

ELISA SIMÓ SOLER
ELOY PEÑA ASENSIO

(Coordinación)

DEFENSA PLANETARIA

AUTORÍA:

ALBA SORIANO ARNAZ
ALBERT RIMOLA
ALBERTO CORONEL TARANCÓN
ANNA GARCIA HOM
CATIA FÁRIA
ELISA SIMÓ SOLER
ELISA CELIA GONZÁLEZ FERREIRO
ELOY PEÑA ASENSIO
JORDI SOLÉ I OLLÉ
JOSÉ IGNACIO ROBLES SÁNCHEZ
JOSEP MARIA TRIGO-RODRÍGUEZ
JUAN MANUEL DE FARAMIÑÁN GILBERT
JUAN MIGUEL SÁNCHEZ LOZANO
JULIA DE LEÓN
NADJEJDA VICENTE CABAÑAS
RAMON J. MOLES PLAZA

Dykinson, S. L.

No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea este electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito del editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (art. 270 y siguientes del Código Penal).

Diríjase a Cedro (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra. Puede contactar con Cedro a través de la web www.conlicencia.com o por teléfono en el 917021970/932720407.

Este libro ha sido sometido a evaluación por parte de nuestro Consejo Editorial
Para mayor información, véase www.dykinson.com/quienes_somos

© Copyright by
Los autores
Madrid, 2023

Editorial DYKINSON, S.L. Meléndez Valdés, 61 - 28015 Madrid
Teléfono (+34) 91 544 28 46 - (+34) 91 544 28 69
e-mail: info@dykinson.com
<http://www.dykinson.es>
<http://www.dykinson.com>

ISBN: 978-84-1122-441-3
Depósito Legal: M-31318-2023
DOI: 10.14679/2271

ISBN electrónico: 978-84-1170-831-9

Maquetación:
german.balaguer@gmail.com

CAPÍTULO 2. CAMBIO CLIMÁTICO E IMPACTO CÓSMICO: SIMILITUDES Y DIFERENCIAS

JORDI SOLÉ I OLLÉ¹

Profesor Agregado, Universitat de Barcelona

DOI: 10.14679/2274

Sumario: 1. INTRODUCCIÓN. 2. EFECTOS DE UN IMPACTO CÓSMICO EN LA TIERRA. 2.1. Efectos físicos en zona continental. 2.2. Efectos físicos en el mar: Tsunamis. 2.3. Efectos en la atmósfera: alteración química. 2.4. Efectos en el clima. 2.5. Efectos en la biosfera. 3. EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA TIERRA. 3.1. Efectos en las zonas continentales. 3.2. Efectos en el mar. 3.3. Efectos en la biosfera. 4. SEMEJANZAS Y DIFERENCIAS EN LOS IMPACTOS. 5. ESTRATEGIAS DE PREVENCIÓN, GESTIÓN Y ADAPTACIÓN COMUNES A AMBOS FENÓMENOS.

1. INTRODUCCIÓN

El universo es una constante danza cósmica de energía y materia, una sinfonía infinita que sigue su curso, imparable ante los caprichos humanos. Pero, aunque parezca ajeno a las civilizaciones modernas, a veces nuestro entorno celeste nos recuerda su presencia con fuerza, como en el caso de los impactos de asteroides y cometas contra la Tierra (conocidos como impactos cósmicos), que han dejado huellas indelebles en nuestro planeta y, por supuesto, en la historia de la vida. Además, y presentando múltiples paralelismos, hay otra amenaza que se cierne sobre la humanidad, una que no proviene del espacio exterior sino de nuestra propia actividad: el cambio climático antropogénico.

En este capítulo se exploran dos fenómenos con causas distintas, pero con similitudes en cuanto a las consecuencias que acarrearán para la biosfera en general y la especie humana en particular. Se aborda la comparación entre el impacto cósmico

¹ Licenciado en física por la Universitat de Barcelona en 1996, se doctoró en Física Aplicada en 2004. En 2007 obtuvo una beca que le permitió realizar un post-doctorado en el Instituto de Ciencias Marinas y Costeras de la Universidad de Rutgers (New Jersey, USA). En 2016 coordina el proyecto europeo MEDEAS de modelización de la transición energética en Europa en el CSIC y desde el 2021 es profesor agregado de la Universitat de Barcelona. Su investigación se centra en la modelización y análisis de datos en Transición Energética, Cambio Climático y Oceanografía utilizando técnicas de física estadística y sistemas complejos.

