4

El cambio climático y los recursos hídricos, por sistemas y sectores

4.1 Ecosistemas y biodiversidad

4.1.1 Contexto

La temperatura y los regímenes de humedad son algunas de las variables clave que determinan la distribución, crecimiento, productividad y reproducción de plantas y animales. Los cambios hidrológicos pueden influir en las especies de diversas maneras, pero los procesos mejor conocidos son los que relacionan la disponibilidad de humedad con los umbrales intrínsecos que gobiernan los procesos metabólicos y reproductivos (Burkett et al., 2005). Los cambios del clima previstos para los próximos decenios tendrán efectos diversos sobre la disponibilidad de humedad, en forma de alteraciones de los periodos de aparición y del volumen de los caudales fluviales, disminuciones del nivel de agua en numerosos humedales, extensión de los lagos de termokarst del Ártico, o disminuciones de la disponibilidad de agua de niebla en los bosques de montaña tropicales.

Las tendencias mundiales de la precipitación, de la humedad, de la sequía y de la escorrentía observadas durante el último siglo se resumen en el Capítulo 3 del 4IE del GTI. Aunque los cambios de la precipitación durante el último siglo indican una variación regional considerable [GTI, Figura 3.14], revelan también algunas tendencias importantes y muy notables. En términos generales, la precipitación aumentó en el Hemisferio Norte entre 1900 y 2005, pero la tendencia a una sequía más generalizada aumentó paralelamente en numerosas y extensas regiones de los trópicos y del Hemisferio Sur, singularmente en el Sahel africano y sur de África, América Central, sur de Asia y Australia oriental. [GTI 3.3.5]

4.1.2 Proyecciones de cambio hidrológico, y sus implicaciones respecto a la biodiversidad mundial

Las estimaciones del cuarto Informe de Evaluación del IPCC sobre el calentamiento mundial se sitúan entre 0,5°C en el Hemisferio Norte y 2°C en la región polar septentrional de aquí a 2030, en base a los escenarios Bl, Al y A2 del IE-EE, de los cuales Bl es el que contempla el calentamiento más elevado. Aunque los modelos simulan el aumento mundial medio de la precipitación, hay una variación espacial y temporal importante. Los modelos de circulación general (MCG) proyectan un aumento de la precipitación en latitudes altas, aunque la magnitud de este incremento varía según el modelo, y una disminución de la precipitación en numerosas áreas subtropicales y de latitudes medias, en ambos hemisferios. [GTI, Figuras 10.8 y 10.12] Las proyecciones indican que durante los próximos decenios la precipitación tenderá a concentrarse en episodios más intensos, separados por periodos más prolongados de precipitación escasa. [GTI 10.3.6.1] El aumento del número de días secos consecutivos sería más apreciable en América del Norte y Central, Caribe, nordeste y suroeste de América del Sur, Europa meridional y Mediterráneo, sur de África, y oeste de Australia. [GTI, Figura 10.18] En regiones tropicales y subtropicales, los impactos del calentamiento y el cambio de las pautas de precipitación tienen implicaciones importantes respecto a la biodiversidad mundial, ya que la diversidad de especies disminuye generalmente con la distancia respecto al Ecuador.

Los cambios hidrológicos proyectados por el 4IE del GTI para el siglo XXI (véase la Sección 2) afectarían *muy probablemente* a la diversidad biológica en todos los continentes. En la mayoría de las regiones del mundo se han detectado ya impactos sobre las especies. [GTII 1.3, 4.2] Un examen de 143 estudios publicados (Root et al., 2003) indica que la flora y la fauna están evidenciando ya cambios discernibles que concuerdan con las tendencias climáticas del siglo XX. De esos cambios, un 80% aproximadamente concuerda con el cambio observado de las temperaturas, aunque teniendo presente que la temperatura podría ejercer también una influencia sobre las especies, al modificar la disponibilidad de humedad. [GTII 1.4.1]

Las respuestas de los ecosistemas a los cambios hidrológicos implican a menudo complejas interacciones entre procesos bióticos y abióticos. Los agregados de especies en comunidades ecológicas reflejan el hecho de que esas interacciones y respuestas no siempre son lineales, lo que agrava la dificultad de proyectar unos resultados ecológicos específicos. Dado que la cronología de las respuestas no siempre es sincrónica en especies pertenecientes a diferentes grupos taxonómicos, podría sobrevenir un desacoplamiento entre especies y fuentes de alimentación, una alteración de las relaciones simbióticas o facilitativas entre especies, o cambios en la competición entre especies. Debido a una conjunción de respuestas diferenciales entre especies y a interacciones que teóricamente podrían establecerse en cualquier punto de una red alimentaria, algunas de las comunidades ecológicas actuales podrían fácilmente disgregarse en el futuro (Root and Schneider, 2002; Burkett et al., 2005). [GTII 1.3.5.5, 4.2.2, 4.4]

Debido a los efectos combinados de la temperatura y del estrés hídrico, se extinguirían algunos anfibios y otras especies acuáticas en Costa Rica, España y Australia (Pounds et al., 2006). [GTII, Tabla 4.1] El desecamiento de humedales en el Sahel afectará al desplazamiento de las aves que los utilizan como puntos de tránsito en su migración hacia los lugares de cría, en el Hemisferio Norte. En el sur de África acontecería un nivel de extinción sin precedentes, tanto en especies animales como vegetales. [GTII Tabla 9.1] En los bosques de montana, gran número de especies dependen de la neblina como fuente de agua: el calentamiento mundial elevará la base de nubes y afectará a las especies que dependen de este recurso. [GTII 13.4.1] De todos los ecosistemas, sin embargo, los ecosistemas acuáticos de agua dulce parecen tener la menor proporción de especies amenazadas de extinción por el cambio climático (Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, 2005b). [GTII 3.5.1]

4.1.3 Impactos de los cambios hidrológicos sobre los principales tipos de ecosistema

4.1.3.1 Lagos y cursos de agua

El calentamiento mundial producirá impactos diversos en los lagos: un dilatado periodo de crecimiento en latitudes altas,

una mayor estratificación con pérdida de nutrientes en aguas superficiales, menor abundancia de oxígeno hipolimnético (por debajo de la termoclina) en aguas profundas, estratificación de aguas lacustres, y mayor extensión geográfica de numerosas plantas acuáticas invasivas. Se espera un aumento de nivel del agua en lagos de latitudes altas, donde los modelos climáticos apuntan a un aumento de la precipitación, y una disminución en latitudes medias o bajas. Los lagos endorreicos (terminales o cerrados) son los más vulnerables a los cambios de clima, debido a su sensibilidad a las alteraciones del balance entre el insumo hídrico y la evaporación. En tales lagos, la alteración del insumo hídrico podría tener efectos muy notables y, en algunas condiciones climáticas, el lago podría desaparecer completamente. El mar de Aral, por ejemplo, ha experimentado una retracción notable, debido a un mayor volumen de extracción aguas arriba con fines de irrigación; y, en China, el nivel del lago Qinghai ha descendido tras disminuir la precipitación en la cuenca de captación. [GTII TIE 4.3.7]

La permanencia de la cubierta de hielo sobre lagos y ríos en latitudes medias y altas se ha reducido en aproximadamente dos semanas durante el siglo pasado en el Hemisferio Norte. [GTI TIE RRP] El aumento de la temperatura del agua en verano puede intensificar la anoxia en los lagos estratificados y la tasa de liberación de fósforo de los sedimentos del fondo del lago, y provocar la floración de algas, modificando la red alimentaria acuática. [GTII 4.4.8] En los lagos tropicales, un aumento unitario de la temperatura se traduce en una diferencia de densidad proporcionalmente mayor que en lagos con temperaturas menores. Por ello, las temperaturas tropicales proyectadas [GTI, Capítulos 10 y 11] darían lugar a una mayor estratificación térmica, produciendo anoxia en las capas profundas de los lagos y un agotamiento de los nutrientes en aguas poco profundas. La menor concentración de oxígeno reduciría, en términos generales, la diversidad de las especies acuáticas, particularmente en los casos en que la calidad del agua ha sido deteriorada por la eutrofización. [CCB 4.4]

Una menor concentración de oxígeno alteraría los agregados bióticos, la biogeoquímica y la productividad general de lagos y cursos de agua. En latitudes medias y altas, las temperaturas óptimas para numerosos grupos taxonómicos de aguas frías son inferiores a 20°C. Habría extinciones de especies si las temperaturas estivales cálidas y la anoxia eliminasen los refugios de aguas frías y profundas. En el sur de la Gran Planicie de Estados Unidos, las temperaturas del agua se están acercando ya a unos límites letales para numerosas especies autóctonas de peces de agua dulce. La rapidez de descomposición de la materia orgánica aumenta con la temperatura, acortando así el periodo durante el cual los invertebrados acuáticos disponen de detritus. [CCB 6.2] Las especies foráneas invasivas representan un gran desafío para la biodiversidad autóctona en los ecosistemas acuáticos. [GTII 4.2.2] El aumento de la temperatura mundial tenderá a extender hacia los polos el ámbito geográfico de numerosas plantas acuáticas invasivas, como *Eichhornia* o *Salvinia*. [IRCC 2.3.6]

Los efectos del calentamiento sobre los sistemas ribereños podrían ser más intensos en las regiones húmedas, en que los caudales son menos variables y las interacciones biológicas controlan la abundancia de organismos. La desecación de los cauces de arroyos y lagos durante largos periodos de tiempo podría reducir la productividad de los ecosistemas debido a la restricción de su hábitat acuático, sumada a una menor calidad del agua, como consecuencia de la disminución de oxígeno y de la mayor concentración de poluyentes. En las áreas semiáridas del planeta, la reducción de los caudales estacionales y la total desecación de los lagos (por ejemplo en África, en el Sahel) puede tener impactos graves sobre los servicios ecosistémicos, y en particular sobre el mantenimiento de la biodiversidad. [CCB 6.7]

Actualmente, la riqueza en especies es máxima en los sistemas de agua dulce del centro de Europa, y disminuye en el norte y en el sur debido a las sequías periódicas y a la salinización (Declerck et al., 2005). Agregados de MCG utilizados para el 4IE del IPCC indican un contraste entre el sur y el norte respecto a la precipitación, con aumentos en el norte y disminuciones en el sur. [GTI 11.3.3.2] Un aumento de la escorrentía y un menor riesgo de sequía beneficiarían posiblemente a la fauna de los sistemas acuáticos en el norte de Europa, mientras que una menor disponibilidad de agua en el sur podría producir el efecto opuesto (Alvarez Cobelas et al., 2005). [GTII 12.4.6]

4.1.3.2 Humedales de agua dulce

El alto grado de variabilidad estructural de los sistemas de humedal se debe principalmente a su propia hidrología, que se manifiesta tanto en ciénagas de turbera, en los bosques boreales de latitudes altas, como en humedales monzónicos tropicales (por ejemplo los de Kakadu, en Australia), o en humedales de latitudes altas en las montañas del Tibet y de los Andes. El cambio climático tendrá efectos más pronunciados en los humedales interiores de agua dulce, debido a la alteración de la precipitación y a perturbaciones más frecuentes o intensas (sequías, tempestades, inundaciones). Aumentos relativamente pequeños de la variabilidad de precipitación pueden afectar en gran medida a la flora y fauna de los humedales en diferentes etapas de su ciclo vital (Keddy, 2000). [GTII 4.4.8] En conjunto, se espera que el calentamiento del clima inicie una tendencia a la sequía en los ecosistemas de humedal. Esta influencia del cambio climático, en gran parte indirecta, que producirá alteraciones en el nivel del agua, sería el principal agente del cambio de los ecosistemas de humedal, y enmascararía los impactos producidos por el aumento de la temperatura y por una mayor duración de las temporadas de crecimiento en las turberas boreales y subárticas (Gorham, 1991). Las áreas monzónicas estarán más expuestas a los efectos de unas lluvias más intensas, con una menor duración de las temporadas de lluvia, lo cual favorecerá las crecidas y la erosión en las cuencas y en los propios humedales. [GTII TAR 5.8.3]

Los procesos de humedal dependen en su mayoría de la hidrología a nivel de cuenca, que puede resultar alterada por los cambios de uso de la tierra y por las prácticas de gestión de los recursos hídricos de superficie. [GTII TIE 5.RE] La recarga de los sistemas freáticos locales y regionales, la posición del

humedal respecto a la topografía local y el gradiente de los sistemas freáticos regionales de mayor tamaño son también factores críticos para determinar la variabilidad y estabilidad del almacenamiento de acuosidad en los humedales en zonas climáticas en que la precipitación no es mucho mayor que la evaporación (Winter and Woo, 1990). El cambio del nivel de recarga en el exterior del humedal podría ser tan importante para el destino del humedal en condiciones climáticas cambiantes como los cambios de la precipitación y de la evaporación en el propio humedal (Woo et al., 1993). [GTII TIE 5.8.2.1] Así, podría resultar muy difícil, si no imposible, adaptarse a las consecuencias de los cambios de disponibilidad de agua que indican las proyecciones. [GTII TIE 5.8.4] Debido en parte a su limitada capacidad de adaptación, se considera que los humedales se encuentran entre los ecosistemas más vulnerables al cambio climático. [GTII 4.4.8]

Los humedales suelen albergar una rica diversidad biológica. Muchos de ellos han sido designados reservas naturales a nivel mundial (los parajes de Ramsar, o del Patrimonio Mundial). Su pérdida podría causar un número considerable de extinciones, particularmente de anfibios y reptiles acuáticos. [GTII 4.4.8] Según el TIE, las ciénagas ombotróficas ('alimentadas por nubes') de las regiones ártica y subártica y los humedales cóncavos con cuencas de pequeño tamaño son los sistemas acuáticos más vulnerables al cambio climático. [GTII TIE 5.8.5] Más recientemente, sin embargo, el 4IE parece indicar un grado de vulnerabilidad muy alto en muchos otros tipos de humedales, como los humedales monzónicos de India y Australia, las turberas boreales, los humedales de pradera bacheados de América del Norte, y los humedales de los Grandes Lagos de África. [GTII 4.4.8, 4.4.10] A menos que cambien las pautas y rutas de migración estacional de numerosas especies de humedal, muchas especies estarán amenazadas de extinción. [GTII 4.4.8] En los hábitats esenciales se podría plantear una restauración en pequeña escala, si se dispone de agua suficiente. [GTII TIE 5.8.4]

Debido a los cambios hidrológicos que conllevaría el calentamiento atmosférico, la superficie cubierta por los humedales ha aumentado en algunas regiones. En la región ártica, la fusión de permafrost está generando nuevos humedales. [GTII 1.3] Las características del termokarst, producidas por la fusión del hielo subterráneo en regiones cubiertas de permafrost, pueden desplazar los biotipos árticos por sobresaturación o desecación (Hinzman et al., 2005; Walsh et al., 2005). Se ha descubierto un extenso proceso de formación de termokarst en América del Norte, cerca de Council, Alaska (Yoshikawa and Hinzman, 2003) y en la Yakutia central (Gavriliev and Efremov, 2003). [GTI 4.7.2.3] Inicialmente, la fusión de permafrost crea depresiones aptas para nuevos humedales y ciénagas interconectados por nuevos canales de drenaje. A medida que el permafrost se sigue derritiendo, las aguas superficiales se introducen en los sistemas de agua subterránea, ocasionando así una pérdida de agua dulce en el hábitat. [GTII 15.4.1.3] El calentamiento puede haber causado ya pérdidas de superficie de humedal, vinculadas al crecimiento de los lagos del delta del Yukon durante el pasado siglo (Coleman and Huh, 2004). [GTII 15.6.2]

Un pequeño aumento de la variabilidad de los regímenes de precipitación puede afectar de manera importante a la flora y fauna de los humedales (Keddy, 2000; Burkett and Kusler, 2000). En los humedales estacionales, como las charcas primaverales, la biodiversidad pueden resultar muy afectada por los cambios de precipitación y de humedad del suelo (Bauder, 2005). En las regiones monzónicas, periodos prolongados de sequía pueden ocasionar la 'terrificación' de los humedales, como se ha observado en el Parque Nacional Keoladeo (Chauhan and Gopal, 2001). [GTII 4.4.8]

4.1.3.3 Costas y estuarios

Los cambios en la cronología y volumen de la escorrentía de agua dulce afectarán a la salinidad, a la disponibilidad de sedimentos y nutrientes y a los regímenes de humedad de los ecosistemas costeros. El cambio climático puede afectar a cada una de esas variables si llega a alterar la precipitación y la escorrentía local o, lo que es más importante, la escorrentía proveniente de las cuencas receptoras que nutren la zona costera. [GTII 6.4.1.3] La hidrología ejerce una fuerte influencia sobre la distribución de comunidades vegetales de los humedales costeros, generalmente estructurada, desde el mar hacia la tierra, en especies de agua salada, de agua salobre y de agua dulce. [GTII 6.4.1.4]

Los impactos del aumento del nivel del mar sobre la fisionomía de la costa dependen de la región costera, dado que la magnitud del aumento del nivel del mar no es uniforme en todo el mundo [GTI 5.5.2] y que algunas regiones costeras experimentan una elevación o un hundimiento resultantes de procesos que no dependen del cambio climático. En particular, la extracción de agua subterránea, petróleo o gas, y la isostasia (adaptación de la superficie de la Tierra a los cambios de masa superficial en escalas temporales geológicas debido, por ejemplo, a una variación de la masa del manto de hielo tras la última desglaciación). Además de los cambios de elevación a lo largo de la costa, otros factores con origen en tierra firme pueden modificar el efecto neto del aumento del nivel del mar sobre los ecosistemas costeros. Los ecosistemas naturales presentes en los humedales se han fragmentado, y el arrastre de agua, sedimentos y nutrientes hacia la costa ha resultado alterado (Nilsson et al., 2005). El cambio de uso de la tierra y las modificaciones hidrológicas han producido impactos aguas abajo, además de influencias localizadas, y en particular el desarrollo humano en las costas. La erosión ha acrecentado la cantidad de sedimento que llega a la costa; la carga en suspensión del río Huanghe (Amarillo), por ejemplo, ha aumentado de 2 a 10 veces en los últimos 2.000 años (Jiongxin, 2003). Los embalses y las canalizaciones, en cambio, han reducido en gran medida la aportación de sedimentos a la costa en otros ríos por retención de sedimento en las presas (Syvistki et al., 2005); este impacto predominará probablemente durante el siglo XXI. [GTII 6.4]

