

CAMBIO CLIMÁTICO, FENÓMENOS METEOROLÓGICOS EXTREMOS Y ANÁLISIS DE RIESGOS

(Cambio climático/fenómeno meteorológico extremo/análisis de riesgos/estadística/incertidumbre)

DAVID RÍOS INSUA*; CLAUDIA CEPPI**; KARLA MELÉNDEZ***; JUAN JOSÉ MOLERO***

* Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

** Politécnico de Bari.

*** Universidad Rey Juan Carlos.

RESUMEN

Hay un consenso creciente sobre la presencia y relevancia del cambio climático. Sin embargo, se debate aún sobre las consecuencias del mismo, en particular, en lo que se refiere a los fenómenos meteorológicos extremos. En este trabajo resumimos la evidencia disponible sobre el impacto de éstos, en especial en referencia a Europa. Debido a ello, es necesario tomar decisiones de mitigación y adaptación. El marco adecuado para apoyar tales decisiones es el análisis de riesgos, como describimos.

1. INTRODUCCIÓN

Como bien se reconoce en distintos estudios sobre problemas y riesgos globales, el cambio climático, sus consecuencias y la falta de mitigación y adaptación a las mismas constituye una de las principales amenazas a las que debe enfrentarse la Humanidad en este siglo, véase, por ejemplo, World Economic Forum (2014) o Lomborg (2007). El cambio climático se explica, esencialmente, como un aumento global de la temperatura media en la Tierra, debido a factores antropogénicos y, en particular, al aumento en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera.

Entre las distintas consecuencias de este fenómeno, se esperan cambios en los patrones habituales sobre

fenómenos meteorológicos extremos (FME) como sequías, temperaturas muy altas o muy bajas, lluvias muy intensas y, a su vez, las consecuencias de esto, como las inundaciones. Los estudios en este campo están imbuidos de una incertidumbre inherente que hace que, por un lado, se pongan en cuestión alguna de sus conclusiones, dificultando la toma de decisiones y, por otro, que los métodos estadísticos y, en particular, el análisis de riesgos sean especialmente relevantes. Debe destacarse, además, que mientras que el cambio climático es un fenómeno global, los cambios en FME tienden a tener una naturaleza más local.

En este trabajo, hacemos una breve introducción al cambio climático y sus posibles efectos, en especial en relación con los FME. Resumimos la evidencia disponible, con énfasis en el continente europeo. Dada la relevancia de sus consecuencias, se hace necesaria la gestión de los riesgos asociados a los mismos. Por ello, hacemos una introducción a un marco para el análisis de riesgos, dando una breve descripción de su aplicación en un caso concreto.

2. EL CAMBIO CLIMÁTICO COMO PROBLEMA

El cambio climático figura entre los principales problemas a los que deberá enfrentarse la Humanidad de forma global a lo largo del presente siglo. Así,

Lomborg (2007) entre los veintitrés problemas globales principales que incluye, considera el cambio climático directamente, y otros problemas asociados, como la contaminación, la deforestación, la pérdida de biodiversidad o la vulnerabilidad frente a desastres naturales. Igualmente, de forma consistente, los estudios de riesgos globales como el del World Economic Forum (2014) incluye entre los diez problemas más urgentes en la Tierra en los próximos diez años, el *Fracaso en la mitigación y la adaptación al cambio climático* y la *Mayor incidencia de sucesos meteorológicos extremos (como inundaciones, tormentas o sequías)* ligados al cambio climático.

El cambio climático, o calentamiento global, puede describirse como el previsible aumento de la temperatura media de la Tierra, asociado a las actividades humanas. Existe disparidad sobre este aumento, que va desde 1 hasta 10 grados para el año 2100, dependiendo de los diferentes escenarios regionales y los distintos modelos, aunque las últimas predicciones, a escala global, dan un rango de aumento de entre 2 y 4.5 grados con alta probabilidad (AR5 IPCC, 2013). Los efectos principales de este incremento medio de las temperaturas, y con ello el aumento de la temperatura estacional media, serán que, probablemente, en media, habrá más records de máximas que de mínimas en las temperaturas, y también que es muy probable que ocurran con mayor frecuencia y duración olas de calor, con notables efectos sobre la salud humana.

Sin embargo, aunque hay cierto consenso científico sobre el cambio climático, así como cierto aumento de la atención de los medios sobre estos temas, muchos políticos no parecen prestarle aún suficiente atención, aunque el reciente plan de acción del presidente Obama (2013) para el clima podría marcar un cambio de tendencia, así como la reciente estrategia europea de adaptación y mitigación (2013). En cualquier caso, obsérvese cómo son aún pocos los estados miembro de la Unión Europea que han tomado acción a nivel nacional a partir de las directivas comunitarias. En España, por ejemplo, no puede decirse que el cambio climático y sus efectos estén entre las principales preocupaciones de la agenda política, a pesar de la existencia de una Oficina Española del Cambio Climático.

