

CAPÍTULO PRIMERO

CAMBIO CLIMÁTICO Y DEGRADACIÓN AMBIENTAL

De acuerdo con el Quinto Informe del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático —IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change—, el calentamiento en el sistema climático es inequívoco, cuya influencia humana es la causa dominante desde la década de 1950; muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios. “La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar se ha elevado y las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado” (IPCC, 2013a: 4).

A su vez, en el recién Informe Especial del IPCC sobre los Impactos del Calentamiento Global de 1,5 °C:

Se estima que las actividades humanas han causado un calentamiento global de aproximadamente 1,0 °C con respecto a los niveles preindustriales, con un rango probable de 0,8 °C a 1,2 °C. Es probable que el calentamiento global llegue a 1,5 °C entre 2030 y 2052 si continúa aumentando al ritmo actual (IPCC, 2018: 6).

I. DEFINICIÓN DE CAMBIO CLIMÁTICO. LA INFLUENCIA HUMANA

De acuerdo con el IPCC, el cambio climático es definido como

Variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo (IPCC, 2013c: 188).

Por su parte, el artículo 1o. de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) señala que el cambio climá-

tico es el “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”.

El cambio climático lo podemos comprender también como una serie de anomalías que se manifiestan en una región en reiteradas ocasiones durante un periodo considerable, y que pueden repetirse de un año a otro; además, presentan una tendencia constante hasta modificar el clima de una región con repercusiones en el ambiente, el ecosistema y la sociedad. La variabilidad climática es atribuible tanto a causas naturales como a actividades humanas que alteran la composición atmosférica; a esto último se le conoce como cambio climático antropogénico, el que invariablemente se añade a las variaciones climáticas naturales que se producen en toda una gama de escalas temporales y espaciales (IPCC, 2001b: 25).

En este contexto, las actividades humanas han incrementado a un ritmo acelerado las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero (GEI)¹ y aerosoles desde la época preindustrial; cabe apuntar que los principales gases antropogénicos de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y el ozono (O₃) troposférico, alcanzaron los niveles más altos jamás registrados durante el decenio de 1990, debido principalmente al consumo de combustibles fósiles, la agricultura y cambios en el uso de las tierras (IPCC, 2001a: 4).² Dichos gases persisten un tiempo determinado en la atmósfera, en donde retienen el calor provocando un calentamiento, por lo que su incremento acelerado altera la temperatura atmosférica.

¹ El gas de efecto invernadero es un “componente gaseoso de la atmósfera, natural o antropogénico, que absorbe y emite radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación terrestre emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera y por las nubes”, propiedad que ocasiona el efecto invernadero. Son considerados GEI primarios de la atmósfera terrestre el vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el ozono (O₃). Además, la atmósfera contiene una cantidad considerable de este tipo de gases provenientes de fuentes antropógenas, como los halocarbonos u otras sustancias que contienen cloro y bromo, contemplados en el Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono de 1987 (IPCC, 2013c: 193). Cabe apuntar que el Protocolo de Kioto de 1997, con carácter adicional y subordinado a la CMNUCC, se refirió en un principio a seis tipos de GEI: CO₂, CH₄, N₂O, perfluorocarbonos (PFC’s), hidrofluorocarbonos (HFC’s) y hexafluoruro de azufre (SF₆); posteriormente, el trifluoruro de nitrógeno (NF₃) se incluyó en el segundo periodo de compromiso del Protocolo (Conferencia de las Partes en Calidad de Reunión de las Partes en el Protocolo de Kioto, 2013: 9 y 10).

² Las concentraciones de CO₂ han aumentado en un 40% desde la era preindustrial; los océanos han absorbido alrededor del 30% del CO₂ antropogénico emitido; sin embargo, esto ha provocado su acidificación (IPCC, 2013a: 11 y 12).

De tal manera que el cambio climático está ligado al calentamiento global (Singer, 2008), que se ha manifestado en las últimas décadas en el aumento del promedio mundial de las temperaturas del aire y del océano, lo cual está directamente asociado a las variaciones de algunos componentes del ciclo hidrológico, como son cambios en los patrones de lluvias, intensidades y valores extremos de precipitación; fusión generalizada de la nieve y del hielo; aumento del vapor de agua atmosférico; aumento de la evaporación, y variaciones de la humedad del suelo y de la escorrentía (Gouretski y Koltermann, 2007).

Además, se ha registrado que es muy probable que el cambio climático antrópico esté relacionado con la alteración de la ocurrencia de los fenómenos estacionales, como los ciclones tropicales, y de fenómenos cíclicos, como El Niño y La Niña, que son fases opuestas de lo que se conoce como el ciclo de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, El Niño-Southern Oscillation).³ Los cambios asociados al ENSO producen grandes variaciones meteorológicas y climáticas en todo el mundo de un año a otro, con profundas repercusiones en la humanidad y en la sociedad, a causa de las sequías, las inundaciones, las olas de calor y demás cambios asociados a este fenómeno, que pueden tener consecuencias muy perjudiciales para la agricultura, la pesca, el medio ambiente, la salud, la demanda de energía, la calidad del aire, entre otros (IPCC, 2001b: 31, 32 y 52).

La evidencia de la influencia humana en el calentamiento de la atmósfera y del océano, en las alteraciones del ciclo global del agua, en las reducciones de la cantidad de nieve y hielo, en la elevación media mundial del nivel del mar y en los cambios de algunos fenómenos climáticos extremos es cada vez mayor, pues es sumamente probable que la influencia humana haya sido la causa dominante del calentamiento observado desde mediados del siglo XX (IPCC, 2013a: 17-19).

³ Remítase a WMO, *WMO El Niño/La Niña Updates Archive*, disponible en: http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/wcasp/enso_updates.html; WMO, *WMO Annual Statements on the Status of the Global Climate*, disponible en: <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-status-of-global-climate>.

El ciclo ENSO es un término científico que describe las fluctuaciones de temperatura entre el océano y la atmósfera en el centro-este del Pacífico ecuatorial. La Niña se refiere a la fase fría del ENSO, y El Niño, a la fase cálida del ENSO; estas desviaciones de las temperaturas superficiales normales pueden tener impactos a gran escala no sólo en los procesos oceánicos, sino también en el clima global. Los episodios de El Niño y La Niña generalmente duran de nueve a doce meses, aunque los eventos pueden prolongarse por años. La frecuencia es irregular, pero ocurren en promedio cada dos a siete años. Típicamente, El Niño se produce con más frecuencia que La Niña (NOAA, 2015).

II. CAMBIO CLIMÁTICO OBSERVADO Y PROYECTADO. LA EVIDENCIA CIENTÍFICA

Existe suficiente evidencia científica de que en los últimos años se ha experimentado un aumento en la temperatura promedio anual de la superficie terrestre y oceánica, combinados y promediados globalmente. Calculados a partir de una tendencia lineal, muestran un calentamiento de 0,85 °C durante el periodo 1880-2012; el incremento total entre el promedio del periodo 1850-1900 y el periodo 2003-2012 es de 0,78 °C. Es prácticamente seguro que la tropósfera se haya calentado a nivel global desde mediados del siglo XX (IPCC, 2013a: 5).

Ahora bien, el ciclo hidrológico y los sistemas hidrológicos están estrechamente vinculados a los cambios de la temperatura atmosférica y al balance radiativo; el agua dulce como componente fundamental en el sistema climático es el principal indicador de su modificación.⁴ Es por ello que los cambios en este sistema, de acuerdo con lo observado, la afectan directamente en los cambios en las pautas, intensidades y valores extremos de precipitación;⁵ fusión generalizada de la nieve y del hielo; aumento del vapor de agua atmosférico; aumento de la evaporación, y variaciones de la humedad del suelo y de la escorrentía. Estos cambios se han experimentado desde hace más de cien años; no obstante, en los últimos cuarenta años, con la existencia de modelos más robustos y bases de datos más completas, se han demostrado científicamente (Bates *et al.*, 2008).

En cuanto a los océanos, su calentamiento domina sobre el incremento de la energía almacenada en el sistema climático, y representa más del 90% de la energía acumulada entre 1971 y 2010. Es prácticamente seguro que la capa superior del océano se haya calentado entre 1971 y 2010, y es probable que se haya calentado entre la década de 1870 y 1971, y que las regiones con alta salinidad, donde predomina la evaporación, se hayan vuelto más salinas, y que las regiones con baja salinidad, donde predominan las precipitaciones, se hayan desalinizado a partir de la década de 1950 (IPCC, 2013a: 8).

⁴ Debido al calentamiento de los lagos y ríos, los ecosistemas de agua dulce han experimentado cambios en la proporción relativa de sus especies, abundancia de organismos, productividad y desplazamientos fenológicos (en particular, una migración más temprana de peces); numerosos lagos han experimentado una estratificación prolongada, con disminuciones de la concentración de nutrientes en su capa superficial y un agotamiento prolongado del oxígeno en capas más profundas.