Los resultados obtenidos por Milly et al. (2005) mediante un agregado de modelos climáticos indican que en los próximos 50 a 100 años el cambio climático acrecentará el caudal hacia las aguas costeras en la región ártica, norte de Argentina y sur de Brasil, partes del subcontinente indio y China, y lo reducirá

en el sur de Argentina y Chile, oeste de Australia y oeste y sur de África, y en la cuenca del Mediterráneo. [GTII 6.3.2; véase la Figura 2.10 de este volumen] Si disminuyera el caudal fluvial, aumentaría la salinidad de los estuarios costeros y de los humedales, y disminuiría la cantidad de sedimentos y nutrientes aportados a la costa. En áreas costeras en que disminuya el caudal, la salinidad tenderá a extenderse aguas arriba, alterando así la distribución de especies de plantas y animales y la disponibilidad de agua dulce para usos humanos. El aumento de la salinidad de las aguas costeras desde 1950 ha contribuido a la reducción de los bosques de palmeras en Florida (Williams et al., 1999) y de los bosques de cipreses calvos en Luisiana (Krauss et al., 2000). El aumento de la salinidad ha desempeñado también un papel en la expansión de los manglares en marismas adyacentes a los terrenos pantanosos de Florida (Ross et al., 2000) y a lo largo del sureste de Australia durante los últimos 50 años (Saintilan and Williams, 1999). [GTII 6.4.1.4] La intrusión de agua salada por efecto conjunto del aumento del agua del mar, de la disminución de los caudales fluviales y de una mayor frecuencia de sequía alteraría a lo largo del siglo las pesquerías costeras que dependen de los estuarios en partes de África, Australia y Asia. [GTII 6.4.1.3, 9.4.4, 10.4.1, 11.4.2]

Los deltas costeros son particularmente vulnerables a los cambios de escorrentía y al transporte de sedimento, que afectan a su capacidad para contrarrestar los impactos físicos del cambio climático. En Asia, donde las actividades humanas ocasionaron un aumento de la cantidad de sedimento en los principales ríos, la construcción de presas aguas arriba está impidiendo el aporte de sedimento a numerosos deltas, con el consiguiente aumento generalizado de la erosión costera (Li et al., 2004; Syvitski et al., 2005; Ericson et al., 2006). [GTII 6.2.3, 6.4.1] En la planicie del delta del río Mississippi, en el sureste de Luisiana, la escasez de sedimento por efecto de la intervención humana en los procesos de delta y el consiguiente aumento de la salinidad y de los niveles del agua en las marismas costeras sobrevinieron tan rápidamente que, entre 1978 y 2000, se convirtieron en mar abierto 1.565 km^2 de marismas costeras intermareas y tierras bajas adyacentes (Banas et al., 2003). [GTII 6.4.1]

Algunos de los impactos potenciales más graves del cambio climático en los estuarios podrían estar vinculados a la alteración de las características físicas de su composición, producida por los cambios en la escorrentía de agua dulce (Scavia et al., 2002). Los aportes de agua dulce a los estuarios influyen en el tiempo de permanencia del agua, en el suministro de nutrientes, en la estratificación vertical, en la salinidad y en el control de las tasas de crecimiento de fitoplancton (Moore et al., 1997). En entornos marinos poco profundos cercanos a la costa, los cambios del caudal fluvial inducirán cambios en la turbidez, en la salinidad, en la estratificación y en la disponibilidad de nutrientes (Justic et al., 2005). [GTII 6.4.1.3]

4.1.3.4 Ecosistemas de montaña

La zonificación de los ecosistemas a lo largo de las pendientes montañosas está inducida por la temperatura y por la humedad del suelo. Estudios recientes (Williams et al., 2003; Pounds and Puschendorf, 2004; Andreone et al., 2005; Pounds et al., 2006) apuntan a un riesgo desproporcionado de extinción en los ecosistemas de montaña y, en particular, en especies endémicas. [GTII 4.4.7] Numerosas especies de anfibios, pequeños mamíferos, peces, pájaros y plantas son muy vulnerables a los cambios actuales y proyectados del clima que alteran su nicho de montaña, extremadamente especializado. [GTII 1.3.5.2, 4.4.7, 9.4.5]

En muchos humedales que dependen de la fusión de la nieve, el aumento de la temperatura ha inducido un salto en la magnitud y periodicidad de los episodios hidrológicos. En América del Norte y Eurasia se ha observado una tendencia al adelanto de las fechas de caudal fluvial máximo en primavera y un aumento de los caudales de base durante los inviernos. [GTII 1.3.2] Entre 1949 y 2004 aumentó la proporción de precipitación anual en forma de lluvia respecto a la de nieve en el 74% de las estaciones meteorológicas estudiadas en las montañas del oeste de Estados Unidos (Knowles et al., 2006). Desde los años 70, el espesor de la nieve en invierno y la cubierta de nieve en primavera han disminuido en Canadá, particularmente en el oeste, donde la temperatura del aire ha aumentado apreciablemente (Brown and Braaten, 1998). La cubierta de nieve vernal y estival está disminuyendo en el oeste de Estados Unidos (Groisman et al., 2004). En agua equivalente, la nieve del primer día de abril ha disminuido un 15-30% desde 1950 en las montañas occidentales de América del Norte, particularmente en elevaciones inferiores durante la primavera, debido en mayor medida al calentamiento que a los cambios de la precipitación (Mote et al., 2005). En las montañas del oeste de Estados Unidos, que dependen del deshielo, los valores máximos del caudal fluvial se alcanzaron, en 2002, entre 1 y 4 semanas antes que en 1948 (Stewart et al., 2005). [GTII 14.2.1]

La duración y espesor de la cubierta de nieve, frecuentemente relacionados con la temperatura media y con la precipitación (Keller et al., 2005; Monson et al., 2006), son factores clave en numerosos ecosistemas alpinos (Körner, 1999). El déficit de nieve expone a plantas y animales a los efectos de las heladas, e influye en el suministro de agua en primavera (Keller et al., 2005). Cuando los cambios en las pautas de nieve alteran los desplazamientos de los animales, como ha sucedido en Colorado (Inouye et al., 2000), podría aumentar la mortalidad de la fauna silvestre por efecto de un desajuste entre ésta y el medio ambiente. [GTII 4.4.7] Para cada aumento de 1°C de temperatura, la duración de la cubierta de nieve disminuiría en varias semanas en las elevaciones medias de los Alpes europeos. Es *virtualmente cierto* que la flora de montaña europea experimentará grandes cambios en respuesta al cambio climático, siendo la diferente duración de la cubierta de nieve un factor más importante que los impactos directos de la temperatura sobre el metabolismo animal. [GTII 12.4.3]

Los cambios en la escorrentía por efecto del deshielo de los glaciares tienen efectos notables sobre los servicios ecosistémicos. La biota de los arroyos y humedales que se alimentan del deshielo de los glaciares es muy vulnerable a la extirpación. [GTII 1.3.1, 3.2, 3.4.3]

4.1.3.5 Bosques, sabanas y pastizales

A medida que se calienta el clima, la disponibilidad de agua deviene un factor clave en la reestructuración de los sistemas boscosos y de pastizal. Se sabe que el cambio climático aumenta la probabilidad de que los incendios incontrolados sean más extensos y frecuentes, induciendo también estrés en los árboles, que intensifica indirectamente los efectos de esas perturbaciones. En los trópicos y en latitudes y altitudes altas, numerosos ecosistemas forestales son crecientemente susceptibles a la sequía y a los cambios concomitantes en relación con incendios, plagas y enfermedades. [GTII, Capítulo 4, 5.1.2, 13.4] Se ha estimado que hasta un 40% de la selva amazónica podría resultar afectado por una disminución incluso pequeña de la precipitación (Rowell and Moore, 2000). Las simulaciones mediante multimodelos MCG de los cambios de precipitación en América del Sur durante los próximos 100 años apuntan a una disminución sustancial (un 20% o más) de la precipitación en la cuenca amazónica durante los meses de junio, julio y agosto, frente a un ligero aumento (un 5%, aproximadamente) durante diciembre, enero y febrero. [GTI 11.6.3.2] Estos cambios de precipitación, acoplados a un aumento de la temperatura, denotan la sustitución de algunas selvas amazónicas por ecosistemas más resistentes a los múltiples estreses producidos por el aumento de la temperatura, las sequías y los incendios. [GTII 13.4.2]

El aumento de las sequías en diversas regiones (Europa, partes de América Latina) durante la temporada de crecimiento iría aparejado a un aumento de la temperatura en verano y a una disminución de la precipitación, con efectos generalizados sobre la productividad neta de los ecosistemas forestales. En los bosques, la sequía induce mortalidad a causa de enfermedades, estrés hídrico y plagas, una menor resistencia, y retroefectos bióticos que varían de un lugar a otro. [GTII 4.4.5] En algunas regiones, los bosques sustituirían otros tipos de vegetación, como la tundra o los pastizales, y la disponibilidad de agua puede ser tan importante para la fotosíntesis como los efectos de la temperatura y del enriquecimiento en CO_2. [GTII 4.4.3, 4.4.5]

Numerosos estudios han evaluado el impacto directo de la fertilización por CO_2 y los efectos del calentamiento sobre los tipos predominantes de bosques y pastizales. Estudios basados en una gran diversidad de especies forestales y herbáceas parecen indicar que el aumento de la actividad fotosintética resultante de un eventual enriquecimiento en CO_2 dependerá de la disponibilidad de agua. [GTII 4.4.3] Una mayor magnitud de los efectos del enriquecimiento en CO_2 sobre los bosques y sabanas podría tener un retroefecto importante sobre los recursos hídricos. Por ejemplo, el enriquecimiento en CO_2 atmosférico puede tener efectos adversos sobre el valor nutritivo de los detritus en los cursos fluviales (Tuchman et al., 2003), y el equilibrio hídrico del suelo puede acusar claramente los efectos de una mayor cantidad de CO_2 en la mayoría de los tipos de pastizal. [GTII 4.4.10] La productividad de los pastizales y de las sabanas es muy sensible a la disponibilidad de precipitación. En varias evaluaciones de la productividad de las praderas de tallo alto, el aumento de la variabilidad pluvial resultó ser más acentuado que el de la cantidad de lluvia, con una disminución del 10% en la productividad primaria neta debida a un aumento del 50% en la duración de los períodos de sequía (Fay et al., 2003a). [GTII 4.4.3]

4.2 Agricultura y seguridad alimentaria, uso de la tierra y silvicultura

4.2.1 Contexto

La productividad de los sistemas agrícolas, forestales y piscícolas depende principalmente de la distribución temporal y espacial de la precipitación y de la evaporación, así como de la disponibilidad de recursos de agua dulce para el riego, especialmente de cultivos. [GTII 5.2.1] Los sistemas de producción de áreas marginales en términos hídricos estarían abocados a una mayor vulnerabilidad climática y a un mayor riesgo en caso de cambio climático, debido a factores como, por ejemplo, la degradación de los recursos terrestres por erosión del suelo, la sobreexplotación de las aguas subterráneas y la consiguiente salinización, o el pastoreo excesivo en tierras secas (FAO, 2003). [GTII 5.2.2] En esas áreas marginales, la agricultura en pequeña escala es especialmente vulnerable al cambio y variabilidad del clima, y los factores de estrés socioeconómicos suelen agravar unas condiciones medioambientales ya de por sí difíciles. [GTII 5.2.2, Tabla 5.2, Recuadro 5.3] En los bosques, los incendios y la proliferación de insectos vinculados a la frecuencia de episodios extremos acentúan la vulnerabilidad del clima. En las pesquerías, la polución del agua y los cambios en los recursos hídricos acentúan también la vulnerabilidad y el riesgo. [GTII 5.2.2]

4.2.1.1 Agricultura y seguridad alimentaria

El agua desempeña un papel crucial en la producción regional y mundial de alimentos. Por una parte, más de un 80% de las tierras agrícolas del mundo depende de la lluvia; en esas regiones, la productividad de los cultivos depende únicamente de una precipitación suficiente para satisfacer la demanda evaporativa y la consiguiente distribución de humedad del suelo (FAO, 2003). [GTII 5.4.1.2] Allí donde esas variables están limitadas por el clima, como sucede en las regiones áridas y semiáridas, en los trópicos y subtrópicos, y en las regiones de tipo mediterráneo de Europa, Australia y América del Sur, la producción agrícola es muy vulnerable al cambio climático (FAO, 2003). Por otra parte, la producción mundial de alimentos depende del agua, no sólo en forma de precipitación, sino también, fundamentalmente, en forma de recursos hídricos disponibles para el riego. De hecho, las tierras de regadío, que representan sólo un 18% de las tierras agrícolas mundiales, producen 1.000 millones de toneladas de cereales al año, que representan aproximadamente la mitad del suministro mundial total; ello se debe a que los cultivos de regadío producen, en promedio, entre 2 y 3 veces más que los cultivos dependientes de la lluvia[19] (FAO, 2003).

[19] Véase en la sección 1.3 una explicación sobre las relaciones entre el riego, el cambio climático y la recarga de agua subterránea. Este tema se aborda también en las Secciones 5.1.3 (relativa a África) y 5.2.3 (relativa a Asia).

Mientras que un déficit excesivo de agua se traduce en vulnerabilidad de la producción, un exceso de agua puede tener también efectos no deseados sobre la productividad de los cultivos, ya directamente (por ejemplo, afectando a las propiedades del suelo y dañando el crecimiento vegetal), ya indirectamente (por ejemplo, impidiendo o retrasando las necesarias labores agrícolas). Los episodios de precipitación intensa, la humedad excesiva del suelo y las crecidas interfieren en la producción de alimentos y en los medios de subsistencia rurales a nivel mundial (Rosenzweig et al., 2002). [GTII 5.4.2.1]

Además de ser una necesidad en los procesos de preparación de los alimentos, el agua, que influye de manera determinante en la productividad de los cultivos y en la producción de alimentos, desempeña un papel crítico en relación con la seguridad alimentaria. En el mundo hay todavía 850 millones de personas mal alimentadas (FAO, 2003). [GTII 5.3.2.1, 5.6.5] Durante los próximos decenios, las presiones socioeconómicas darán lugar a una mayor competitividad entre las necesidades de riego y la demanda de los sectores no agrícolas, que podría reducir la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos necesarios para la alimentación. [GTII 3.3.2] Estudios recientes indican que es *improbable* que se cumplan en 2015 los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) en lo referente al hambre. [GTII 5.6.5] Al mismo tiempo, durante este siglo el cambio climático puede reducir aún más la disponibilidad de agua para la producción mundial de alimentos, a consecuencia de los cambios medios proyectados de la temperatura y de los regímenes de precipitación, y del aumento previsto de la frecuencia de fenómenos extremos tales como las sequías o las crecidas (Rosenzweig et al., 2002). [GTII 5.6.5]

Las evaluaciones de los impactos del clima en la producción de alimentos están, en general, crucialmente determinadas por el tipo específico de proyección que se utilice para la precipitación mediante MCG. [GTII 5.4.1.2] Se dispone actualmente de una amplia diversidad de escenarios de precipitación. Las evaluaciones mediante escenarios basados en una menor precipitación regional suelen arrojar señales negativas respecto a la producción de cultivos, y viceversa. Las proyecciones que apuntan a una mayor aridez en diversos medioambientes de tipo mediterráneo (Europa, Australia y América del Sur), así como en regiones tropicales áridas y semiáridas marginales, particularmente en el África subsahariana, parecen ser robustas en relación con los distintos modelos (véase la Figura 2.10). Esas regiones se enfrentarían a una mayor vulnerabilidad por efecto del cambio climático, como puede verse en la Figura 4.1. [GTII 5.3.1]

4.2.1.2 Uso de la tierra y ecosistemas forestales

Los ecosistemas forestales ocupan aproximadamente 4.000 millones de hectáreas de tierras, una superficie comparable al conjunto de las utilizadas por cultivos y pastizales. De esas tierras, sólo unos 200 millones de hectáreas están destinadas a la producción forestal comercial en todo el mundo (FAO, 2003). [GTII 4.4.5, 5.1.1, 5.4.5]

Los bosques son determinantes para el suministro, la calidad y la cantidad de agua, tanto en los países desarrollados como en desarrollo. La importancia de los bosques como cuencas de captación de agua puede aumentar sustancialmente en los próximos decenios a medida que escaseen los recursos de agua dulce, particularmente en los países en desarrollo. (Mountain Agenda, 1997; Liniger and Weingartner, 1998). [UTCUTS 2.5.1.1.4; GTII 4.1.1]

Los bosques contribuyen al ciclo hídrico regional, y los cambios de uso de la tierra podrían afectar en gran medida a los climas locales y regionales (Harding, 1992; Lean et al., 1996). Por otra parte, la protección de los bosques puede ser beneficiosa, ya que reduciría las sequías y las crecidas, particularmente en los trópicos (Kramer et al., 1997; Pattanayak and Kramer, 2000). [UTCUTS 2.5.1.1.6]