Todo esto podría explicarse en parte por el escepticismo en la opinión pública en torno a los temas del

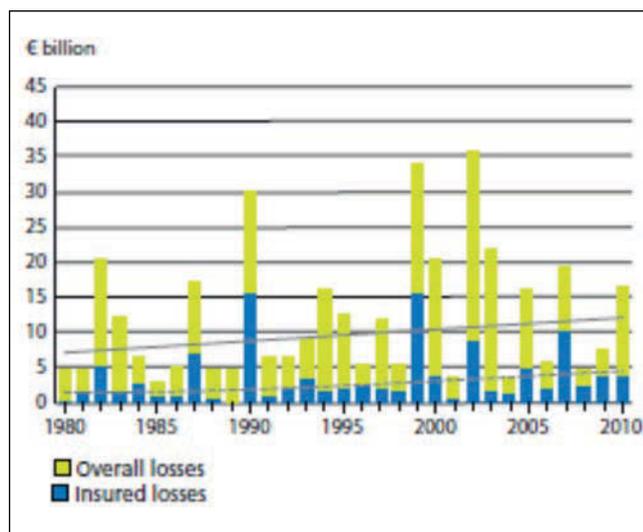


Figura 1. Pérdidas asociadas a fenómenos naturales extremos en Europa (Hov et al, 2013).

cambio climático, y que, en consecuencia, pueden oponerse a la implementación práctica de acciones políticas o influenciar las actitudes de los decisores (Whitmarsh, 2011).

Quizá la forma más convincente de convencer sea analizando los costes asociados a las catástrofes meteorológicas, por ejemplo en Europa, como se refleja en la gráfica adjunta de Munich Re, disponible en Hov et al (2013), que sugieren costes cada vez mayores asociados a los fenómenos extremos. Obsérvese, además, como forma de comparación, que las pérdidas asociadas a fenómenos naturales no meteorológicos, como terremotos o erupciones volcánicas, no han aumentado.

Podría decirse que este claro aumento de costes asociados a fenómenos meteorológicos extremos se debe, al menos en parte, al aumento de activos expuestos a tales riesgos. Sin embargo, en nuestra opinión, esto sólo indicaría la necesidad de tomar acciones en la dirección de adaptarse y mitigar los efectos del cambio.

3. EL CAMBIO CLIMÁTICO: UN RESUMEN

El fenómeno del cambio climático no está exento de polémica, debido a los intereses creados por dis-

tintos lobbies económicos e industriales. Así, mientras entre la comunidad científica el consenso sobre las causas, efectos y tendencias del cambio climático van convergiendo, los medios de comunicación y los actores políticos no coadyuvan a superar las dudas y el escepticismo en la opinión pública. De hecho, ha sido escenario de conocidas batallas mediáticas con documentales en una y otra dirección. Así, por ejemplo, *An Inconvenient Truth* intentó llamar la atención sobre la responsabilidad y el impacto del comportamiento humano sobre el cambio climático, *Cool It!* intentaba dar una visión del anterior como algo exagerado y *The Great Global Warming Swindle* intentaba demostrar cómo el concepto de cambio climático de origen antropogénico es una farsa fabricada por ambientalistas anti-industria junto a científicos, periodistas y políticos cómplices, apoyados en evidencia científica poco fiable. Una buena descripción de estos debates puede verse en Mann (2010). Algunas descripciones equilibradas sobre la evidencia disponible sobre el cambio climático pueden verse en Royal Society (2010) y NAS y Royal Society (2014).

Como breve resumen, la cadena de razonamientos que lleva a apoyar la existencia del cambio climático sería la siguiente, véase Mann (2010) para más detalles:

- La actividad humana ha producido un aumento considerable de CO₂, y otros GEI, en la atmósfera, como consecuencia de la actividad industrial.