⁵ En cuanto a eventos extremos de precipitación, se ha observado un aumento de estos episodios en todo el mundo (Beck *et al.*, 2004: 181-190).

Con relación a la criósfera, en los dos últimos decenios, los mantos de hielo de Groenlandia y la Antártida han ido perdiendo masa. En cuanto a los primeros, es muy probable que el ritmo de la pérdida haya aumentado considerablemente, de 34 Gt año⁻¹, durante el periodo 1992-2001, a 215 Gt año⁻¹, durante el periodo 2002-2011; respecto a los segundos, es probable que el ritmo de la pérdida de hielo del manto de hielo haya aumentado de 30 Gt año⁻¹, durante el periodo 1992-2001, a 147 Gt año⁻¹, durante el periodo 2002-2011. Los glaciares en casi todo el mundo han disminuido; el hielo del Ártico y el manto de nieve en primavera en el hemisferio norte continúan reduciéndose en extensión. Es muy probable que la superficie media anual del hielo marino del Ártico haya disminuido durante el periodo 1979-2012 en un rango del 3.5% al 4.1% por decenio, y es muy probable que el mínimo estival del hielo marino (hielo marino permanente) haya disminuido en un rango del 9.4% al 13.6% por decenio. En cuanto a las temperaturas del permafrost, éstas han aumentado en la mayoría de las regiones desde principios de la década de 1980; el calentamiento observado ha sido de hasta 3 °C en partes del norte de Alaska, y hasta 2 °C en partes del norte de la Rusia europea, en donde se ha observado una reducción considerable del grosor de la extensión en superficie del permafrost durante el periodo de 1975-2005 (IPCC, 2013a: 9).⁶

También existen indicios de que este deshielo ha contribuido muy probablemente al aumento observado del nivel del mar, el cual se estima que ha sido de 1,7 mm año⁻¹, entre 1901 y 2010; de 2,0 mm año⁻¹, entre 1971 y 2010, y de 3,2 mm año⁻¹, entre 1993 y 2010 (IPCC, 2013a: 11), con afectaciones directas a las regiones costeras y en los pequeños Estados insulares.

Por lo que corresponde al cambio climático proyectado, los datos del Quinto Informe de Evaluación del IPCC señalan que las emisiones continuas de GEI causarán un mayor calentamiento y nuevos cambios en todos los componentes del sistema climático, por lo que es probable que para fines del siglo XXI la temperatura global en la superficie sea superior en 1,5 °C a la del periodo entre 1850 y 1900, ante lo cual se espera que los cambios que se producirán en el ciclo global del agua en respuesta a este calentamiento no serán uniformes; por otro lado, se estima que serán más intensos y frecuentes los fenómenos de precipitación extrema en la mayoría de las masas

⁶ La reducción de las masas de nieve y hielo ha generado alteraciones en la escorrentía, el aumento del volumen de agua dulce en los mares, la elevación de la corteza terrestre (Larsen *et al.*, 2004: 1118-1133) y la formación de lagos, cuyos impactos en conjunto representan un gran potencial de inundaciones, erosión y destrucción de caminos e infraestructura, que indudablemente afectan a las actividades productivas, como son la ganadería, la agricultura, la industria y el turismo. Lo anterior ha ocurrido en regiones montañosas de los Alpes, el Himalaya y los Andes, así como en las cuencas con hielos permanentes, como la Antártida, Alaska y Siberia, en donde vive más de la sexta parte de la población mundial.

térricas de latitud media y en las regiones tropicales húmedas. A su vez, los océanos seguirán calentándose; se penetrará desde la superficie hasta las capas profundas de los océanos, y se afectará la circulación oceánica. Por su parte, las proyecciones apuntan a que la cubierta de hielo del Ártico seguirá disminuyendo y haciéndose más delgada; en general, el volumen global de los glaciares continuará reduciéndose, lo que implicará que el nivel medio global del mar seguirá aumentando, con la probabilidad de que el ritmo de elevación sea mayor que el observado durante el periodo 1971-2010 (IPCC, 2013a: 20, 23-25, 27 y 28). Las previsiones del aumento del nivel medio global del mar sugieren un rango indicativo de 0,26 a 0,77 m para 2100 si el calentamiento global es de 1,5 °C, 0,1 m menos que si el calentamiento global es de 2 °C, cuya reducción es trascendente, ya que implica que hasta diez millones de personas (conforme a cifras de población de 2010) estarían menos expuestas a los riesgos que ello conlleva (sin ejecutar medidas de adaptación), tales como el desplazamiento forzado (IPCC, 2018: 9).

Asimismo, es importante señalar que los modelos climáticos prevén importantes diferencias en las características regionales del clima entre el momento actual y un calentamiento global de 1,5 °C, y entre un calentamiento global de 1,5 °C y de 2 °C, cuyas discrepancias comprenden un aumento de la temperatura media en la mayoría de las regiones terrestres y oceánicas, episodios de calor extremo en la mayoría de las regiones habitadas, así como precipitaciones intensas en varias regiones, la probabilidad de sequía y de déficits de precipitación en algunas regiones (IPCC, 2018: 9).

Lamentablemente, gran parte del cambio climático antropógeno, generado principalmente por las emisiones de CO₂, es irreversible en una escala temporal de entre varios siglos a milenios, y seguirá causando nuevos cambios a largo plazo en el sistema climático, como el aumento del nivel del mar, acompañados de impactos asociados, salvo que se produzca una abundante remoción de CO₂ de la atmósfera durante un periodo prolongado, lo cual se vislumbra como un objetivo muy difícil de alcanzar (IPCC, 2013a: 20, 23-25, 27 y 28; IPCC, 2018: 7).

III. LAS DIMENSIONES DE LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

De acuerdo con los informes del IPCC (IPCC, 2001c; IPCC, 2007a; IPCC, 2007b; IPCC, 2007c; IPCC, 2013c; IPCC, 2014; IPCC, 2018), el cambio climático implica no sólo afectaciones ambientales, sino también económicas y sociales. A guisa de ejemplo, en el siguiente punto haremos referencia a al-

gunos aspectos destacables; ello, con el fin de subrayar la relevancia de los impactos y sus consecuencias.

1. *Ambientales*

- *Ecosistemas.* El cambio climático antropógeno ha causado durante los últimos años importantes modificaciones a los ecosistemas, y se le han atribuido algunas extinciones de especies.⁷ Diversas especies terrestres, dulceacuícolas y marinas han modificado sus áreas de distribución geográfica, actividades estacionales, pautas migratorias, abundancias e interacciones con otras especies en respuesta a este fenómeno (IPCC, 2014: 4, 14 y 15). Los bosques tropicales en todo el mundo han sufrido tanto desplazamiento como pérdida en población. En el norte de Europa, en Norteamérica, así como en Japón, China y Rusia, se han alterado hábitats de bosque polar, tundra y praderas, por lo que algunas especies de aves, peces y mamíferos se han desplazado más al norte; además, han aparecido especies invasoras y exóticas. En Oceanía, los ecosistemas más afectados son los costeros y marinos debido a la acidificación del agua de mar, lo cual ha provocado cambios en el crecimiento del fitoplancton, en la abundancia de especies de macroalgas y alteraciones en las tasas de crecimiento de abulón, langosta y otros peces de importancia comercial. Las sequías atípicas de larga duración y extensión han afectado los bosques de Norteamérica y Asia central con altas tasas de mortalidad en diversas especies, sobre todo de coníferas; además, se han incrementado las plagas, enfermedades y organismos patógenos que afectan a diversas especies vegetales y animales. En las islas del Pacífico, las costas del golfo de México y el mar Caribe, de Sudamérica y de África, los impactos más severos los han recibido las colonias de coral, dunas, humedales, manglares y estuarios.
- *Recursos hídricos.* Las consecuencias del cambio climático vinculadas con la explotación excesiva de los recursos hídricos han implicado la

⁷ De acuerdo con el IPCC, de las 105,000 especies estudiadas, se prevé que el 6% de los insectos, el 8% de las plantas y el 4% de los vertebrados pierdan más de la mitad de su alcance geográfico si el calentamiento global es de 1,5 °C, en contraste con un 18% de los insectos, un 16% de las plantas y un 8% de los vertebrados si el calentamiento global es de 2 °C. Los impactos asociados a otros riesgos relacionados con la biodiversidad, como los incendios forestales y la propagación de especies invasoras, son menores con un calentamiento global de 1,5 °C que con uno de 2 °C (IPCC, 2018: 10).

disminución de los caudales. Algunas de las cuencas de los principales ríos del mundo, como el Indo, el Brahmaputra, el Ganges, el Salween y el Mekong en Asia;⁸ los mares Caspio y Aral y el río Danubio en Europa; el río Bravo de Norteamérica,⁹ y el río Nilo y los lagos Victoria y Tanganika en África, están sufriendo de estrés hídrico por el aumento de temperaturas, lo que provoca una mayor variación y volumen en la escorrentía, así como por el deterioro de la calidad y cantidad del agua; el primero ocurre por la acidificación del agua por las emisiones de CO₂ (con impacto directo en la biodiversidad), aumento de erosión y transporte de contaminantes, y el segundo se debe a la mayor evapotranspiración y reducción del régimen de lluvias. Ahora bien, entre más se caliente el agua, la productividad de la industria pesquera irá disminuyendo, con las consecuencias sociales que esto significa. Por otro lado, se ha documentado la pérdida de permafrost, la reducción de glaciares de montaña y de zonas polares, con la consecuente reducción de escorrentía, lo que afecta la contribución de escurrimiento hacia ríos y lagos internos, lo cual se ha observado en Sudamérica, Norteamérica, Europa y Asia; de igual manera, el incremento de temperatura superficial del agua ha provocado cambios en la dinámica del flujo de la misma y la aparición de zonas de eutrofización en lagos de África, Sudamérica y Asia.

