundial, basándose en el carácter extremo de las altas temperaturas y de las olas de calor que han acompañado a las sequías recientes. [GTI 3.RE, 3.3.4]

Basándose en el PDSI, Dai et al. (2004b) identificaron una notable tendencia al aumento de la sequedad terrestre en el Hemisferio Norte desde mediados de los años 50, con sequedad generalizada en buena parte de Eurasia, norte de África, Canadá y Alaska (Figura 3.1). En el Hemisferio Sur, la superficie terrestre era húmeda en los años 70 y relativamente seca en los 60 y 90, y entre 1974 y 1998 hubo una tendencia al aumento de la sequedad, aunque durante el periodo 1948-2002 las tendencias fueron débiles. Las disminuciones de la precipitación terrestre en los últimos decenios son la causa principal de las tendencias secas, aunque es *probable* que el elevado calentamiento de la superficie durante los 2 o 3 últimos decenios haya contribuido a ellas. A nivel mundial, las áreas muy secas (definidas como áreas terrestres con un PDSI inferior a -3,0) han aumentado a más del doble (de ~12% a 30%) desde los años 70, con un gran salto a principios de los años 80 debido a una disminución de la precipitación terrestre relacionada con ENOA, y con aumentos posteriores debidos, principalmente, al calentamiento en superficie (Dai et al., 2004b). [GTI 3.3.4]

Las sequías afectan a la producción agrícola pluvial, así como al abastecimiento de agua para fines domésticos, industriales y agrícolas. Algunas regiones semiáridas y subhúmedas como, por ejemplo, Australia [GTII 11.2.1], el oeste de Estados Unidos de América y sur de Canadá [GTII 14.2.1], o el Sahel (Nicholson, 2005), han padecido sequías más intensas durante varios años. [GTII 3.2]

La ola de calor europea de 2003, atribuible al calentamiento mundial (Schär et al., 2004), estuvo acompañada de déficits de precipitación anual de hasta 300 mm. Esta sequía contribuyó a una

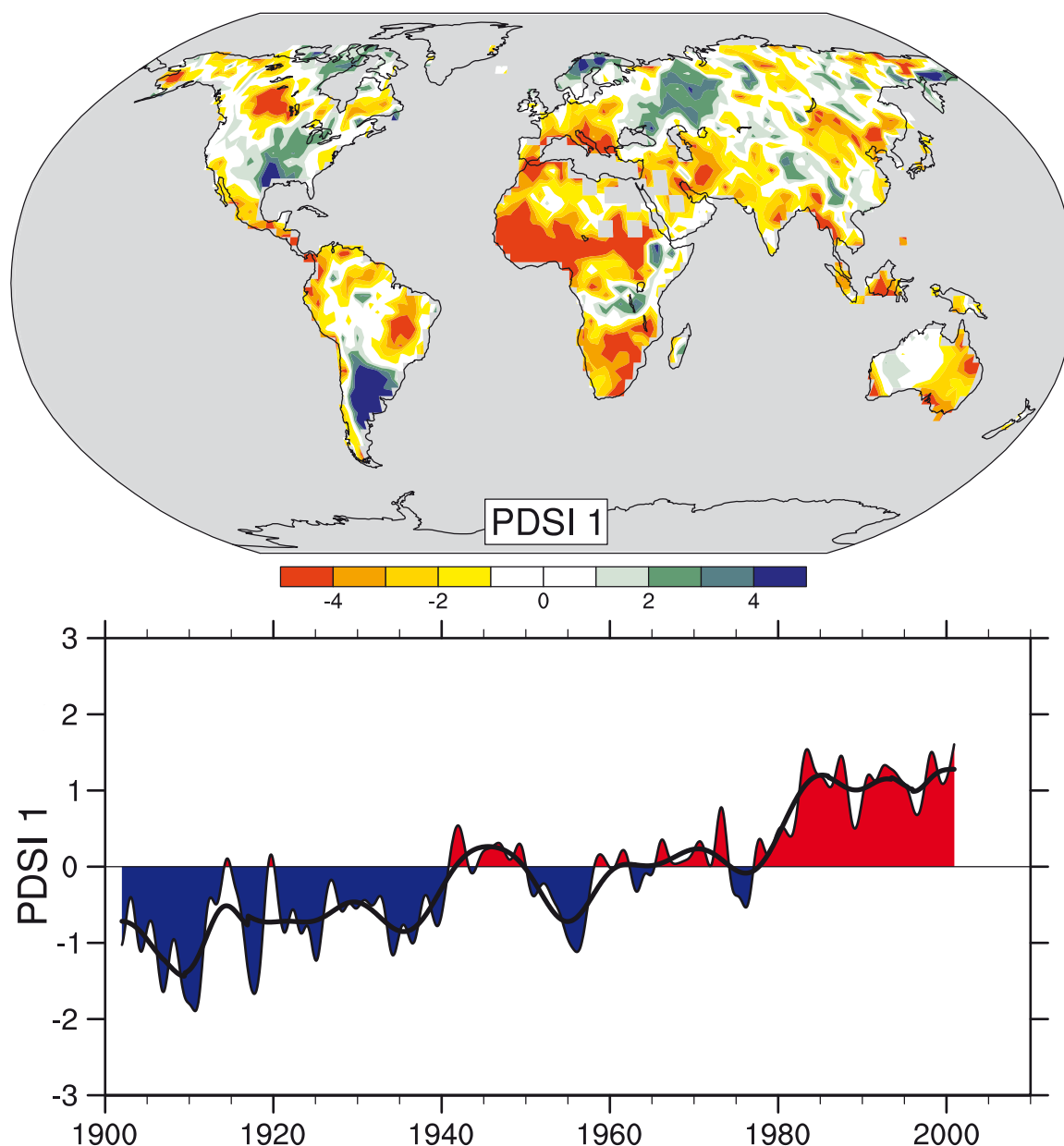


Figura 3.1: La más importante de las pautas espaciales (primero de los principales componentes analizados; figura superior) del Índice Palmer de Severidad de Sequía (PDSI) mensual en el período 1900-2002. El PDSI es un índice de sequía que mide el déficit acumulado (tomando como referencia las condiciones medias locales) en la humedad superficial del suelo mediante la incorporación de la precipitación precedente y de estimaciones de la humedad presente en la atmósfera (en base a las temperaturas atmosféricas) en un sistema de contabilidad hidrológica¹³. En el gráfico inferior puede verse la evolución del signo y magnitud de esta pauta desde 1900. Cuando los valores representados en el gráfico inferior son positivos (o negativos), las áreas rojas y anaranjadas del mapa superior son más secas (o más húmedas) y las áreas azules y verdes son más húmedas (o más secas) que los valores promediados. La curva negra alisada indica las variaciones decenales. La serie temporal se corresponde aproximadamente con una tendencia, y tanto esta pauta como sus variaciones representan un 67% de la tendencia lineal del PDSI entre 1900 y 2002 en toda la superficie terrestre mundial. Indica, por consiguiente, una mayor sequía generalizada en África, especialmente en el Sahel, por ejemplo. Obsérvense también las áreas más cálidas, particularmente en el este de América del Norte y del Sur y en el norte de Eurasia (según Dai et al., 2004b). [GTI FAQ 3.2]

¹³ Obsérvese que el PDSI no proporciona un modelo realista de la sequía en regiones en que la precipitación es en forma de nieve, por ejemplo en las regiones polares.

reducción, estimada en un 30%, de la producción primaria bruta de los ecosistemas terrestres en Europa (Ciais et al., 2005). Muchos grandes ríos (por ejemplo, el Po, el Rin, el Loira o el Danubio) registraron niveles bajos sin precedentes, que provocaron trastornos en la navegación interior, en los riegos y en la refrigeración de las plantas eléctricas (Beniston and Diaz, 2004; Zebisch et al., 2005). Los valores extremos del deshielo en los glaciares alpinos impidieron que se alcanzasen caudales todavía menores en el Danubio y en el Rin (Fink et al., 2004). [GTII 12.6.1]

3.2 Cambios futuros respecto a la disponibilidad y demanda de agua por efecto del cambio climático

3.2.1 Dinamizantes climáticos de los sistemas de agua dulce en el futuro

Los principales dinamizantes climáticos que determinan la disponibilidad de agua son la precipitación, la temperatura y la demanda evaporativa (determinada por la radiación neta en la superficie del terreno, la humedad atmosférica, la velocidad del viento y la temperatura). La temperatura tiene particular importancia en las cuencas con predominio de nieve y en las áreas costeras, en este último caso por el impacto de la temperatura sobre el nivel del mar (aumento estérico del nivel del mar por dilatación térmica del agua). [GTII 3.3.1]

En la sección 2.3 se describen los cambios proyectados respecto de esos componentes del balance hídrico. En pocas palabras, la escorrentía fluvial anual total en el conjunto de la superficie terrestre aumentaría, aun cuando haya regiones en que el aumento o la disminución sean considerables. Sin embargo, el aumento de la escorrentía no será plenamente utilizable a menos que haya una infraestructura adecuada para captar y almacenar el excedente de agua. En los océanos, el término “evaporación menos precipitación” aumentaría.

3.2.1.1 Agua subterránea

El cambio climático afecta a la rapidez de recarga de las aguas subterráneas (es decir, a los recursos freáticos renovables) y al espesor de las masas freáticas. Sin embargo, no es mucho lo que se sabe sobre la recarga y los niveles actuales, tanto para los países desarrollados como en desarrollo; además, ha habido muy pocas investigaciones sobre el impacto futuro del cambio climático sobre las aguas subterráneas, o sobre las interacciones entre el agua subterránea y el agua superficial. En latitudes altas, la descongelación del permafrost produce cambios tanto del nivel como de la calidad de las aguas subterráneas, debido a un mayor acoplamiento con las aguas superficiales. [GTII 15.4.1] Dado que en muchos casos las masas freáticas van a parar a la superficie o se recargan mediante aguas superficiales, sería de esperar que los regímenes de flujo del agua de superficie afectasen a las aguas subterráneas. Una mayor variabilidad de la precipitación podría reducir la recarga freática en áreas húmedas, dado que una mayor asiduidad de la precipitación intensa podría rebasar con mayor frecuencia la capacidad de

infiltración del suelo. En áreas semiáridas y áridas, sin embargo, una mayor variabilidad de la precipitación puede acrecentar la recarga de agua subterránea, dado que sólo las lluvias muy intensas pueden llegar a infiltrarse antes de evaporarse, y que los acuíferos aluviales se recargan principalmente de inundaciones causadas por crecidas. [GTII 3.4.2]