La repoblación forestal y la reforestación podrían intensificar la humedad, disminuir la temperatura y acrecentar las lluvias en las regiones afectadas (Harding, 1992; Blythe et al., 1994); la deforestación, en cambio, puede reducir la lluvia a nivel local y elevar las temperaturas. En la Amazonia y en Asia, la deforestación puede dar lugar a nuevas condiciones climáticas inadecuadas para la necesaria regeneración de las especies de los bosques pluviales (Chan, 1986; Gash and Shuttleworth, 1991; Meher-Homji, 1992). [UTCUTS 2.5.1.1.6]

Los ecosistemas forestales difieren en su sensibilidad al cambio climático (por ejemplo, Kirschbaum and Fischlin, 1996; Sala et al., 2000; Gitay et al., 2001); los biomas limitados por la temperatura son sensibles a los impactos del calentamiento, y los limitados por el agua son sensibles al agravamiento de la sequía. Algunos, como los ecosistemas que dependen del fuego, podrían cambiar rápidamente en respuesta al cambio climático y a otros cambios medioambientales (Scheffer et al., 2001; Sankaran et al., 2005). [GTII 4.1, 4.4.5]

Los ecosistemas forestales y la biodiversidad a ellos asociada podrían estar particularmente amenazados en África, debido a una conjunción de presiones socioeconómicas y de factores relacionados con el uso de la tierra y con el cambio climático. [GTII 4.2] De aquí a 2100, los impactos negativos podrían ocasionar una disminución, tanto de la calidad del agua como de los bienes y servicios ecosistémicos, en aproximadamente un 25% de la superficie de África (particularmente en el sur y oeste del continente). [GTII 4.RE, 4.4.8] De hecho, se están detectando y documentando ya cambios en diversos ecosistemas, particularmente en el sur de África. [GTII 9.2.1.4]

4.2.2 Observaciones

4.2.2.1 Impactos climáticos y agua

Aunque es sabido que la agricultura y la silvicultura dependen en gran medida del clima, es difícil encontrar evidencia de un cambio vinculado a los cambios regionales del clima, y específicamente al agua. La agricultura y la silvicultura están también fuertemente influidas por factores no climáticos, y especialmente por las prácticas de gestión y por los cambios tecnológicos (Easterling, 2003) a escala local y regional, así como por los precios de mercado y las políticas en materia de subvenciones. [GTII 1.3.6]

Aunque es difícil identificar en los sistemas humanos respuestas al reciente cambio climático, en razón de múltiples dinamizantes no climáticos y de la existencia de procesos de adaptación, sí se han detectado efectos sobre los bosques y sobre algunos sistemas agrícolas. Los cambios sobrevenidos en ciertos aspectos del sistema sanitario humano han sido vinculados al reciente calentamiento. La adaptación al reciente calentamiento está empezando a ser documentada sistemáticamente. En comparación con otros factores, el reciente calentamiento ha tenido consecuencias limitadas respecto a la agricultura y a la silvicultura. Sin embargo, se ha observado un avance significativo de la fenología respecto de la agricultura y la silvicultura en grandes partes del Hemisferio Norte, con respuestas limitadas en términos de gestión de cultivos. La mayor duración de la temporada de crecimiento ha contribuido al aumento observado de la productividad forestal en numerosas regiones, mientras que el aumento de temperatura y sequedad es parcialmente responsable de la disminución de la actividad forestal y de la mayor frecuencia de incendios forestales en América del Norte y en la cuenca mediterránea. Tanto la agricultura como la silvicultura han evidenciado ser vulnerables a las tendencias recientes en términos de olas de calor, sequías e inundaciones. [GTII 1.3.6, 1.3.9, 5.2]

4.2.2.2 CO_2 atmosférico y dinámica del agua

Los efectos de una mayor cantidad de CO_2 atmosférico sobre la función de las plantas podrían tener implicaciones importantes respecto a los recursos hídricos, debido a una mayor eficiencia en el consumo foliar de agua, resultante de una resistencia estomática mayor que con las concentraciones actuales. En relación con las especies de plantas C_3 (incluidos la mayoría de los cultivos alimentarios), el impacto del CO_2 puede ser relativamente mayor para los cultivos sometidos a estrés hídrico que para los cultivos adecuadamente irrigados. [GTII TIE 5.3.3.1]

A gran escala, sin embargo, son muy inciertas las implicaciones de las interacciones entre el CO_2 y el agua (a nivel de dosel vegetal, de explotación agrícola y de región). En general, se reconoce que los efectos positivos que ejercería un aumento de CO_2 sobre las relaciones entre el agua y las plantas quedarían compensados por una mayor demanda evaporativa a temperaturas superiores. [GTII TIE 5.3.3.1]

Numerosos estudios recientes confirman y amplían los resultados del TIE, que indican que, en los próximos decenios, los cambios de temperatura y de precipitación modificarán y, en muchos casos, limitarán los efectos directos del CO_2 sobre las plantas. Por ejemplo, unas temperaturas altas durante el período de floración podrían atenuar los efectos del CO_2, ya que limitarían el número, tamaño y calidad de los granos (Thomas et al., 2003; Baker et al., 2004; Caldwell et al., 2005). Del mismo modo, una mayor demanda de agua vinculada al calentamiento podría atenuar los previsibles efectos positivos del CO_2. Para un nivel de 450 ppm de CO_2, el rendimiento de los cultivos de trigo dependientes de la lluvia aumentaría para valores de calentamiento de hasta 0,8°C, pero disminuiría a partir de los 1,5°C; será necesario incrementar el riego para contrarrestar esos efectos negativos. [GTII 5.4.1.2]

Por último, tanto los fitofisiólogos como los modelizadores de cultivos son conocedores de que los efectos de un nivel elevado de CO_2, medidos en condiciones experimentales e introducidos en los modelos, podrían sobreestimar la respuesta real a nivel de campo y de explotación agrícola. Ello se debe a numerosos factores, que operan generalmente a nivel de campo, como las plagas, las malas hierbas, la competencia por los recursos, la humedad del suelo o la calidad del aire. Estos críticos factores han sido escasamente investigados en condiciones experimentales de gran escala y, por ello, no están bien integrados en los modelos que determinan el crecimiento vegetal. El conocimiento de la dinámica que caracteriza las interacciones entre, por una parte, una elevada concentración de CO_2 y, por otra, el clima, la calidad del suelo y del agua, las plagas, las malas hierbas y enfermedades, la variabilidad del clima y la vulnerabilidad de los ecosistemas, sigue siendo una prioridad a la hora de analizar los impactos futuros del cambio climático sobre los sistemas gestionados. [GTII 5.4.1, 5.8.2]

4.2.3 Proyecciones

Durante el siglo XXI, la alteración de la demanda y de la disponibilidad de agua por efecto del cambio climático afectará notablemente a las actividades agrícolas, a la seguridad alimentaria, a la silvicultura y a las pesquerías. Por una parte, un cambio en la relación entre la evaporación y la precipitación modificará la demanda de agua de las plantas, tomando como referencia la ausencia de cambio climático. Por otra parte, la modificación de las pautas de precipitación y de los ciclos de almacenamiento a escala de cuenca alterará la disponibilidad estacional, anual e interanual de agua para los ecosistemas agrícolas y acuáticos (FAO, 2003). En la mayoría de las regiones del mundo, los cambios del clima intensifican la demanda de riego, debido a los efectos conjuntos de una disminución de la lluvia y de un aumento de la evaporación vinculado al aumento de las temperaturas. [GTII 5.8.1]

Los cambios de la frecuencia e intensidad de los episodios climáticos extremos (por ejemplo, una mayor frecuencia de olas de calor, de sequías o de inundaciones) tendrán consecuencias importantes respecto a la producción alimentaria y forestal (así como al riesgo de incendios forestales), y respecto a otras producciones en ecosistemas agrícolas, muy por encima del impacto de tales cambios sobre el valor medio de las variables. [GTII 5.RE] En particular, más de un 90% de las simulaciones predicen un aumento de la sequía en los subtrópicos a finales del siglo XXI [GTI RRP], a la par que un aumento de los valores extremos de precipitación en las principales áreas de producción agrícola del sur y este de Asia, Australia oriental y norte de Europa. [GTI 11.3, 11.4, 11.7]. Hay que señalar que los modelos del impacto del cambio climático sobre los alimentos, los productos forestales y las fibras no incorporan todavía esas recientes conclusiones acerca de las pautas proyectadas de cambio de la precipitación; las proyecciones indican que los impactos negativos serían peores que los actualmente calculados, una vez que se incluyan los efectos de los valores extremos sobre la productividad. [GTII 5.4.1, 5.4.2]

Los cambios porcentuales de la escorrentía media anual son indicativos de la disponibilidad media de agua para la cubierta vegetal. Los cambios proyectados de aquí a 2100 [GTII, Capítulo 3] exhiben algunas pautas coherentes: aumentos en latitudes altas y en los trópicos húmedos, y disminuciones en latitudes medias y en ciertas partes de los trópicos secos (Figura 4.1b). La disminución de la disponibilidad de agua denota un aumento del estrés hídrico que indica, en particular, un empeoramiento en regiones en que el agua destinada a la producción es ya un producto básico escaso (por ejemplo, en la cuenca mediterránea, en América Central y en regiones subtropicales de África y Australia; véase la Figura 4.1b). [GTII 5.3.1]

Por último, podría ser importante reconocer que en los próximos decenios los sistemas de producción y los recursos hídricos estarán configurados de manera determinante por la interacción concurrente de los dinamizantes socioeconómicos y climáticos. Por ejemplo, el aumento de la demanda de agua de riego para usos agrícolas dependerá tanto de la variación de las condiciones climáticas como de una mayor demanda de alimentos por una población en crecimiento; además, la disponibilidad de agua para la productividad forestal dependerá tanto de los dinamizantes climáticos como de los impactos antropógenos más importantes, particularmente la deforestación en áreas tropicales. En la cuenca amazónica, por ejemplo, la deforestación y la fragmentación creciente pueden desencadenar sequías graves que rebasarían con mucho la señal climática, incrementando así el riesgo de incendios forestales. [GTII 5.3.2.2]

4.2.3.1 Cultivos

Aunque, en términos generales, un calentamiento moderado en latitudes altas mejoraría el rendimiento de cultivos y pastizales, un pequeño calentamiento en áreas de latitud baja, o en áreas estacionalmente secas, tendría un efecto negativo sobre el rendimiento. Los resultados de los modelos indican que, en regiones de latitudes altas, aumentos entre moderados y medios de la temperatura local (1-3°C), junto con un aumento del CO_2 y los cambios de pluviosidad consiguientes, podrían tener efectos pequeños y beneficiosos sobre el rendimiento de los cultivos en distintos emplazamientos. En regiones de latitudes bajas, sin embargo, es *probable* que un aumento incluso moderado de la temperatura (entre 1 y 2°C) ejerza un impacto negativo sobre el rendimiento de la mayoría de cereales. Un calentamiento superior tendría impactos negativos en todas las regiones. [GTII 5.RE]

Las regiones en que la agricultura es actualmente una actividad marginal, debido en gran parte a una combinación de suelos pobres, escasez de agua y depauperación rural, podrían padecer en grado cada vez mayor los impactos del cambio climático sobre el agua. Por consiguiente, incluso un cambio pequeño del clima podría incrementar el número de personas susceptibles de padecer hambre, y el impacto sería particularmente grave en el África subsahariana. [GTII 5.RE]

Un aumento de la frecuencia de episodios climáticos extremos podría reducir el rendimiento de los cultivos en mayor medida que el impacto del cambio climático medio. Diversos estudios de simulación basados en el TIE han considerado determinados aspectos de un aumento de la variabilidad climática en diversos escenarios de cambio climático. Rosenzweig et al. (2002) calcularon que, partiendo de escenarios de aumento de la precipitación intensa, las pérdidas de producción por efecto de una humedad excesiva del suelo (que es ya notable en la actualidad) se duplicarán en Estados Unidos hasta llegar a los 3.000 millones de dólares anuales de aquí a 2030. En Bangladesh

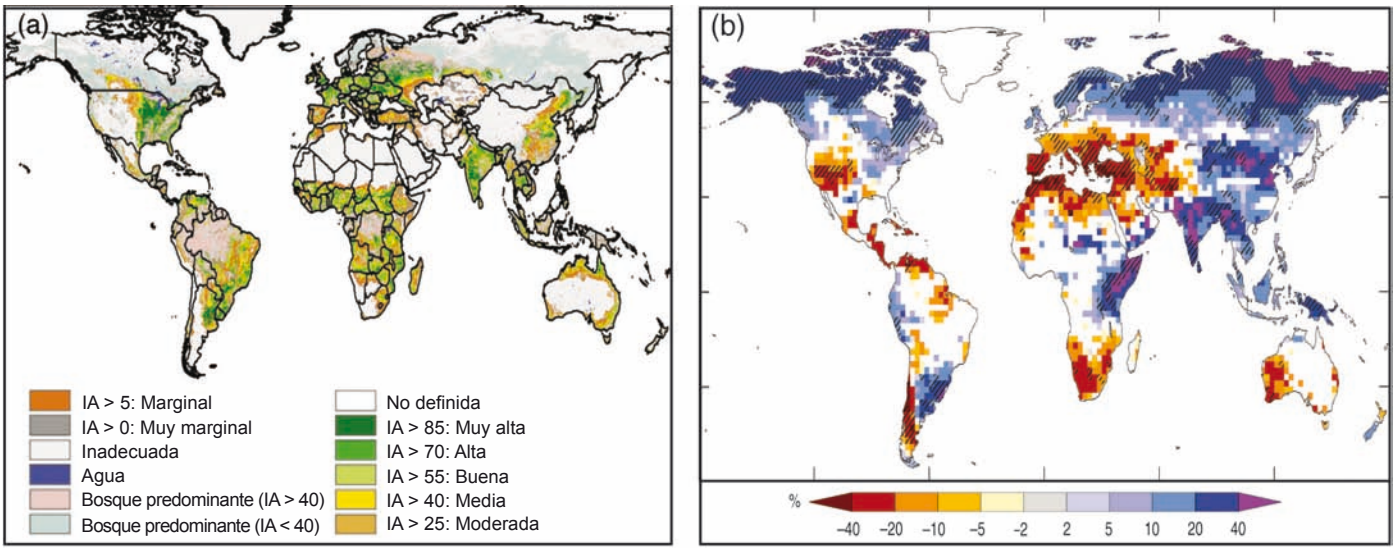

Figura 4.1: *(a) Adecuación actual de los cultivos de secano (excluidos los ecosistemas forestales) (según Fischer et al., 2002b). IA = índice de adecuación [GTII, Figura 5.1a]; (b) cambio porcentual medio multimodelo proyectado para la escorrentía media anual desde la fecha actual (1980-1999) hasta 2090-2099. [Basado en IdS, Figura 3.5]*

el riesgo de pérdida de cosechas se incrementaría, dado que aumentaría la frecuencia de crecidas como consecuencia del cambio climático. Por último, los estudios de impacto del cambio climático que contemplan una mayor intensidad de lluvia indican un mayor riesgo de erosión del suelo; en regiones áridas y semiáridas, una alta intensidad de lluvia podría estar asociada a unas mayores posibilidades de salinización, debido a una mayor pérdida de agua más allá de la zona radicular de los cultivos. [GTII 5.4.2.1]

Los impactos del cambio climático sobre las necesidades de agua de riego podrían ser grandes. Algunos estudios recientes han cuantificado además los impactos del cambio climático sobre las necesidades de riego a nivel regional y mundial, con independencia de los efectos positivos de una mayor concentración de CO_2 sobre la eficiencia de uso del agua destinada a los cultivos. Considerando los impactos directos del cambio climático sobre la demanda evaporativa de los cultivos, aunque en ausencia de impactos causados por el CO_2, Döll (2002) estimó un aumento de las necesidades *netas* de riego de los cultivos (es decir, descontando las pérdidas por transpiración) de entre un 5% y un 8% en todo el mundo de aquí a 2070, con una mayor intensidad de las señales a nivel regional (por ejemplo, +15%) en el sureste de Asia. [GTII 5.4.2.1]

En un estudio que incluía los efectos positivos del CO_2 sobre la eficiencia de uso del agua destinada a los cultivos, Fischer et al. (2006) calcularon un aumento del 20% en las necesidades netas mundiales de riego de aquí a 2080, siendo mayor el impacto en las regiones desarrolladas que en las regiones en desarrollo, tanto por efecto de una mayor demanda evaporativa como de una mayor duración de la temporada de crecimiento en condiciones de cambio climático. Fischer et al. (2006) y Arnell et al. (2004) obtuvieron también aumentos del estrés hídrico (medido como el cociente entre las necesidades de riego y los recursos hídricos renovables) en Oriente Medio y sureste de Asia. Estudios regionales recientes han puesto igualmente de relieve una dinámica crítica de la relación cambio climático/agua en áreas de regadío cruciales, como el norte de África (aumento de las necesidades de riego; Abou-Hadid et al., 2003) o China (disminución de las necesidades de riego; Tao et al., 2003a). [GTII 5.4.2.1]

A escala nacional, se han publicado algunos estudios integradores. En Estados Unidos, dos estudios de modelización sobre la adaptación del sector agrícola al cambio climático (es decir, tránsitos entre la producción de regadío y la dependiente de lluvia) prevén a partir de 2030 una disminución tanto de la superficie de regadío como del volumen extraído para diversos escenarios de clima (Reilly et al., 2003; Thomson et al., 2005a). Este resultado está vinculado a una diferencia cada vez menor entre el rendimiento de la agricultura de regadío y de secano, debida a la disminución del rendimiento de los cultivos de regadío como consecuencia de un aumento de la temperatura, o del rendimiento de las cosechas de secano por efecto de una mayor precipitación. En tales estudios no se ha tenido en cuenta la mayor variabilidad de la precipitación diaria y, por ello, los valores de rendimiento de los cultivos de secano están probablemente sobreestimados. [GTII 3.5.1]