2. Sociales

- *Agricultura y seguridad alimentaria.* Las repercusiones del cambio climático en la producción de alimentos afectarán a “todos los aspectos de la seguridad alimentaria incluido el acceso a los alimentos, el uso de éstos y la estabilidad de sus precios”, con la consecuente incidencia en los medios de subsistencia a nivel local y mundial, en particular en las regiones con alta inseguridad alimentaria y gran desigualdad social (IPCC, 2014: 4, 6, 13, 18 y 20). En relación con los principales cultivos (trigo, arroz y maíz) en las regiones tropicales y templadas, las proyecciones estiman que el cambio climático sin adaptación tendrá un impacto negativo en la producción, aunque puede haber localidades individuales que resulten beneficiadas de este aumento (IPCC, 2014: 17). Los países pobres y en vías de desarrollo de África, Asia y algunos de América Central y el Caribe son

⁸ Lutz *et al.*, 2014: 587-592.

⁹ Detinger *et al.*, 2015: 2069-2093; Llano, 2019: 237-257.

los más afectados por su dependencia a la agricultura de temporal y su alta vulnerabilidad en el ganado, ya que debido a ondas de calor, sequías extensas y duraderas, huracanes e inundaciones, heladas y lluvia extrema se han incrementado las tasas de mortalidad y enfermedades de los principales ganados, así como la presencia de plagas y pérdidas en cultivos.¹⁰ De igual manera, los impactos del cambio climático en el océano incrementan los riesgos para la pesca y la acuicultura a causa de los impactos en la fisiología, la supervivencia, el hábitat, la reproducción, la incidencia de enfermedades y el riesgo de aparición de especies invasoras (IPCC, 2018: 11).

- *Salud.* El impacto del cambio climático afectará a la salud al generar lesiones, enfermedades y muertes debido a olas de calor e incendios más intensos; igualmente, se prevé una mayor desnutrición a causa de la disminución en la producción de alimentos en las regiones pobres; mayores riesgos de enfermedades transmitidas por los alimentos y el agua, y el desplazamiento de vectores transmisores de enfermedades a zonas más altas y a regiones fuera de los trópicos; el cambio climático puede propagar enfermedades infecciosas en áreas en las que comúnmente no se presentan (IPCC, 2014: 19). Los cambios en los ecosistemas y, por tanto, en su biodiversidad afectan las poblaciones de vectores de enfermedades, lo cual potencialmente eleva las tasas de malaria, dengue, chikungunya, entre otros. Además, el incremento en las temperaturas facilita la propagación de las poblaciones de mosquitos a regiones como Europa, África central y oriental y Sudamérica. Por otro lado, el calentamiento global también contribuye a la propagación de virus que provocan meningitis, hantavirus y rotavirus, en zonas templadas y frías de Asia, Europa y Norteamérica.
- *Movimientos poblacionales.* El Quinto Informe de Evaluación del IPCC pone de manifiesto que el cambio climático durante el siglo XXI proyecta un aumento en el desplazamiento de personas, cuyo riesgo se acrecienta en los países en desarrollo cuando las poblaciones tanto rurales como urbanas están expuestas a los fenómenos meteorológicos extremos y carecen de recursos para una migración planificada. A su vez, entre los principales resultados expuestos por el IPCC se establece que los impactos del cambio climático son una creciente amenaza para la seguridad humana, al perjudicar el acceso a los alimentos, al agua y al refugio, destruyendo a la vez pertenencias,

¹⁰ Ibarra, 2019: 329-350; López y Hernández, 2016: 459-496.

donde el aumento de migraciones forzadas pone en peligro la cultura y la identidad de las personas; indirectamente, todo esto puede aumentar los riesgos de conflictos violentos en la forma de guerra civil y violencia entre grupos, al incrementarse motores como la pobreza y las crisis económicas (IPCC, 2014: 20).

3. *Económicos*

El Informe Stern hace referencia al impacto del cambio climático sobre la economía mundial, y entre sus conclusiones principales se afirma que, en caso de no producirse una rectificación inmediata del actual modelo productivo, los costes del cambio climático para la economía mundial serán equivalentes a la pérdida de un mínimo del 5% del producto interno bruto (PIB) mundial anual, por lo que se necesitará una inversión semejante al 1% del PIB mundial para aminorar los efectos del cambio climático, ya que de no hacerse dicha inversión, el mundo se expondrá a una recesión, que podrá alcanzar el 20% del PIB global; en dicho escenario, de acuerdo con Estrada y otros, el sector agrícola y el suministro de agua serían los más afectados, además de la pérdida del 50% de la vegetación y la cubierta forestal para mediados del siglo XXI (Estrada *et al.*, 2013: 6).

Cabe resaltar que, por ejemplo, Estados Unidos presentó una pérdida económica atribuible al cambio climático estimada entre 2,000 y 14,000 millones de dólares tan sólo en 2005, cantidad que equivale del 2 al 12% de la pérdida de la riqueza de la población local, como consecuencia de los impactos de los fenómenos naturales (Estrada *et al.*, 2015: 1). En este contexto, el pronóstico indica que el incremento en 1 °C de la temperatura global representaría un aumento de las pérdidas por tormentas tropicales y huracanes calculado entre 19,000 y 88,000 millones de dólares por año (Estrada *et al.*, 2015: 4).

En el plano regional, diversos estudios estiman que los costos económicos del cambio climático en América Latina y el Caribe relacionados con un aumento de 2,5 °C de temperatura (muy probablemente alrededor de 2050) oscilan entre el 1.5% y el 5% del PIB actual (CEPAL, 2015: 26). La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), por su parte, ha indicado que las pérdidas económicas acumuladas por eventos hidrometeorológicos en Latinoamérica alcanzaron un valor de 81,000 millones de dólares en el periodo de 1970-2008 (CEPAL, 2009: 32).

Por otro lado, de una manera no exhaustiva, datos de un reciente estudio de la CEPAL, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y el Fondo

Mundial para la Naturaleza (WWF)¹¹ calculan que el valor agregado anual de los daños económicos que se anticipan en la región de América Latina y el Caribe, como consecuencia de algunos de los principales impactos físicos¹² atribuibles al inevitable aumento de 2 °C de la temperatura media sobre los niveles preindustriales, irá aumentando gradualmente hasta alcanzar aproximadamente entre 85,000 millones de dólares y 110,000 millones de dólares en 2050; ello, sin considerar otros valores difícilmente cuantificables, como los daños a la biodiversidad, la afectación de los servicios ambientales y los daños culturales y sociales, lo que incidirá en el Índice de Desarrollo Humano, transgrediendo negativamente en los niveles de equidad y pobreza.¹³

En México, actualmente las pérdidas en el PIB a consecuencia de las variaciones en el clima han impactado fuertemente al sector agrícola; durante la última década, se dio más variabilidad y reducción global de la precipitación pluvial, que afectó en especial a los productores de temporal, generalmente campesinos de subsistencia (Ortiz *et al.*, 2015: 232), entre quienes se encuentran los más pobres, tanto por nivel de ingreso como de riqueza, por lo que la vulnerabilidad de los campesinos ante el cambio climático aumentará significativamente. Más del 60% de la agricultura en nuestro país se lleva a cabo bajo condiciones de temporal, por lo que resulta vulnerable a las condiciones climatológicas extremas, como heladas, sequías e inundaciones, lo que generará grandes costos para el país (Ibarrarán y Rodríguez, 2007: 21-27).

En este sentido, cabe señalar que en los últimos años se ha observado una disminución en la producción de los cultivos y en el número de cabezas de ganado, con afectación a la industria de procesamiento de alimentos, de ahí que se reporte un incremento del 47.5% en la importación de granos con un costo de 2,164 millones de dólares, aumentando, en consecuencia, el pre-

¹¹ Vergara *et al.*, 2014.