Según los resultados de un modelo hidrológico mundial (véase la Figura 3.2), la recarga de agua subterránea, promediada a nivel mundial, aumentaría menos que la escorrentía total (un 2%, frente al 9% registrado hasta los años 2050 como respuesta, en términos de cambio climático, al escenario A2 del IE EE mediante el modelo ECHAM4: Döll and Flörke, 2005). En base a los cuatro escenarios de cambio climático investigados (los modelos de circulación general ECHAM4 y HadCM3 con los escenarios de emisiones A2 y B2¹⁴ del IE-EE), se calculó que la recarga de agua subterránea disminuiría hasta el decenio de 2050 en más de un 70% en el nordeste de Brasil, suroeste de África y la franja meridional del Mar Mediterráneo. Sin embargo, dado que en ese estudio no se ha tenido en cuenta el aumento esperado de la variabilidad de la precipitación diaria, la disminución podría estar ligeramente sobreestimada. Cuando el espesor de la capa freática aumenta y la recarga de agua subterránea disminuye, peligran los humedales que dependen de acuíferos y de la escorrentía fluvial de base durante las estaciones secas. Algunas de las regiones en que la recarga de agua subterránea aumentaría, según los cálculos, en más de un 30% de aquí a 2050 son el Sahel, el Oriente próximo, el norte de China, Siberia, y el oeste de Estados Unidos de América. En áreas en que el nivel freático es ya alto, un aumento de la recarga podría ocasionar problemas de salinización de suelos urbanos y agrícolas y de suelos anegados. [GTII 3.4.2]

Los escasos estudios relativos a los impactos del cambio climático sobre las aguas subterráneas en determinados acuíferos arrojan resultados vinculados muy específicamente al lugar y al modelo climático (véase, por ejemplo, Eckhardt and Ulbrich, 2003, referido a una cuenca de una cadena baja de montañas de la Europa central; o Brouyere et al., 2004, referido a un acuífero calcáreo de Bélgica). Así, por ejemplo, en la región del acuífero Ogallala la recarga natural de agua subterránea disminuiría en más de un 20% en todas las simulaciones basadas en un calentamiento de 2,5°C o superior (Rosenberg et al., 1999). [GTII 14.4] Por efecto del cambio climático, en numerosos acuíferos del mundo la recarga primaveral se desplazaría hacia el invierno, y la recarga estival disminuiría. [GTII 3.4.2]

3.2.1.2 Crecidas

Como se ha visto en la sección 2.3.1, las proyecciones indican que los episodios de precipitación intensa serían más frecuentes en la mayoría de las regiones durante el siglo XXI. Ello afectaría al riesgo de crecidas repentinas y de inundaciones en núcleos urbanos. [GTI 10.3.5, 10.3.6; GTII 3.4.3] En la Tabla 3.2 se muestran algunos posibles impactos.

En un análisis multimodelos, Palmer and Räisänen (2002) obtuvieron proyecciones que apuntaban a un incremento considerable del riesgo de un invierno muy lluvioso en buena

¹⁴ Véanse el Apéndice I las descripciones de estos modelos.

parte de Europa central y septentrional, debido a un aumento de las precipitaciones intensas asociadas a las tempestades en latitudes medias. Una duplicación del CO₂ sobre extensas áreas de Europa conllevaría un aumento considerable (en un factor de cinco a siete) de la probabilidad de que la precipitación invernal boreal total exceda del doble de la desviación típica respecto a los valores normales, con efectos *probables* sobre el riesgo de crecidas invernales. Otras proyecciones indican un mayor riesgo de estaciones monzónicas muy lluviosas en Asia (Palmer and Räisänen, 2002). Según Milly et al. (2002), si se cuadruplicase la cantidad de CO₂ se rebasarían con mayor frecuencia los volúmenes máximos de control (período: 100 años) del caudal fluvial mensual en 15 de las 16 grandes cuencas del mundo. En algunas áreas, lo que actualmente

se considera una crecida secular (en la sesión de control) ocurriría con una frecuencia mucho mayor, incluso cada 2 a 5 años, aunque con una gran incertidumbre en las proyecciones. En muchas regiones templadas es *probable* que disminuya la contribución del deshielo de nieve a las crecidas primaverales. (Zhang et al., 2005). [GTII 3.4.3]

Según ciertos modelos climáticos, la superficie inundada de Bangladesh aumentaría en al menos 23%-29% para un aumento de la temperatura mundial de 2°C (Mirza, 2003). [GTII 3.4.3]

La reducción de la cubierta de neviza¹⁵ sobre los glaciares por efecto del calentamiento produce un aumento inmediato de la

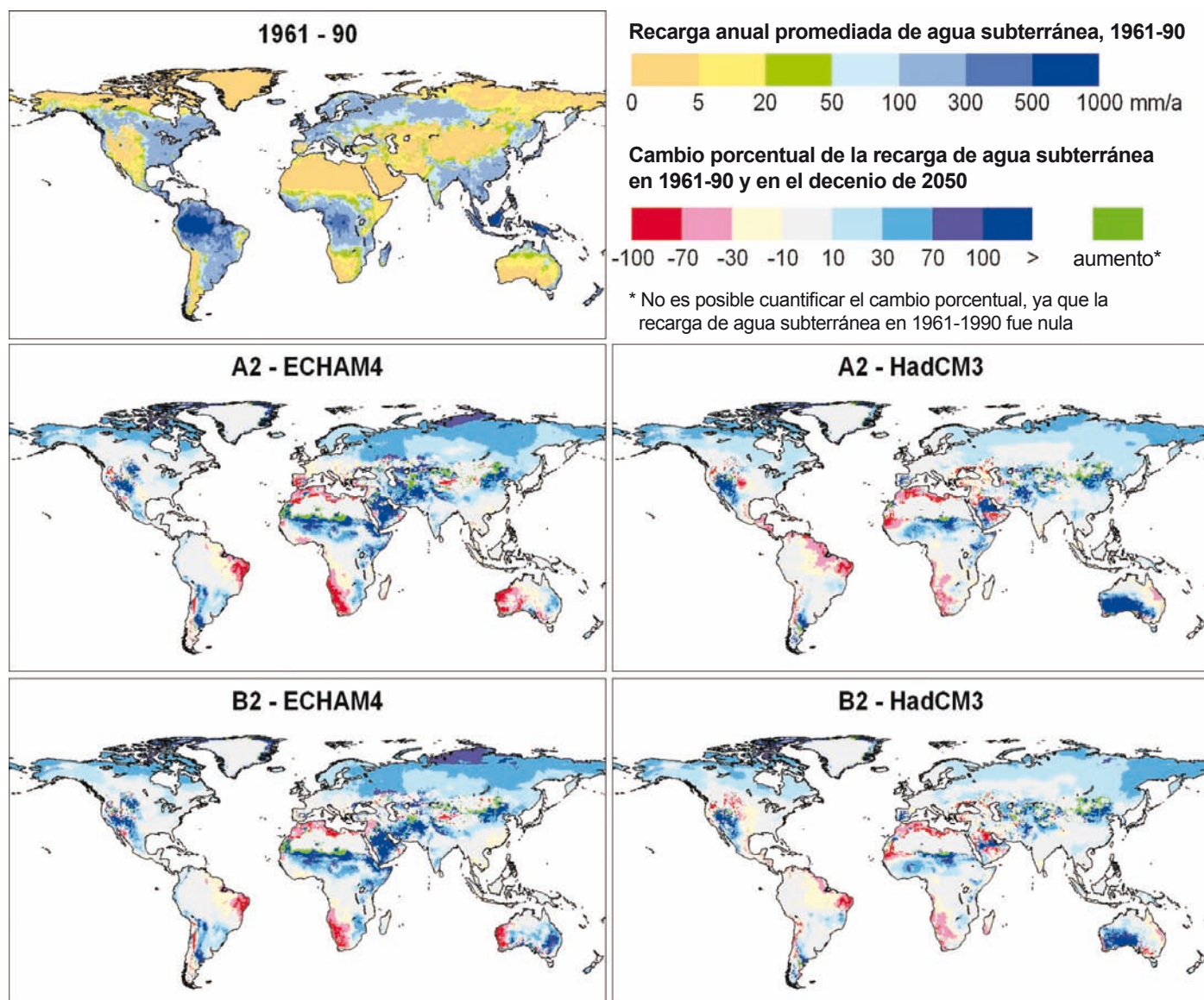


Figura 3.2: Impacto simulado del cambio climático sobre la recarga difusa anual de agua subterránea promediada a largo plazo. Cambios porcentuales de la recarga promediada de agua subterránea en 30 años desde la fecha actual (1961-1990) hasta el decenio de 2050 (2041-2070), calculados mediante el modelo hidrológico mundial WGHM, para cuatro escenarios diferentes de cambio climático (tomando como base los modelos climáticos ECHAM4 y HadCM3 y los escenarios de emisión A2 y B2 del IE-EE) (Döll and Flörke, 2005). [GTII, Figura 3.5]

¹⁵ Neviza: nieve antigua (todavía permeable) que se encuentra en un estado intermedio de conversión en hielo glacial (impermeable).

escorrentía de agua de deshielo, que puede generar crecidas en los ríos alimentados por glaciares. [GTII 3.4.3]

Hay cierto grado de incertidumbre en las estimaciones de la evolución futura de la frecuencia de crecidas en el Reino Unido. Según el modelo climático utilizado, la importancia que revistan la contribución del deshielo de nieve y las características y ubicación de las cuencas, el impacto del cambio climático sobre el régimen de crecidas (magnitud y frecuencia) puede ser positivo o negativo, lo cual pone de relieve la incertidumbre que subsiste respecto a los impactos del cambio climático. (Reynard et al., 2004). [GTII 3.4.3]

3.2.1.3 Sequías

Es probable que aumente la superficie afectada por las sequías. [GTI RRP] En áreas continentales medias, la humedad tiende a

disminuir durante los veranos, lo cual apunta a un mayor riesgo de sequía en esas regiones. [GTI 10.RE] Según un estudio de la frecuencia mundial de sequías, basado en un único modelo, la proporción de superficie terrestre que experimenta sequías extremas en algún momento, la frecuencia de episodios de sequía extrema y la duración media de las sequías aumentarían, de aquí a los años 2090, en un factor de 10 a 30, de 2 y de 6, respectivamente, en base al escenario A2 del IE-EE (Burke et al., 2006). [GTI 10.3.6; GTII 3.4.3] Una disminución de la precipitación estival en el sur y centro de Europa, acompañada de un aumento de las temperaturas (que acrecienta la demanda evaporativa), daría lugar inevitablemente a una menor humedad del suelo en verano (Douville et al., 2002; Christensen et al., 2007) y a una mayor frecuencia e intensidad de las sequías. [GTII 3.4.3] Como puede verse en la Figura 3.3, de aquí al decenio de 2070 las sequías de magnitud actualmente vinculada a un período de retorno de 100

Tabla 3.2: Ejemplos de posibles impactos del cambio climático por efecto del cambio respecto a los fenómenos atmosféricos y climáticos extremos, en base a proyecciones que abarcan hasta mediados-finales del siglo XXI. Estos ejemplos no contemplan cambios o novedades respecto a la capacidad adaptativa. Las estimaciones de probabilidad de la columna 2 corresponden a los fenómenos indicados en la columna 1. La dirección de la tendencia y la verosimilitud de los fenómenos son corresponden a las proyecciones de cambio climático del IE-EE del IPCC. [GTI, Tabla RRP-2; GTII, Tabla RRP-2]