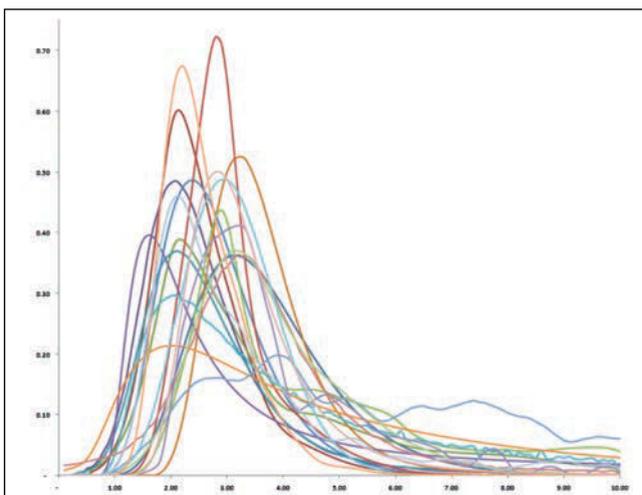


Figura 2. Incertidumbre sobre el aumento de la temperatura media global en 2100 (Hov et al, 2013).

- Diversos modelos muestran que este aumento de la emisión de CO₂ y otros gases, tienen un impacto sobre el calentamiento de la Tierra, lo que se denomina como efecto invernadero.
- De hecho, a mediados de los 90, se había registrado un aumento de la temperatura media de la Tierra de 0.6°C, respecto a la del comienzo de la industrialización, disponiéndose cada vez de más datos en esa dirección que sugieren el calentamiento global.
- Desde mediados de los 90, se pueden investigar los mecanismos causales del cambio climático, usando modelos de clima, disponiéndose cada vez de mejores modelos, con mayor precisión y mejor capacidad predictiva.
- Tales modelos incluyen diversas entradas, pero sólo cuando se incluye el impacto de la actividad humana entre las mismas, se puede explicar el calentamiento global.
- En consecuencia, se predicen aumentos globales de temperatura media en la Tierra bajo diferentes escenarios, de forma consistente.

Es importante indicar que aunque la mayoría de los modelos indican un aumento global de la temperatura media, hay incertidumbre como se muestra en la Figura 2, en la que se presentan las predicciones sobre el aumento de la temperatura media para el año 2100 para diversos modelos climáticos, aunque las últimas predicciones indican que con alta probabilidad el rango de aumento estaría entre 2 y 4.5 grados.

Debemos mencionar que también hay argumentos en contra del cambio climático, normalmente apoyados en una cadena de negaciones como la que sigue, véase Mann (2010) para más detalles:

- Las emisiones de CO₂ no están, de hecho, aumentando. *Por contra la última actualización del IPCC (AR5-IPCC, 2013), sugiere que con alta confianza, las emisiones totales de origen antropogénico de gases de invernadero han crecido más rápidamente de 2000 a 2010 que en las tres décadas anteriores y, de hecho, es la década de emisiones máximas de la historia. Más aún, las tendencias actuales de emisión se encuentran en los niveles más altos de las pro-*

yecciones para esta década y esto a pesar de las políticas implantadas para intentar reducir las emisiones. Así, de 2000 a 2010, las emisiones crecieron en media el 2.2% anual comparado con el 1.3% por año en el período de 1970 a 2000. El CO₂ permanece como la mayor emisión antropogénica con el 76% de las emisiones totales ponderadas por el GWP100, con alta confianza.

- Incluso si estuviesen aumentando tales emisiones, no tienen impacto sobre el clima, pues no hay evidencia convincente sobre el calentamiento global. Por contra, las concentraciones de emisiones en la atmósfera, y en particular de CO₂, tienen un efecto sobre el incremento de la temperatura debido al efecto invernadero, pues la concentración de estos gases, de hecho, tiene impacto sobre el intercambio y captura de energía infrarroja en la atmósfera. El calentamiento depende en gran medida de la cantidad de GEI acumulada en la atmósfera, de la trayectoria de las emisiones y, también, de los efectos en cadena que pueden amplificar o reducir el calentamiento, como, por ejemplo, el incremento de humedad.
- Incluso si hubiese calentamiento, éste se debe, de hecho, a causas naturales. Estudios actuales demuestran que, aunque hay algunas causas naturales como el cambio en la posición relativa entre la Tierra y el Sol, las erupciones volcánicas y los cambios climáticos debido a fenómenos cíclicos, como El Niño, pueden tener un impacto sobre el calentamiento global, por sí mismos no pueden conducir al incremento producido durante el siglo XX. Estos incrementos son explicables sólo si se consideran las contribuciones de los GEI de origen antropogénico.
- Incluso si el calentamiento no se explicase por causas naturales, el impacto de la actividad humana es pequeño y el de los GEI es aún menor. El impacto de las actividades humanas sobre el cambio climático se expresa principalmente por las emisiones y el efecto invernadero resultante, pero también por las emisiones de otros contaminantes diferentes que producen aerosoles que tienen un efecto tanto sobre la reflexión de los rayos solares como sobre en la formación de nubes, contribuyendo ambos fenó-

menos al calentamiento atmosférico. La tendencia actual de crecimiento en las temperaturas globales desde 1900, alrededor de 0.8 °C, puede explicarse sólo considerando el crecimiento concomitante de los gases de invernadero y, en particular, de CO₂. Su concentración en la atmósfera ha crecido desde la Revolución Industrial hasta hoy, del 40 %, y más de la mitad de este incremento ha ocurrido desde 1970. Otras modificaciones antropogénicas sobre el medio ambiente, como el cambio en los usos agrarios, el incremento en las superficies impermeables en las ciudades, y la reducción de suelo forestal y espacios verdes abiertos, tienen un efecto directo en la cantidad de energía consumida que modifica el clima local.