y el cambio climático, ambos escenarios potencialmente catastróficos que requieren la preparación y gestión adecuadas para minimizar su impacto en la sociedad y en el medio ambiente. La popularidad de la película «No mires arriba», que presenta una ficción sobre la respuesta de la sociedad ante la amenaza de un cuerpo celeste de grandes proporciones, cuestiona si seríamos capaces de actuar conjuntamente de forma constructiva para evitar o mitigar una colisión catastrófica. Además, el hecho de que uno de los protagonistas sea un activista ecologista ha despertado comparaciones con el cambio climático, un fenómeno que ya estamos padeciendo y que también requiere de una acción colectiva global para gestionar sus consecuencias negativas sobre la vida en el planeta.

Así, se presentarán brevemente las razones básicas que hacen interesante comparar estos dos escenarios –cambio climático e impacto cósmico– tan diferentes en características y procesos, pero que conllevan ambos la necesidad de que la sociedad se prepare para la eventualidad de efectos disruptivos y su gestión, de forma que causen el mínimo daño en los seres humanos y la biosfera. Se citarán las principales fuentes de información utilizadas en ambos casos para poder entender tanto los puntos fuertes de este análisis como sus limitaciones.

Por otra parte, es necesario contextualizar todos estos datos para evitar que queden en meras hipótesis teóricas. En este sentido, es crucial proporcionar un marco referencial adecuado. Para situar esta información de manera precisa, utilizaremos como hilo conductor de la narrativa un evento histórico: el impacto del asteroide que provocó la gran extinción masiva en la que perecieron los dinosaurios (**Chapman 1994**). Este impacto ocurrido en la península del Yucatán, México, conocido como Chicxulub, ha sido objeto de intensas investigaciones recientes que han matizado la idea de que el impacto cósmico fue la única causa de la extinción de los dinosaurios (**Condamine et al. 2021**). A pesar de ello, este evento sigue siendo de gran importancia ya que causó efectos a medio y largo plazo en el clima, como un calentamiento global súbito en términos geológicos (**Bobrowsky y Rickman 2007**).

Actualmente, estamos generando un efecto similar al del impacto de Chicxulub en el clima al introducir gases de efecto invernadero en la atmósfera, lo que podría llevarnos a la extinción masiva de muchas especies, incluida la nuestra. Las estrategias de adaptación podrían ser similares a las empleadas en caso de un escenario de colisión, pero a diferencia de este, tanto la creación como la mitigación del cambio climático están en nuestras manos. Se requiere de una estrategia intergeneracional y de un enfoque profundo que vaya más allá de desviar o destruir un Objeto Potencialmente Peligroso (OPP).

En este contexto, la siguiente sección se centrará en las consecuencias de un impacto cósmico de grandes dimensiones en la Tierra, con especial atención al evento de Chicxulub (**Jones y Kodis 1982**). La sección 3 presentará un resumen de los efectos del cambio climático según el informe del Panel Internacional sobre el Cambio Climático de Naciones Unidas (IPCC, por sus siglas en inglés), un organismo de las Naciones Unidas. En la sección 4, se analizarán las similitudes y diferencias entre los efectos de

ambos fenómenos. Finalmente, en la sección 5 se expondrán las posibles medidas de mitigación y adaptación, especialmente en cuanto a estrategias y políticas de adaptación y acción social.

2. EFECTOS DE UN IMPACTO CÓSMICO EN LA TIERRA

Un impacto cósmico en la Tierra, producido por un gran asteroide o cometa, puede tener una serie de efectos significativos e incluso devastadores. En el momento de la colisión, se transfiere una enorme cantidad de energía cinética, lo que puede resultar en la excavación de un cráter y en la generación de una onda de choque destructiva que ocasione daños en el epicentro y en los alrededores. Además, se puede liberar una gran cantidad de energía térmica, lo que puede provocar la fusión y vaporización de las rocas y otros materiales cercanos. También puede producirse un pulso electromagnético, que puede afectar a los sistemas electrónicos y eléctricos cercanos.