Fenómeno ^a y dirección de la tendencia	Verosimilitud de las tendencias futuras en base a proyecciones para el siglo XXI mediante escenarios IE-EE	Ejemplos de los principales impactos proyectados, por sectores			
		Agricultura, silvicultura y ecosistemas [4.4, 5.4]	Recursos hídricos [3.4]	Salud humana [8.2]	Industria, asentamientos y sociedad [7.4]
Episodios de precipitación intensa: Aumento de la frecuencia en la mayoría de las áreas	Muy probable	Daños a los cultivos; erosión del suelo; imposibilidad de cultivar tierras por anegamiento de los suelos	Efectos adversos sobre la calidad del agua superficial y subterránea; polución de los suministros de agua; posiblemente menor escasez de agua	Mayor riesgo de defunciones, lesiones y enfermedades infecciosas, respiratorias y dérmicas	Alteración de los asentamientos, del comercio, del transporte y de las sociedades por efecto de las crecidas: presiones sobre las infraestructuras urbanas y rurales; pérdidas de bienes
Aumento del área afectada por la sequía	Probable	Degradación del suelo; disminución de los rendimientos/daños a los cultivos; más cabezas de ganado muertas; mayores riesgos de incendios forestales	Mayor extensión del estrés hídrico	Mayor riesgo de escasez de alimentos y de agua; mayores riesgos de malnutrición; mayor riesgo de enfermedades transmitidas por el agua y los alimentos	Escasez de agua para asentamientos, industrias y sociedades; menor potencial de generación hidroeléctrica; posibles migraciones de la población
Aumento de la actividad ciclónica tropical	Probable	Daños a los cultivos; árboles desgajados por el viento; daños a los arrecifes de coral	Interrupciones del suministro eléctrico que alteran el abastecimiento de agua para la población	Mayor riesgo de defunciones, lesiones, enfermedades transmitidas por el agua y por los alimentos; trastornos de estrés postraumático	Trastornos causados por crecidas y vientos fuertes; denegación de seguros por aseguradoras privadas en áreas vulnerables; posibilidad de migraciones de la población; pérdida de bienes

^a Véase en la Tabla 3.7 del Cuarto Informe de evaluación del Grupo de trabajo I una explicación más detallada de las definiciones.

años¹⁶ tendrían, en promedio, períodos de retorno inferiores a 10 años en ciertas partes de España y Portugal, el oeste de Francia, la cuenca del Vístula en Polonia y el oeste de Turquía (Lehner et al., 2005). [GTII 3.4.3]

En la Tabla 3.2 pueden verse algunos de los impactos del aumento de la superficie afectada por sequías. El deshielo de la nieve se adelantaría y sería menos abundante, lo cual podría acrecentar el riesgo de sequía en cuencas alimentadas por nieve fundida durante la temporada de caudal bajo, es decir, en los veranos y otoños. El riesgo de sequía aumentaría en las regiones más dependientes del deshielo de los glaciares para su abastecimiento de agua durante la temporada seca (Barnett et al., 2005). En los Andes, el agua de los glaciares contribuye al caudal fluvial y al suministro de agua para decenas de millones de personas durante la larga estación seca. En los próximos decenios se espera que

desaparezcan gran número de glaciares pequeños, por ejemplo en Bolivia, Ecuador y Perú (véase Ramírez et al., 2001; Recuadro 5.5). En áreas abastecidas por el deshielo de los glaciares y de la nieve del Hindu Kush y del Himalaya, de los que dependen centenares de millones de personas en China, Pakistán e India, el suministro de agua se verá afectado negativamente (Barnett et al., 2005). [GTII 3.4.3]

3.2.1.4 Calidad del agua

Las proyecciones indican que el aumento de la temperatura del agua y de la intensidad de precipitación, sumado a unos periodos de caudal bajo más prolongados, potenciarían muchas fuentes de polución del agua, en particular sedimentos, nutrientes, carbono orgánico disuelto, patógenos, plaguicidas, sal y temperatura. Ello fomentaría la floración de algas (Hall et al., 2002; Kumagai et al., 2003) y engrosaría el contenido de bacterias y hongos

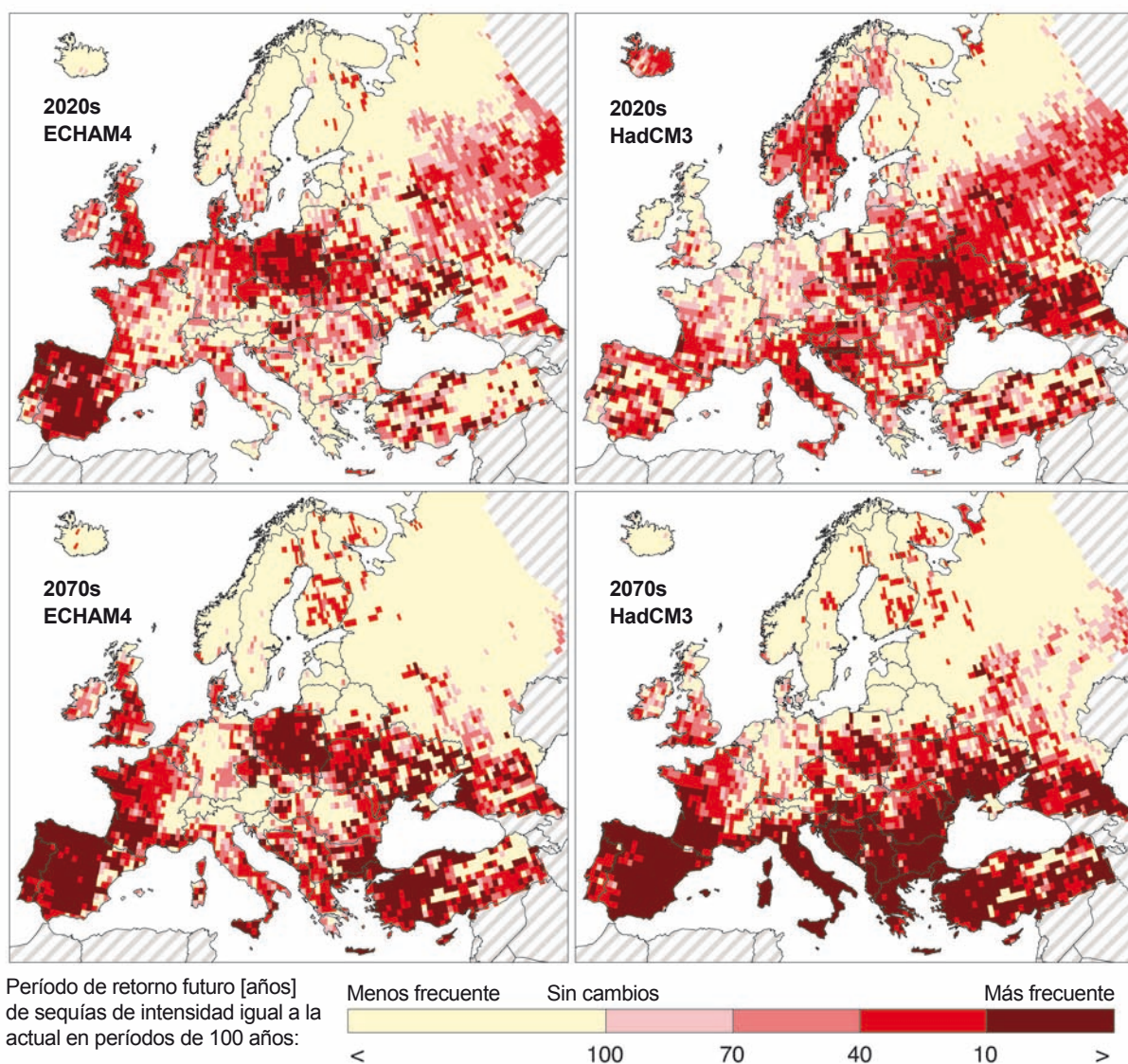


Figura 3.3: Cambio de la recurrencia futura de sequías por períodos de 100 años, basada en comparaciones entre el clima y el uso de agua en 1961-1990 (Lehner et al., 2005). [GTII, Figura 3.6]

¹⁶ Cada año, la posibilidad de superar una crecida con un período de retorno de 100 años es de 1%, mientras que para las crecidas con período de retorno de 10 años es de 10%.

(Environment Canada, 2001). Esto, a su vez, afectará a los ecosistemas, a la salud humana, y a la fiabilidad y costos de funcionamiento de los sistemas hídricos. [GTII 3.RE]

Es *probable* que el aumento de las temperaturas deteriore la calidad del agua en los lagos, debido a una mayor estabilidad térmica y a una alteración de las pautas de mezclado, dando lugar a una menor concentración de oxígeno y a una más abundante liberación de fósforo de los sedimentos. A título de ejemplo, las concentraciones de fósforo en una bahía del lago Ontario, de por sí altas durante el verano, podrían duplicarse si la temperatura del agua aumentara entre 3 y 4 grados (Nicholls, 1999). Sin embargo, el aumento de las temperaturas podría mejorar también la calidad del agua durante los inviernos y las primaveras por efecto de un deshielo más temprano y, por consiguiente, de unos niveles de oxígeno más altos y de una menor mortandad de peces durante los inviernos. [GTII 4.4.8, 14.4.1]

Una mayor intensidad de lluvia hará aumentar la abundancia de partículas sólidas en suspensión (turbidez) en lagos y embalses debido a la erosión fluvial del suelo (Leemans and Kleidon, 2002), e incorporará sustancias poluyentes (Mimikou et al., 2000; Neff et al., 2000; Bouraoui et al., 2004). El aumento de la intensidad de precipitación deterioraría la calidad del agua, debido a un mayor transporte de patógenos y de otros poluyentes disueltos (por ejemplo, plaguicidas) hacia las aguas superficiales y subterráneas, y al aumento de la erosión, que a su vez moviliza la adsorción de sustancias poluyentes, como el fósforo o los metales pesados. Además, una mayor asiduidad de lluvias intensas sobrecargaría con mayor frecuencia la capacidad de los sistemas de alcantarillado y de las plantas de tratamiento de aguas de desecho. [GTII 3.4.4] Si los niveles de caudal bajos se hacen más frecuentes, disminuirá la capacidad de dilución de contaminantes y aumentará la concentración de sustancias poluyentes, en particular los patógenos. [GTII 3.4.4, 14.4.1] En las áreas en que la escorrentía, en conjunto, disminuya (por ejemplo, en numerosas áreas semiáridas), el deterioro de la calidad del agua será incluso mayor.