- Incluso si los cambios asociados no fuesen despreciables, éstos serían, globalmente, buenos. Desde luego, al menos por el momento, las pérdidas asociadas a fenómenos meteorológicos extremos no son nada despreciables, como se muestra en la Figura 2.
- Incluso si los cambios no fuesen buenos, los humanos nos hemos venido adaptando fácilmente a las nuevas circunstancias a lo largo de nuestra historia. Sin embargo, en el mejor de los casos, la adaptación será costosísima, como en el ejemplo del inmenso proyecto de obra civil que se está realizando en Holanda (Wolman, 2008), desviando inversiones que podrían dedicarse a otros problemas globales, como el hambre o la educación. Más aún, muchas zonas cercanas a la costa deberán abandonarse. Está demostrado el impacto del calentamiento global tiene un efecto sobre la pérdida de biodiversidad, el incremento del nivel del mar, la acidificación de los océanos, el aumento de días muy calurosos durante el verano y un aumento de la precipitación en algunas regiones, como luego indicaremos. Todos estos cambios afectan las condiciones de vida humana, reduciendo la disponibilidad de agua, con alteración de la producción de alimentos, la producción de sucesos extremos como avenidas, y la aceleración de los procesos de erosión costera, haciendo imposible las condiciones de vida en algunas partes del mundo, deteriorándolas de forma disruptiva en muchas otras zonas.

- En cualquier caso, es muy tarde para arreglar el problema y/o llegará un cambio tecnológico para remediarlo. *Si las emisiones continuasen al ritmo actual, para el 2100 se produciría un calentamiento estimado de entre 2.6° y 4.8° C. Si considerásemos sólo el efecto del calentamiento debido a las emisiones de CO₂, se estima un incremento de alrededor de 1° C, pero el efecto de la retroalimentación puede amplificar este efecto por un factor entre 1.5 and 4.5. Esta incertidumbre en las estimaciones provendría de la dificultad en evaluar el impacto de la retroalimentación en el calentamiento. La principal proviene de la presencia de vapor de agua en la atmósfera, que es un GEI, mientras que la mayor incertidumbre proviene de la estimación del efecto del almacenamiento por los océanos y el suelo para absorber el CO₂ emitido. La capacidad de almacenamiento, sin embargo, viene afectada por la concentración actual, por lo que resulta difícil determinar qué parte de las emisiones futuras se absorberán o liberarán a la atmósfera. Así, la principal contramedida sería actuar sobre las emisiones de CO₂ que son la fuerza motriz tanto para los efectos directos como para la retroalimentación.*

4. CAMBIO CLIMÁTICO Y FENÓMENOS METEOROLÓGICOS EXTREMOS

Además de emerger un consenso considerable sobre la ocurrencia del cambio climático, también lo emerge con respecto de algunas de sus consecuencias. Así, por ejemplo, estudios recientes sugieren que el

incremento de CO₂ tiene una influencia directa significativa sobre la circulación atmosférica y, por tanto, sobre cambios en las precipitaciones globales y tropicales. Igualmente, se considera muy probable que el calentamiento por causas antropogénicas ha contribuido a la subida del nivel del mar en la segunda mitad del S XX. Entre 1870 y 2004, el nivel global del mar subió 195 mm y 1.46 mm por año (Church y White, 2006). De 1950 a 2009, la subida anual media habría sido de 1.7 ± 0.3 mm por año, sugiriendo las mediciones de satélite subidas de alrededor de 3.3 ± 0.4 mm por año entre 1993 y 2009.

Sin embargo, existen dudas razonables sobre algunos de sus efectos. Es de esperar que uno de ellos sea la modificación de los patrones meteorológicos y, en particular, de algunos fenómenos meteorológicos extremos. Es de destacar que, por un lado, estos conllevan riesgos adicionales y, por otro, son fenómenos de carácter mucho más local. Resumimos brevemente aquí la evidencia disponible sobre la previsible evolución de tales fenómenos en Europa. Para un informe detallado, véase Hov et al (2013), que intenta alimentar la estrategia europea de adaptación al cambio climático.