Durante un evento de este tipo, no solo las zonas cercanas se ven afectadas. La energía liberada en la colisión puede causar terremotos y tsunamis que afecten áreas lejanas, y también puede expulsar grandes cantidades de gases de efecto invernadero y partículas en la atmósfera, lo que puede alterar el clima global y la biodiversidad a escala planetaria. Un evento como el de Chicxulub tendría efectos físicos devastadores en la Tierra (**Morgan et al. 2022**). El polvo eyectado a la atmósfera bloquearía la luz solar incidente afectando gravemente a la cadena trófica. Además, podría producir una lluvia de escombros que afecte la calidad del suelo y el agua, lo cual es de vital importancia para la vida de muchas especies.

Un impacto cósmico tendría graves consecuencias sobre la biosfera, lo que resultaría en extinciones masivas de especies animales y vegetales. La onda expansiva y las explosiones posteriores liberarían enormes cantidades de energía, lo que destruiría hábitats y modificaría la distribución de especies. Además, la inyección de gases y partículas en la atmósfera provocaría un cambio en la química de la misma y un bloqueo de la cantidad de luz solar que llega a la superficie terrestre, afectando gravemente a la fotosíntesis de las plantas y a toda la cadena alimentaria.

2.1. Efectos físicos en zona continental

El impacto cósmico tendría una serie de efectos físicos en la Tierra. En primer lugar, se liberaría una gran cantidad de radiación térmica, lo que generaría un pulso térmico extremadamente potente. Este pulso térmico produciría una onda de choque destructiva que se propagaría por el terreno y se experimentaría como un temblor sísmico similar a un terremoto. Tanto la entrada atmosférica como la propia colisión generarían ráfagas de viento extremadamente fuertes y caóticas que tendrían el potencial de provocar daños significativos a los edificios y otras estructuras cercanas, así como de afectar la vida y el hábitat de las especies animales y vegetales en la zona de impacto.

El conocimiento adquirido a través del estudio de las pruebas de bombas nucleares y las técnicas desarrolladas durante la guerra fría para la detección de ensayos se utiliza para analizar los impactos de pequeños asteroides y cometas (meteoroides) que continuamente golpean la atmósfera terrestre (**Ens et al. 2012**). Ambos fenómenos implican una gran cantidad de energía liberada en un corto período de tiempo, lo que produce una serie de efectos físicos similares como la emisión de radiación térmica y la generación de ondas de choque destructivas, con la diferencia de que los impactos cósmicos no producen efectos radiactivos.

2.2. Efectos físicos en el mar: Tsunamis

Los océanos de nuestro planeta son vastos y extensos, cubriendo aproximadamente el 71% de la superficie terrestre. Debido a esto, los impactos en el océano son más probables que en los continentes, siendo una consecuencia directa la generación de tsunamis, que pueden ser enormemente peligrosos para las zonas costeras (**Robertson y Gisler 2019**). Los tsunamis son olas gigantes que se forman en el océano después de un evento de gran magnitud, como un terremoto submarino, una erupción volcánica o una colisión de un cuerpo celeste contra el agua. Cuando esto último ocurre, se produce una onda de choque que se propaga por debajo de la superficie del agua a una velocidad extremadamente alta. A medida que la onda se acerca a la costa, la profundidad del agua disminuye, aumentando la altura y peligrosidad de la ola.

La velocidad de propagación de la ola también es importante para comprender la amenaza que representan los tsunamis. Los tsunamis pueden viajar a través del océano a velocidades que oscilan entre 500 y 800 kilómetros por hora, dependiendo de la profundidad del agua. En aguas profundas, los tsunamis pueden viajar a velocidades cercanas a los 800 kilómetros por hora, lo que significa que pueden cruzar un océano entero en cuestión de horas, mientras que en aguas someras la velocidad disminuye. La velocidad de la ola también se reduce a medida que la ola se aproxima a la costa, ya que la fricción con el fondo del mar y la disminución de la profundidad del agua hacen que la velocidad decrezca.

Es importante destacar que los tsunamis no son olas ordinarias. A diferencia de las olas que se ven en las playas, los tsunamis tienen longitudes de onda mucho más largas y una energía enorme, de modo que pueden afectar grandes áreas de la costa causando importantes daños como inundaciones masivas, erosión de la costa y destrucción de estructuras costeras. La inundación puede ser especialmente peligrosa si la ola es lo suficientemente alta como para alcanzar zonas bajas, como ríos y bahías. La erosión de la costa puede causar la pérdida de tierra y la devastación de la vegetación costera. La destrucción de estructuras costeras, si se trata de edificios que albergan a muchas personas, puede tener resultados dramáticos.