En áreas semiáridas y áridas, es *probable* que el cambio climático acentúe la salinización de las aguas subterráneas poco profundas, debido a un aumento de la evapotranspiración. [GTII 3.4.2] Los caudales fluviales disminuirían en numerosas áreas semiáridas, por lo que aumentaría la salinidad en ríos y estuarios. [GTII 3.4.4] Así, por ejemplo, los niveles de salinidad en la cabecera de la cuenca de Murray-Darling, en Australia, aumentarían entre un 13% y un 19% de aquí a 2050 (Pittock, 2003). En términos generales, una menor recarga de agua subterránea, que reduce la movilización de sales subterráneas, puede compensar el efecto de una menor dilución de sales en ríos y estuarios. [GTII 11.4]

En áreas costeras, el aumento del nivel del mar podría tener efectos negativos sobre el drenaje del agua de tempestad y la evacuación de aguas de desecho [GTII 3.4.4], y podría acentuar la intrusión de agua salada en las aguas subterráneas dulces de los acuíferos costeros, afectando así negativamente a los recursos de agua subterránea. [GTII 3.4.2] En dos islas coralinas pequeñas y llanas, cerca de las costas de India, se ha calculado que, si el nivel del mar aumentase en sólo 0,1 m, el espesor del lentejón de agua dulce disminuiría de 25 m a 10 m, y de 36 m a 28 m, respectivamente, (Bobba et al., 2000). Cualquier disminución de la recarga de los acuíferos agravará los efectos del aumento del nivel del mar. En los acuíferos terrestres, una menor recarga de agua subterránea podría ocasionar la intrusión de agua salada de acuíferos salinos cercanos (Chen et al., 2004). [GTII 3.4.2]

3.2.1.5 Erosión hídrica y sedimentación

Todos los estudios de erosión del suelo indican que el aumento esperado de la intensidad pluvial produciría una mayor erosión. [GTII 3.4.5] Además, la transformación de la precipitación invernal, de nieve y menos erosiva, en precipitación pluvial más erosiva por efecto del aumento de las temperaturas invernales agravaría la erosión perjudicando, por ejemplo, la calidad del agua en áreas agrícolas. [GTII 3.4.5, 14.4.1]

La fusión de permafrost convierte en erosionables suelos que previamente no lo eran. [GTII 3.4.5] Otros efectos indirectos del cambio climático sobre la erosión responden a cambios de los suelos y de la vegetación producidos por el cambio climático y por las consiguientes medidas de adaptación. [GTII 3.4.5] Los escasos estudios sobre el impacto del cambio climático en el transporte de sedimentos parecen indicar que el transporte aumentará debido al aumento de la erosión, particularmente en áreas con mayor escorrentía. [GTII 3.4.5]

3.2.2 Dinamizantes no climáticos de los sistemas de agua dulce en el futuro

Son numerosos los factores no climáticos que afectan a los recursos de agua dulce a escala mundial (UN, 2003). Los cambios de uso de la tierra, la construcción y gestión de embalses, las emisiones de poluyentes y el tratamiento del agua y de las aguas de desecho influyen tanto en la cantidad como en la calidad de los recursos hídricos. El uso de agua depende de los cambios de población, del consumo de alimentos, de la economía (incluido el control de los precios del agua), de la tecnología, del estilo de vida y del valor que la sociedad atribuye a los ecosistemas de agua dulce. La vulnerabilidad de los sistemas de agua dulce al cambio climático depende también de la gestión del agua a nivel nacional e internacional. Cabe esperar que el paradigma de “gestión integrada de los recursos hídricos” (GIRH)¹⁷ vaya

¹⁷ Modalidad actual de gestión del agua que, sin embargo, no ha sido definida inequívocamente. La GIRH está basada en cuatro principios, formulados en la Conferencia Internacional sobre Agua y Medio Ambiente de Dublín, 1992: (1) el agua dulce es un recurso finito y vulnerable, esencial para el sostenimiento de la vida, el desarrollo y el medio ambiente; (2) el desarrollo y gestión del agua debería estar basado en un planteamiento participativo que implique a usuarios, participantes y responsables de políticas de todos los ámbitos; (3) las mujeres tienen un papel central en el aprovisionamiento, gestión y salvaguardia del agua; (4) el agua desempeña un papel económico en todos sus usos sujetos a competencia, y debería reconocerse como un bien económico.

ganando aceptación en todo el mundo (UN, 2002; World Bank 2004a; World Water Council, 2006); con ello el agua, como recurso y como ecosistema, pasaría a ocupar el centro de atención de los responsables de políticas. Es *probable* que se reduzca así la vulnerabilidad de los sistemas de agua dulce al cambio climático. El estudio de los caudales requeridos para el medio ambiente podría inducir a modificar las operaciones en los embalses de modo que se restringiese el uso humano de esos recursos hídricos. [GTII 3.3.2]

3.2.3 Impactos del cambio climático sobre la disponibilidad de agua dulce en el futuro

Por lo que respecta al aprovisionamiento de agua, es *muy probable* que los costos del cambio climático sean, en términos mundiales, mayores que los beneficios. Una de las razones es el *muy probable* aumento de la variabilidad de la precipitación, y una previsible mayor frecuencia de crecidas y sequías, como se ha indicado en las secciones 2.1.6 y 2.3.1. El riesgo de sequía aumentará en las cuencas abastecidas por nieve de deshielo durante la temporada de caudal bajo, como se ha indicado en la Sección 3.2.1. Los efectos de las sequías y de las crecidas se podrían atenuar mediante una adecuada inversión en infraestructura y mediante cambios en la gestión del agua y del uso de la tierra, pero la ejecución de estas medidas implicará un costo (US Global Change Research Program, 2000). Las infraestructuras hídricas, las pautas de uso y las instituciones se han desarrollado en el contexto de las condiciones actuales. Todo cambio importante en la frecuencia de las crecidas y de las sequías y en la cantidad y calidad del agua, o en la estacionalidad de su disponibilidad, precisará ajustes que pueden ser costosos, no sólo en términos económicos sino también en términos sociales y ecológicos, y en particular será necesario gestionar los posibles conflictos entre diferentes grupos de interés (Miller et al., 1997). [GTII 3.5]

Los cambios hidrológicos pueden tener consecuencias positivas en algunos aspectos, y negativas en otros. Por ejemplo, una mayor escorrentía anual podría generar beneficios para diversos tipos de usuarios de agua, tanto en las cuencas como fuera de ellas, ya que renovaría los recursos hídricos, pero podría generar también daños si aumentaran los riesgos de crecida. En los últimos decenios, la tendencia a una mayor pluviosidad en partes australes de América del Sur ha incrementado la superficie inundada por crecidas, pero también ha mejorado las cosechas en la región de la Pampa argentina y ha proporcionado nuevas oportunidades comerciales para la pesca (Magrin et al., 2005). [GTII 13.2.4] Una mayor escorrentía podría también dañar áreas en que la capa freática es poco profunda. En esas áreas, el aumento de la capa freática perjudica al uso agrícola y daña los edificios en las áreas urbanas. En Rusia, por ejemplo, se estima que los daños anuales causados por el bajo nivel de las capas freáticas ascienden actualmente a entre 5.000 y 6.000 millones de dólares (Kharkina, 2004) y es *probable* que aumenten en el futuro. Además, un aumento de la escorrentía anual podría no acarrear un aumento beneficioso de los recursos hídricos ya disponibles, si ese aporte de agua adicional se concentra durante la estación de caudales altos. [GTII 3.5]

La mayor intensidad de precipitación puede dar lugar a periodos de mayor turbidez y concentración de nutrientes y patógenos en los recursos hídricos superficiales. La empresa de distribución de agua de la ciudad de Nueva York contempla los episodios de precipitación intensa como una de sus principales preocupaciones en relación con el cambio climático, dado que pueden elevar los niveles de turbidez en algunos de los principales depósitos de la ciudad hasta 100 veces por encima del límite legal de calidad de la fuente en el punto de toma, lo cual conlleva un importante tratamiento adicional y costos de supervisión (Miller and Yates, 2006). [GTII 3.5.1]

3.2.4 Impactos del cambio climático sobre la demanda de agua dulce en el futuro

El aumento de las temperaturas y de la variabilidad de la precipitación generarían en conjunto una mayor demanda de agua de riego, aun en el caso de que la precipitación total durante la temporada de crecimiento se mantuviera invariable. Se ha modelizado el impacto del cambio climático sobre los periodos óptimos de crecimiento y sobre la optimización del rendimiento del uso de agua de riego, en base al supuesto de que no habrá cambios en la superficie de riego ni en la variabilidad del clima (Döll, 2002; Döll et al., 2003). Aplicando los escenarios A2 y B2 del IE-EE del IPCC, interpretados mediante dos modelos climáticos, se proyectó que las necesidades netas de riego en China e India, que son los países con mayor superficie de riego del mundo, cambiarían de aquí a 2020 entre +2% y +15% en el caso de China, y entre -6% y +5% en el caso de India, según el escenario de emisión y el modelo climático utilizado (Döll, 2002; Döll et al., 2003). Diferentes modelos climáticos proyectan diferentes cambios mundiales de las necesidades netas de riego, con incrementos estimados de entre 1 y 3% de aquí al decenio de 2020 y de entre 2 y 7% de aquí al decenio de 2070. El aumento mundial máximo de las necesidades netas de riego se obtiene para el escenario climático basado en el escenario de emisiones B2. [GTII 3.5.1]

En un estudio sobre el riego de los maizales en Illinois, basado en la optimización del beneficio, se concluyó que una disminución de la precipitación anual en un 25% tenía el mismo efecto sobre el rendimiento del riego que una disminución de un 15% más una duplicación de la desviación típica de la precipitación diaria (Eheart and Tornil, 1999). El estudio evidenciaba también que el uso de agua de riego basado en la optimización del beneficio responde mejor a los cambios de precipitación que el uso de agua basado en la optimización del rendimiento, y la duplicación del CO₂ atmosférico influye en muy escasa medida. [GTII 3.5.1]

Es *probable* que el aumento de la demanda de agua para uso doméstico por efecto del cambio climático (por ejemplo, por el aumento del riego de jardines) y de la demanda de agua para usos industriales sea relativamente pequeño; es, por ejemplo, inferior a un 5% de aquí a 2050 en las ubicaciones seleccionadas (Mote et al., 1999; Downing et al., 2003). Un efecto secundario indirecto, aunque pequeño, sería el aumento de la demanda de electricidad para refrigeración de edificios, que tendería

a incrementar la extracción de agua de refrigeración en las plantas térmicas de energía eléctrica. Un análisis estadístico del uso de agua en la ciudad de Nueva York reveló que el uso diario de agua por habitante en días con temperaturas superiores a 25°C aumenta en 11 litros/°C (aproximadamente, un 2% del consumo actual diario por habitante) (Protopapas et al., 2000). [GTII 3.5.1]