Por lo que respecta a las *temperaturas extremas*, se espera una tendencia a que haya más días calientes y templados y más olas de calor. En particular, la probabilidad de que se produzcan olas de calor como la de 2003 en Centroeuropa o la de 2010 en Rusia, aumentará considerablemente: una ola de calor de las que se producen una vez cada cincuenta años, pasará a ocurrir una vez cada cinco años a finales de este siglo. Igualmente, habrá menos días fríos en la mayoría de



Figura 3. Algunas vistas de fenómenos meteorológicos extremos.

Europa. Además, en la mayor parte de Europa habrá más extremos calientes y menos extremos fríos, en asociación con el calentamiento global.

Por lo que respecta a *precipitaciones extremas*, resulta ser un fenómeno de variabilidad mucho más compleja, para el que no existe un patrón espacial robusto en Europa. Existe una aparente tendencia a precipitaciones más fuertes, esperándose sucesos de fuerte precipitación y menos sucesos de precipitación moderada, con inviernos más húmedos y veranos más secos. Se espera que el Sur de Europa sea más seco y el Norte más húmedo.

En relación con los *vientos extremos*, hay cierta evidencia de que las tormentas de invierno han aumentado en el Noroeste de Europa. Sin embargo, existe controversia respecto de los cambios a largo plazo, puesto que los resultados dependen mucho de los conjuntos de datos empleados. Bajo la hipótesis de no adaptación al cambio climático, las simulaciones sugieren un aumento de pérdidas monetarias de entre el 30 y el 100% en el Norte y el Centro de Europa, en relación con los vientos extremos. Además, en el Sur de Europa se esperan menos tormentas de viento.

Por lo que respecta a los *fenómenos convectivos*, los datos disponibles sobre tormentas convectivas de verano no están suficientemente armonizadas como para hacer una evaluación fiable de las tendencias recientes. Sin embargo, un análisis de escenarios sugiere que en el futuro habrá más ocasiones que propicien el desarrollo de este tipo de tormentas, como consecuencia del cambio climático.

Los riesgos de *inundaciones y avenidas* crecerán en toda Europa, en consistencia con el aumento en la frecuencia y la intensidad de las lluvias extremas. En efecto, el número de riadas ha crecido en Europa, aunque no hay una tendencia creciente generalizada espacialmente. Debe destacarse que los daños por inundaciones han crecido, pero esto no necesariamente va ligado al cambio climático, pues faltan datos y han aumentado los activos expuestos a riesgo de inundaciones. A pesar de ello, ha habido claros esfuerzos en la gestión de inundaciones.

Finalmente, por lo que respecta a las *sequías*, debe indicarse que son fenómenos relativamente raros con

gran variabilidad natural en frecuencia e intensidad. En consecuencia, debemos esperar aún para obtener datos suficientes que nos permitan detectar tendencias. Sin embargo, los registros hasta ahora disponibles sugieren que las sequías han aumentado en el Sur y Centro de Europa desde los años 50. En el resto de Europa no se aprecian aún tendencias consistentes. En el futuro, se espera que aumente la sequedad veraniega en el Sur y Centro de Europa, aumentando, por tanto, el riesgo de sequía, habiendo periodos de sequedad más largos y mayor de déficit de humedad en el suelo.

Es importante insistir que estos fenómenos extremos tienen numerosas consecuencias no deseadas. Entre ellas mencionamos la pérdida de vidas humanas. Por ejemplo, se atribuye a la ola de calor de 2003 más de 70.000 muertes en los países afectados (Robine et al, 2008). Otra consecuencia importante es el daño a infraestructuras, como ilustra el caso de las inundaciones del verano del 2008 en el Este de Europa que conllevó la destrucción de 50.000 hogares y más de 30.000 hectáreas de suelo agrícola. Las pérdidas financieras (aseguradas o no) asociadas a estos fenómenos extremos son considerables. Así, por ejemplo, datos de Múnich Re estiman que en el año 1983 se produjeron unas pérdidas de entre 2.700 y 8.600 millones de dólares por las inundaciones en el Norte de España. También puede resultar problemático el uso ineficiente del suelo como consecuencia de la nueva meteorología, lo que puede llevar a la variación en las cosechas. Como ejemplo, en el sur de Inglaterra se ha comenzado a producir vinos espumosos. Obsérvese además que las sequías pueden llevar a una reducción en la calidad del agua, a la competición por recursos escasos e, incluso, a migraciones. Así, por ejemplo, la NAS (2013) ha elaborado un informe sobre el posible impacto del cambio climático en la seguridad nacional. Igualmente, el calor o el frío extremos pueden disparar considerablemente la demanda energética.