¹² Tales como el aumento del nivel del mar (un m); el blanqueo coralino; la intensificación y aumento de la frecuencia de eventos meteorológicos extremos; problemas en la salud, al generarse un aumento en incidencias de diarrea y desnutrición; la extinción paulatina de especies en la Amazonía; la reducción acelerada del tamaño de glaciares en Perú; el detrimento de servicios ecosistémicos, y la pérdida de la capacidad de generación hidroeléctrica en Brasil. Véase Vergara *et al.*, 2014: 32-35.

¹³ Para medir la calidad de vida generalmente se emplea el Índice de Desarrollo Humano, que es un indicador propuesto por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, a través del cual se mide el grado de desarrollo de los países a partir de las siguientes variables: 1) longevidad: medida en función de la esperanza de vida al nacer; 2) nivel educacional: medido en función de una combinación de la tasa de alfabetización de adultos y la tasa bruta de matrícula combinada de primaria, secundaria y superior; y 3) nivel de vida: medido por el PIB real per cápita. Remítase a PNUD, 1990: 36 y 37.

cio de los alimentos; lo anterior, vinculado con el impacto económico negativo con relación al cambio climático que se genera sobre el valor de la tierra, cuyas estimaciones indican que hacia 2050 existirán pérdidas en el valor de la producción en los Estados del sur del país, cuyos cultivos básicos como el maíz y el frijol muestran tendencias a la baja, además de una pronunciada inestabilidad, lo que afectará negativamente al ingreso agrícola (Martínez y Rodríguez, 2008).

De la Fuente y Olivera (2013), al examinar el efecto del cambio climático en el PIB per cápita y en la pobreza en México, estiman que, ante el incremento de la variabilidad climática y las precipitaciones pluviales, el ingreso se reducirá en hasta 1.45% para 2030, y la reducción de la pobreza será más lenta, lo que propiciará que 2,902,868 personas permanezcan en condiciones de pobreza; esto se establece con base en cifras de población proyectadas para 2030.

Por su parte, Galindo, en el estudio sobre *La economía del cambio climático en México*, observa que la valuación de los costos de los impactos de este fenómeno son tres veces mayores que aquellos asociados a un acuerdo de mitigación internacional para México, ya que, conforme a su análisis, los costos totales del cambio climático alcanzarán en 2100 alrededor del 6.22% del PIB, excluyendo actividades pecuarias, eventos extremos, alza del nivel del mar y los costos fuera del mercado en biodiversidad, cuya pérdida del 45% es depreciada en este pronóstico con una disminución económica del 0.06% del total del PIB, y vidas humanas; a su vez, estima que los costos de la mitigación con reducciones al 50% de emisiones al 2100 con respecto al 2002 oscilan entre 0.7 y 2.2% del PIB actual, dependiendo del valor de la tonelada de carbono (Galindo, 2009: 54 y 55).

Sin embargo, Estrada y otros debaten estos resultados en un análisis posterior, argumentando la incertidumbre que producen los modelos teóricos en los que se basan, al sostener con tan sólo el 60% de probabilidad una media equivalente al 3.5% del crecimiento anual del PIB dependiente de variables determinantemente constantes, como el alza del capital social y la tasa del empleo, estimadas en un 4.5% y 1.5%, respectivamente, mientras que las fluctuaciones en el precio del consumo de energía e hidrocarburos no son consideradas; además, señalan que dicho estudio proporciona estimaciones de los costos acumulados del cambio climático para México durante este siglo y que, de acuerdo con sus datos, los impactos económicos del cambio climático no representarían un menoscabo a la economía mexicana; por lo tanto, subestiman los impactos potenciales del cambio climático a esta última, lo cual contrasta con los estudios referentes a las evaluaciones de los

impactos del cambio climático con consecuencias considerables en nuestro país. Además, agregan que los resultados expuestos son notoriamente bajos en comparación con los del Informe Stern; de tal manera que, para que las estimaciones del estudio de Galindo sean consistentes al Informe, los costos del cambio climático deberían ser al menos tan grandes como el promedio mundial, teniendo en cuenta que México es un país en desarrollo y significativamente biodiverso, en donde el valor presente de los costos acumulados del cambio climático durante este siglo correspondería a una pérdida anual del 0.08% del PIB (Estrada *et al.*, 2013: 5 y 6).

IV. DETERIORO PAULATINO Y DETERIORO REPENTINO. DISTINTAS ESCALAS TEMPORALES

Los efectos del cambio climático pueden observarse a distintas escalas temporales. Los deterioros repentinos son efectos que ocurren en un periodo corto de semanas o meses, mientras que el deterioro paulatino puede verse reflejado en varios años o décadas. El deterioro repentino está asociado con los fenómenos meteorológicos extremos, que son fenómenos inusualmente severos impropios de una estación. Para determinar si un fenómeno es severo o no, la ocurrencia de una variable meteorológica debe estar por encima o por debajo de un valor umbral cercano al extremo superior o inferior de los registros de valores en una localidad particular.

En la actualidad, tendemos a prestar más atención a los fenómenos súbitos y poco a la problemática a largo plazo del cambio climático. Sin embargo, la gravedad de los impactos ocasionados por fenómenos extremos también depende de la exposición y la vulnerabilidad de las poblaciones humanas, que a su vez están relacionados con factores como el deterioro paulatino como consecuencia del cambio climático antropogénico, la variabilidad natural del clima y el desarrollo socioeconómico (IPCC, 2012: 17-19). Las consecuencias acumuladas del deterioro paulatino y repentino son una degradación ambiental generalizada, que implica “la disminución de la capacidad del medio ambiente para responder a las necesidades y a los objetivos sociales y ecológicos” (UNISDR, 2009: 12), y provocan conflictos socioambientales y migración humana, en razón de que “la degradación del medio ambiente puede alterar la frecuencia y la intensidad de las amenazas naturales y aumentar el grado de vulnerabilidad de las comunidades” (UNISDR, 2009: 12).

Con el objetivo de relacionar los efectos del cambio climático con la migración humana, en este capítulo clasificamos como deterioro paulatino a

las sequías, la desertificación, la elevación del nivel del mar y la acidificación de los océanos. Consideramos como deterioro repentino a las olas de calor y frío, los ciclones tropicales y las inundaciones.

1. *Deterioro paulatino*

A. *Sequías*

El término se refiere a un déficit en la precipitación de una región, tomando como referencia a la precipitación media anual o estacional de largo periodo (Martínez y Fernández, 2004: 315). Conforme al IPCC, la sequía es un “período de condiciones anormalmente secas durante un tiempo suficiente para causar un desequilibrio hidrológico grave” (IPCC, 2013b: 201).

A escala global, no existe evidencia suficiente para asegurar que las sequías tengan una tendencia a incrementarse. Esto puede deberse a la falta de observaciones directas y a las inconsistencias geográficas en las tendencias (Sheffield *et al.*, 2012: 435-438; IPCC, 2013c: 46-50). Sin embargo, es probable que la frecuencia e intensidad de las sequías esté aumentando en algunas regiones del planeta, como el Mediterráneo y el oeste de África, y esté disminuyendo en el noroeste de Australia y algunas regiones de Norteamérica (IPCC, 2013c: 46-50). Aun así, se sabe que la sequía regional puede tener impactos en la sequía global (Sternberg, 2011).

Debido a la compleja dinámica atmosférica de la humedad, puede ocurrir que en algunas regiones exista un aumento en la sequía, mientras que en otras haya un aumento en las inundaciones. Por ejemplo, mientras que en Norteamérica se espera un aumento en la precipitación media anual y en el número de inundaciones (Easterling *et al.*, 2000: 2069 y 2070), en el sur de Europa la sequía podría provocar la disminución en el potencial de generación de energía hidroeléctrica y, en general, en la productividad agrícola (WMO, 2007: 3). En México, bajo un escenario de cambio climático se prevé que algunas regiones se beneficien, en tanto que otras se vean afectadas por un aumento en el grado de severidad de la sequía. Las regiones que mayormente se verían afectadas son la península de Baja California y el noroeste de Sonora (Martínez y Fernández, 2004: 315-325).

Existen numerosos efectos ambientales derivados de las sequías; en los bosques, la mortalidad de los árboles puede ocasionar alteración en la riqueza, en la composición y en la distribución de las especies; posibles impactos en los ciclos del carbono y el nitrógeno; disminución en la productividad primaria, e incremento súbito y paulatino de recursos para organismos des-

componedores (Weifeng *et al.*, 2012: 109-121). Además, una disminución en la humedad relativa aumenta la acumulación de combustible orgánico seco, lo cual es un factor potencial de incendios, incrementando así la tasa de deforestación (Díaz-García *et al.*, 2013: 397 y 398). Las alteraciones en la conectividad hidrológica como consecuencia de un aumento en la sequía pueden provocar cambios en la calidad de los cuerpos de agua dulce, impactando la biota acuática (Boulton y Lake, 2008: 81-102).