Con respecto a los países en desarrollo, un estudio de la FAO que no consideró los impactos del cambio climático (Bruinsma, 2003) preveía un aumento del 14% en la extracción de agua de riego de aquí a 2030. Sin embargo, los cuatro escenarios de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio proyectan aumentos mucho menores de la extracción de agua de riego a escala mundial, y presuponen que la superficie de riego aumentará tan sólo entre un 0% y un 6% de aquí a 2030, y entre un 0% y un 10% de aquí a 2050. [GTII 3.5.1]

Es *probable* que este enorme aumento del uso de agua acaezca en los sectores doméstico e industrial, con aumentos de la detracción de entre un 14% y un 83% de aquí a 2050 (Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, 2005a, b). Esta conclusión está basada en la idea de que el valor del agua será mucho más elevado para los usos domésticos e industriales, lo cual es particularmente cierto en condiciones de estrés hídrico. [GTII 3.5.1]

A nivel local, la agricultura de regadío podría encontrarse ante nuevos problemas, vinculados a la distribución espacial y temporal de los caudales. En latitudes bajas, por ejemplo, y especialmente en el sureste de Asia, el adelanto del deshielo de nieve puede ocasionar inundaciones vernales y escasez de agua de riego en los períodos estivales. [GTII 5.8.2]

4.2.3.2 Pastos y ganadería

Muchas de las tierras de pastoreo del mundo se encuentran en áreas semiáridas susceptibles al déficit hídrico; toda disminución posterior de los recursos hídricos afectará en gran medida a su capacidad de pastoreo. En consecuencia, una variabilidad mayor del clima y de las sequías puede acarrear pérdidas de ganado. Específicamente, es *probable* que el impacto sobre la productividad animal, debido a una mayor variabilidad de las pautas meteorológicas, sea mucho mayor que los efectos asociados a la alteración de las condiciones climáticas promedias. Las pérdidas catastróficas más frecuentes, resultantes de la inexistencia de un acondicionamiento previo frente a los fenómenos meteorológicos, sobrevienen en establos confinados, y las pérdidas económicas ocasionadas por un menor rendimiento de la ganadería superan con creces las acarreadas por la mortandad de ganado. [GTII 5.4.3.1]

A nivel mundial, gran número de tierras de pastoreo acusan los efectos de los episodios de El Niño/Oscilación Austral (ENOA). En las sequías ocasionadas por este fenómeno, las regiones secas conllevan un riesgo de retroefecto positivo entre la degradación del suelo y de la vegetación y la disminución de la lluvia, cuya consecuencia sería la pérdida tanto de tierras de pastoreo como de cultivo. [GTII 5.4.3.1] Sin embargo, mientras en el TIE del GTI se señalaba una probabilidad mayor de experimentar ENOA frecuentes como consecuencia del cambio climático, en el 4IE del GTI no se identificaron correlaciones entre ese fenómeno y el cambio climático. [GTI TIE RRP; GTI 10.3.5.4]

Una encuesta de datos experimentales a nivel mundial sugiere que un calentamiento suave incrementa por lo general la

Recuadro 4.1: El cambio climático y la pesca en el bajo Mekong – Un ejemplo de los múltiples estreses causados por la actividad humana en el sistema de pesquerías de un gran delta. [GTII, Recuadro 5.3]

Las pesquerías son esenciales para la subsistencia de cuantos viven en los países del bajo Mekong, particularmente los pobres de las tierras rurales. De los 60 millones de personas que habitan en esa cuenca, dos terceras partes trabajan directa o indirectamente en el sector de las pesquerías, que representa en torno a un 10% del PIB de Camboya y de la República Democrática Popular Lao. El río alberga habitualmente unas 1.000 especies de peces y muchas más variantes marinas, por lo que su fauna es una de las más prolíficas y diversas del mundo (MRC, 2003). Según estimaciones recientes, la producción anual de las pesquerías de captura supera los 2,5 millones de toneladas (Hortle and Bush, 2003), contribuyendo el delta a más de un 30% de esta cifra.

Los efectos directos del cambio climático vendrán determinados por las pautas cambiantes de la precipitación y del deshielo y por el aumento del nivel del mar, que afectarán a la hidrología y a la calidad del agua. Habrá efectos indirectos atribuibles al cambio de las pautas de vegetación, que pueden alterar la cadena alimenticia y acrecentar la erosión del suelo. Es *probable* que los efectos de origen humano sobre las pesquerías (debidos al crecimiento de la población, a la mitigación de las crecidas, al mayor volumen de agua extraída, al cambio de uso de la tierra y a la sobreexplotación pesquera) sean más importantes que los efectos del clima, aunque las presiones ejercidas por ambos están estrechamente relacionadas.

Cierto análisis de impacto de los escenarios de cambio climático sobre el caudal del río Mekong (Hoanh et al., 2004) estima un aumento de los caudales máximos mensuales de 35-41% en la cuenca y de 16-19% en el delta (el porcentaje inferior corresponde al periodo 2010-2038, y el superior a 2070-2099, respecto de los niveles correspondientes a 1961-1990). Se ha estimado que los flujos mensuales mínimos disminuirán en un 17-24% en la cuenca y en un 26-29% en el delta. El aumento de las inundaciones redundará positivamente en el rendimiento de las pesquerías, aunque la reducción del hábitat en la estación seca puede aminorar la captura de algunas especies. No obstante, las intervenciones de gestión hídrica previstas, principalmente las presas, tendrían efectos opuestos sobre la hidrología; es decir, ocasionarían una disminución marginal de los caudales en las estaciones húmedas y un aumento considerable en las estaciones secas (World Bank, 2004b).

Los modelos indican que un aumento del nivel del mar de tan sólo 20 cm desplazaría en 25 km hacia el interior la línea de contorno del nivel hídrico en el delta del Mekong durante la estación de crecidas, y empujaría río arriba el agua salada (aunque canalizada) durante la estación seca (Wassmann et al., 2004). El desplazamiento del agua salada hacia el interior alteraría notablemente la composición de las especies de pesquería, aunque no sería perniciosa para el rendimiento de las pesquerías en su conjunto.

productividad de los pastizales, con respuestas positivas máximas en latitudes altas, y que la productividad y composición de las especies vegetales en las tierras de pastoreo está íntimamente ligada a la precipitación. Además, resultados recientes (véase la Figura 4.1) proyectan disminuciones de la cantidad de lluvia en algunos de los principales pastizales y tierras de pastoreo (por ejemplo, en América del Sur, sur y norte de África, Asia occidental, Australia, y sur de Europa). [GTII 5.4.3.2]

Un elevado nivel de CO_2 atmosférico puede aminorar el agotamiento del agua del suelo en diferentes pastizales autóctonos y semiautóctonos templados y mediterráneos. Sin embargo, conjuntamente con el cambio climático, la mayor variabilidad de las lluvias y el aumento de las temperaturas podrían limitar más seriamente la humedad del suelo y reducir así la productividad, contrarrestando los impactos beneficiosos del CO_2. Otros impactos sobre la ganadería son consecuencia directa del aumento de la carga térmica. [GTII 5.4.3.2]

4.2.3.3 Pesquerías

Algunos de los impactos negativos del cambio climático sobre la acuicultura y las pesquerías de agua dulce son: el estrés debido al aumento de la temperatura y de la demanda de oxígeno y a la disminución del pH; la calidad y cantidad de agua en el futuro; los fenómenos meteorológicos extremos; la mayor frecuencia de enfermedades e intoxicaciones; el aumento del nivel del mar y los conflictos de intereses frente a las necesidades de protección de la costa; y la incertidumbre sobre el abastecimiento futuro de productos de pescado y de aceites de las pesquerías de captura. En el Recuadro 4.1 se detalla un caso concreto ilustrativo de los múltiples estreses que podrían afectar a las pesquerías en los países en desarrollo [GTII 5.4.6.1]

Entre los impactos positivos cabe señalar: aumento de las tasas de crecimiento y de la eficacia de conversión alimentaria; mayor duración del período de crecimiento; extensión del ámbito geográfico; y explotación de nuevas áreas, gracias a la disminución de la cubierta de hielo. [GTII 5.4.6.1]

4.2.4 Adaptación, vulnerabilidad y desarrollo sostenible

La gestión del agua es un componente esencial que deberá adaptarse para hacer frente a las presiones climáticas y

socioeconómicas de los próximos decenios. Los usos del agua cambiarán por efecto conjunto de: alteraciones de la disponibilidad de agua, variación de la demanda de agua del sector agrícola y de otros sectores que competirán por ella, particularmente el urbano, y cambios en la gestión del agua.

Las prácticas que mejoran la productividad en el uso de agua de riego -definida como producción de cultivo por unidad de agua consumida- pueden conferir un potencial de adaptación considerable a todos los sistemas de producción agrícola ante un eventual cambio climático. Además, mejorar la eficiencia de riego es indispensable para asegurar la disponibilidad de agua con destino a la producción alimentaria y a la satisfacción de necesidades humanas y medioambientales compitientes. [GTII 3.5.1]

Varios estudios de simulación parecen indicar que la adaptación podría reportar beneficios relativos al sector agrícola para unos niveles de calentamiento entre bajos y moderados, aunque algunas estrategias de respuesta podrían ocasionar un mayor estrés sobre el agua y otros recursos medioambientales a medida que aumenta el calentamiento. El concepto de *adaptación autónoma* designa las respuestas que pondrán en marcha agricultores, comunidades rurales y/u organizaciones de agricultores en función del cambio climático real o subjetivo en los próximos decenios, sin intervención o coordinación de las administraciones regionales o nacionales, o en virtud de acuerdos internacionales. En ese sentido, la adaptación inadecuada (por ejemplo, las presiones para cultivar tierra marginal o para adoptar prácticas de cultivo insostenibles conforme disminuyen los rendimientos) podría agravar la degradación agrícola y amenazar la biodiversidad de las especies silvestres y domésticas, posiblemente poniendo en peligro la capacidad de respuesta futura ante un aumento del riesgo climático en fechas posteriores del siglo. Así pues, será necesaria una *adaptación planificada* para facilitar y maximizar los beneficios que las respuestas de adaptación al cambio climático reportarán a largo plazo, en particular modificando las políticas, instituciones e infraestructura dedicadas a ese fin. [GTII 5.5]

4.2.4.1 Adaptación autónoma

Las opciones de adaptación autónoma son en gran medida ampliaciones o intensificaciones de actividades de gestión de riesgo y mejora de la producción ya existentes, y están, por consiguiente, al alcance de agricultores y comunidades. En lo referente al agua, cabe señalar las siguientes:

- adopción de variedades/especies de mayor resistencia al choque térmico y a la sequía;
- modificación de las técnicas de riego, y particularmente de su cantidad, distribución en el tiempo o tecnología;
- adopción de tecnologías de eficiencia hídrica para 'cosechar' agua, retener la humedad del suelo (por ejemplo, conservando los residuos de los cultivos) y reducir el entarquinamiento y la intrusión de agua salada;

Recuadro 4.2: Estrategias de adaptación del pastoreo en el norte de Kenya y sur de Etiopía. [GTII, Recuadro 5.5]

El pastoreo ha evolucionado en África para adaptarse a la hostilidad de un entorno cuyo régimen de precipitaciones es extremadamente variable, tanto en el espacio como en el tiempo (Ellis, 1995). Varios estudios recientes (Ndikumana et al., 2000; Hendy and Morton, 2001; Oba, 2001; McPeak and Barrett, 2001; Morton, 2006) han analizado las estrategias de adaptación utilizadas por los pastores durante sequías recientemente padecidas en el norte de Kenya y en el sur de Etiopía, así como las adaptaciones a más largo plazo que aquéllas conllevan.

- La *movilidad* sigue siendo la principal estrategia de adaptación de los pastores a las variaciones espaciales y temporales de la precipitación, y en años de sequía numerosas comunidades recurren a los pastos de reserva no utilizados en las estaciones 'normalmente' secas, debido a su lejanía, a las restricciones impuestas por el régimen de propiedad agraria, a los problemas ocasionados por enfermedades animales y a otros conflictos. Sin embargo, la invasión e individualización de tierras de pastoreo comunales y el deseo de establecerse en un lugar fijo para poder acceder a servicios sociales y ayudas alimentarias han limitado seriamente la movilidad del pastoreo.
- El objetivo de los pastores es la *acumulación de rebaños*, y la evidencia mayoritaria indica que es ésta una manera racional de protegerse contra la sequía.
- Una minoría de pastores guarda actualmente sus fondos, o parte de ellos, en cuentas bancarias, mientras que otros recurren a métodos de ahorro y crédito *sui generis* acordados con los tenderos.
- Los pastores utilizan también *piensos suplementarios* para el ganado, comprándolos o bien obteniéndolos de los árboles; mejoran *la gestión de las enfermedades animales* mediante técnicas autóctonas y científicas; y pagan por el agua extraída de pozos perforados.
- En esa región, la *diversificación de los medios de subsistencia* para no circunscribirse al pastoreo suele consistir en aceptar trabajos de bajos ingresos o no sostenibles desde el punto de vista medioambiental (por ejemplo, la producción de carbón), en vez de utilizar estrategias de adaptación preventivas para atenuar la vulnerabilidad.
- Varios *mecanismos intracomunales* permiten distribuir productos animales entre los menos favorecidos y, a éstos, participar en la explotación de animales vivos, pero están desapareciendo, debido al elevado nivel de riesgo concomitante en esas comunidades.

- mejora de la gestión del agua para evitar la saturación hídrica, la erosión y la lixiviación;
- modificación de los calendarios de cultivo, es decir, las fechas o la ubicación de las actividades de cultivo;
- utilización de predicciones climáticas estacionales.

Otras estrategias de adaptación pueden conllevar la modificación del uso de la tierra para aprovechar las condiciones agroclimáticas alteradas. [GTII 5.5.1]

Algunos estudios de simulación ponen de manifiesto la importancia del agua de riego como técnica de adaptación para atenuar los impactos del cambio climático. En general, sin embargo, las proyecciones parecen indicar que los beneficios relativos más importantes de la adaptación se obtendrán con un calentamiento entre bajo y moderado, y que las prácticas de adaptación que conllevan un aumento del consumo de agua de riego podrían, de hecho, entrañar un estrés suplementario que afectaría al agua y a los recursos medioambientales, a medida que aumentan el calentamiento y la demanda evaporativa. [GTII 5.8.1]

Se han explorado también muchas estrategias de adaptación en sectores productivos clave distintos de la agricultura, aunque sin ceñirse exclusivamente a los problemas del agua. Entre las estrategias de adaptación que podrían, sin embargo, afectar al uso del agua cabe señalar, respecto a los sistemas pecuarios, las siguientes: alteración de la rotación de pastos, modificación de las épocas de pastoreo, del forraje y de las razas o especies animales, alteración de la integración en sistemas de ganado/cultivo híbridos, en particular utilizando cultivos de forraje adaptados, atención especial para asegurar un suministro adecuado de agua, y utilización de piensos y concentrados suplementarios. En el Recuadro 4.2 se muestran las estrategias de adaptación del pastoreo en áreas semiáridas y áridas de Kenya y sur de Etiopía. [GTII 5.4.7]

Entre las estrategias de adaptación silvícolas cabe señalar el cambio de intensidad de la gestión, la hibridación de especies, la introducción de periodos de rotación, la adaptación al cambio del tamaño y calidad de los bosques, y la modificación de los sistemas de lucha contra incendios. [GTII 5.5.1]

Por lo que se refiere a los ecosistemas marinos, a excepción de la acuicultura y de ciertas actividades pesqueras de agua dulce, la explotación de las poblaciones naturales de peces excluye las adaptaciones de la gestión sugeridas para los sectores agrícola, ganadero y forestal. Las opciones de adaptación se centran, pues, en la alteración del tamaño de las capturas y del esfuerzo dedicado a ellas. El margen de adaptación autónoma está cada vez más restringido por la entrada en vigor de nuevas reglamentaciones respecto a la explotación de los ecosistemas pesqueros y marinos [GTII 5.5.1]

De adoptarse con carácter general, las estrategias de adaptación de los sistemas productivos podrían compensar en gran medida los efectos negativos del cambio climático y sacar provecho de sus efectos positivos. Sin embargo, no se ha evaluado suficientemente el grado de eficacia o el alcance que tendría la adopción de esas medidas, en razón de la complejidad del proceso de toma de decisiones, de la diversidad de respuestas entre unas y otras regiones, de los retrasos en su implementación, y de los posibles obstáculos económicos, institucionales y culturales al cambio. Por ejemplo, en las comunidades de escasos recursos dedicadas a la agricultura/ganadería de subsistencia, la capacidad de adaptación realizable se considera por lo general muy baja. Análogamente, hay grandes superficies de bosques en los que la gestión humana directa es mínima, lo cual limita las oportunidades de adaptación. Incluso en bosques en que la gestión es más intensiva, en los que las actividades de adaptación podrían ser más viables, la gran separación temporal entre la siembra y la cosecha podría complicar la adopción de estrategias de adaptación efectivas. [GTII 5.1.1]