Este fue el caso de Chicxulub que ocasionó un tsunami global treinta mil veces más energético que cualquiera producido hoy en día por un terremoto. Utilizando técnicas de simulación por ordenador, un estudio reciente ha encontrado que durante los 10 primeros minutos después del impacto se produjeron incrementos en las velocidades

de 20 cm/s en la costa y de 1 m/s a mar abierto, acompañado por olas de 10 metros de altura en la costa Atlántica y Pacífica (**Range et al. 2022**). El tsunami fue tan fuerte que removió el sedimento marino en estas regiones, eliminando los registros sedimentarios o dejando una señal de distorsión en los sedimentos más antiguos.

2.3. Efectos en la atmósfera: alteración química

La inyección de grandes cantidades de óxido nítrico, agua vaporizada y halógenos en la atmósfera como resultado de un impacto cósmico pueden tener efectos importantes en la estratosfera y en la capa de ozono. Esta última se trata de una capa de gas ubicada en la atmósfera superior de la Tierra, y su principal función es proteger a la vida en la Tierra de los rayos ultravioleta del Sol. Los rayos ultravioleta son una forma de radiación electromagnética que es invisible para el ojo humano, pero que puede ser extremadamente dañina para los seres vivos.

Los óxidos de nitrógeno (NO_x) son uno de los principales factores responsables de la reducción de la capa de ozono después de un impacto cósmico. Los NO_x interactúan con el ozono y lo descomponen en oxígeno molecular. Los halógenos (especialmente el cloro y el bromo) también pueden descomponer el ozono y reducir su concentración en la atmósfera. Estos halógenos son liberados al aire por la evaporación del agua de mar que es arrastrada por el impacto.

La disminución de la capa de ozono puede durar varios miles de años después del impacto, aunque su efecto es más intenso durante los primeros 60-100 mil años. Este fenómeno puede tener graves consecuencias para la vida en la Tierra, ya que un aumento en la cantidad de radiación ultravioleta que alcanza la superficie terrestre puede causar daños genéticos en las células y aumentar el riesgo de cáncer de piel en los seres vivos.

2.4. Efectos en el clima

El funcionamiento del sistema climático se puede describir como el de una máquina térmica que recibe la energía de alta frecuencia emitida por el Sol y que, tras su transformación en energía de baja frecuencia, se vuelve a liberar al espacio exterior en forma de radiación térmica. Esta transformación de la energía es lo que da lugar a los patrones climáticos que observamos en la atmósfera, los océanos, los continentes, los cuerpos de agua dulce y la actividad biológica en la Tierra.

La variable principal que nos permite trazar la evolución de este sistema es, generalmente, la temperatura y sus variaciones. Los impactos de asteroides y cometas de gran tamaño han influido en las proporciones de sustancias que alteran la absorción, transmisión y emisión de esta energía que nos llega del Sol. Los efectos en el clima después del impacto de Chicxulub fueron la producción de aerosoles que interfirieron en el equilibrio radiactivo de la atmósfera (**Toon et al. 1994**) y que hicieron que, por un lado, llegase menos radiación, disminuyendo la actividad fotosintética y, por otro,

un descenso brusco de la temperatura que se añadió a la recientemente descubierta tendencia al enfriamiento en este periodo (**Condamine et al. 2021**).

Un evento como el de Chicxulub originaría una gran cantidad de polvo y partículas en suspensión a la atmósfera, lo que reduciría la cantidad de luz solar que llega a la superficie terrestre produciendo un enfriamiento generalizado del planeta, que afectaría principalmente tanto a los ecosistemas terrestres como acuáticos (**Bardeen et al. 2017**). Además de los efectos a corto plazo, un impacto cósmico en la Tierra tendría graves consecuencias a largo plazo, incluyendo cambios abruptos en la atmósfera que podrían durar décadas o incluso siglos. La inyección masiva de gases de efecto invernadero en la atmósfera, como el dióxido de carbono y el metano, provocaría un calentamiento global y cambios climáticos a largo plazo. Este efecto sería especialmente preocupante, ya que aumentaría la velocidad del cambio climático y sus consecuencias negativas para la vida.