Aquellas zonas en las que la disponibilidad relativa de agua disminuya tendrán un aumento en la demanda, y, como consecuencia, la dificultad para suministrar el agua sería un factor potencial de conflicto. Esto se intensificaría en las zonas áridas o semiáridas en donde se realizan actividades productivas. Debido al cambio climático, se prevé que la disponibilidad relativa de agua disminuya; con esto, la demanda de agua aumentará, y la dificultad para suministrarla será un factor potencial de conflicto.

Por otro lado, es de señalar que la sequía tiene un impacto socioeconómico relevante; por ejemplo, en el caso de México, donde la agricultura de riego y de temporal es una fuente importante de empleo y de ingreso económico, las sequías representan un alto riesgo para el sector agropecuario, ya que propician severos desajustes a la economía regional y nacional; de igual manera, el sector ganadero se ve afectado con pérdidas económicas; todo ello, con la consecuente afectación social (Cenapred, 2012; PECC, 2014: 4-9); a su vez, la escasez de agua es un factor decisivo para abandonar los poblados y regiones (Ortega-Gaucin y Velasco, 2013: 79). De tal manera que los efectos de las sequías pueden incidir en la migración de la población productiva en busca de mejores oportunidades, ya sea en las grandes ciudades o en países fronterizos (Feng *et al.*, 2010: 14257-14262).

B. Desertificación

La Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación en los Países Afectados por Sequía Grave o Desertificación, en particular en África, adoptada el 17 de junio de 1994, define a la desertificación en el artículo 1o., inciso *a*, como “la degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas resultante de diversos factores, tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas”; a su vez, en el inciso *f* se señala que la degradación de las tierras es

...la reducción o la pérdida de la productividad biológica o económica y la complejidad de las tierras agrícolas de secano, las tierras de cultivo de regadío

o las dehesas, los pastizales, los bosques y las tierras arboladas, ocasionada, en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, por los sistemas de utilización de la tierra o por un proceso o una combinación de procesos, incluidos los resultantes de actividades humanas y pautas de poblamiento, tales como:

- i. la erosión del suelo causada por el viento o el agua,
- ii. el deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas o de las propiedades económicas del suelo, y
- iii. la pérdida duradera de vegetación natural.

La desertificación, por lo tanto, es el proceso de degradación del suelo fértil en el que se pierde parcial o totalmente su potencial de producción. La desertificación es consecuencia de tres factores principales: la pérdida de cobertura vegetal, la erosión y la escasez de agua. El cambio climático está íntimamente ligado a la desertificación por las retroalimentaciones que existen entre la degradación del suelo y la precipitación. Así, se generan cambios en las escorrentías y en la disponibilidad de agua.

De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2007: 3), las estimaciones prevén que el cambio climático aumente la desertificación debido a la alteración en la distribución espacial y temporal de la temperatura, las lluvias, la radiación solar y los vientos. Al igual que en la sequía, la desertificación no impacta de una manera homogénea a escala global. Por ejemplo, los suelos expuestos a la degradación como consecuencia de un mal manejo de la tierra son más susceptibles a la desertificación por el cambio climático. El incremento en la temperatura regional altera las propiedades y los procesos del suelo (descomposición de materia orgánica, lixiviación y regímenes de inundación). Se estima que la productividad de los cultivos disminuya aun cuando el aumento en la temperatura sea muy pequeño, principalmente en latitudes bajas donde existe una temporalidad de lluvias y secas. En Latinoamérica se espera una salinización y desertificación de las tierras agrícolas en las zonas más secas.

C. Elevación del nivel del mar

Es el aumento en el nivel medio global del mar causado principalmente por dos procesos distintos: la expansión térmica de las aguas oceánicas y el deshielo de los polos. La expansión térmica se debe a la dilatación del agua debido al aumento en la temperatura. Se estima que alrededor de la mitad del aumento del nivel del mar que se produjo durante el siglo pasado se debe a la expansión térmica de los océanos (IPCC, 2013c: 1139-1141). Los cambios

en los vientos superficiales, la expansión térmica y la incorporación de hielo fundido alteran las corrientes oceánicas, lo que modifica el nivel del mar de manera diferencial.

Asimismo, a nivel local, la compactación de sedimentos y los procesos tectónicos modifican el nivel del mar. De acuerdo con el Quinto Informe del IPCC (IPCC, 2013c: 1139), la tasa de cambio del nivel medio global del mar era de 1.7 ± 0.2 mm año⁻¹ para todo el siglo XX, y de entre 2.8 y 3.6 mm año⁻¹ desde 1993. Durante el periodo 1901-2010, el nivel del mar se elevó 0.19 metros.

El incremento del calentamiento global aumenta la exposición de las islas pequeñas, las zonas costeras bajas y los deltas a los riesgos asociados al aumento del nivel del mar para muchos sistemas humanos y ecológicos. El efecto inmediato es un aumento en el hundimiento y en las inundaciones, así como las intrusiones de agua salada y los daños en la infraestructura (IPCC, 2018: 10). Otros efectos menos inmediatos implican la pérdida de humedales, la erosión de playas y la pérdida de acantilados de sustrato suave (Nicholls, 2011: 144-157).

Ahora bien, tomando en cuenta que las zonas costeras e insulares son las más vulnerables, un porcentaje sustancial de la población humana se vería severamente afectado, incluso con un aumento mínimo del nivel del mar (Anthoff *et al.*, 2006; IPCC, 2013c: 1139-1141), lo que propiciaría un considerable movimiento poblacional.

La elevación del nivel del mar constituye un riesgo para los sectores residencial y de infraestructura asentados en zonas costeras, por lo que desde el punto de vista económico implica el aumento de los costos para proteger y mantener las fronteras marítimas, además de que el sector turístico también es afectado, al resultar erosionadas las costas y al generarse la pérdida de áreas de playas (Galindo, 2009: 41).

Al respecto, cabe señalar que, en el ámbito nacional, diversos estudios han evaluado el coste económico del aumento del nivel del mar (IPCC, 2001c). Tal es el caso de Uruguay, en donde se evaluaron los impactos potenciales de un incremento de 0.5 metros en la costa de Montevideo, cuyo resultado sin respuesta adaptativa estimó el costo de dicho aumento en 23 millones de dólares, con un retiro de la línea de costa de entre 56 y 112 metros, y una pérdida de 6.8 hectáreas de tierra (Saizar, 1997: 73-79). Por su parte, en Polonia se estimó que el costo total de pérdida de tierra por la elevación del nivel del mar sería de aproximadamente 30 billones de dólares, mientras que el costo de la protección total de 2,200 km de costa se evaluó en 6 billones de dólares (IPCC, 2001c).

En México, el litoral costero se extiende a lo largo de aproximadamente 11,122 km (incluye ríos, deltas, estuarios, lagunas, bahías, humedales, manglares y arrecifes), en cuyas zonas se ubican importantes centros urbanos y se desarrollan actividades fundamentales para la economía del país, tales como la extracción de petróleo, turismo, agricultura, pesca y acuacultura, entre otras (Vázquez, 2008: 8); de ahí la importancia de conocer qué tan vulnerables pueden ser nuestros ecosistemas y su poder de adaptación ante la elevación del nivel del mar.

En el estudio denominado *Evaluación regional de la vulnerabilidad actual y futura de la zona costera mexicana y los deltas más impactados ante el incremento del nivel del mar debido al cambio climático y fenómenos hidrometeorológicos extremos*, las proyecciones nacionales estimadas para un escenario con incremento del nivel del mar de dos metros señalan que en términos absolutos Campeche, Sinaloa y Quintana Roo podrían ser los estados más afectados, mientras que en términos relativos Tabasco sería el estado más afectado, con el 14% de su superficie; le seguirían Quintana Roo, Campeche y Sinaloa, con 11.94, 9.50 y 8.90%, respectivamente; cabe señalar que las proyecciones para el incremento de un metro se mantienen similares (Vázquez, 2008: 26-32).

No obstante, es preciso destacar que en dicho estudio se identifica a casi todo el litoral costero del golfo de México con afectaciones en las zonas costeras de los estados de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán, Quintana Roo, Sinaloa, Nayarit y Chiapas hacia finales del presente siglo, cuyas zonas críticas serán la Laguna de Términos en Campeche; el Complejo Deltaico Grijalva-Usumacinta y el sistema lagunar Carmen-Pajonal Machona en Tabasco; la Reserva de la Biosfera Sian Ka'an en Quintana Roo, y Marismas Nacionales en Nayarit y Sinaloa (Vázquez, 2008: 47 y 48).