4.2.4.2 Adaptación planificada

Las soluciones de adaptación planificada deberían centrarse en el desarrollo de nuevas infraestructuras, políticas e instituciones de apoyo que faciliten, coordinen y maximicen los beneficios de los nuevos sistemas de gestión y uso de la tierra. En términos generales, ello puede conseguirse mejorando la gobernanza y, en particular, haciendo que en los programas de desarrollo se tenga en cuenta el cambio climático; aumentando las inversiones en infraestructuras de riego y en tecnologías que permitan aumentar el rendimiento del agua; creando infraestructuras de transporte y almacenamiento adecuadas; revisando el régimen de propiedad agraria (procurando, en particular, definir claramente los derechos de propiedad); y estableciendo mercados accesibles y eficientes para los productos, los insumos (en particular, mediante planes de fijación de precios del agua) y los servicios financieros (en particular, los seguros). [GTII 5.5]

Podría ser necesario implicar a varios organismos en la adaptación planificada y en la coordinación de políticas para facilitar la adaptación al cambio climático, particularmente en aquellos lugares en que la disminución del rendimiento obligue a cultivar tierras marginales o a adoptar prácticas de cultivo no sostenibles, con el consiguiente aumento de la degradación de la tierra y del uso de recursos, en particular de agua. [GTII 5.4.7]

Diversas evaluaciones de la adaptación a escala mundial, nacional y de cuenca evidencian que, en general, las cuencas áridas y semiáridas son las más vulnerables al estrés hídrico. Si disminuyera la precipitación, la demanda de agua de riego impediría satisfacer el resto de la demanda. Las proyecciones de cambio del flujo fluvial en las cuencas hidrográficas de los ríos Sacramento-San Joaquín y Colorado indican que no será posible satisfacer la demanda hídrica actual de aquí a 2020, ni siquiera adoptando prácticas de gestión adaptativa. Un mayor uso de agua de riego reduciría tanto la escorrentía como el caudal corriente abajo (Eheart and Tornil, 1999). [GTII 3.5.1]

Las políticas encaminadas a primar la introducción de mejoras que aumenten la eficiencia de riego, mediante mecanismos de mercado o mediante una mayor reglamentación y una mejor gobernanza, son una herramienta importante para incrementar la capacidad de adaptación a escala regional. Una consecuencia imprevista sería un mayor uso de agua de consumo corriente arriba, que privaría de agua a los usuarios corriente abajo sin

regresar, por consiguiente, al curso fluvial como flujo de retorno (Huffaker, 2005). [GTII 3.5.1]

Además de las técnicas actualmente disponibles para los agricultores y gestores de la tierra, es necesario ofrecer nuevas opciones técnicas mediante actividades de investigación y desarrollo ad hoc, que deberían ser planificadas y puestas en práctica ya con objeto de reforzar en su conjunto la capacidad de respuesta a los cambios climáticos en los próximos decenios. Algunas opciones tecnológicas para potenciar la I+D son los sistemas de cría tradicional y la biotecnología, encaminados a mejorar la resistencia a diversos tipos de estrés climático (por ejemplo, sequías o inundaciones) de cultivos, forrajes, ganado, bosques y pesquerías (Recuadro 4.3).

Recuadro 4.3: Contribución de la biotecnología a la adaptación agrícola y forestal

La biotecnología y la reproducción convencional pueden contribuir al desarrollo de nuevas variedades con características mejoradas, más adaptadas a las condiciones del cambio climático. E particular, la resistencia a la sequía y al estrés térmico, a las plagas, a las enfermedades, a la salinidad y a la saturación hídrica. Como oportunidades adicionales ofrecidas por las nuevas variedades, cabe señalar la modificación de la fenología, y una mejor respuesta a concentraciones de CO_2 elevadas. Por lo que se refiere al agua, varios estudios documentan modificaciones genéticas de especies de cultivo importantes (por ejemplo, maíz, o soja) con una mayor tolerancia al déficit hídrico (análisis general de Drennen et al., 1993; Kishor et al., 1995; Pilon-Smits et al., 1995; Cheikh et al., 2000), aunque esta consideración podría no ser extensiva a la generalidad de las plantas cultivables. En general, se tiene aún muy poca información sobre los resultados prácticos de las modificaciones genéticas en las aplicaciones agrícolas y silvícolas (Sinclair and Purcell, 2005).

4.2.4.3 Seguridad alimentaria y vulnerabilidad

Es *probable* que el cambio climático afecte a la seguridad alimentaria en sus cuatro vertientes: disponibilidad de alimentos (producción y comercio), acceso a alimentos, estabilidad del suministro alimentario, y utilización de alimentos (conjunto de procesos que intervienen en la preparación y consumo de alimentos). Es muy importante destacar que la seguridad alimentaria no dependerá únicamente de los impactos climáticos y socioeconómicos en la producción alimentaria, sino también (de manera crucial) de los cambios que experimenten los flujos comerciales, las existencias y las políticas de ayuda alimentaria. En particular, el cambio climático tendrá impactos de distinto signo y geográficamente diversos sobre la producción alimentaria y, por consiguiente, sobre el acceso a alimentos. En los trópicos, los países en desarrollo, muchos de los cuales poseen recursos hídricos y tierras inadecuados, están ya amenazados de inseguridad alimentaria grave, y podrían ser particularmente vulnerables al cambio climático [GTII 5.6.5]

Los cambios de la frecuencia e intensidad de sequías e inundaciones afectarán a la estabilidad del abastecimiento de alimentos esenciales y al acceso a ellos. En los trópicos semiáridos, el déficit de lluvia puede reducir drásticamente el rendimiento de los cultivos y el volumen de la cabaña pecuaria. La inseguridad alimentaria y la pérdida de medios de subsistencia se agravarían aún más con la pérdida de tierras de cultivo y de criaderos de pesquería en la costa, por efecto de las inundaciones y de la erosión costera en extensiones bajas. [GTII 5.6.5]

Debido a su impacto sobre los recursos medioambientales, el cambio climático puede afectar asimismo a la utilización de los alimentos, con importantes consecuencias adicionales sobre la salud. [GTII, Capítulo 8] Por ejemplo, la disminución del agua disponible en regiones en que ésta es ya escasa, particularmente en los subtrópicos, tendrá impactos negativos directos sobre la elaboración y el consumo de alimentos. A la inversa, un mayor riesgo de crecidas en los asentamientos humanos costeros debido a un aumento del nivel del mar o a una precipitación intensa podría agravar la contaminación de alimentos y las enfermedades, aminorando con ello las pautas de consumo. [GTII 5.6.5]

4.2.4.4 Cuestiones relacionadas con la calidad del agua

En los países en desarrollo, la calidad microbiológica del agua es baja, debido a la falta de saneamientos y de métodos de tratamiento adecuados, y a las deficientes condiciones sanitarias (Lipp et al., 2001; Jiménez, 2003; Maya et al., 2003; WHO, 2004). El cambio climático podría inducir un estrés adicional sobre la calidad del agua, particularmente en los países en desarrollo (Magadza, 2000; Kashyap, 2004; Pachauri, 2004). Hasta la fecha, no hay estudios especializados sobre el ciclo vital de los microorganismos en los países en desarrollo en condiciones de cambio climático; sería muy necesario, en particular, estudiar los efectos producidos por la utilización de aguas de desecho deficientemente tratadas para usos de riego, y sus relaciones con los brotes endémicos de *helmintiasis* (WHO/UNICEF, 2000). [GTII 3.4.4]

Aproximadamente un 10% de la población mundial consume cultivos irrigados con aguas de desecho no tratadas o insuficientemente tratadas, particularmente en países en desarrollo de África, Asia y América Latina. Las proyecciones indican que esa cifra aumentaría con la población y con la demanda de alimentos. [GTII 8.2.5] Una estrategia para combatir tanto la escasez hídrica como ciertos problemas sanitarios concomitantes consistiría, por consiguiente, en utilizar en mayor medida aguas de desecho adecuadamente tratadas con fines de irrigación. [GTII 3.4.4]

4.2.4.5 Comunidades rurales, desarrollo sostenible y conflictos hídricos

La cooperación transfronteriza en lo referente al agua está considerada como una política efectiva y como un instrumento para mejorar la gestión del agua en regiones extensas que comparten recursos comunes. El cambio climático y el

incremento de la demanda hídrica en los próximos decenios añaden nuevas dificultades a este tipo de acuerdos marco, y agravan el potencial de conflicto a nivel local. Por ejemplo, las medidas unilaterales de adaptación a la escasez de agua ocasionada por el cambio climático podrían intensificar la competición por los recursos hídricos. Además, los cambios de productividad de la tierra podrían propiciar toda una serie de sistemas agrícolas nuevos o modificados, necesarios para mantener la producción, y en particular las prácticas de intensificación. Éstas, a su vez, podrían suscitar presiones medioambientales adicionales, que se traducirían en pérdidas de hábitat, disminución de la biodiversidad, entarquinamiento, y erosión y degradación del suelo. [GTII 5.7]

Cabe esperar también impactos sobre el desarrollo comercial, económico y medioambiental y sobre el uso de la tierra como consecuencia de las medidas adoptadas para sustituir los combustibles de origen fósil por biocombustibles, tal como prevé el Plan de Acción Europeo sobre la Biomasa. La producción de biocombustibles en gran escala plantea interrogantes en diversos respectos, por ejemplo en relación con las necesidades de fertilizantes y plaguicidas, el ciclo de nutrientes, el balance energético, los impactos sobre la diversidad biológica, la hidrología y la erosión, los conflictos con la producción alimentaria, o el volumen de subvenciones necesario. De hecho, una de las aspiraciones de los próximos decenios consistirá en encontar un equilibrio entre los sectores alimentario, forestal y energético en la competencia por las tierras y las materias primas, por ejemplo ideando soluciones que aseguren el derecho a la alimentación y al desarrollo rural local con un aumento máximo de las necesidades de energía y de mitigación del clima. [UTCUTS 4.5.1]

En América del Norte, la sequía podría agravarse en el interior del continente, y las áreas de producción, especialmente de maíz y soja (Brklacich et al., 1997), podrían desplazarse hacia el norte (Mills, 1994). [GTII TIE 15.2.3.1] En México, las pérdidas de producción podrían estar vinculadas principalmente a la sequía, por efecto de una disminución de las zonas agroecológicas idóneas para el cultivo de maíz (Conde et al., 1997). [GTII TIE 14.2.2.1] La sequía es un problema importante en el continente australiano por razones sociales, políticas, geográficas y medioambientales. Un cambio climático seco como consecuencia de una menor precipitación y de un aumento de la demanda evaporativa conllevaría declaraciones de sequía más frecuentes y prolongadas en el marco de la actual política de lucha contra la sequía en Australia. [GTII TIE 12.5.6]

En los recursos hídricos radica una de las principales vulnerabilidades de África en relación con los usos domésticos, agrícolas e industriales. En las cuencas fluviales compartidas es necesario establecer protocolos de cooperación regional para reducir al mínimo tanto los impactos negativos como las posibilidades de conflicto. Por ejemplo, la superficie del lago Chad varía de 20.000 km^2 en la estación seca a 50.000 km^2 en la húmeda. Aunque se han delimitado con precisión las divisorias entre Chad, Nigeria, Camerún y Níger, nunca se han determinado claramente ciertos sectores de ellas situados en los afluentes del lago Chad, y las situaciones de crecida y de recesión del agua plantean complicaciones adicionales. Problemas similares en el río Kovango, entre Botswana y Namibia, provocaron en su día una confrontación armada. [GTII TIE 10.2.1.2]

La creciente escasez de agua, el aumento de la población, la degradación de los ecosistemas de agua dulce compartidos y la competencia por unos recursos naturales en retracción, distribuidos por una superficie de tal magnitud y afectando a tantos países, podrían desencadenar conflictos bilaterales y multilaterales. En las áreas semiáridas de África, el pastoreo es la principal actividad económica, y las comunidades de pastoreo incorporan también inmigrantes transnacionales en busca de nuevos pastos estacionales. En situaciones de sequía, esas comunidades podrían entrar en conflicto con los sistemas agrarios establecidos. [GTII TIE 10.2.1.2]

La acuicultura mundial está protagonizada por Asia; sólo en China, se produce un 70% del total de pescados y mariscos de piscifactoría (FAO, 2006). El pescado es una importante fuente de proteínas, vital para la seguridad alimentaria en muchos países de Asia, particularmente en las comunidades depauperadas de las áreas costeras. Las piscifactorías necesitan tierra y agua, dos recursos que escasean ya en muchos países de Asia. En áreas costeras de Tailandia, el desvío de agua para su uso en criaderos de gambas ha hecho descender notablemente los niveles de agua subterránea. [GTII TIE 11.2.4.4]

En Asia hay no menos de 14 grandes cuencas internacionales. Su gestión es particularmente problemática en países de alta densidad de población, que a menudo utilizan incluso las áreas más frágiles e inadaptadas de las cuencas para destinarlas a cultivos, usos residenciales y otras actividades intensivas. Por ello en muchos países, particularmente Bangladesh, Nepal, Filipinas, Indonesia y Vietnam, muchas cuencas están muy afectadas por la deforestación, la conversión indiscriminada de tierras, la excesiva erosión del suelo, y una productividad agrícola en declive. Al carecer de estrategias de adaptación adecuadas, esas cuencas son muy vulnerables al cambio climático [GTII TIE 11.2.3.2.]

4.2.4.6 Mitigación

Las respuestas de adaptación y las iniciativas de mitigación en los sectores agrícola y forestal podrían ser simultáneas; su eficacia dependerá de las pautas del cambio climático real en los próximos decenios. Las interacciones concomitantes entre estos factores (cambio climático, adaptación y mitigación) afectarán con frecuencia a los recursos hídricos. [GTIII 8.5, Tabla 8.9]

Las estrategias de adaptación y mitigación podrían o bien exhibir sinergias, en cuyo caso las actuaciones se reforzarían recíprocamente, o ser mutuamente contraproducentes. Con respecto al agua, los ejemplos de estrategias de adaptación que reducen las opciones de mitigación se refieren sobre todo al riego, y están relacionadas con el costo energético del abastecimiento de agua y con las emisiones adicionales de gases invernadero posiblemente vinculadas a la modificación de las prácticas de cultivo. La utilización de energías renovables para la extracción y distribución de agua podría, sin embargo,

obviar este conflicto. Análogamente, algunas estrategias de mitigación podrían afectar negativamente a la adaptación, por ejemplo aumentando la dependencia respecto de los cultivos energéticos, que podrían competir por los recursos hídricos, reducir la biodiversidad y agravar con ello la vulnerabilidad a los extremos climáticos. [GTIII 12.1.4, 12.1.4]

Por otra parte, numerosas prácticas de secuestro de carbono, que implican un menor grado de labranza, un aumento de la superficie cultivable y la utilización de sistemas de rotación mejorados, constituyen en esencia –y ciertamente fueron desarrolladas con ese fin– 'buenas prácticas' agroforestales, que dan lugar a sistemas de producción más resistentes a la variabilidad climática y que proporcionan, así, una excelente adaptación frente al aumento de la presión sobre el agua y los recursos del suelo (Rosenzweig and Tubiello, 2007). [GTII 5.4.2; GTIII 8.5]

4.3 Salud humana

4.3.1 Contexto

La salud humana, que abarca el bienestar físico, social y psicológico, depende de la adecuación del suministro de agua potable y de la seguridad del medio ambiente. Los seres humanos están expuestos al cambio climático tanto directamente, a merced de las pautas meteorológicas (fenómenos extremos más intensos y frecuentes), como indirectamente, en virtud de los cambios experimentados en relación con el agua, el aire, la calidad y cantidad de los alimentos, los ecosistemas, la agricultura, los medios de subsistencia y la infraestructura. [GTII 8.1.1] Dado el considerable número de personas que podrían verse afectadas por la malnutrición y la escasez de agua, éstas podrían ser las consecuencias sanitarias más importantes del cambio climático (véanse las Secciones 4.2 y 4.4). [GTII 8.4.2.3]

La salud de la población ha mejorado notablemente en los últimos 50 años, aunque sigue habiendo un importante desequilibrio sanitario en y entre países. Es *improbable* que en ciertos países en desarrollo se alcance el Objetivo de Desarrollo del Milenio (ODM) de disminuir en dos tercios la tasa de mortalidad de menores de 5 años de aquí a 2015. La salud deficiente agrava la vulnerabilidad y reduce la capacidad de adaptación al cambio climático tanto de las personas como de las comunidades. Las poblaciones con altas tasas de enfermedad y de discapacidad afrontan con menos éxito los estreses de cualquier tipo, en particular los relacionados con el cambio climático. [GTII 8.1.1]

El programa conjunto OMS/UNICEF de Monitoreo del Abastecimiento de Agua y del Saneamiento estima actualmente que 1.100 millones de personas (un 17% de la población mundial) no tienen acceso a recursos hídricos, entendiéndose por tal la disponibilidad de un mínimo de 20 litros de agua por persona y día procedentes de una fuente de agua mejorada situada a menos de 1 km. Una fuente de agua mejorada es aquella de la que puede obtenerse agua 'salubre'; por ejemplo, una toma de agua doméstica o un pozo perforado. Casi dos terceras partes de las personas sin acceso al agua viven en Asia. En el África subsahariana, un 42% de la población no tiene acceso a agua mejorada. La OMS cifra en 1,7 millones de muertes por año la carga total de enfermedad debida a un suministro de agua inadecuado y a un saneamiento e higiene deficientes. Las consecuencias que podrían tener para la salud las condiciones del abastecimiento de agua y de los saneamientos son, para muchos países, un aspecto de especial interés en relación con el cambio climático. En las regiones vulnerables, la concentración de riesgo vinculada a la inseguridad tanto de los alimentos como del agua podría agravar particularmente los impactos de cualquier fenómeno meteorológico extremo (por ejemplo, las crecidas o las sequías) sobre las viviendas afectadas. [GTII 9.2.2]

La variación de los extremos climáticos podría ocasionar graves impactos sobre la salud humana. Las inundaciones se agravarán previsiblemente con el cambio climático, con las consiguientes implicaciones para la salud de las personas. La vulnerabilidad a las inundaciones es menor cuando existe una infraestructura para la eliminación de los desechos sólidos, para la gestión de las aguas de desecho y para el suministro de agua potable. [GTII 8.2.2]

La falta de agua para usos higiénicos determina actualmente una gran parte de la carga de enfermedad mundial. Una pequeña parte, no cuantificada, de esa carga es imputable a la variabilidad climática o a los extremos climáticos. La 'escasez de agua' está asociada a una multiplicidad de consecuencias adversas para la salud, entre ellas las enfermedades relacionadas con la contaminación del agua por materias fecales y otras sustancias peligrosas (por ejemplo, parásitos).