Se han propuesto, en consecuencia, diversas medidas para la mitigación y la adaptación frente al cambio climático y sus consecuencias. Entre las medidas de mitigación pueden incluirse los denominados impuestos por emisión de carbono, que intentan penalizar el exceso de emisiones o la implementación de desarrollos tecnológicos para mejorar la eficiencia energética, como los métodos para optimizar la cantidad de fuel para apoyar las operaciones de espera en

aviación, con la consiguiente reducción de emisiones, véase Ayra et al (2014). Entre las medidas de adaptación pueden incluirse los grandes proyectos de geoingeniería y el desarrollo de infraestructuras más seguras, como el proyecto holandés, antes mencionado, de protección frente a las inundaciones producidas por la previsible subida del mar, véase Wolman (2008); la mejora de los servicios meteorológicos y de los sistemas de alerta temprana, para una mejor preparación frente a contingencias extremas; el desarrollo de mapas de vulnerabilidad para determinar las zonas en mayor riesgo; la mejora de los sistemas de información al público sobre, por ejemplo, qué hacer frente a olas de calor, posiblemente basado en redes sociales para el apoyo a los grupos más vulnerables; la introducción de nuevas políticas de seguros que tengan en cuenta las contingencias por fenómenos extremos (y su creciente coste); o el cambio en estilos de vida, incluyendo la posible relocalización de la población en zonas con menor riesgo de exposición a fenómenos extremos.

5. ANÁLISIS Y GESTIÓN DE RIESGOS

Una de las críticas habituales que se hace a la investigación en cambio climático es la alta incertidumbre que afecta a tal investigación. El origen de esta incertidumbre se debe a que los modelos globales de clima se asimilan a programas informáticos complejos que simulan la evolución de la atmósfera y los océanos para predecir temperaturas y otras variables climáticas bajo distintos escenarios. Tales modelos requieren aproximaciones que conllevan incertidumbres. Además, los parámetros incluidos requieren una calibración que, igualmente, conllevan incertidumbre.

Resulta, en consecuencia, fundamental el papel de la Estadística en la investigación en cambio climático, que tiene un papel esencial en al menos dos direcciones: los modelos de sucesos extremos, véase Coles (2001) para una introducción, que permiten describir y predecir 'lo inusual', en el sentido de estimar para niveles más allá de lo observado; los métodos de medias y mixturas de modelos, véase p.ej. Hoeting et al (1998), que permiten tratar la incertidumbre en los mismos, así como aprender sobre la relevancia de cada uno de ellos a partir de los datos recibidos, facilitando la selección de modelos. Resulta igualmente impor-

tante comunicar en forma adecuada la incertidumbre. Para ello es interesante la escala del IPCC que se concreta en los valores virtualmente cierto (cuando la probabilidad del suceso es de más del 99%), muy probable (entre el 90% y el 99%), probable (entre el 66% y el 90%), tan probable como improbable (entre el 33% y el 66%), improbable (entre el 10% y el 33%), muy improbable (entre el 1% y el 10%), excepcionalmente improbable (menos del 1%). Sin embargo, debe indicarse que tal sistema de comunicación es mejorable, como indica Cooke (2013), en especial en lo relativo a la comunicación simultánea de las incertidumbres relativas a varias de las proposiciones.

La otra gran aportación de la Estadística, y más generalmente de las Ciencias de la Decisión, en los estudios sobre cambio climático está en el Análisis de Riesgos. A pesar de la incertidumbre existente con respecto a los efectos del cambio climático, resulta necesario tomar decisiones y, para ello, es esencial el Análisis de Riesgos. Es un proceso analítico sistemático para evaluar, gestionar y comunicar los riesgos, que se realiza para entender la naturaleza de las consecuencias negativas, no deseables para la vida humana, la salud, la propiedad y/o el medio ambiente (para reducir o eliminarlas), véase Bedford y Cooke (2003). Debido a la relevancia de las consecuencias, proponemos emplear el marco para el Análisis de Riesgos debido al IGCC, véase Renn (2006), que pasaría por las siguientes fases:

1. Evaluación de riesgos. Se obtiene información sobre la relevancia y las características de los riesgos atribuidos a las amenazas que afectan al sistema de interés.
2. Evaluación de intereses. Se emplea para analizar la percepción del riesgo, entender el problema y evaluar los intercambios entre riesgos y beneficios, desde la perspectiva de los grupos con intereses en el problema.
3. Gestión de riesgos. Incluye las actividades dirigidas a controlar las amenazas, en el sentido de hacer éstas menos probable, o bien, si ocurren, que sean menos dañinas.
4. Comunicación de riesgos. Comprende todas las actividades de intercambio de información y opiniones en relación con el riesgo y sus factores entre los evaluadores de riesgo, los gestores de riesgo y otros participantes en el problema.