Los impactos del aumento del nivel del mar para las costas mexicanas serán diferentes en magnitud y características para los estados costeros; sin embargo, los efectos socioeconómicos potenciales directos e indirectos, en general, implicarán daños económicos, ambientales, culturales y de subsistencia a causa de la pérdida de tierras, infraestructura y hábitats costeros, con afectación a los asentamientos humanos, el turismo, la agricultura, la acuacultura, el suministro, la cantidad y calidad de agua dulce, las pesquerías, así como los servicios financieros y de salud (Vázquez, 2008).

D. Acidificación de los océanos

El aumento en la concentración de CO₂ en la atmósfera provoca un incremento en la absorción oceánica de dióxido de carbono, lo que ocasiona la acidificación (Dore *et al.*, 2009: 12235-12240). Este fenómeno no ocurre

de forma homogénea a escala global. Por ejemplo, las regiones polares son más susceptibles a la acidificación, mientras que los sistemas costeros eutróficos usualmente presentan un pH más alto (Steinacher *et al.*, 2009: 530 y 531; Doney *et al.*, 2012: 16). Además, el cambio de uso de suelo y los flujos de los ríos modifican la alcalinidad de las regiones costeras. De acuerdo con el Quinto Informe del IPCC (2013: 294), el pH superficial del océano ha disminuido en 0.1 unidades con respecto a la época preindustrial. Los océanos han absorbido alrededor del 30% de las emisiones de CO₂, por lo que el proceso de acidificación se está acelerando.

Al acidificarse el océano, se reduce la concentración de iones carbonatados, lo que ocasiona que el nivel de saturación de carbonato de calcio se reduzca. Esto podría generar severos impactos en arrecifes de coral, criaderos de ostras, redes tróficas y ciclos geoquímicos (Doney *et al.*, 2012: 19-21). Para algunos autótrofos como el fitoplancton o algunos pastos marinos, el incremento de CO₂ puede promover la fotosíntesis, mientras que para otros, particularmente para los organismos calcificadores, la fotosíntesis se vería reducida (Kroeker *et al.*, 2009: 1419-1434).

La acidificación puede modificar una amplia variedad de procesos metabólicos; por ejemplo, en algunos peces y moluscos podría reducir la capacidad de retención de oxígeno (Pörtner, 2010: 881-893). Estos efectos podrían alterar la producción pesquera, así como las actividades turísticas asociadas principalmente a los ecosistemas de arrecifes de coral.

2. *Deterioro repentino*

A. *Olas de calor y frío*

Las olas de calor son periodos de clima más cálido de lo habitual y pueden durar varios días o semanas. Las olas de calor representan un gran riesgo para la población, principalmente en combinación con una alta humedad, porque generan la persistencia de altas temperaturas durante las noches (Karl *et al.*, 2009: 24 y 25). En las últimas décadas se ha presentado una tendencia creciente en las olas de calor de este tipo. Cabe señalar que éstas pueden estar acompañadas de baja humedad, lo que se asocia con las sequías y, a su vez, con un aumento en los incendios forestales (Trenberth, 2011: 131 y 132; Lau y Kim, 2012: 393-397).

Numerosos estudios han documentado que el cambio climático ha aumentado la frecuencia, severidad y duración de las olas de calor en casi todas las zonas continentales del mundo (Karl *et al.*, 2008; Stott *et al.*, 2010: 192-

211; Christidis *et al.*, 2011: 1922-1930; IPCC, 2013: 46-50). Por ejemplo, las temperaturas extremas durante la noche usualmente ocurrían una vez cada veinte años. Ahora, se registra una cada diez años (Zwiers *et al.*, 2011: 881). Actualmente, los veranos extremadamente cálidos (temperaturas superiores a tres desviaciones estándar del promedio histórico) se observan en el 10% del territorio mundial, mientras que en el periodo comprendido entre 1951 y 1980 se registraba en tan sólo el 0.1-0.2% (Hansen *et al.*, 2013: 547). Cabe señalar que estos eventos extremos son responsables de más muertes anuales que la combinación de huracanes, rayos, tornados y terremotos en los Estados Unidos (Luber y McGeehin, 2008: 429).

Las olas de frío son episodios extremos en el descenso de la temperatura, que pueden ser más severos debido a un aumento en la fuerza del viento (Stocks *et al.*, 2004: 450). El cambio climático provocará un aumento tanto en el número como en la intensidad de estas temperaturas extremas, principalmente en Europa y Estados Unidos (Kodra y Ganguly, 2014: 3-5). Entre los efectos esperados se encuentran la modificación de los umbrales de respuesta de las plagas agrícolas (Diffenbaugh *et al.*, 2008: 1-9), la modificación de los límites de distribución de las especies (Walther *et al.*, 2002: 389-395; Firth *et al.*, 2011: 250-256), y una afectación directa en los productos agrícolas (Schlenker y Roberts, 2009: 15594-15598).

En el caso de México, Ibararán y Rodríguez señalan que económicamente los impactos de la variación de temperaturas en la producción agrícola (la estimación se aplica a seis productos del sector agrícola: caña de azúcar, maíz, naranja, trigo, café y frijol)¹⁴ pueden ir del orden de los dieciséis a los veintidós mil millones de pesos (Ibararán y Rodríguez, 2007: 25-30); no obstante, cabe destacar que tal estimación no toma en cuenta la introducción de medidas defensivas, como incrementar el uso de insumos para contrarrestar la reducción en la productividad, modificar la composición de la producción y/o cambiar las fechas de siembra. Además, el resultado del estudio se considera parcial, debido a que sólo incluye seis productos del sector agrícola para determinar el costo impuesto por el cambio climático; por otro lado, no toma en cuenta medidas de adaptación y no determina las pérdidas distributivas y para los consumidores.

B. *Ciclones tropicales*

Los ciclones tropicales y sus etapas (perturbación tropical, depresión tropical, tormenta tropical y huracán) son fenómenos meteorológicos extre-

¹⁴ Ibararán y Rodríguez, 2007: 26, tabla 4.2.

mos que han recibido mucha atención en las últimas evaluaciones del IPCC, porque contribuyen a la ocurrencia de desastres. Sin embargo, los riesgos de desastre no obedecen únicamente a factores físicos, sino que surgen de la interacción entre los fenómenos meteorológicos junto con la exposición y vulnerabilidad de las poblaciones humanas. El cambio climático antropogénico, la variabilidad natural del clima y el desarrollo socioeconómico son factores determinantes de la severidad de los desastres (IPCC, 2012: 18).

El cambio constante en el clima genera dificultad para predecir la severidad de los fenómenos climáticos extremos; por lo tanto, es probable que ocurran fenómenos de este tipo sin precedentes. Además, se espera que, durante el siglo XXI, la frecuencia, la intensidad y la proporción de precipitaciones aumenten en muchas zonas del planeta. Se espera un aumento en la velocidad máxima del viento en los ciclones tropicales; sin embargo, debido a que no todas las cuencas oceánicas responden del mismo modo, no se esperan cambios observables a escala mundial (IPCC, 2013c: 107 y 108).

En cuanto a los ciclones, existe un consenso respecto al aumento en su intensidad en el noroeste del Pacífico y en el Atlántico norte, y se prevé que, a mayor número e intensidad de tormentas, los impactos podrían tener mayores consecuencias sociales y económicas relevantes (Cenapred, 2012; PECC, 2014: 4-9).

En el caso de México, la frecuencia y la intensidad de los ciclones tropicales están superando por mucho la capacidad de planeación y reacción del gobierno, y están impactando gravemente no sólo a la población, sino también a las finanzas del país, cuyo perjuicio económico ha pasado de un promedio anual de 730 millones de pesos en el periodo de 1980-1999 a 21,950 millones para el periodo 2000-2012 (ENCC, 2013: 32).

Finalmente, cabe señalar que los ciclones tropicales pueden representar una fuerte influencia en la movilidad y reubicación de varios sectores de la población humana, con la consecuente afectación tanto a las comunidades receptoras como a las de origen; ello, debido a que el impacto de los fenómenos meteorológicos extremos está estrechamente ligado a los sectores vinculados al clima, como son agua, salud, seguridad alimentaria, agricultura, silvicultura, turismo, entre otros, y afecta la capacidad para enfrentar los efectos y la capacidad de adaptación (IPCC, 2012: 2 y 3).

C. Inundaciones

Las inundaciones son eventos hidrológicos repentinos asociados a un aumento extremo en la precipitación como consecuencia de tormentas tropi-

cales, tormentas eléctricas, lluvia orográfica y ciclones extratropicales que se desarrollan principalmente a escalas locales y regionales (Trenberth, 2011: 123 y 124). De acuerdo con el Informe Especial sobre la Gestión de los Riesgos de Fenómenos Meteorológicos del IPCC (IPCC, 2012: 10-15), las proyecciones en las precipitaciones sugieren cambios en los regímenes de inundaciones de origen fluvial, principalmente a escala local en algunas cuencas o regiones. Es muy probable que el incremento en el nivel medio del mar contribuya a un aumento en las inundaciones en zonas costeras. Los lugares que actualmente experimentan impactos adversos, como la erosión costera y las inundaciones, seguirán haciéndolo. Las pequeñas islas tropicales se verían afectadas tanto por el aumento en el nivel del mar como por el aumento en la velocidad máxima de las tormentas tropicales. Asimismo, los cambios en las olas de calor, el retroceso glacial y/o la degradación del permafrost influirán en los fenómenos de alta montaña, como la inestabilidad de las pendientes, los movimientos de masa y las inundaciones provocadas por el desbordamiento de los lagos glaciales.