La mortalidad y morbilidad infantil ocasionadas por la diarrea en países de bajos ingresos, particularmente en el África subsahariana, sigue siendo elevada pese a haber mejorado la atención sanitaria y a aplicarse ya terapias de rehidratación oral. El cambio climático agravará previsiblemente la escasez de agua, pero es difícil evaluar en qué se traducirá ésta a nivel doméstico, en términos de disponibilidad de agua y, por consiguiente, de salud e higiene. No se dispone de información que vincule la modelización del cambio climático en gran escala con los impactos de pequeña escala sobre la población o a nivel doméstico. Además, al evaluar los impactos sanitarios de una menor disponibilidad de agua en el futuro deberán tenerse siempre en cuenta las eventuales mejoras del acceso a aguas 'salubres'. [GTII 8.2.5, 8.4.2.2]

4.3.1.1 Implicaciones respecto a la calidad del agua potable

La relación entre la precipitación de lluvia, el caudal fluvial y la contaminación del suministro de agua es altamente compleja, tanto cuando su transporte se efectúa a través de canalizaciones como en contacto directo con las aguas superficiales. Si los flujos fluviales disminuyen como consecuencia de una menor precipitación, su capacidad de dilución de efluentes disminuirá también y elevará, por consiguiente, la carga patógena y química. Ello podría entrañar un aumento de la exposición humana o, cuando el suministro de agua está canalizado,

un incremento de la demanda para las instalaciones de tratamiento de agua. Durante la sequía del verano de 2003, la disminución del caudal fluvial en los Países Bajos parece haber inducido cambios en la calidad del agua (Senhorst and Zwolsman, 2005). La marcada estacionalidad de los brotes de cólera en el Amazonas, asociada probablemente a las elevadas concentraciones patógenas de los estanques, ha sido asociada a la disminución del caudal fluvial en la estación seca (Gerolomo and Penna, 1999). [GTII 8.2.5]

La gestión de los drenajes y de las aguas de tempestad es importante en las comunidades urbanas de bajos ingresos, ya que la obstrucción del alcantarillado puede ocasionar inundaciones y facilitar la propagación de enfermedades transmitidas por vectores (Parkinson and Butler, 2005). En las ciudades en que el alcantarillado se desbordase en varios lugares simultáneamente, podría aumentar la contaminación provocada por las aguas de desecho durante las crecidas. [GTII 8.2.5]

En países de alto nivel de ingresos, la precipitación y la escorrentía podrían incrementar la carga microbiana total de los cursos de agua y de los depósitos de agua potable, aunque su correlación con la incidencia de enfermedades humanas es más dudosa, debido a que la concentración de contaminantes está diluida. La contaminación estacional de las aguas superficiales en los comienzos de la primavera en América del Norte y Europa podría explicar en parte la estacionalidad de algunos casos esporádicos de enfermedades transmitidas por el agua, como la *criptosporidiosis* o la *campilobacteriosis*. Una parte importante de los brotes conocidos de enfermedades transmitidas por el agua está vinculada a episodios de precipitación intensa acompañados, frecuentemente, de fallos de las plantas de tratamiento. [GTII 14.2.5, 8.2.5]

La floración de algas nocivas (FAN) en el agua dulce produce toxinas que podrían causar enfermedades humanas. Su aparición en aguas superficiales (ríos, o lagos) podría aumentar si aumenta la temperatura. Sin embargo, la amenaza para la salud humana es muy pequeña, ya que el contacto directo con las algas suele estar restringido. El riesgo de que el suministro de agua se contamine con ese tipo de toxinas es bajo, pero se desconocen sus implicaciones respecto a la salud humana. [GTII 8.2.4, 3.4.4]

En áreas en que la infraestructura de suministro de agua es deficiente, la transmisión de enteropatógenos alcanza un máximo durante la estación lluviosa. Además, se ha descubierto que la subida de las temperaturas está asociada a un mayor número de episodios de diarrea (Checkley et al., 2000; Singh et al., 2001; Vasilev, 2003; Lama et al., 2004). La incidencia subyacente de esas enfermedades está asociada a una higiene deficiente y a la imposibilidad de acceder a aguas salubres. [GTII 8.2.5]

4.3.1.2 Desastres: tempestades de viento y crecidas

En las secciones anteriores se ha descrito en qué manera afectará el cambio climático al riesgo de desastres relacionados con el agua, entre ellos las crecidas por desbordamiento de lagos glaciales, el aumento de intensidad de las mareas de tempestad, o el cambio respecto al riesgo de crecidas (véase la Sección 3.2), en particular de crecidas repentinas y urbanas, con algunas disminuciones del riesgo de crecidas primaverales por deshielo de nieve. [GTII 3.4.3] Las crecidas ocasionan un impacto importante sobre la salud, en términos tanto del número de defunciones y de la carga de enfermedad como de los daños en la infraestructura sanitaria. [GTII 8.2.2] Después de una crecida, el riesgo de enfermedades infecciosas suele ser bajo en los países con alto nivel de ingresos, pero en las poblaciones con una infraestructura deficiente y una elevada carga de enfermedades infecciosas es frecuente que aumenten las tasas de enfermedades diarreicas. Aumenta la evidencia de que los desastres relacionados con el clima afectan a la salud mental, y de que las personas que han padecido los efectos de una crecida sufren ansiedad y depresión prolongadas. [GTII 8.2.2, 16.4.5]

Las crecidas y las precipitaciones intensas podrían ocasionar la contaminación del agua con sustancias químicas, como metales pesados u otras sustancias peligrosas, procedentes de depósitos de almacenamiento, o presentes ya en el medio ambiente (por ejemplo, plaguicidas). El aumento de la densidad de población y del desarrollo industrial en áreas expuestas a desastres naturales incrementa tanto la probabilidad de desastres futuros como el potencial de exposición de gran número de personas a materiales peligrosos por esa razón. [GTII 8.2.2]

4.3.1.3 Sequía y enfermedades infecciosas

En un pequeño número de enfermedades infecciosas se ha establecido una relación entre ellas y la precipitación, no vinculada, ni en calidad ni en cantidad, al uso de agua potable ni a artrópodos vectores. La distribución espacial, intensidad y estacionalidad de la *meningitis* meningocócica (epidémica) en la región africana del Sahel está relacionada con factores climáticos y medioambientales, particularmente la sequía, aunque el mecanismo causal no se conoce con suficiente detalle. La distribución geográfica de la *meningitis* se ha extendido por el África occidental en los últimos años, lo cual podría atribuirse a la alteración del medio ambiente ocasionada tanto por los cambios de uso de la tierra como por el cambio climático a nivel regional. [GTII 8.2.3.1]

4.3.1.4 Tempestades de polvo

El polvo arrastrado por el viento proveniente de las regiones desérticas de África, la Península Arábiga, Mongolia, el Asia central y China podría afectar a la calidad del aire y a la salud de la población en áreas distantes. En presencia de polvo, el aire puede transportar, además de una mayor concentración de partículas respirables, sustancias vestigiales que podrían afectar a la salud humana, esporas de hongos, y bacterias. [GTII 8.2.6.4]

4.3.1.5 Enfermedades transmitidas por vectores

El clima influye en la distribución espacial, en la intensidad de transmisión y en la estacionalidad de las enfermedades transmitidas por vectores (por ejemplo, el paludismo) y por el caracol de agua (por ejemplo, la *esquistosomiasis*). [GTII 8.2.8] Durante las sequías, la actividad de los mosquitos es menor pero, si la transmisión se redujera de manera apreciable, la población de individuos no inmunes podría aumentar. A largo plazo, la incidencia de enfermedades transmitidas por mosquitos, como el paludismo, disminuye debido a la menor

abundancia de aquéllos, aunque la epidemia podría sobrevenir incluso en condiciones climáticas adecuadas. [GTII 8.2.3.1]

La distribución de la *esquistosomiasis*, enfermedad parasitaria relacionada con el agua de la que el caracol de agua es portador intermedio, está influida por factores climáticos en ciertos lugares. Por ejemplo, el cambio observado en la distribución de la *esquistosomiasis* en China durante el último decenio podría deberse en parte a la reciente tendencia al calentamiento. Se ha comprobado también que los sistemas de riego aumentan la incidencia de esa enfermedad cuando no se aplican medidas de control oportunas. [GTII 8.2.8.3]

4.3.2 Observaciones

Son muy diversas las causas subyacentes que podrían afectar y modificar el impacto del cambio climático sobre la salud humana. Dada la compleja relación existente entre factores climáticos y enfermedades, no suele ser posible atribuir los cambios de determinadas pautas de enfermedad a los cambios climáticos observados. Por otra parte, es difícil encontrar series de datos sanitarios de calidad y duración suficiente para realizar estudios al respecto. No se ha publicado ningún estudio sobre los efectos sanitarios de origen hídrico que describa pautas de enfermedad sólidamente atribuibles a los cambios climáticos observados. Hay, en cambio, cierto número de informes sobre las respuestas adaptativas del sector hídrico diseñadas para atenuar el impacto del cambio climático [GTII, Capítulo 7]

Las tendencias observadas respecto a los desastres relacionados con el agua (crecidas, tempestades de viento) y el papel desempeñado por el cambio climático son temas abordados en otros estudios. [GTII 1.3]

4.3.3 Proyecciones

El cambio climático tendrá previsiblemente una serie de efectos adversos sobre las poblaciones en que la infraestructura de distribución de agua y de saneamiento es inadecuada para satisfacer las necesidades locales. El acceso a aguas salubres sigue siendo un problema sanitario extremadamente importante a nivel mundial. Las regiones secas del planeta están habitadas por más de 2.000 millones de personas, que padecen en mayor medida malnutrición, mortalidad infantil y enfermedades relacionadas con la contaminación o la escasez de agua. La escasez de agua constituye una importante limitación para el desarrollo sostenible (Rockstrom, 2003). [GTII 8.2.5, 8.4.2.2]

4.3.4 Adaptación, vulnerabilidad y desarrollo sostenible

Las deficiencias de los sistemas de salud pública y un limitado acceso a la atención sanitaria primaria contribuyen a agravar los niveles de vulnerabilidad y a reducir la capacidad de adaptación de cientos de millones de personas. [GTII 8.6] Existen limitaciones fundamentales en los países de bajo nivel de ingresos, en los cuales la salud de la población depende de las mejoras de los sectores sanitario, hídrico, agrario, de transporte, de energía y de vivienda. La pobreza y la gobernanza deficiente son los obstáculos más graves para conseguir una adaptación efectiva. A pesar del crecimiento económico, es *probable* que los países de bajo nivel de ingresos sigan siendo vulnerables a medio plazo, y que tengan menos opciones de adaptación al cambio climático que los países de alto nivel de ingresos. Por consiguiente, para que las estrategias de adaptación sean efectivas, éstas deberían enmarcarse en las políticas de desarrollo, medio ambiente y salud vigentes en el área abarcada. Muchas de las opciones que podrían utilizarse para reducir la vulnerabilidad futura son de utilidad para adaptarse al clima actual, y podrían utilizarse también para alcanzar otros objetivos medioambientales y sociales. [GTII 8.6.3]

Antes de poner en práctica cualquier estrategia de adaptación, convendría evaluar sus posibles efectos adversos para la salud. Se ha constatado, por ejemplo, que las micropresas y los programas de riego incrementan la mortalidad por paludismo. [GTII 8.6.4] Las medidas de lucha contra la escasez de agua, como la reutilización de aguas de desecho no tratadas o parcialmente tratadas con fines de riego, tienen también implicaciones respecto a la salud humana. El riego es en la actualidad un factor de primer orden en la difusión de algunas enfermedades infecciosas, como el paludismo o la *esquistosomiasis* (Sutherst, 2004). Hay directrices estrictas sobre la calidad de las aguas de desecho destinadas al riego, cuya finalidad es prevenir los riesgos sanitarios aparejados por los organismos patógenos y asegurar la calidad de los cultivos (Steenvoorden and Endreny, 2004). Ciertas enfermedades, como la *helmintiasis*, se transmiten mediante el consumo de productos procedentes de cultivos regados con aguas contaminadas o de desecho; en las áreas rurales y suburbiales de los países de ingresos más bajos, la utilización de aguas fecales y residuales para el riego, que es una práctica común, viene a ser una fuente de transmisión de enfermedades de transmisión fecal-oral. En la actualidad, no menos de una décima parte de la población mundial consume productos procedentes de cultivos regados con aguas de desecho. Sin embargo, el aumento de la escasez de agua y de la demanda de alimentos, sumado a unas condiciones sanitarias deficientes, favorecerá la utilización de agua de baja calidad. Para controlar estos problemas será necesario elaborar programas de tratamiento de aguas de desecho y planificar su reutilización. [GTII 8.6.4, 3.4.4]

4.4 Abastecimiento de agua y saneamientos

Los efectos observados del cambio climático sobre la calidad y cantidad de los recursos hídricos han sido abordados detalladamente en las Secciones 4.2 y 4.3. En la presente sección se resumen los principales argumentos y se describen sus implicaciones respecto a los servicios de abastecimiento de agua y de saneamiento.

4.4.1 Contexto

En la Sección 4.3.1 se han expuesto diversas estadísticas sobre el acceso a un agua salubre. El acceso a un agua salubre está

Tabla 4.1: *Efectos observados del cambio climático, junto con sus impactos observados/posibles respecto a los servicios hidrológicos. [GTII, Capítulo 3]*

Efecto observado	Impactos observados/posibles
Aumento de la temperatura atmosférica	• Disminución de la disponibilidad del agua en cuencas alimentadas por glaciares en retracción, observada en ciertas ciudades andinas de América del Sur (Ames, 1998; Kaser and Osmaston, 2002)
Aumento de la temperatura superficial del agua	• Disminución del contenido de oxígeno disuelto, pautas de mezclado y capacidad de autodepuración • Mayor número de floraciones de algas
Aumento del nivel de mar	• Salinización de los acuíferos costeros
Cambios en las pautas de precipitación	• Variación de la disponibilidad del agua, debida a los cambios de precipitación y a otros fenómenos similares (por ejemplo, recarga de las aguas subterráneas, evapotranspiración)
Aumento de la variabilidad interanual	• Mayor dificultad para controlar las crecidas y para utilizar los reservorios durante la estación de crecidas
Aumento de la evapotranspiración	• Menor disponibilidad de agua • Salinización de los recursos hídricos • Disminución del nivel freático
Aumento de la frecuencia e intensidad de fenómenos extremos	• Las crecidas afectan a la calidad del agua y a la integridad de la infraestructura hidrológica, y acentúan la erosión fluvial, introduciendo así diversos tipos de poluyentes en los recursos hídricos • Las sequías afectan a la disponibilidad y calidad del agua

actualmente considerado como un derecho humano universal. Sin embargo, el mundo está tropezando con problemas cada vez mayores para la prestación del servicio de distribución de agua, particularmente en los países en desarrollo. Ello se debe a varias razones, no necesariamente vinculadas al cambio climático. La falta de agua disponible, una demanda cada vez mayor y más irregular como consecuencia del crecimiento de la población en áreas concentradas, el crecimiento de la urbanización, la mayor intensidad de uso de agua para mejorar el bienestar general, y la necesidad de mejorar la gobernanza del agua, son variables que dificultan enormemente la prestación satisfactoria de los servicios de abastecimiento de agua. En este contexto, el cambio climático representa simplemente una carga adicional para los servicios de abastecimiento de agua potable y para cualquier otra organización que preste servicios hidrológicos con miras a satisfacer las necesidades de sus clientes. Aunque a nivel local es difícil identificar los efectos del cambio climático, los efectos observados y las proyecciones constituyen un buen punto de partida para preparar el futuro.

4.4.2 Observaciones

En la Tabla 4.1 se resumen los posibles vínculos entre el cambio climático y los servicios hídricos.

4.4.3 Proyecciones

La *menor disponibilidad de agua* podría ser consecuencia de:

a. disminución del caudal en cuencas alimentadas por glaciares en retracción, y mayor duración y frecuencia de las estaciones secas,
b. disminución de las precipitaciones estivales, que conlleva un menor volumen de agua almacenada en reservorios alimentados por ríos estacionales (du Plessis et al., 2003),
c. variabilidad interanual de la precipitación, y cambios estacionales del flujo fluvial,
d. disminución del nivel de las aguas subterráneas no costeras,
e. aumento de la evapotranspiración por efecto de una mayor temperatura del aire, de una mayor duración del período de crecimiento y de un mayor uso de agua de riego,
f. salinización (Chen et al., 2004).