2.5. Efectos en la biosfera

Tal y como se ha descrito, después de los primeros días posteriores al impacto de Chicxulub, la atmósfera quedó saturada de polvo y aerosoles como resultado de la colisión. Se produjo un largo invierno debido al oscurecimiento producido por la nube de polvo que envolvió todo el planeta. Además de este cambio brusco en la radiación solar que llegaba a la Tierra (**Parkhomenko 2021**), investigaciones recientes sugieren que, a parte del polvo y aerosoles fruto del impacto directo, los fuegos forestales masivos que ocasionó se añadieron como factor determinante a la extinción masiva, conocida como K-Pg o extinción del Cretáceo–Paleogénico (**Tabor et al. 2020**). La reorganización ecológica que siguió implicó el fin del Mesozoico (final de los dinosaurios, la «era de los reptiles») y el principio del Cenozoico (la «era de los mamíferos»).

3. EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA TIERRA

Siguiendo la recopilación de trabajos publicada por el IPCC, en las siguientes subsecciones se explicarán sucintamente los principales impactos del cambio climático en nuestra civilización y sus proyecciones futuras. Se explicarán los efectos teniendo en cuenta las zonas continentales, los océanos y la biosfera. Para ordenar las predicciones que se realizan mediante conjuntos de modelos numéricos agrupados en el acrónimo CMIP6, se evalúan posibles escenarios de evolución. En el último informe, el AR6 en su parte de impactos (evaluados en el grupo de trabajo 2, WGII)² da una estimación de los efectos del cambio climático siguiendo diferentes caminos de variación según las políticas adoptadas y la correspondiente evolución socioeconómica. Estas posibilidades van desde la más benigna (SSP1-1.9 que sigue los acuerdos de París) hasta la más dañina (SSP5-8.5). Veamos pues cuáles son sus efectos.

² <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>.

3.1. Efectos en las zonas continentales

En general e independientemente del escenario, incrementos de temperatura entre 1,5 y 4,5 °C, conllevan no sólo que los ciclos estacionales se vean afectados, sino toda una cascada de cambios que se retroalimentarán. Las consecuencias detalladas se pueden encontrar en el propio informe del IPCC o en su resumen ejecutivo (2021). Sintetizando enormemente, podríamos decir que los efectos más grandes pueden ser, a parte del cambio de temperatura media global, variaciones en los patrones de precipitación, alteración en la cobertura de hielo global (con efectos grandes en el hielo de los polos) e incrementos del nivel medio del mar. Además, los eventos meteorológicos extremos crecerán tanto en número como en intensidad, y la crecida del nivel del mar pondrá en compromiso las áreas costeras y sus infraestructuras (aquí debemos tener en cuenta que alrededor de un 10% de la población mundial vive en áreas costeras que están a menos de 10 metros sobre el nivel del mar). Habrá cambios en los patrones de precipitación (y evaporación) que afectarán el ciclo del agua, generando como consecuencia sequías e inundaciones que producirán un incremento de la desertificación en latitudes bajas. Esto generará crisis humanitarias sin precedente que tendrán consecuencias a nivel social, ocasionando, por ejemplo, grandes migraciones con implicaciones económicas difíciles de prever.

3.2. Efectos en el mar

Las principales consecuencias del cambio climático en el mar se pueden resumir en cuatro puntos: el cambio de energía en forma de calor en el océano, el cambio en la temperatura superficial del mar, el cambio en el nivel del mar y sus efectos en áreas costeras y humedales y el cambio de la acidez del agua de mar³.

El océano es un regulador global del clima a través de su capacidad de almacenar grandes cantidades de calor y llevarlas a sus capas intermedias y profundas. Una de las razones por las que el cambio climático no ha sido tan severo hasta ahora ha sido esta propiedad de retener energía del océano. Parece que este almacenamiento se está saturando⁴ con consecuencias graves cuando llegue al límite o el océano libere este exceso de energía que ha venido acumulando en las últimas décadas.

El cambio en la temperatura superficial del mar genera alteraciones en las corrientes marinas (Caesar et al. 2021) y estas a su vez son uno de los mecanismos mediante el cual la Tierra redistribuye globalmente la energía que le llega del Sol. Alteraciones en estos patrones podrían repercutir en el mecanismo de transporte global, lo que aceleraría las transformaciones y contribuiría a la inestabilidad del clima. La subida del nivel del mar genera impactos ya comentados en la subsección anterior.