Como consecuencia del cambio climático, se espera un aumento en la escorrentía anual, principalmente en latitudes superiores (Tao *et al.*, 2003: 251-261), y una disminución en regiones como África occidental, sur de Europa y sur de América Latina (Milly *et al.*, 2005: 347-350). Se estima que, por cada aumento de 1 °C en la temperatura, la escorrentía total mundial se incrementará 4% (Labat *et al.*, 2004: 631), lo cual supone un riesgo para las poblaciones colindantes con cuerpos lacustres en regiones vulnerables.

Anualmente, las inundaciones generan miles de pérdidas humanas y costos multimillonarios en diferentes partes del mundo, ya que éstas se producen en zonas donde suelen existir importantes asentamientos humanos y una intensa actividad económica; basta señalar que en 2008 afectaron a nivel mundial a 44.9 millones de personas, con costos económicos estimados en 1,905 millones de dólares, por lo que constituyen el fenómeno hidrológico de mayor impacto en la sociedad a nivel mundial (Baró-Suárez *et al.*, 2011: 201).

Por su parte, las inundaciones ocasionadas por los deshielos generan grandes modificaciones al paisaje, afectando las condiciones de vida de los pobladores en muchas regiones montañosas y de cuencas con hielos permanentes, en donde se concentra más de un sexto de la población mundial (Watson y Haeberli, 2004: 2-10).

Por ello, los estudios se han enfocado en determinar las causas y la predictibilidad de estos eventos, principalmente los ciclones tropicales, pues son los eventos cuyos efectos son los más devastadores (Murnane, 2004: 701-703).

Finalmente, cabe señalar que, económicamente, la estimación de los daños, antes y después del evento, cobra gran relevancia para el análisis costo-

beneficio, donde siempre resultará más rentable implementar de manera previa medidas que mitiguen el efecto de las inundaciones futuras, ya que generalmente se requiere de inversiones económicas significativas una vez acaecidos los daños por no actuar con prevención (Baró-Suárez *et al.*, 2011).

V. BIBLIOGRAFÍA

- ANTHOFF, David *et al.*, 2006, *Global and Regional Exposure to Large Rises in Sea-Level: A Sensitivity Analysis*, Reino Unido, Tyndall Centre for Climate Change Research.
- BARÓ-SUÁREZ, José Emilio *et al.*, 2011, “Costo más probable de daños por inundaciones en zonas habitacionales de México”, *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. II, núm. 3, julio-septiembre.
- BATES, B. *et al.* (eds.), 2008, *El cambio climático y el agua. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, Ginebra, Secretaría del IPCC.
- BECK, Ch. *et al.*, 2004, “A New Monthly Precipitation Climatology for the Global Land Areas for the Period 1951 to 2000”, *DWD, Klimastatusbericht*.
- BOULTON, Andrew y LAKE, Sam, 2008, “Effects of Drought on Stream Insects and its Ecological Consequences”, en LANCASTER, Jill y BRIERS, Rob (eds.), *Aquatic Insects: Challenges to Populations*, Reino Unido, CAB International.
- CENAPRED, 2012, *Atlas Nacional de Riesgos*, México, Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- CEPAL, 2009, *Cambio climático y desarrollo en América Latina y el Caribe. Una reseña*, Santiago de Chile, Naciones Unidas.
- CEPAL, 2015, *La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe. Paradojas y desafíos del desarrollo sostenible*, Santiago de Chile, Naciones Unidas.
- CHRISTIDIS, Nikolaos *et al.*, 2011, “The Role of Human Activity in the Recent Warming of Extremely Warm Daytime Temperatures”, *Journal of Climate*, núm. 24.
- CONFERENCIA DE LAS PARTES EN CALIDAD DE REUNIÓN DE LAS PARTES EN EL PROTOCOLO DE KIOTO, 2013, *Decisión 1/CMP.8. Enmienda al Protocolo de Kioto de conformidad con su artículo 3, párrafo 9 (Enmienda de Doha)*, FCCC/KP/CMP/2012/13/Add, 28 de febrero.
- DETTINGER, Michael *et al.*, 2015, “Western Water and Climate Change”, *Ecological Applications*, vol. 25, núm. 8.
- DÍAZ-GARCÍA, Eva *et al.*, 2013, “Forest Fuel Characterization Using Direct Sampling in Forest Plantations”, en GONZÁLEZ-CABÁN, Armando (ed.),

Proceedings of the Fourth International Symposium on Fire Economics, Planning, and Policy: Climate Change and Wildfires, Albany (California), Department of Agriculture, Forest Service.

- DIFFENBAUGH, Noah *et al.*, 2008, “Global Warming Presents New Challenges for Maize Pest Management”, *Environmental Research Letters*, núm. 3.
- DONEY, Scott *et al.*, 2012, “Climate Change Impacts on Marine Ecosystems”, *Annual Review of Marine Science*, núm. 4.
- DORE, John *et al.*, 2009, “Physical and Biogeochemical Modulation of Ocean Acidification in the Central North Pacific”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, núm. 106.
- EASTERLING, David *et al.*, 2000, “Climate Extremes: Observations, Modelling, and Impacts”, *Science*, núm. 289.
- ENCC, 2013, *Estrategia Nacional de Cambio Climático, Visión 10-20-40*, México, *Diario Oficial de la Federación*, 3 de junio.
- ESTRADA, Francisco *et al.*, 2013, “The Economics of Climate Change in Mexico: Implications for National/Regional Policy”, *Climate Policy*, Inglaterra, Taylor & Francis.
- ESTRADA, Francisco *et al.*, 2015, “Economic Losses from US Hurricanes Consistent with an Influence from Climate Change”, *Nature Geoscience*.
- FENG, S. *et al.*, 2010, “Linkages Among Climate Change, Crop Yields and Mexico-US Cross-Border Migration”, *PNAS*, vol. 107, núm. 32, 10 de agosto.
- FIRTH, Louise *et al.*, 2011, “Air Temperature and Winter Mortality: Implications for the Persistence of the Invasive Mussel, *Perna Viridis* in the Intertidal Zone of the Southeastern United States”, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, núm. 400.
- FUENTE, A. de la y OLIVERA, M., 2013, “The Poverty Impact of Climate Change in Mexico”, *World Bank Policy Research Working Paper*, núm. 6461, mayo.
- GALINDO, Luis Miguel (coord.), 2009, *La economía del cambio climático en México. Síntesis*, México, SHCP-Semarnat.
- GOURETSKI, V. y KOLTERMANN, K., 2007, “How Much is the Ocean Really Warming?”, *Geophysical Research Letters*, vol. 34.
- HANSEN, James *et al.*, 2013, “Changes in the Frequency of Extreme Summer Heat”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, núm. 110.
- IBARRA, Rosalía, 2019, “Cambio climático, seguridad alimentaria y derecho humano a la alimentación”, en IBARRA, Rosalía (coord.), *Cambio climático y*

gobernanza. *Una visión transdisciplinaria*, México, UNAM, Instituto de Investigaciones Jurídicas.

- IBARRARÁN, María Eugenia y RODRÍGUEZ, Melissa, 2007, *Estudio sobre economía del cambio climático en México*, México, Instituto Nacional de Ecología-Universidad Iberoamericana de Puebla.
- IPCC, 2000, WATSON, R. T. *et al.* (eds.), *Land Use, Land-Use Change and Forestry*, Cambridge, Cambridge University Press.
- IPCC, 2001a, WATSON, R. T. (ed.), *Cambio climático 2001: informe de síntesis. Resumen para responsables de políticas. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Tercer Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, OMM-PNUMA.
- IPCC, 2001b, HOUGHTON, J. T. *et al.* (eds.), *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge-Reino Unido-Nueva York, Cambridge University Press.
- IPCC, 2001c, MCCARTHY, J. J. *et al.* (eds.), *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge-Reino Unido-Nueva York, Cambridge University Press.
- IPCC, 2007a, “Resumen para responsables de políticas, resumen técnico y preguntas más frecuentes”, en SOLOMON, S. *et al.* (eds.), *Cambio climático 2007: base de ciencia física. Contribución del Grupo de Trabajo I al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC*, Cambridge, Cambridge University Press.
- IPCC, 2007b, METZ, B. *et al.* (eds.), *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Cambridge University Press.
- IPCC, 2007c, PACHAURI, R. *et al.* (eds.), *Cambio climático 2007: informe de síntesis. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, Ginebra, IPCC.
- IPCC, 2012, *Resumen para responsables de políticas. Informe especial sobre la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático*, Cambridge, Cambridge University Press.
- IPCC, 2013a, “Resumen para responsables de políticas”, en STOCKER, T. F. *et al.* (eds.), *Cambio climático 2013: bases físicas. Contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, Cambridge-Nueva York, Cambridge University Press.
- IPCC, 2013b, “Glosario”, en STOCKER, T. F. *et al.* (eds.), *Cambio climático 2013: bases físicas. Contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del*

- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, Cambridge-Nueva York, Cambridge University Press.
- IPCC, 2013c, STOCKER, T. F. *et al.* (eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge-Nueva York, Cambridge University Press.
- IPCC, 2014, “Resumen para responsables de políticas”, en FIELD, C. B. *et al.* (eds.), *Cambio climático 2014: impactos, adaptación y vulnerabilidad. Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, Ginebra, Organización Meteorológica Mundial.
- IPCC, 2018, “Resumen para responsables de políticas”, en MASSON-DELMONTE, V. *et al.* (eds.), *Calentamiento global de 1,5 °C. Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza*, OMM-PNUMA.
- KARL, Thomas *et al.*, 2008, *Weather and Climate Extremes in a Changing Climate*, Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research, Washington.
- KARL, Thomas, 2009, *Global Climate Change Impacts in the United States*, Nueva York, Cambridge University Press.
- KODRA, Evan y GANGULY, Auroop, 2014, “Asymmetry of Projected Increases in Extreme Temperature Distributions”, *Scientific Reports*, núm. 4.
- KROEKER, Kristy *et al.*, 2009, “Meta-Analysis Reveals Negative Yet Variable Effects of Ocean Acidification on Marine Organisms”, *Ecology Letters*, núm. 13.
- LABAT, David *et al.*, 2004, “Evidence for Global Runoff Increase Related to Climate Warming”, *Advances in Water Resources*, núm. 27.
- LARSEN, C. F. *et al.*, 2004, “Rapid Uplift of Southern Alaska Caused by Recent Ice Loss”, *Geophysical Journal International*, vol. 158, núm. 3.
- LAU, William y KIM, Kyu-Myong, 2012, “The 2010 Russian Heat Wave/ Wildfires and Pakistan Flood: Teleconnection of Extremes”, *Journal of Hydrometeorology*, núm. 13.
- LLANO, María, 2019, “Aguas transfronterizas y cambio climático. El caso del río Colorado”, en IBARRA, Rosalía (coord.), *Cambio climático y gobernanza. Una visión transdisciplinaria*, México, UNAM, Instituto de Investigaciones Jurídicas.

- LÓPEZ, Alejandro y HERNÁNDEZ, Danae, 2016, “Cambio climático y agricultura: una revisión de la literatura con énfasis en América Latina”, *El Trimestre Económico*, vol. 83, núm. 332, octubre-diciembre.
- LUBER, George y MCGEEHAN, Michael, 2008, “Climate Change and Extreme Heat”, *American Journal of Preventive Medicine*, núm. 35.
- LUTZ, A. F. *et al.*, 2014, “Consistent Increase in High Asia’s Runoff Due to Increasing Glacier Melt and Precipitation”, *Nature Climate Change*, núm. 4.
- MARTÍNEZ, Julia y FERNÁNDEZ, Adrián, 2004, *Cambio climático: una visión desde México*, México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología.
- MARTÍNEZ, R. M. y RODRÍGUEZ, O. E., 2008, *Construcción de un indicador frente a la vulnerabilidad que implica el cambio climático. Coloquio Internacional de Medio Ambiente y Desarrollo, retos de la gestión ambiental local*, México.
- MILLY, Paul *et al.*, 2005, “Global Pattern of Trends in Streamflow and Water Availability in a Changing Climate”, *Nature*, núm. 438.
- MURNANE, Richard, 2004, “Climate Research and Reinsurance”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, núm. 85.
- NAKICENOVIĆ, N. y SWART, R. (eds.), 2000, *Special Report on Emissions Scenarios*, Cambridge, Cambridge University Press.
- NICHOLLS, Robert, 2011, “Planning for the Impacts of Sea Level Rise”, *Oceanography*, núm. 24.
- NOAA, 2015, *What Are El Niño and La Niña?*, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), disponible en: <http://oceanservice.noaa.gov/facts/ninonina.html>.
- ORTEGA-GAUCIN, David y VELASCO, Israel, 2013, “Aspectos socioeconómicos y ambientales de las sequías en México”, *Aqua-LAC*, vol. 5, núm. 2, septiembre.
- ORTIZ, Benjamín *et al.* (coords.), 2015, *Reporte Mexicano de Cambio Climático. Grupo II. Impactos, vulnerabilidad y adaptación*, México, UNAM, Programa de Investigación en Cambio Climático.
- PECC, 2014, *Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018*, México, *Diario Oficial de la Federación*, 28 de abril.
- PNUD, 1990, *Desarrollo humano. Informe 1990*, Bogotá, Tercer Mundo Editores.
- PÖRTNER, Hans-Otto, 2010, “Oxygen and Capacity Limitation of Thermal Tolerance: A Matrix for Integrating Climate Related Stressors in Marine Ecosystems”, *Journal of Experimental Biology*, núm. 213.
- SAIZAR, A., 1997, “Assessment of Impacts of a Potential Sea-Level Rise on Coast of Montevideo, Uruguay”, *Climate Research*, vol. 9, diciembre.

- SCHLENKER, Wolfram y ROBERTS, Michael, 2009, “Nonlinear Temperature Effects Indicate Severe Damages to US Crop Yields under Climate Change”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, núm. 106.
- SHEFFIELD, Justin *et al.*, 2012, “Little Change in Global Drought over the Past 60 Years”, *Nature*, núm. 491.
- SINGER, S. F. (ed.), 2008, *Nature, Not Human Activity, Rules the Climate: Summary for Policymakers of the Report of the Nongovernmental International Panel on Climate Change*, Chicago, The Heartland Institute.
- STEINACHER, Marco *et al.*, 2009, “Imminent Ocean Acidification in the Arctic Projected with the NCAR Global Coupled Carbon Cycle-Climate Model”, *Biogeosciences*, núm. 6.
- Stern Review on the Economics of Climate Change*, disponible en: http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20080910140413/http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/stern_review_report.cfm.
- STERNBERG, Troy, 2011, “Regional Drought Has a Global Impact”, *Nature*, núm. 472.
- STOCKS, Jodie *et al.*, 2004, “Human Physiological Responses to Cold Exposure”, *Aviation Space and Environmental Medicine*, núm. 75.
- STOTT, Peter *et al.*, 2010, “Detection and Attribution of Climate Change: A Regional Perspective”, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, núm. 1.
- TAO, Fulu *et al.*, 2003, “Changes in Soil Moisture in China over the Last Half-Century and their Effects on Agricultural Production”, *Agricultural and Forest Meteorology*, núm. 118.
- TRENBERTH, Kevin, 2011, “Changes in Precipitation with Climate Change”, *Climate Research*, núm. 47.
- UNISDR, 2009, *Terminología sobre reducción del riesgo de desastres*, Ginebra, Naciones Unidas, Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas.
- VÁZQUEZ, Alfonso (coord.), 2008, *Evaluación regional de la vulnerabilidad actual y futura de la zona costera mexicana y los deltas más impactados ante el incremento del nivel del mar debido al cambio climático y fenómenos hidrometeorológicos extremos. Informe final*, México, UNAM-Semarnat, Instituto Nacional de Ecología.
- VERGARA, Walter *et al.*, 2014, *El desafío climático y de desarrollo en América Latina y el Caribe. Opciones para un desarrollo resiliente al clima y bajo en carbono*, Banco Interamericano de Desarrollo.
- WALTHER, Gian-Reto *et al.*, 2002, “Ecological Responses to Recent Climate Change”, *Nature*, núm. 416.

- WATSON, Robert y HAEBERLI, Wilfried, 2004, “Environmental Threats, Mitigation Strategies and High Mountain Areas”, *Ambio*, núm. 13.
- WEIFENG, Wang *et al.*, 2012, “Drought-Induced Tree Mortality: Ecological Consequences, Causes, and Modeling”, *Environmental Review*, núm. 20.
- WMO, 2007, *Climate Change and Desertification*, Ginebra, World Meteorological Organization.
- WMO, *WMO Annual Statements on the Status of the Global Climate*, disponible en: <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate>.
- WMO, *WMO El Niño/La Niña Updates Archive*, disponible en: http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/wcasp/enso_updates.html.
- ZWIERS, Francis *et al.*, 2011, “Anthropogenic Influence on Long Return Period Daily Temperature Extremes at Regional Scales”, *Journal of Climate*, núm. 24.