3.2.5 Impactos del cambio climático sobre el estrés hídrico en el futuro

Las estimaciones mundiales del número de personas que habitan en áreas con escasez de agua difieren mucho de un estudio a otro (Vörösmarty et al., 2000; Alcamo et al., 2003a, b, 2007; Oki et al., 2003; Arnell, 2004). Sin embargo, el cambio climático es sólo uno de los numerosos factores que influye en el futuro del estrés hídrico, aunque los cambios demográficos, socioeconómicos y tecnológicos son probablemente más importantes en la mayoría de las épocas y regiones. En el decenio de 2050, las diferencias entre las proyecciones de población de los cuatro escenarios IE-EE del IPCC tendrían un mayor efecto sobre el número de personas que habitan en cuencas fluviales con estrés hídrico que las diferencias entre escenarios climáticos (Arnell, 2004). El número de personas que viven en cuencas fluviales con estrés hídrico aumentaría de manera apreciable (Tabla 3.3). A partir del decenio de 2050, el cambio respecto al número de personas que previsiblemente estarán sometidas a estrés hídrico depende en gran medida del escenario IE-EE adoptado. El aumento sería sustancial para el escenario A2, mientras que la tasa de aumento sería inferior en los escenarios A1 y B1, debido al aumento mundial de los recursos renovables de agua dulce y a una ligera disminución de la población (Oki and Kanae, 2006). Cabe destacar que, basándose en el indicador de disponibilidad de agua por habitante, el cambio climático tendería a reducir el estrés hídrico mundial a nivel planetario. Ello se debe a que el aumento de escorrentía se concentra principalmente en las áreas más pobladas del planeta, principalmente en el este y suroeste de Asia. Sin embargo, dado que esa mayor escorrentía discurre principalmente durante las estaciones de caudal abundante (Arnell, 2004), es posible que no alivie los problemas de la

estación seca si no se almacena el excedente de agua sobrante, y no reduciría tampoco el estrés hídrico en otras regiones del mundo. Los cambios de las pautas estacionales y una mayor probabilidad de fenómenos extremos podrían enmascarar los efectos de una mayor disponibilidad anual de agua dulce y del cambio demográfico. [GTII 3.5.1]

Si se evalúa el estrés hídrico no sólo en función de la población y del cambio climático, sino también de los cambios de uso de agua, la importancia de los dinamizantes no climáticos (ingresos, eficiencia de uso del agua, productividad hídrica y producción industrial) aumenta (Alcamo et al., 2007). En algunos casos, el aumento de los ingresos repercute en el uso del agua y en el estrés hídrico en mayor medida que el crecimiento de la población (expresado mediante el cociente entre la extracción de agua y los recursos hídricos). Los modelos indican que, de aquí al decenio de 2050, el estrés hídrico disminuiría en un 20-29% de la superficie terrestre, y aumentaría en un 62-76% de la superficie terrestre mundial (en base a dos modelos climáticos y a los escenarios A2 y B2 del IE-EE). La mayor disponibilidad de agua, vinculada al aumento de la precipitación, es la causa principal de la disminución del estrés hídrico, mientras que las pérdidas de agua son la causa principal de su aumento. El aumento del uso doméstico de agua, estimulado por el crecimiento de los ingresos, se consideró como un factor dominante (Alcamo et al., 2007). [GTII 3.5.1]

3.2.6 Impactos del cambio climático sobre los costos, y otros aspectos socioeconómicos del agua dulce

La cantidad de agua disponible para captación depende de la escorrentía, de la recarga freática, de las condiciones de los acuíferos (por ejemplo, grado de confinamiento, profundidad, espesor, o límites), de la calidad del agua y de la infraestructura de abastecimiento hídrico (por ejemplo, embalses, pozos, o redes de distribución). El acceso a agua potable salubre depende más de la adecuación de la infraestructura de suministro de agua que del volumen de escorrentía. Sin embargo, el objetivo de un acceso más salubre al agua potable resultará más difícil de lograr en regiones en que disminuya la escorrentía y/o la recarga de aguas subterráneas por efecto del cambio climático. Además, el cambio climático implica un costo adicional para el sector de abastecimiento de agua debido, por ejemplo, al nivel cambiante del agua, que afecta a la infraestructura de suministro y que podría impedir la extensión de los servicios de abastecimiento de agua a un mayor número de personas. Ello, a su vez, genera un mayor impacto socioeconómico, con el consiguiente costo, particularmente en áreas en que ha aumentado también la prevalencia del estrés hídrico por efecto del cambio climático. [GTII 3.5.1]

Los cambios inducidos por el cambio climático en el régimen de escorrentía estacional y en la variabilidad interanual de la escorrentía pueden ser tan importantes para la disponibilidad de agua como los cambios del promedio anual de la escorrentía a largo plazo (US Global Change Research Program, 2000). La población que habita en cuencas abastecidas por el deshielo, que experimentan una disminución de la cantidad de nieve almacenada durante el

Tabla 3.3: Impacto del crecimiento demográfico y del cambio climático sobre el número de personas que viven en cuencas fluviales que padecen estrés hídrico (con recursos hídricos renovables por habitante inferiores a 1.000 m³/año) hacia 2050. [GTII, Tabla 3.2]

	Población estimada en cuencas fluviales que padecerían estrés hídrico en 2050 (miles de millones)	
	Arnell (2004)	Alcamo et al. (2007)
1995: Referencia	1,4	1,6
2050: Escenario de emisiones A2	4,4–5,7	6,4–6,9
2050: Escenario de emisiones B2	2,8–4,0	4,9–5,2

Estas estimaciones están basadas en escenarios de emisiones y en varias sesiones de modelos. La horquilla de valores refleja la diversidad de modelos climáticos utilizados para traducir las emisiones en escenarios climáticos.

invierno, puede verse afectada negativamente por la disminución de los cauces fluviales durante los veranos y otoños (Barnett et al., 2005). El Rin, por ejemplo, podría experimentar una reducción de entre un 5% y un 12% de su caudal estival bajo durante el decenio de 2050, que afectaría negativamente al suministro de agua, particularmente en las plantas térmicas de generación eléctrica (Middelkoop et al., 2001). Ciertos estudios de la cuenca del río Elba revelan que la evapotranspiración real aumentaría de aquí a 2050 (Krysanova and Wechsung, 2002), mientras que el caudal del río, la recarga freática, el rendimiento agrícola y las fuentes difusas de polución disminuirían *probablemente* (Krysanova et al., 2005). [GTII 3.5.1]

En la China occidental, es *probable* que el adelanto del deshielo primaveral y la disminución de los glaciares reduzcan la disponibilidad de agua de riego para usos agrícolas. Se han estimado, para el caso de China, las inversiones y costos de explotación de los pozos y embalses adicionales que se precisarían para asegurar un suministro fiable de agua en la eventualidad de un cambio climático. El costo es bajo en las cuencas en que el estrés hídrico actual es pequeño (por ejemplo, en Changjiang), y alto allí donde el estrés hídrico es elevado (por ejemplo, en el río Huanghe) (Kirshen et al., 2005a). Además, el impacto del cambio climático sobre el costo de abastecimiento de agua aumentará en el futuro, no sólo por efecto de un cambio climático más pronunciado, sino también como consecuencia de una demanda creciente. [GTII 3.5.1]

En cierto acuífero de Tejas, el ingreso neto de los agricultores disminuiría entre un 16 y un 30% de aquí al decenio de 2030, y entre un 30 y un 45% de aquí al decenio de 2090, debido a la disminución del abastecimiento de agua de riego y al aumento de la demanda. En total, el beneficio neto obtenido del uso de agua (principalmente, de sus usos municipales e industriales) disminuiría en menos de un 2% en ese mismo periodo (Chen et al., 2001). [GTII 3.5.1]

Si, como consecuencia del cambio climático, fuese necesario sustituir el agua dulce del suministro por agua desalinizada, el costo derivado del cambio climático incluiría el costo promedio de desalinización, cifrado actualmente en aproximadamente 1,00 dólares por m³ de agua de mar y en 0,60 dólares por m³ de agua salobre (Zhou and Tol, 2005). El costo de cloración del agua dulce asciende a aproximadamente 0,02 dólares/m³. En áreas costeras densamente pobladas de Egipto, China, Bangladesh, India y el sureste de Asia (FAO, 2003), los costos de desalinización pueden ser prohibitivos. En esas áreas, particularmente en Egipto, será necesario investigar nuevas tecnologías de desalinización para reducir costos, especialmente utilizando fuentes de energía no convencionales que conlleven un menor nivel de emisiones de gases invernadero. Además, la desalinización de aguas salobres puede mejorar el rendimiento económico de esos proyectos (véase la Sección 4.4.4). [GTII 3.5.1]

Los daños que ocasionen las crecidas en el futuro dependerán en gran medida de las pautas de asentamiento, de las decisiones sobre el uso de la tierra, de la calidad de las predicciones de crecida, de los sistemas de alerta y respuesta, y del valor de las

estructuras y otras propiedades ubicadas en áreas vulnerables (Mileti, 1999; Pielke and Downton, 2000; Changnon, 2005), así como de los cambios inherentes al clima, como las variaciones en la frecuencia de los ciclones tropicales (Schiermeier, 2006). [GTII 3.5.2]

Es posible obtener una proyección de los impactos del cambio climático en términos de daños causados por las crecidas, basándose en una modelización de los cambios que experimentará el intervalo de recurrencia de las crecidas actuales en períodos de 20 o 100 años, conjuntamente con los daños causados por las crecidas actuales, determinados en base a las relaciones altura-caudal y a una descripción detallada de las propiedades. Con este tipo de metodología, se proyectó que, en promedio, el daño directo anual causado por las crecidas en tres cuencas de drenaje de Australia aumentaría de 4 a 10 veces si se duplicara la cantidad de CO₂ (Schneider et al., 2000). [GTII 3.5.2]

En Choi and Fisher (2003) se ha estimado el cambio de los daños causados por crecidas en determinadas regiones de Estados Unidos, en base a dos escenarios de cambio climático cuya precipitación anual media aumentaba en 13,5% y 21,5%, respectivamente, en tanto que la desviación típica de la precipitación anual se mantenía constante o aumentaba proporcionalmente a la media. Mediante un modelo econométrico estructural (de regresión) basado en una serie histórica de daños causados por crecidas con presencia de población, y utilizando como parámetros de predicción un indicador de riqueza y el valor de la precipitación anual, las proyecciones indicaron que el valor medio y la desviación típica de los daños causados por crecidas aumentarían más de un 140% al aumentar en un 13,5% el valor medio y la desviación típica de la precipitación anual. Esta estimación parece indicar que las pérdidas causadas por las crecidas están vinculadas principalmente a la exposición de la población a fenómenos naturales peligrosos, debido a la falta de infraestructura social, dado que la capacidad explicativa del modelo que incorpora población y riqueza es de un 82%, mientras que agregando la precipitación aumenta hasta un 89%. [GTII 3.5.2]