Las previsiones indican que el número de personas que podrían padecer un agravamiento del estrés hídrico podría cifrarse entre 400 millones y 1.700 millones de aquí al decenio de 2020, entre 1.000 millones y 2.000 millones de aquí al decenio de 2050, y entre 1.100 millones y 3.200 millones de aquí al decenio de 2080 (Arnell, 2004); la amplitud de estos intervalos refleja la diversidad de escenarios IE-EE considerados [GTII 3.2, 3.5.1]

En ciertas áreas, la escasa disponibilidad de agua ocasionará la sobreexplotación de las aguas subterráneas, que conllevará un mayor costo del abastecimiento de agua para todos los usos, debido a la necesidad de bombear aquélla a una mayor profundidad y desde lugares más lejanos. Además, la sobreexplotación de las aguas subterráneas podría ocasionar en ciertos casos el deterioro de la calidad del agua. En algunas regiones de India, Bangladesh, China,

norte de África, México y Argentina, más de 100 millones de personas padecen envenenamiento por arsénico y fluorosis (una enfermedad dental y ósea ocasionada por la ingesta excesiva de fluoruros con el agua potable) (UN, 2003); la situación podría agravarse si la población se viese obligada a consumir más agua subterránea por falta de fuentes de agua fiables en la superficie. [GTII 3.4.4]

Es *probable* que la mayor escasez de agua, sumada a una mayor demanda de alimentos y/o a un mayor uso de agua de riego por efecto del aumento de las temperaturas, redunde en una mayor reutilización del agua. En áreas con saneamientos insuficientes podría llegar a practicarse (por primera vez, o en mayor medida) una reutilización incontrolada de agua (con aguas poluidas, o incluso de desecho). [GTII 3.3.2, 8.6.4]

Deterioro de la calidad del agua causado por la variación del flujo. La disminución de los recursos hídricos incrementaría la concentración de poluyentes en el agua debido a su menor capacidad de dilución. [GTII 3.4.4, 14.4.1] Además, debido a la erosión fluvial, el aumento de los caudales fluviales desplazará y transportará hacia los recursos hídricos diversos compuestos presentes en el suelo. [GTII 3.4]

Análogamente, cabe esperar un aumento de las tasas de morbilidad y mortalidad a causa de enfermedades transmitidas por el agua, tanto en los escenarios más húmedos como en los más secos, imputable a la insuficiencia del suministro de agua potable (Kovats et al., 2005; Ebi et al., 2006) y a la mayor presencia de patógenos transportados por los cuantiosos caudales de agua durante los episodios de precipitación extrema. El aumento de la precipitación podría ocasionar asimismo un aumento de la turbidez y de la carga de nutrientes en el agua. El servicio de distribución de agua potable de la ciudad de Nueva York ha identificado en los fenómenos de intensa precipitación uno de sus problemas más importantes en relación con el cambio climático, ya que pueden inducir un aumento de la turbidez en algunos de los principales depósitos de la ciudad más de 100 veces superior al límite legalmente establecido respecto a la calidad de origen en los puntos de toma, lo que obliga a un importante tratamiento adicional, con los costos de supervisión consiguientes (Miller and Yates, 2006). [GTII 3.5.1]

Aumento de la escorrentía. En algunas regiones mejorará la disponibilidad de agua, eventualidad que, considerando la situación actual de los recursos hídricos mundiales, será en líneas generales beneficiosa. Es necesario, sin embargo, adoptar medidas que permitan aprovechar esa evolución en beneficio de la humanidad. Por ejemplo, a pesar del aumento de escorrentía previsible en el este y sur de Asia por efecto del cambio climático, es posible que no se consiga resolver el problema de la escasez de agua en esas áreas, debido a la falta de recursos que permitirían ampliar la capacidad de almacenamiento necesaria para captar el agua adicional y poder así utilizarla durante la estación seca. [GTII 3.5.1]

El aumento de la precipitación en las ciudades podría afectar al funcionamiento de los sistemas de alcantarillado; las sobrecargas no controladas podrían introducir en los recursos hídricos poluyentes microbianos y químicos, difíciles de eliminar mediante los métodos convencionales de tratamiento del agua potable. Diversos estudios demuestran que la transmisión de enteropatógenos resistentes a la cloración (*Cryptosporidium,* por ejemplo) aumenta durante la estación de lluvias (Nchito et al., 1998; Kang et al., 2001). Esta situación podría agravarse aún más en los países en desarrollo, donde el nivel de salud es inferior y el contenido patógeno de las aguas de desecho es más elevado (Jiménez, 2003). Además, las precipitaciones extremas causantes de crecidas entrañan un riesgo para la infraestructura hidrológica. Durante las crecidas, se averían con frecuencia las instalaciones de tratamiento de agua de abastecimiento y de desecho, dejando así a la población sin protección sanitaria [GTII 3.2, 3.4.4, 8.2.5]

Deterioro de la calidad del agua por efecto del aumento de las temperaturas. El aumento de las temperaturas, sumado al de las concentraciones de fósforo en lagos y reservorios, favorece la floración de algas que deterioran la calidad del agua confiriéndole un color, olor y sabor desagradables y, posiblemente, haciéndola tóxica para los seres humanos, para el ganado y para la fauna silvestre. Su tratamiento es extremadamente costoso en base a la tecnología disponible, incluso para los servicios hídricos de los países desarrollados (Environment Canada, 2001). El aumento de la temperatura del agua facilitará asimismo la transferencia a la atmósfera de poluyentes volátiles y semivolátiles (amoníaco, mercurio, PCB (policlorobifenilos), dioxinas y plaguicidas) presentes en el agua de abastecimiento y de desecho. [GTII 3.4.4]

Aumento de la salinización. La salinización del agua extraída de los acuíferos costeros como consecuencia del aumento del nivel del mar constituye un problema de la mayor importancia, ya que la cuarta parte de la población mundial aproximadamente vive en áreas de la costa en que suele escasear el agua y en que la población aumenta con rapidez (Small and Nicholls, 2003; Millenium Ecosystems Assessment, 2005b). La salinización podría afectar asimismo a los acuíferos de tierra firme, debido a la disminución de la recarga de agua subterránea (Chen et al., 2004). [GTII 3.2, 3.4.2]

En lo referente a los servicios hidrológicos, las poblaciones más afectadas por el cambio climático serán las situadas en las cuencas de África, región del Mediterráneo, Oriente Próximo, sur de Asia, norte de China, Australia, Estados Unidos, centro y norte de México, nordeste de Brasil, y costa occidental de América del Sur, que padecen ya estrés hídrico. Los más expuestos a este peligro serán los habitantes de megalópolis, de áreas rurales fuertemente dependentes del agua subterránea, de islas pequeñas, y de cuencas alimentadas por glaciares o por el deshielo de nieve (más de una sexta parte de la población mundial vive en cuencas alimentadas por agua de deshielo). Los problemas serán más acuciantes en las áreas económicamente deprimidas, en que el estrés hídrico se verá agravado por factores socioeconómicos (Alcamo and Henrichs, 2002; Ragab and Prudhomme, 2002). [GTII 3.3.2, 3.5.1]

4.4.4 Adaptación, vulnerabilidad y desarrollo sostenible

A la vista de los problemas expuestos, es importante que los servicios de distribución de agua potable de esas regiones elaboren los planes correspondientes. Los servicios de abastecimiento de agua potable están, en su mayoría, preparados para afrontar el cambio, relativamente pequeño, de las temperaturas y de las precipitaciones medias que sobrevendría en los próximos decenios, excepto en casos límite en que una variación de los valores medios obligaría a modificar el diseño del sistema o la tecnología utilizada (por ejemplo, cuando la disminución de la precipitación obligue a instalar reservorios adicionales (Harman et al., 2005), ocasione una intrusión salina en los tramos inferiores de un río, o haga necesarios nuevos sistemas de tratamiento del agua para eliminar la sal). Encontramos un ejemplo reciente de adaptación en el sur de África, en la ciudad de Beira, Mozambique, (Ruosteenoja et al., 2003), que está trasladando 5 km hacia el interior su estación de bombeo, que se encuentra ya a 50 km de distancia, para asegurarse la disponibilidad de agua dulce. [GTII 7.4.2.3.1]

Los servicios hídricos suelen distribuir el agua mediante sistemas mecánicos. Tales sistemas han sido diseñados incorporando factores de seguridad, y tienen una esperanza de vida útil de entre 20 y 50 años (para los reservorios de almacenamiento esta cifra podría ser incluso superior). La resistencia del sistema de suministro de agua y del funcionamiento de la infraestructura hidrológica suele estudiarse atendiendo únicamente a las condiciones observadas. Deberían tenerse en cuenta también las proyecciones climáticas, particularmente con los sistemas diseñados para hacer frente a crecidas o sequías.

Menor disponibilidad de agua. Excepto en un pequeño número de países industrializados, el consumo de agua está aumentando en todo el mundo debido al crecimiento demográfico y económico, a la evolución de los estilos de vida y al crecimiento de los servicios de abastecimiento de agua potable. [GTII 3.3] Es importante implementar programas de uso de agua eficientes en las regiones en que *probablemente* disminuirá la disponibilidad de agua, ya que podrían ser necesarias grandes inversiones para conseguir un suministro adecuado, o construyendo nuevos reservorios de almacenamiento o haciendo uso de fuentes de agua alternativas. La disminución del consumo de agua podría retrasar, e incluso eliminar, la necesidad de infraestructura adicional. Una de las maneras más rápidas de incrementar la disponibilidad de agua consistiría en minimizar las pérdidas de las redes de abastecimiento urbanas y de los sistemas de riego. Otras alternativas que atenuarían la necesidad de nuevos suministros de agua son la captación de agua de lluvia y la reutilización controlada del agua [GTII 3.5, 3.6]

Disminución de la calidad del agua por efecto de las variaciones del flujo. La protección de los recursos hídricos es una estrategia importante, y eficaz en términos de costo, para resolver los problemas de calidad del agua en el futuro. Aunque es ya una práctica común en ciertos países, se hacen necesarias nuevas metodologías para la gestión de la calidad del agua en todo el mundo. Una de ellas consistiría en la implantación de planes de salubridad hídrica (PSH) que permitan evaluar y gestionar íntegramente los riesgos desde la cuenca de captación hasta el consumidor, como se propuso en WHO (2005). Además, convendría examinar periódicamente el diseño y funcionamiento de las plantas de tratamiento de agua de abastecimiento y de desecho, particularmente en áreas vulnerables, a fin de asegurar, e incluso mejorar, su fiabilidad y su capacidad para hacer frente a unas variaciones de flujo de magnitud incierta.

Desalinización. Los métodos de tratamiento de agua son una opción que permitiría resolver los problemas de aumento de la salinidad en los lugares amenazados, como las áreas costeras muy urbanizadas que dependen de acuíferos sensibles a la intrusión salina. En la actualidad, las tecnologías disponibles son generalmente de membrana, y más costosas que los métodos tradicionales de tratamiento de agua dulce. El costo de desalinización del agua marina se estima en torno a 1 dólar/m^3, el del agua salobre en 0,60 dólares/m^3 (Zhou and Tol, 2005), y la cloración de agua dulce en 0,02 dólares/m^3. Afortunadamente, el costo ha ido disminuyendo, aunque comporta todavía una alta demanda de energía. Los costos de la desalinización deben juzgarse en comparación con el costo de prolongación de las conducciones y, en su caso, de reubicación de las instalaciones de tratamiento para conseguir acceso a un agua dulce. A efectos prácticos, el costo de construcción de las instalaciones de extracción y tratamiento, más la red de bombeo para el abastecimiento de la población urbana, es aproximadamente la mitad del costo total del sistema. [GTII 7.5] Sin embargo, en las áreas costeras de Egipto, China, Bangladesh, India y sureste de Asia, densamente pobladas, los costos de desalinización podrían seguir siendo prohibitivos. [GTII 3.5.1] Si en un futuro aumentara el recurso a la desalinización, habría que considerar algunos aspectos medioambientales secundarios: el efecto sobre los organismos marinos y su arrastre por las plantas de desalinización de agua marina, y la evacuación sin riesgo de salmueras de alta concentración que pueden contener también otros productos químicos. [GTII 3.3.2]

Otras posibles soluciones al problema del agua de desecho. Será necesario idear estrategias que permitan a los sistemas de alcantarillado y plantas de tratamiento hacer frente a caudales cada vez mayores y más variables. Por ejemplo, la utilización de sistemas descentralizados, la construcción de sistemas de alcantarillado independientes, el tratamiento de los reboses combinados del alcantarillado (es decir, la mezcla de aguas de desecho y escorrentía en las ciudades), o la inyección de agua de lluvia en el subsuelo. Dado el elevado costo que conlleva la ampliación de capacidad de las plantas de tratamiento de aguas de desecho urbanas, convendría recurrir a sistemas de financiación adecuados que tengan en cuenta las condiciones locales. En las áreas rurales, la cobertura de los saneamientos suele ser muy reducida, y es necesario formular planes de actuación a nivel local basados en tecnologías de bajo costo, atendiendo a las condiciones locales y con participación de la comunidad. [GTII 7.4.2.3]

Mejor administración de los recursos hídricos. Además de las medidas de adaptación ya expuestas, debe considerarse otro instrumento eficiente: una gestión integrada del agua que incorpore, como variable adicional, el cambio climático. La disminución, el aumento o la mayor variabilidad de la disponibilidad de agua ocasionarán conflictos entre sus consumidores (agricultura, industrias, ecosistemas y asentamientos). Las instituciones que administran la distribución del agua desempeñarán un papel destacado a la hora de determinar el impacto social de una mayor o menor disponibilidad de agua a nivel mundial, y a la hora de distribuir las ganancias y pérdidas entre los diferentes sectores de la sociedad. Los organismos institucionales necesitan encontrar mejores formas de repartir el agua, en base a principios (por ejemplo, de equidad y eficiencia) que podrían ser políticamente difíciles de aplicar en la práctica. Además, tendrán que considerar la gestión de las cuencas internacionales y de las cuencas superficiales y subterráneas. [GTII 3.5.1]

Para poder hacer frente al estrés adicional inducido por el cambio climático será necesaria la participación pública en la planificación hídrica, particularmente en lo que se refiere al cambio de mentalidad acerca del valor del agua, a la importancia y el papel que la reutilización del agua desempeñará en el futuro, y al grado en que la sociedad está dispuesta a contribuir a la mitigación de los efectos relacionados con el agua.

Para implementar una política basada en los principios de gestión integrada del agua, hay que procurar mejorar la coordinación entre las diversas entidades gubernamentales y revisar los marcos institucionales y legales que faciliten la aplicación de medidas de adaptación. El cambio climático afectará a todos cuantos están vinculados al proceso de gestión del agua, entre ellos los consumidores. Por consiguiente, todos debemos ser conscientes de los posibles impactos sobre el sistema, a fin de adoptar decisiones adecuadas y de estar preparados para desembolsar los costos consiguientes. En lo referente, por ejemplo, a las normas de evacuación de aguas de desecho, es posible que haya que revisar en su conjunto la estrategia utilizada, siempre y cuando esté basada en la capacidad de autodepuración del agua superficial, que disminuirá con el aumento de la temperatura. [GTII 3.4.4]

Países desarrollados. En los países desarrollados, el agua potable es sometida a un completo tratamiento antes de su suministro al consumidor, y el nivel de tratamiento del agua de desecho es bastante elevado. Es necesario que esos beneficios, así como la adecuada protección de las fuentes de agua, no se pierdan si llega a acontecer un cambio climático, aunque haya que incurrir en costos adicionales, por ejemplo si se imponen nuevas necesidades de tratamiento del agua. En pequeñas comunidades y áreas rurales, podría considerarse la protección de las fuentes de agua como opción más beneficiosa en términos de costo.

Países en desarrollo. Por desgracia, algunos países tal vez no tendrán los recursos económicos suficientes para hacer frente a los problemas que acarreará el cambio climático. Los países pobres necesitan ya recursos adicionales para superar los problemas de una infraestructura inadecuada, y serán por consiguiente más vulnerables a los impactos proyectados respecto a la cantidad y calidad del agua, a menos que que encuentren opciones de bajo costo y opciones de financiación asequibles.