Sin embargo, por razones descritas en SREX (2012), la mayoría de propuestas tienden a ser cualitativas, por ejemplo basadas en matrices de riesgos, a pesar de las críticas sobre estos métodos reflejadas, p.ej. en Cox (2008). De hecho, en la mayoría de las aplicaciones en las que se combinan probabilidades y severidades según escalas cualitativas, su producto a través de la matriz de riesgos puede asignar rankings similares a riesgos muy diferentes, no apoyando necesariamente la toma de decisiones adecuadas. Además, en el caso de análisis multiamenaza se suele hacer la hipótesis de que las mismas son independientes lo que conlleva errores adicionales. De hecho, tienden a carecer de una componente de toma de decisiones y a centrarse en una sola amenaza, cuando puede ocurrir que haya varias amenazas, que las posibles contramedidas no sean igualmente efectivas para las distintas amenazas y se carezca de presupuesto para enfrentarse a todas ellas simultáneamente.

El marco general cuantitativo para el análisis de riesgos que proponemos pasaría por las siguientes fases:

1. Determinar los objetivos de la organización que, típicamente se referirán a mantener o mejorar la eficacia operativa de la misma
2. Identificar los riesgos, o posibles sucesos que pueden afectar negativamente a los objetivos de la organización.
3. Evaluar los riesgos, asignando la probabilidad de los sucesos y la distribución sobre los impac-

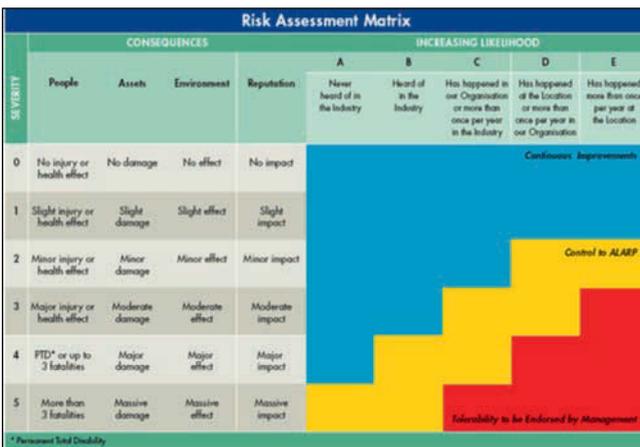


Figura 4. Una matriz de riesgos. <http://www.unicaen.fr/mountainrisks/spip/spip.php?article13>

tos en los objetivos, calculando la pérdida en utilidad esperada al considerar tales riesgos.

4. Considerar alternativas de tratamiento y seleccionar el mejor de ellos (el que aumenta más la utilidad esperada de la organización).
5. Periódicamente evaluar el resultado del tratamiento y revisar el análisis.

Hemos aplicado este proceso a un caso en El Salvador, uno de los países más vulnerables frente al cambio climático, en concreto en Jiquilisco, una de las zonas más afectadas, en el Bajo Lempa. La dificultad añadida de esta zona es que se ve sometida a dos tipos de fenómenos extremos: por un lado, las sequías y, por otro, las inundaciones, asociadas, bien a tormentas tropicales y huracanes, bien a precipitaciones extremas.



Figura 5. Mapa de El Salvador. La caja muestra la zona de Jiquilisco



Figura 6. Residentes del Bajo Lempa evacuado la zona tras inundaciones causadas por la tormenta tropical 12-E en Octubre 2011. Fuente: Ecoviva Project.

Además, los fenómenos de inundaciones pueden potenciarse por encontrarse Jiquilisco por debajo de embalses con sueltas no demasiado bien gestionadas. La zona es de alto interés ecológico y agrícola, pero con una población empobrecida y con escaso desarrollo cultural.

Tras construir modelos de predicción de inundaciones y sequías, se hizo una predicción sobre el número de días de inundación y el número de meses de sequía que padecería Jiquilisco en los próximos diez años, junto con su evaluación económica. Sus altos valores hacían aconsejable la gestión de tales riesgos, considerando contramedidas como el drenaje del río, la construcción de diques y muros de contención, una mejor regulación de los embalses, la relocalización de la población, mejores sistemas de seguros, introducir sistemas de desalinización de agua o la mejora de los sistemas de producción.