Se examinaron en otro estudio los posibles impactos de los cambios experimentados por los episodios de precipitación extrema sobre los causados por crecidas, utilizando para ello el modelo del Centro Canadiense del Clima y el escenario IS92a para el área metropolitana de Boston, en el nordeste de Estados Unidos (Kirshen et al., 2005b). Este estudio concluyó que, en ausencia de inversiones de adaptación, tanto el número de bienes dañados por las crecidas como el costo general de los daños se duplicarían de aquí a 2100 respecto de lo que cabría esperar si no hubiera cambio climático. Se concluyó también que los retrasos en los transportes por efecto de las crecidas entrañarían perjuicios cada vez mayores a lo largo de este siglo. El estudio concluyó que la *probable* magnitud económica de tales daños es suficientemente alta como para justificar grandes inversiones en estrategias de adaptación, como la protección universal de las llanuras inundables [GTII 3.5.2]

Corroboró también esos resultados un estudio sobre los daños causados por las crecidas fluviales y costeras en Inglaterra y

Gales en el decenio de 2080, que combina cuatro escenarios de emisiones con cuatro escenarios de cambio socioeconómico en un marco de referencia semejante al del IE-EE (Hall et al., 2005). En todos los escenarios, los daños por crecidas aumentarían a menos que se modificaran las políticas, las prácticas y las infraestructuras actuales de gestión de las crecidas. De aquí al decenio de 2080, se prevé que los gastos anuales totalicen 5.000 millones de libras esterlinas en un futuro planeta de tipo B1, frente a los 1.000 millones actuales, mientras que un cambio climático aproximadamente igual implicaría únicamente unos 1.500 millones de libras esterlinas de daños en un escenario de tipo B2. Los escenarios B1 y B2 dan resultados aproximadamente similares si se normalizan estas cifras en términos de producto interior bruto. En base a un escenario de tipo A1, los daños anuales ascenderían a 15.000 millones de libras esterlinas de aquí al decenio de 2050, y a 21.000 millones de libras de aquí al decenio de 2080 (Evans et al., 2004; Hall et al., 2005). [GTII 3.5.2]

En el futuro, una mayor duración de las crecidas causaría trastornos a la navegación en un mayor número de casos, y podrían acentuarse los regímenes de flujo bajos que restringen las operaciones de carga de los barcos. En el Rin, por ejemplo, el período restrictivo, cifrado actualmente en 19 días para las condiciones climáticas actuales, podría aumentar hasta 26-34 días en el decenio de 2050 (Middelkoop et al., 2001). [GTII 3.5.1]

Es *probable* que el cambio climático altere los caudales fluviales, produciendo impactos importantes sobre la disponibilidad de agua en el curso fluvial, particularmente para la generación de energía hidroeléctrica. En base a un modelo hidrológico de gran escala, se ha obtenido una estimación de los impactos sobre la energía hidroeléctrica en Europa. Los resultados indican que, de aquí al decenio de 2070, la capacidad de generación de electricidad de las plantas hidroeléctricas existentes al finalizar el siglo XX (en base al escenario de emisiones IS92a) aumentará entre un 15 y un 30% en Escandinavia y norte de Rusia, donde actualmente se genera entre el 19% (Finlandia) y cerca del 100% (Noruega) de la electricidad mediante energía hidráulica (Lehner et al., 2005). En Portugal, España, Ucrania y Bulgaria, que actualmente generan entre un 10% (Ucrania, Bulgaria) y un 39% de electricidad por medios hidráulicos, se obtienen disminuciones de entre 20 y 50% o superiores (Lehner et al., 2005). Para el conjunto de Europa (en que la energía hidroeléctrica representa un 20%), las proyecciones indican que la capacidad hidroeléctrica disminuiría entre un 7 y un 12% de aquí al decenio de 2070. [GTII 3.5.1]

En América del Norte, una disminución del flujo proveniente de los Grandes Lagos podría ocasionar importantes pérdidas económicas, ya que disminuiría la generación de potencia hidroeléctrica en los ríos Niágara y San Lorenzo (Lofgren et al., 2002). Según una proyección del modelo CGCM1 basada en un calentamiento mundial de 2°C, la generación de energía hidroeléctrica en los ríos Niágara y San Lorenzo, en Ontario, disminuiría entre un 25 y un 35%, con unas pérdidas anuales de 240 a 350 millones de dólares canadienses a precios de

2002 (Buttle et al., 2004). Con el modelo climático HadCM2¹⁸, sin embargo, se obtiene un pequeño aumento de la capacidad hidroeléctrica (+3%), que asciende a aproximadamente 25 millones de dólares canadienses anuales. Según otro estudio, que analizó diferentes escenarios de modelos climáticos, un calentamiento mundial de 2°C podría reducir la capacidad de generación de energía hidroeléctrica en el río San Lorenzo entre un 1 y un 17% (LOSLR, 2006). [GTII 3.5.1]

3.2.7 Áreas y sectores de agua dulce muy vulnerables al cambio climático

En numerosas regiones del mundo, los efectos del cambio climático sobre los recursos de agua dulce podrían afectar al desarrollo sostenible y poner en riesgo, por ejemplo, la reducción de la pobreza y la mortalidad infantil. Incluso con una gestión óptima del agua, es *muy probable* que no sea posible evitar sus efectos negativos sobre el desarrollo sostenible. En la Figura 3.4 pueden verse algunos casos reveladores a nivel mundial; en ellos, el impacto del cambio climático en relación con el agua dulce amenaza el desarrollo sostenible de las regiones afectadas. Para conseguir una gestión “sostenible” de los recursos hídricos suele aplicarse un método de gestión integrada (GIRH: véase la definición en la nota de pie de página 17). Sin embargo, la interpretación exacta de este término es muy variable. Todas las definiciones incluyen de una u otra manera el concepto de mantenimiento y mejora del medio ambiente, y particularmente del medio ambiente acuático, teniendo en cuenta la competencia entre usuarios, los ecosistemas de los cursos fluviales y los humedales. En términos más generales, contemplan también las implicaciones medioambientales de las políticas de gestión hídrica; por ejemplo, las implicaciones de las políticas de gestión hídrica respecto a la gestión de la tierra y, a la inversa, las implicaciones de las políticas de gestión de la tierra respecto al medio ambiente acuático. En el sector hídrico, la gobernanza es un componente importante de la gestión del agua si se desea conseguir unos recursos hídricos sostenibles en el marco de diversos sistemas políticos, socioeconómicos y administrativos (GWP, 2002; Eakin and Lemos, 2006). [GTII 3.7]

3.2.8 Incertidumbres de los impactos proyectados del cambio climático sobre los sistemas de agua dulce

Las incertidumbres respecto a los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos se derivan principalmente de la incertidumbre existente respecto a los aportes de precipitación y, en menor medida, de las incertidumbres respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero (Döll et al., 2003; Arnell, 2004), o respecto a las sensibilidades climáticas (Prudhomme et al., 2003), o de la sensibilidad inherente a los propios modelos hidrológicos (Kaspar, 2003). Otra fuente de incertidumbre relacionada con los efectos proyectados del cambio climático sobre los sistemas de agua dulce radica en la naturaleza, magnitud y éxito relativo de las iniciativas y

¹⁸ Véase en el Apéndice I una descripción de estos modelos.

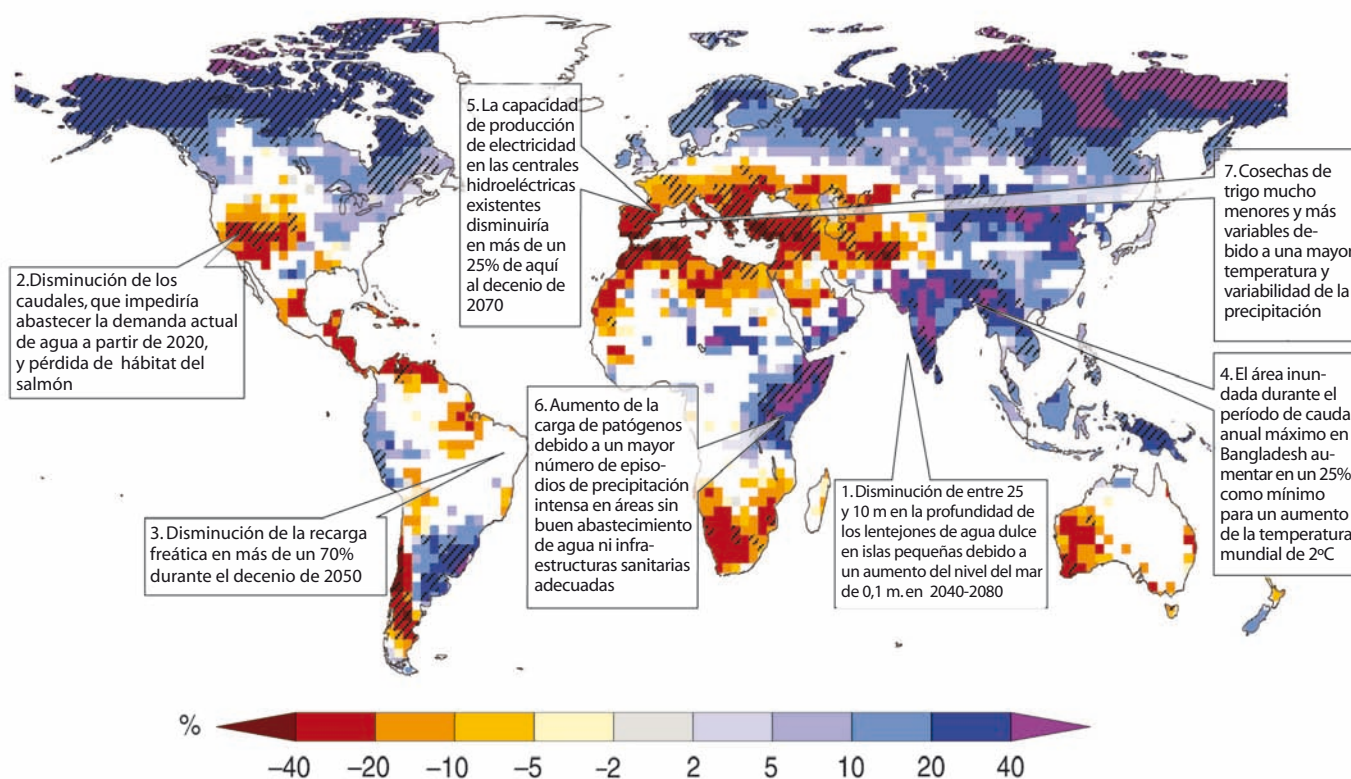


Figura 3.4: Mapa indicativo de los impactos futuros del cambio climático relacionados con el agua dulce que amenazan el desarrollo sostenible de las regiones afectadas. 1: Bobba et al. (2000), 2: Barnett et al. (2004), 3: Döll and Flörke (2005), 4: Mirza et al. (2003), 5: Lehner et al. (2005), 6: Kistemann et al. (2002), 7: Porter and Semenov (2005). Con respecto al mapa del fondo, véase la Figura 2.10: Cambio medio de la escorrentía anual (%) mediante un agregado de modelos desde el presente (1980-1999) hasta 2090-2099 para el escenario de emisiones A1B del IE-EE (basado en Milly et al., 2005). Las áreas de color azul (rojo) denotan un aumento (disminución) de la escorrentía anual. [Basado en GTII, Figura 3.8, e IdS, Figura 3.5]

medidas ya planificadas con carácter de intervenciones. Los impactos ilustrados en la Figura 3.4 se manifestarían de forma diferente en función de las medidas de adaptación adoptadas. Las consecuencias de las medidas de adaptación al cambio climático (por ejemplo, un mayor periodo de crecimiento de las cosechas, o una mayor regulación del caudal fluvial, junto con una mayor capacidad de embalsamiento) no han sido tenidas íntegramente en cuenta en las actuales predicciones. Una comparación entre diferentes fuentes de incertidumbre en las estadísticas de crecidas de dos cuencas del Reino Unido (Kay et al., 2006a) condujo a la conclusión de que la mayor fuente de incertidumbre era la estructura del MCG, seguida de los escenarios de emisiones y de la modelización hidrológica. En Prudhomme and Davies (2006) se llegaba a conclusiones similares respecto de a caudales medios mensuales, y respecto a las estadísticas de los niveles de caudal bajos en Gran Bretaña. [GTII 3.3.1]