Dado que algunas de las opciones de adaptación y mitigación identificadas son simplemente inviables, es posible que los países en desarrollo tengan que adaptarse recurriendo a prácticas no sostenibles, por ejemplo la sobreexplotación creciente de las aguas subterráneas, o la reutilización de una cantidad mayor de agua de desecho no tratada. Estas 'soluciones' son interesantes, porque podrían ponerse en práctica con facilidad a nivel individual y personal. Por consiguiente, es necesario desarrollar opciones inocuas y poco costosas que no impliquen necesariamente soluciones convencionales, particularmente para abastecer de agua a comunidades de escasos recursos en las que, en muchos casos, ni siquiera existen empresas de abastecimiento de agua propiamente dichas. Lamentablemente, son pocos los estudios disponibles al respecto. [GTII 3.4.3, 8.6.4]

En resumen, el cambio climático podría tener efectos tanto positivos como negativos sobre los servicios hídricos. Importa, pues, ser consciente de sus consecuencias a nivel local, y elaborar planes en consonancia. En el momento actual, sólo algunas empresas de distribución de agua de ciertos países, en particular Países Bajos, Reino Unido, Canadá y Estados Unidos, han empezado a considerar las implicaciones del cambio climático en el contexto del control de las crecidas y de la gestión del suministro de agua. [GTII 3.6]

4.5 Asentamientos e infraestructura

Los cambios respecto a la disponibilidad de agua, a su calidad, a las características de la precipitación y a la probabilidad y magnitud de las crecidas desempeñarán previsiblemente un importante papel en la materialización de los efectos del cambio climático sobre los asentamientos humanos y la infraestructura (Shepherd et al., 2002; Klein et al., 2003; London Climate Change Partnership, 2004; Sherbinin et al., 2006). Estos efectos variarán de unas regiones a otras. Además, dependerán en gran medida de la ubicación geográfica, del nivel de desarrollo socioeconómico, de las instituciones responsables de la asignación del agua, de la naturaleza de la base económica local, de las características de la infraestructura y de otros agentes estresantes. Entre ellos cabe señalar la polución, la degradación de los ecosistemas, el hundimiento de la tierra (debido a la pérdida de permafrost, a procesos isostáticos naturales o a actividades humanas como, por ejemplo, la utilización de aguas subterráneas), y el crecimiento demográfico (UNWWAP, 2003, 2006; Faruqui et al., 2001; UNDP, 2006). Los lugares del planeta en que más peligra el suministro de agua dulce por efecto del cambio climático son las islas pequeñas, los países áridos y semiáridos en desarrollo, las regiones que obtienen el agua dulce de ríos alimentados por la fusión de los glaciares o por el deshielo estacional, los países con una alta proporción de tierras bajas costeras, y las megalópolis costeras, particularmente en la región de Asia y el Pacífico (Alcamo and Henrichs, 2002; Ragab and Prudhomme, 2002). [GTII 6.4.2, 20.3]

Es *muy probable* que el aumento de la densidad de población en los lugares de alto riesgo, como las áreas costeras y ribereñas, agrave la vulnerabilidad a los efectos hídricos del cambio climático; en particular, a los daños ocasionados por crecidas y tempestades, y a la degradación de la calidad del agua por efecto de la intrusión salina. [GTII 6.4.2, 7.4.2.4] También es *probable* que los asentamientos cuya economía esté estrechamente vinculada a actividades sensibles al clima y dependientes del agua, como la agricultura de regadío, el turismo acuático o el esquí sobre nieve, sean particularmente vulnerables al impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos (Elsasser and Burki, 2002; Hayhoe et al., 2004). [GTII 7.4.3, 12.4.9]

La infraestructura asociada a los asentamientos abarca edificios, redes de transporte, instalaciones costeras, infraestructura de abastecimiento de agua y de agua de desecho, y redes de distribución de energía eléctrica. Entre los impactos que afectarían a la infraestructura cabe señalar los daños directos (por ejemplo, por efecto de crecidas o de inestabilidades estructurales ocasionadas por la erosión pluvial o por cambios de la capa freática) y los impactos sobre la operatividad, el costo y la adecuación de unas instalaciones no diseñadas para las condiciones climáticas que, según las proyecciones, prevalecerán en el futuro. [GTII 3.4.3, 3.5, 7.4.2.3]

4.5.1 Asentamientos

Gran número de asentamientos humanos carecen actualmente de un suministro adecuado de agua salubre. La Organización Mundial de la Salud estima que 1.100 millones de personas en todo el mundo carecen de acceso a agua potable salubre, y otros 2.400 millones no tienen acceso a unos saneamientos adecuados (WHO/UNICEF, 2000). Los hogares urbanos de escasos recursos no suelen tener acceso a la red de abastecimiento de agua, y son, por ello, particularmente vulnerables a las subidas de precio del agua potable (UN-HABITAT, 2003; UNCHS, 2003, 2006; UNDP, 2006). En Yakarta, por ejemplo, se ha sabido que algunas viviendas sin suministro regular de agua potable destinan hasta un 25% de sus ingresos al agua, mientras que en Ammán, Jordania, durante el caluroso verano de 1998 los residentes del campo de refugiados que carecían de acceso al servicio municipal de aguas potables tuvieron que pagar tasas de agua mucho más altas que otros núcleos familiares (Faruqui et al., 2001). Es *muy probable* que los impactos del cambio climático sobre la disponibilidad de agua y sobre su calidad en origen planteen cada vez mayores dificultades para resolver esos problemas, particularmente en áreas en que el estrés hídrico aumentará previsiblemente, debido a la disminución de la escorrentía y al aumento de la población. [GTII 3.5.1] En las áreas semiáridas de los países en desarrollo, los asentamientos con altas tasas de crecimiento, particularmente las comunidades con pocos recursos y escasa capacidad de adaptación, son particularmente vulnerables a una menor disponibilidad de agua y, por consiguiente, al aumento de costo vinculado a la consecución de un suministro fiable (Millenium Ecosystems Assessment, 2005b). [GTII 7.4]

Tanto en los países en desarrollo como en los desarrollados, el rápido aumento de la población en las ciudades costeras, que previsiblemente continuará, agravará la exposición humana a las crecidas y a los daños ocasionados por tempestades, huracanes y otros fenómenos similares en las costas. [GTII 7.4.2.4] Ese mismo desarrollo está contribuyendo en los deltas a la pérdida de humedales que podrían amortiguar los efectos de las tempestades. [GTII 6.4.1.2] Además, gran parte del aumento de población acaece en áreas costeras con relativa escasez de agua, agravando de ese modo los desequilibrios entre la demanda y la disponibilidad de agua (Small and Nicholls, 2003; Millenium Ecosystems Assessment, 2005b).

4.5.2 Infraestructura

4.5.2.1 Redes de transporte

Las crecidas causadas por la subida del nivel del mar y por el cambio de intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos (por ejemplo, tempestades, o huracanes) amenazan las redes de transporte en ciertas áreas. Podría haber crecidas de esas características en las calles o en las instalaciones de metro, y los deslizamientos de tierra y las crecidas podrían dañar puentes, carreteras y ferrocarriles. En Londres, cuyo metro es el más antiguo del mundo, las proyecciones indican que la intensificación del régimen de precipitación agravaría el riesgo de inundación del metro y de las autopistas. Ello obligaría a mejorar los sistemas de drenaje de esas redes (Arkell and Darch, 2006). Análogamente, una reciente investigación sobre el sistema de transporte de superficie en el área metropolitana de Boston predijo que el aumento de las crecidas ocasionaría un mayor número de retrasos y cancelaciones de viajes, lo cual se traduciría en una pérdida de jornadas laborales y de ventas, y en una menor productividad (Suarez et al., 2005). Estos costos, sin embargo, serían pequeños comparados con los daños que las crecidas infligirían a la infraestructura de transportes de Boston (Kirshen et al., 2006). [GTII 7.4.2.3.3] Como ejemplo de vulnerabilidad real que podría agravarse con la intensificación del régimen de precipitaciones, la empresa india Konkan Railway desembolsa cada año aproximadamente un millón de dólares en daños por deslizamientos de tierra durante la estación de lluvias (Shukla et al., 2005). [GTII 7.4.2.3.3]

4.5.2.2 Construcciones

Las inundaciones, los deslizamientos de tierra y las tempestades de gran intensidad (por ejemplo, los huracanes) entrañan un riesgo máximo de daños en los edificios, tanto en los países desarrollados como en desarrollo, debido a la presencia cada vez mayor de viviendas y otras propiedades en áreas costeras, laderas, barrancos y otros lugares de riesgo (Bigio, 2003; UN-HABITAT, 2003). Los asentamientos irregularmente instalados en áreas urbanas de países en desarrollo son particularmente vulnerables, ya que tienden a ubicarse en lugares relativamente peligrosos susceptibles a las crecidas, a los deslizamientos de tierra y a otros desastres de origen climático (Cross, 2001; UN-HABITAT, 2003). [GTII 7.4.2.4]

Otros impactos sobre los edificios consistirían en una posible aceleración de su desgaste externo, a consecuencia de la intensificación de las precipitaciones y de una mayor frecuencia de tempestades (véase, por ejemplo, Graves and Phillipson, 2000), y en un aumento de los daños estructurales ocasionados

por el agotamiento y hundimiento de la capa freática (véase, por ejemplo, Sanders and Phillipson, 2003), o por la elevación de la capa freática (Kharkina, 2004). [GTII 3.5]

Otro aspecto problemático es el futuro comportamiento de los sistemas de evacuación de agua de tempestad. En las regiones afectadas por tempestades cada vez más intensas, deberá aumentar la capacidad de esos sistemas para evitar las crecidas locales y los daños ocasionados por éstas en edificios y demás infraestructura (UK Water Industry Research, 2004). [GTII 7.6.4]

4.5.2.3 Infraestructura costera

En las tierras bajas, la infraestructura de las áreas costeras es vulnerable a los daños causados por la elevación del nivel del mar, las inundaciones, los huracanes y otras formas de tempestad. El volumen de infraestructura costera en peligro está aumentando con rapidez por efecto del continuo crecimiento de las ciudades costeras y del aumento del turismo en áreas tales como el Caribe (véase, por ejemplo, Hareau et al., 1999; Lewsey et al., 2004; Kumar, 2006). En ciertas áreas, el costo estimado de los daños ocasionados por la subida del nivel del mar suele ser importante. En Polonia, por ejemplo, el costo estimado de los daños ocasionados por un aumento del nivel del mar de un metro de aquí a 2100 ascendería a 30.000 millones de dólares, debido a su impacto sobre áreas urbanas, alcantarillado, puertos, y otros elementos de infraestructura (Zeidler, 1997). En ese mismo estudio se estima que en Vietnam, donde el aumento del nivel del mar sería de un metro, 17 millones de personas padecerían los efectos de las crecidas, y los daños ocasionados podrían alcanzar los 17.000 millones de dólares, con impactos importantes en el interior, lejos de la zona costera. [GTII 6.3, 6.4, 6.5]

4.5.2.4 Infraestructura energética

Los cambios hidrológicos afectarían directamente a la producción de las centrales hidroeléctricas, tanto de las actualmente existentes como de los posibles proyectos futuros. El grado de desarrollo hidroeléctrico presenta importantes diferencias regionales. En África, donde el potencial hidroeléctrico está escasamente aprovechado, las simulaciones de cambio climático para la central hidroeléctrica Batoka Gorge, en el río Zambeze, arrojan una disminución importante del caudal fluvial (por ejemplo, una disminución del caudal mensual medio de entre $3{,}21 \times 10^9$ m^3 y $2{,}07 \times 10^9$ m^3) y una reducción de la producción de energía eléctrica (por ejemplo, una disminución de la producción mensual media de entre 780 GWh y 613 GWh) (Harrison and Whittington, 2002). La potencia hidroeléctrica disminuiría también en otros lugares y períodos en que las proyecciones indican una disminución del caudal del río (véase, por ejemplo, Whittington and Gundry, 1998; Magadza, 2000). En otras áreas, las proyecciones indican un aumento de la generación hidroeléctrica. Por ejemplo, las estimaciones para el decenio de 2070 en base al escenario de emisiones IS92a indican que el potencial de producción de electricidad de las centrales hidroeléctricas al finalizar el siglo XX se incrementará entre un 15 y un 30% en Escandinavia y norte de Rusia, donde entre un 19% (Finlandia) y cerca de un 100% (Noruega) es de origen hidroeléctrico (Lehner et al., 2005). [GTII 3.5] Otras infraestructuras de energía, como las líneas de conducción de corriente eléctrica, las plataformas petroleras marinas o los oleoductos, podrían ser vulnerables a los daños ocasionados por las crecidas y por tempestades de mayor intensidad. [GTII 7.5] Además, los problemas de disponibilidad de agua de refrigeración (debido a su menor cantidad o a su mayor temperatura) podrían perturbar el suministro de energía, afectando adversamente a la producción de energía de las centrales eléctricas, térmicas y nucleares (EEA, 2005).

4.5.3 Adaptación

Los impactos vinculados a la alteración de la frecuencia de crecidas y sequías, o de la cantidad, calidad o estacionalidad del agua disponible podrían atenuarse mediante una inversión apropiada en infraestructura, y modificando consiguientemente la gestión del agua y el uso de la tierra. Una planificación coordinada podría ser útil, ya que existen muchos puntos de interacción entre los impactos ejercidos por el clima sobre las diferentes infraestructuras. Por ejemplo, el colapso de las defensas contra las crecidas podría traer aparejado el corte del suministro eléctrico, que a su vez dejaría sin servicio a las estaciones de bombeo de agua y a las de tratamiento de aguas de desecho.

Una mejor integración de la variabilidad climática actual en la gestión de los recursos hídricos facilitaría la adaptación al futuro cambio climático (*grado de confianza muy alto*). [GTII 3.6] Por ejemplo, la gestión del riesgo de crecidas actual mediante la interposición de áreas verdes y espacios naturales de contención en torno a los ríos que atraviesan las áreas urbanas contribuiría a paliar los efectos adversos de las escorrentías ocasionadas por unas tempestades futuras más intensas. Con todo, cualquiera de estas respuestas entraña costos no sólo económicos, sino también en términos de impacto social y, en particular, vinculados a la necesidad de solucionar los conflictos que pudieran surgir entre los diferentes grupos de interés. [GTII 3.5]

4.6 Economía: seguros, turismo, industria, transporte

4.6.1 Contexto

El clima y los recursos hídricos afectan a varios sectores económicos secundarios y terciarios, como los seguros, la industria, el turismo o el transporte. Los efectos hídricos del cambio climático sobre esos sectores podrían ser positivos o negativos, pero los extremos climáticos y otros cambios abruptos tienden a afectar a los sistemas humanos con mayor dureza que los cambios graduales, en parte porque se dispone de menos tiempo para adaptarse a ellos. [GTII 7.1.3]

Las pérdidas experimentadas a nivel mundial ponen de manifiesto el rápido aumento de los costos por efecto de fenómenos meteorológicos extremos desde los años 70. En cierto estudio se concluye que, aunque la señal predominante siga siendo un importante aumento del valor atribuido a la

exposición al riesgo, una vez normalizadas las pérdidas en términos de exposición sigue apreciándose una tendencia subyacente al alza. En determinadas regiones y para ciertos tipos de peligro, en particular el peligro de crecidas extremas de algunos grandes ríos, hay evidencia de un aumento en la frecuencia de acaecimiento. [GTII 1.3.8.5]

Como confirmación del gran impacto de la variabilidad climática sobre las pérdidas de las aseguradoras, las crecidas ocasionan un 10% de las pérdidas por aseguramiento en todo el mundo. La sequía tiene también repercusiones: datos relativos al Reino Unido indican un desfase entre el costo de los partes de siniestro por hundimiento y la (escasez de) precipitación estival. Sin embargo, en los países en desarrollo las pérdidas ocasionadas por los fenómenos extremos se cuantifican más en términos de vidas humanas que de resultados de las aseguradoras. La sequía del Sahel, por ejemplo, pese a su extrema gravedad, tuvo un impacto reducido sobre el sector financiero oficial, debido a la baja penetración de los seguros en esa región. [GTII TIE 8.2.3]

4.6.2 Costos socioeconómicos, mitigación, adaptación, vulnerabilidad, desarrollo sostenible

De todos los posibles impactos hídricos sobre el transporte, el más gravoso son las inundaciones. El costo en concepto de retrasos y de cancelaciones de viajes es relativamente pequeño en comparación con el daño ocasionado a la infraestructura y a otros tipos de bienes (Kirshen et al., 2006). En los últimos diez años, cuatro inundaciones ocasionaron daños superiores a los 10 millones de euros (13 millones de dólares) en instalaciones de metro, y hubo numerosos casos en que los daños fueron de menor cuantía (Compton et al., 2002). [GTII 7.4.2.3.3]

Suele considerarse que los sectores industriales son menos vulnerables a los impactos del cambio climático que, por ejemplo, la agricultura. Las excepciones más señaladas son las instalaciones industriales situadas en áreas sensibles al clima (por ejemplo, llanuras inundables) (Ruth et al., 2004) y las dependientes de materias primas sensibles al clima, como las fábricas de elaboración de alimentos. [GTII 7.4.2.1]

En cada país, la cobertura específica de los seguros contra riesgos vendrá determinada por los efectos de los desastres precedentes. Dada la alta concentración de pérdidas que ocasionan las crecidas catastróficas, el nivel de contratación de seguros contra crecidas con empresas privadas suele ser bajo (e incluso nulo); por ello, en varios países la Administración ha desarrollado planes de aseguramiento alternativos respaldados por el Estado (Swiss Re, 1998). [GTII 7.4.2.2.4]

En el sector financiero, los riesgos relacionados con el cambio climático son contemplados cada vez más frecuentemente en determinados sectores 'susceptibles', como las centrales hidroeléctricas, la irrigación y la agricultura, o el turismo (UNEP/GRID-Arendal, 2002). [GTII 7.4.2.2]

El cambio climático afectaría al turismo en lo que se refiere a la disponibilidad de agua, que podría cambiar en sentido positivo o negativo (Braun et al., 1999; Uyarra et al., 2005). El calentamiento climático abre la posibilidad de ampliar la extensión de medioambientes exóticos (los palmerales de la Europa occidental, por ejemplo), lo cual, aunque podría ser positivo para algunos turistas, podría ocasionar también la extensión en el espacio y la proliferación de enfermedades transmitidas por el agua y por vectores. Las sequías y la extensión de los medioambientes áridos (y de los efectos de los fenómenos meteorológicos extremos) podría desalentar el turismo, aunque no se sabe con certeza qué es lo que sería inaceptable para los turistas. [GTII 7.4.2.2.3] Las áreas que dependen de la disponibilidad de nieve (por ejemplo, para el turismo de invierno) son algunas de las más vulnerables al calentamiento global. [GTII 11.4.9, 12.4.9, 14.4.7]

El transporte de mercancías por vías navegables interiores (por ejemplo, el Rin) podría resultar más dificultoso en situaciones de crecida y de sequía (Parry, 2000). [GTII 7.4.2.2.2]

Los seguros diversifican el riesgo y coadyuvan a la adaptación, mientras que la gestión de los fondos de aseguramiento tiene implicaciones respecto a la mitigación. [GTII 18.5] En relación con la infraestructura de transporte, los costos y beneficios de la adaptación han sido evaluados en menor medida (véase, por ejemplo, Dore and Burton, 2001). [GTII 17.2.3]