En este caso particular, la mejor solución desde la perspectiva del análisis de riesgos resultó ser la relocalización de la población, que podría hacerse con relativo bajo coste económico y emocional, teniendo en cuenta lo pequeña de la misma.

6. DISCUSIÓN

Hemos realizado una breve introducción al fenómeno del cambio climático y sus consecuencias sobre los denominados fenómenos meteorológicos extremos. Los impactos esperados de tales sucesos serán extremadamente importantes en términos de vidas humanas, disrupción de los sistemas sociales y económicos, daño a infraestructuras y otros. A pesar de la incertidumbre existente, las consecuencias potenciales negativas hacen necesario que se tomen medidas para permitir la mitigación y/o adaptación a las consecuencias del cambio climático. Tales medidas tienen sus costes, no sólo económicos. El Análisis de Riesgos facilita un marco para elegir la mejor combinación de contramedidas, de cuyos métodos hemos hecho una breve descripción. El Análisis de Riesgos apoya todos los pasos necesarios para afrontar tales problemas, aportar modelos adecuados para el tratamiento de la incertidumbre, cuantificar las probabilidades de ocurrencia de los sucesos y sus consecuencias, evaluar las actitudes frente al riesgo de las poblaciones afectadas y

ayudar a elegir la mejor combinación de medidas de adaptación y/o mitigación frente al cambio climático y los fenómenos meteorológicos extremos.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo realizado con ayuda de los proyectos RIESGOS, del MINECO, y de RIESGOS-CM. Se agradecen las discusiones con los expertos del grupo EASAC sobre fenómenos meteorológicos extremos, así como el apoyo de la Acción COST EJNET (COST Action IS1304 Expert Judgment Network: Bridging the Gap Between Scientific Uncertainty and Evidence-Based Decision Making) para una visita de Claudia Ceppi a la URJC.

REFERENCIAS

1. Ayra, E., Ríos Insua, D., Cano, J. (2014) To fuel or not to fuel. Is that the question?, *Jour. Amer. Stat. Society*, 109, 465-476.
2. Bredford, T., Cooke, R. (2003) *Probabilistic Risk Analysis: Foundations and Methods*, Cambridge University Press
3. Church, J., White, N. (2006). A 20th century acceleration in global sea-level rise., *Geophysical Research Letters*, 33, L01602.
4. Coles S. (2001), *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*, Springer 2001
5. Cooke, R. Uncertainty analysis comes to integrated assessment models for climate change... and conversely, *climatic gchange*, (2013), 467-479.
6. Cox, T.L. (2008) What's wrong with risk matrices, *Risk Analysis*, 28, 497-512.
7. European Commission (16/04/2013) Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions An EU Strategy on adaptation to climate change /* COM/2013/0216 final.
8. Hoeting, J. A., Madigan, D., Raftery, A. E., and Volinsky, C. T. (1999). Bayesian model averaging: A tutorial with discussion. *Statistical Science*, 14, 382-401.
9. Hov, O., Cubashe, U., Fischer, E., Hoppe, E., Iversen, T., Kvamsto, N., Kundzewicz, Z., Rezacova, D., Ríos, D., Santos, F., Scahdler, B., Veisz, O., Zerefos, C., Benestad, R., Norton, M., Murlis, J. (2013) *Extreme Weather Events in Europe*.

- Preparing for Climate Change Adaptation*, NMI.
10. IPCC (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
 11. Lomborg, B. (2007) *Solutions for the World's Biggest Problems*, Cambridge University Press.
 12. Mann, M. (2010) *The Hockey Stick and Climate Change Wars*, Columbia University Press.
 13. National Academy of Sciences; The Royal Society (2014) *Climate Change: Evidence and Causes: Set of 5 Booklets*. Resource available at http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=18730.
 14. National Academy of Sciences (2013) *Climate and Social Stress: Implications for Security Analysis*, NAS.
 15. Renn, O. (2006) *Risk Governance: Towards an Integrative Approach*, IRGC.
 16. Royal Society (2010) *Climate change: A summary of the science*, RSS.
 17. SREX (2012) *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters*, IPCC.
 18. Robine JM, Cheung SL, Le Roy S, Van Oyen H, Griffiths C, Michel JP, Herrmann FR. (2008). *Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003*, *Comptes rendus – Biologies*, 331, 171-178.
 19. White House (2013) *The President's climate action plan*, Executive Office of the President, June 2013.
 20. World Economic Forum (2014), *Global Risks Report 2014 Ninth Edition* resource available at <http://www.weforum.org/issues/global-risks> WEF.
 21. Wolman D. (2008) *Before the Levees Break: A Plan to Save the Netherlands*, *Wired Magazine*, December.