Cuando se evalúa la incertidumbre respecto al impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos, un planteamiento probabilístico multimodelo es preferible a utilizar los resultados de un solo modelo climático. Desde las fechas del TIE, diversos estudios de impacto hidrológico han utilizado datos climáticos multimodelo (por ejemplo, Arnell (2004) a escala mundial, o Jasper et al. (2004) a escala de cuenca fluvial), pero no son muchos los estudios que incorporan evaluaciones probabilísticas. [GTII 3.3.1]

En numerosos estudios de impacto, las series temporales de valores climáticos observados son ajustadas en base a un cálculo del cambio experimentado por las variables climáticas, a fin de obtener escenarios coherentes con las condiciones actuales. El objeto de tales ajustes es reducir los impactos del error de modelización del clima de los MCG, en base al supuesto de que las discrepancias en la modelización del clima son de magnitud similar para los horizontes temporales actuales y futuros. Ello es particularmente importante en relación con las proyecciones de precipitación, en las cuales las diferencias entre los valores observados y los calculados mediante modelos del clima son sustanciales [GTII 3.3.1]

En los estudios de impacto hidrológico no se tienen en cuenta, en muchos casos, los cambios de la variabilidad interanual o diaria de las variables climáticas. Ello conlleva una subestimación de los cauces futuros y de las sequías, así como de la disponibilidad y necesidad de agua de riego. [GTII 3.3.1] Genera también incertidumbre la selección de indicadores y de valores de umbral para cuantificar el impacto del cambio climático sobre los recursos de agua dulce.

Para compensar el desajuste entre las escalas de reticulación espacial del MCG y de los procesos hidrológicos, se han desarrollado técnicas que adaptan la escala de los resultados

del MCG a una resolución espacial (y temporal) más fina. [GTI TIE, Capítulo 10] El supuesto básico de esas técnicas es que las relaciones estadísticas identificadas para el clima actual seguirán siendo válidas cuando cambien las condiciones futuras. Las técnicas de reducción de escala podrían permitir a los modelizadores incorporar la variabilidad diaria en los cambios futuros (por ejemplo, Díaz-Nieto and Wilby, 2005) y aplicar un marco de referencia probabilístico para generar información sobre los futuros caudales fluviales en la planificación de los recursos hídricos (Wilby and Harris, 2006). Estos planteamientos ayudan a comparar diferentes fuentes de incertidumbre que afectan a las proyecciones de los recursos hídricos. [GTII 3.3.1]

Los esfuerzos por cuantificar el impacto económico de los cambios relacionados con el clima sobre los recursos hídricos se ven dificultados por la falta de datos y por la circunstancia de que las estimaciones son muy sensibles tanto a los métodos de evaluación como a los diferentes supuestos en que se base la modificación de la estructura de disponibilidad de agua en relación con los diferentes tipos de usos de agua; por ejemplo, para usos agrícolas, urbanos o río adentro (Changnon, 2005; Schlenker et al., 2005; Young, 2005). [GTII 3.5]

3.3 Adaptación hídrica al cambio climático: consideraciones generales

Los gestores de recursos hídricos han hecho frente desde antiguo a una demanda de recursos hídricos variable. Hasta la fecha, han supuesto por lo general que la base de recursos naturales es razonablemente constante a medio plazo y que, por ello, la experiencia hidrológica pasada constituye una buena indicación de las condiciones futuras. El cambio climático pone en tela de juicio estos supuestos convencionales, y podría alterar la fiabilidad de los sistemas de gestión hídrica. [GTII 3.6.1] Las respuestas de los gestores al cambio climático abarcan el desarrollo de nuevas metodologías de evaluación y diseño de sistemas, así como métodos no estructurales basados en mecanismos tales como la Directiva Marco relativa al Agua, de la Unión Europea. [GTII 12.2.2]

En la Tabla 3.4 se resumen algunas opciones de adaptación orientadas a la oferta y a la demanda, diseñadas para asegurar el abastecimiento en condiciones promedias y de sequía. Las opciones orientadas a la oferta implican por lo general una mayor capacidad de almacenamiento o de extracción de los cursos hídricos y, por ello, pueden tener consecuencias adversas para el medio ambiente. Las opciones orientadas a la demanda pueden carecer de efectividad práctica, dado que están basadas en la acumulación de acciones de individuos. Algunas opciones pueden ser incompatibles con las medidas de mitigación, ya que implican un alto consumo energético, por ejemplo en el caso de la desalinización o del bombeo.

Es frecuente diferenciar entre adaptación autónoma y adaptación planificada. La *adaptación autónoma* es aquella que no constituye una respuesta consciente a los estímulos del clima, sino que se deriva de cambios introducidos para satisfacer nuevas demandas, objetivos y expectativas que, aunque no hayan sido ideados expresamente para compensar el cambio climático, pueden reducir las repercusiones de ese cambio. Este tipo de adaptación está muy extendido en el sector hídrico, aunque con diversos grados de efectividad en la lucha contra el cambio climático (véase la Tabla 3.5). [GTII 3.6.1] En América Latina se han implantado algunas prácticas de adaptación autónoma, entre ellas la gestión de transvases entre cuencas y la optimización del uso de agua [GTII 13.5.1.3] En África, las comunidades y los agricultores locales han desarrollado esquemas de adaptación para prever las lluvias, utilizando la experiencia acumulada. Los agricultores del Sahel utilizan también sistemas tradicionales de recuperación de agua para complementar el riego. [GTII 9.6.2.1, 9.5.1, Tabla 9.2]

La *adaptación planificada* es el resultado de decisiones de política deliberadas, y toma en cuenta específicamente el cambio y variabilidad del clima; hasta ahora, rara vez ha sido implementada. Los gestores hídricos de algunos países, entre ellos Países Bajos, Australia, Reino Unido, Alemania, Estados Unidos y Bangladesh, han empezado a abordar directamente las implicaciones del cambio climático como parte integrante de sus prácticas normales de gestión de crecidas y de abastecimiento de agua. [GTII 3.2, 3.6.5, 17.2.2] Esas adaptaciones han

Tabla 3.4: Algunas opciones de adaptación respecto a la oferta y demanda de agua (lista no exhaustiva). [GTII, Tabla 3.5]

Oferta	Demanda
Prospección y extracción de agua subterránea	Mejora de la eficacia del uso de agua mediante agua reciclada
Mayor capacidad de almacenamiento mediante la construcción de reservorios y presas	Reducción de la demanda de agua de riego mediante modificaciones de los calendarios de cultivo, combinaciones de cultivos, métodos de riego y superficies plantadas
Desalinización de agua del mar	Reducción de la demanda de agua de riego mediante la importación de productos agrícolas: agua virtual
Ampliación del almacenamiento de agua de lluvia	Promoción de prácticas autóctonas para un uso sostenible del agua
Eliminación de vegetación invasiva no autóctona en áreas ribereñas	Mayor uso de mercados de agua para reasignar el agua a usos muy valorados
Transvase de agua	Mayor uso de incentivos económicos, como la medición de caudal o la determinación de precios, para incentivar la conservación de agua

consistido generalmente en modificaciones de métodos y procedimientos como, por ejemplo, las normas de diseño, o el cálculo de los márgenes de cambio climático. Se han implementado adaptaciones de ese tipo en el Reino Unido y en los Países Bajos para la prevención de crecidas (Klijn et al., 2001; Richardson, 2002), en el Reino Unido para el suministro de agua (Arnell and Delaney, 2006), y en Bangladesh para la planificación hídrica en general. [GTII 3.6.5, 17.2.2] Son muy raros los ejemplos de acciones “concretas” en el sector hídrico para adaptarse específica y únicamente a un clima en evolución. Ello se debe en parte a que el cambio climático podría ser sólo uno de los muchos factores que afectan a las estrategias y planes de inversión (y podría no ser el más importante en el marco de una planificación a corto plazo), y en parte a la incertidumbre de las proyecciones de futuros cambios hidrológicos.

Se hará necesaria una adaptación a los cambios de disponibilidad y calidad del agua, no sólo desde los organismos de gestión del agua, sino también desde los propios usuarios de los recursos hídricos. Éstos abarcarán la industria, los agricultores (particularmente los de regadío) y los consumidores. Pero, aunque se ha acumulado mucha experiencia en la adaptación a los cambios de la demanda y de la legislación, no es mucho lo que se sabe sobre la manera en que esas organizaciones e individuos conseguirán adaptarse a la evolución del clima.

En la Tabla 3.5 se indican algunas de las medidas de adaptación, planificadas o autónomas, actualmente utilizadas en el mundo, tal como fueron expuestas en los capítulos regionales del 4IE del GTII. La tabla no es exhaustiva, y es posible utilizar muy diversos indicadores en numerosos lugares.

Hay un *alto grado de confianza* en que la adaptación puede reducir la vulnerabilidad, particularmente a corto plazo. [GTII 17.2, 18.1, 18.5, 20.3, 20.8] Sin embargo, aunque la capacidad de adaptación está íntimamente ligada al desarrollo social y económico, no está igualmente distribuida en y entre las sociedades. La capacidad de los depauperados, de las personas mayores, de las mujeres, de los enfermos y de las poblaciones indígenas suele ser menor. [GTII 7.1, 7.2, 7.4, 17.3]

Es posible definir cinco tipos diferentes de límites en relación con la adaptación a los efectos del cambio climático. [GTII 17.4.2]

- (a) *Físicos o ecológicos*: tal vez no será posible evitar los efectos adversos del cambio climático por medios técnicos o mediante cambios institucionales. Por ejemplo, tal vez no sea posible adaptarse cuando los ríos se han secado completamente. [GTII 3.6.4]
- (b) *Técnicos, políticos o sociales*: por ejemplo, podría resultar difícil encontrar lugares aceptables para nuevos embalses, o que los usuarios reduzcan el consumo de agua. [GTII 3.6.4]
- (c) *Económicos*: una estrategia de adaptación podría resultar, simplemente, demasiado costosa en comparación con los beneficios que reporte su implementación.
- (d) *Culturales e institucionales*: esta categoría abarca el contexto institucional en que se enmarca la gestión del

agua, la baja prioridad dada a la gestión del agua, la falta de coordinación entre organismos, las tensiones entre unas y otras escalas, la gobernanza ineficaz, y la incertidumbre sobre el cambio climático futuro (Ivey et al., 2004; Naess et al., 2005; Crabbe and Robin, 2006); todos ellos operan como límites institucionales a la adaptación. [GTII 3.6.4]

- (e) *Cognitivos e informativos*: puede ocurrir, por ejemplo, que los gestores hídricos no sean conscientes del problema que plantea el cambio climático, o puede que le otorguen escasa prioridad en comparación con otros problemas. Una limitación informativa esencial es la falta de acceso a metodologías que permitan hacer frente con coherencia y rigor al cambio climático. [GTII 17.4.2.4]

El cambio climático es un desafío conceptual para los gestores hídricos, ya que introduce incertidumbres en las condiciones hidrológicas futuras. Puede resultar también muy difícil detectar una tendencia subyacente (Wilby, 2006), lo que significa que podría ser necesario tomar decisiones de adaptación antes de conocer claramente cómo están evolucionando realmente los regímenes hidrológicos. La gestión del agua ante una situación de cambio climático obliga, por ello, a adoptar un planteamiento basado en escenarios (Beuhler, 2003; Simonovic and Li, 2003). Así se está haciendo en países como Reino Unido (Arnell and Delaney, 2006) o Australia (Dessai et al., 2005). Sin embargo, hay dos problemas. En primer lugar, hay a menudo grandes diferencias entre unos y otros impactos según el escenario, por lo que los análisis deberán estar basados en más de un escenario. En segundo lugar, hay países en que los gestores hídricos demandan información sobre el grado de verosimilitud de los resultados definidos, a fin de tomar decisiones basadas en el conocimiento de los riesgos (por ejemplo, Jones and Page, 2001). Por ello, se están desarrollando técnicas que permitan construir distribuciones de probabilidad de determinados resultados, que obligarán a formular diversos supuestos acerca las distribuciones de probabilidad de los dinamizantes clave de la incertidumbre de los impactos (por ejemplo, Wilby and Harris, 2006). [GTII 3.6.4]

Una segunda metodología frente a la incertidumbre, conocida como “gestión adaptativa” (Stakhiv, 1998), implica un mayor uso de medidas de gestión hídrica relativamente robustas en relación con la incertidumbre. Tales instrumentos, en particular las medidas encaminadas a reducir la demanda de agua, han sido propugnados como medio para reducir al mínimo la exposición de un sistema al cambio climático (por ejemplo, en California: Beuhler, 2003). De modo similar, algunas estrategias de resistencia para gestionar las crecidas (por ejemplo, permitir que los ríos se desborden temporalmente, o reducir la exposición a los daños de las crecidas) son más robustas en términos de incertidumbre que las medidas tradicionales de protección frente a crecidas (Klijn et al., 2004; Olsen, 2006). [GTII 3.6.4]

3.3.1 Gestión integrada de los recursos hídricos

La gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH: véase la nota de pie de página 17) debería ser un instrumento para explorar medidas de adaptación al cambio climático pero, por el

Tabla 3.5: Ejemplos prácticos de adaptación.

Región	Medida de adaptación	Origen
África	- Predicciones estacionales y su producción, difusión, incorporación e integración en sistemas de apoyo a la toma de decisiones basada en modelos - Mejora de la resiliencia ante futuros periodos de sequía, que afecta a los actuales sistemas agrícolas de secano mediante reformas de la infraestructura física, en particular: sistemas de recogida de agua; construcción de presas; prácticas de conservación del agua y agrícolas; riego por goteo; desarrollo de variedades de cultivo resistentes a la sequía y de rápida maduración, y variedades de cultivos alternativas e híbridas	GTII 9.5, Tabla 9.2
Asia	Reformas de la infraestructura agrícola, en particular: - Abastecimiento de agua para pastizales - Sistemas de riego y uso/almacenamiento eficiente del agua de lluvia y de nieve - Sistema de intercambio de información sobre nuevas tecnologías a nivel nacional, regional e internacional - Acceso adecuado de pastores, pescadores y agricultores a las predicciones meteorológicas (lluvias y temperaturas) - Reciclado y reutilización de aguas de desecho municipales, por ejemplo en Singapur - Reducción del gasto y de las fugas de agua, y uso de metodologías orientadas al mercado para reducir el uso abusivo de agua	GTII 10.5, Tabla 10.8 GTII 10.5.2
Australia y Nueva Zelandia	- Iniciativa Nacional sobre el Agua - Planta de tratamiento para el abastecimiento de agua reciclada - Menores pérdidas por infiltración, y medidas de conservación - Sustitución de canales de riego por conducciones - Mejoras de la eficiencia de uso del agua y de su calidad - Prevención contra la sequía, nuevos precios del agua - Instalación de aljibes para el agua de lluvia - Desalinización de agua del mar	GTII 11.2, Tabla 11.2, Recuadro 11.2; Véase la Tabla 5.2, en este mismo volumen
Europa	- Estrategias basadas en la demanda (por ejemplo, conservación del agua doméstica, industrial y agrícola), reparación de las fugas de los depósitos municipales de agua de riego en áreas altas, y de diques en áreas bajas - Ampliación de la superficie de llanuras inundables, depósitos de emergencia para situaciones de crecida, reserva de terrenos para las aguas de crecida, y sistemas de alerta frente a crecidas, particularmente las repentinas - Medidas basadas en la oferta (por ejemplo, embalsamiento de ríos para formar presas en su cauce, reutilización de aguas de desecho y sistemas de desalinización, e intervención del precio del agua - Incorporación de estrategias regionales y de cuencas receptoras para incluir el cambio climático en los planes de gestión integrada del agua	GTII 12.5.1
América Latina	- Captación de agua de lluvia, y sistemas de almacenamiento - Programas de "autoorganización" para mejorar los sistemas de abastecimiento de agua en comunidades muy pobres - Prácticas de conservación del agua, reutilización del agua, reciclado del agua modificando los procesos industriales, y optimización del uso de agua	GTII 13.2.5.3, Recuadro 13.2, 13.5.1
América del Norte	- Conservación más eficaz de agua, y labranza de conservación - Inversiones en sistemas de conservación de agua y nuevas instalaciones de suministro y conservación del agua - Modificación de la política de seguros nacionales contra crecidas en Estados Unidos para limitar el riesgo de múltiples reclamaciones en situaciones de crecida - Elevación obligatoria de las viviendas que acumulen dos reclamaciones relacionadas con crecidas en 2,5 cm por encima del nivel de crecida de un período de retorno de 100 años, o reubicación obligatoria - Limpieza de los sistemas de drenaje y sustitución de los sistemas generales de alcantarillado para cumplir criterios más extremos de las crecidas con período de retorno de 5 años - Almacenamiento en aljibes del agua de lluvia recogida en los tejados para facilitar la infiltración, y aumento del almacenamiento en depresiones y en retenciones urbanas	GTII 14.2.4 GTII 14.5.1
Regiones polares	- Una estrategia de adaptación que se ha utilizado ya con éxito para contrarrestar el impacto de la desecación de los pantanos en los deltas implica controlar la liberación del agua de los embalses para facilitar la formación de atascos de hielo, con las consiguientes crecidas - Regulación del caudal de generación hidroeléctrica, estrategias de captación y métodos de acceso a agua potable - Estrategias para reducir los riesgos crecientes/decrecientes vinculados al agua dulce (por ejemplo, estructuras de protección a fin de reducir los riesgos de crecida o de aumentar las crecidas para los sistemas acuáticos)	GTII 15.6.2 GTII 15.2.2.2
Islas pequeñas	- Plantas desalinizadoras - Grandes depósitos de almacenamiento, y mejora de la captación de agua - Protección de las aguas subterráneas, mayor acopio de agua de lluvia y mayor capacidad de almacenamiento, destilación solar, gestión de las aguas de tempestad, y asignación de áreas de recarga de agua subterránea en las islas	GTII 16.4.1, Recuadro 16.5

momento, se encuentra en sus comienzos. Algunas estrategias eficaces de gestión integrada del agua consisten en: averiguar los puntos de vista de la sociedad, reformular los procesos de planificación, coordinar la gestión de la tierra y de los recursos hídricos, reconocer los vínculos entre la cantidad y la calidad del agua, hacer un uso conjunto de las aguas superficiales y subterráneas, proteger y restaurar los sistemas naturales, y tener presente el cambio climático. Además, las estrategias integradas consideran de forma explícita los obstáculos al flujo de información. No siempre es necesario un planteamiento totalmente integrado, sino que el grado de integración adecuado dependerá de hasta qué punto facilita la actuación efectiva en respuesta a necesidades específicas (Moench et al., 2003). En particular, un planteamiento integrado de la gestión del agua podría contribuir a resolver

conflictos entre usuarios que compiten por ella. En diversos lugares del oeste de Estados Unidos, los gestores hídricos y diversos grupos de interés han estado experimentando métodos para promover una toma de decisiones basada en el consenso. Estas actuaciones incluyen iniciativas locales de acopio de agua e iniciativas estatales o federales para incorporar a las partes interesadas en los procesos de planificación (por ejemplo, US Department of the Interior, 2005). Estas iniciativas podrían facilitar las negociaciones entre grupos de interés en situación de competencia, a fin de lograr una resolución de los problemas mutuamente satisfactoria que considere una amplia diversidad de factores. En cuencas de gran tamaño, como la del río Colorado, tales factores abarcan diversas escalas temporales y espaciales (Tabla 3.6). [GTII 3.6.1, Recuadro 14.2]

Tabla 3.6: Cuestiones a diversa escala relativas a la gestión integrada del agua en la cuenca del río Colorado (Pulwarty and Melis, 2001). [GTII, Tabla 3.4]

Escala temporal	Cuestión
Indeterminada	Caudal necesario para proteger especies en peligro
Largo plazo	Asignación entre cuencas y asignación entre Estados
Decenal	Obligación de abastecimiento de la cuenca superior
Anual	Cumplimiento de normas en el lago Powell para igualar el almacenamiento con el del lago Mead
Estacional	Meses de máximo calor y máximo frío
Diaria a mensual	Operaciones de control de crecidas
Horaria	Generación de energía por la Western Area Power Administration
Escala espacial	
Mundial	Influencias climáticas, Parque Nacional del Gran Cañón
Regional	Expropiación previa (por ejemplo, Upper Colorado River Commission)
Estatal	Diferentes acuerdos sobre comercialización del agua para distritos dentro y fuera del Estado
Municipal y comunitaria	Calendario, tratamiento, uso doméstico del agua