³ <https://www.epa.gov/climate-indicators/oceans>.

⁴ <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-ocean-heat-content>.

Finalmente, el incremento de la concentración de CO₂ en la atmósfera hace que su disolución en el agua de mar sea mayor, con lo que su PH cambiará, y como consecuencia, afectará al equilibrio de minerales en el agua que acaba influyendo a todos los ecosistemas marinos.

3.3. Efectos en la biosfera

Los efectos del cambio climático son amplios e implican muchos aspectos, desde la ecología hasta la genética pasando por características fisiológicas o biomasa (**Scheffers et al. 2016**). La crisis ecológica deja de serlo para convertirse en algo más genérico y profundo: una crisis biológica. Hasta la fecha, han ido apareciendo distintos trabajos científicos que alertaban de los cambios en los ecosistemas debidos a la actividad humana. Uno de ellos, ya del año 2012, constituía una revisión sistemática que señalaba los cambios abruptos en los ecosistemas debido a efectos de la actividad humana (**Barnosky et al. 2012**). En este artículo se decía que sobre 2045, de seguir la tendencia actual, todos los ecosistemas de la Tierra experimentarían un cambio hacia un estado incierto. Recuerdo, en este punto, que nuestra alimentación depende, precisamente, de saber cómo, cuándo, y en qué cantidad podremos tener cosechas para alimentarnos.

Pues bien, si las previsiones en 2012 alertaban sobre el problema en los ecosistemas, estudios posteriores (**Scheffers et al. 2016**) evidencian que los impactos del cambio climático son ya evidentes a nivel incluso genético. Cabe precisar que se entiende por «impacto», las variaciones (positivas o negativas desde el punto de vista humano) de un proceso ecológico debido al cambio climático. A partir de ahí se considera la relevancia de este efecto en los ecosistemas y en los sistemas humanos. Es decir, cómo afecta el cambio climático a la producción de alimentos y otros recursos (pesquerías, agricultura, bosques y producción ganadera) y la salud de los seres humanos. Las evidencias apuntan hacia un incremento de la incertidumbre (tal y como ya se decía en el estudio de 2012) pero en este artículo se constata que la incertidumbre vendrá acentuada por una reducción de la diversidad genética en los cultivos que, además, tendrán unos rendimientos inconsistentes con lo que se ha venido observando en el pasado, un decrecimiento de la producción pesquera debido a la reducción del tamaño del pescado y una disminución de la producción de vegetales debido a menos períodos de frío en invierno que, en conjunto, pondrán en jaque la seguridad alimentaria global. Además, se prevén cambios en la distribución de vectores de enfermedades, junto con la aparición de nuevos patógenos y plagas que pondrán en serio peligro la salud de los seres humanos además de las de las cosechas, la producción de madera y ganadera (en este punto cabe recordar que el artículo de revisión citado es anterior a la COVID-19).

Los principales impactos se pueden dividir en:

3.3.1. *Impactos ecológicos del cambio climático*

- Organismos. Diferentes organismos están cambiando para adaptarse a situaciones de mayor amplitud térmica, o primaveras más cálidas en zonas templadas. Se adelantan los períodos migratorios o se modifican mediante selección por las condiciones ambientales, y aparecen respuestas genéticas para ajustarse a las nuevas condiciones climáticas.
- Población. En la mayoría de las especies, las migraciones y procesos vitales (embrionarios, floración, puesta o hibernación) están condicionados por los cambios estacionales e inter-estacionales. Las alteraciones en la temperatura y la concentración de CO₂ han extendido los períodos de crecimiento de muchas especies de plantas. En el mar se ven avanzados los tiempos típicos de las proliferaciones algales (base de las redes tróficas marinas) producto de la alteración en la temperatura del agua y la reducción de la capa de hielo. La acumulación del estrés debido a cambios en la temperatura afecta también a la abundancia de individuos, la estructura de edades y la proporción machos–hembras. Se estima que un 80% de las especies en ecosistemas marinos, agua dulce y terrestres tienen una respuesta en abundancia a causa de los efectos del cambio climático.
- Distribución de especies. Se ha constatado que la respuesta más rápida de las especies es un desplazamiento en su distribución para encontrar condiciones de los hábitats óptimas. Las especies acuáticas han expandido su hábitat, en la parte fría (latitud) a un ritmo de 19 km por década, las marinas 72 km por década y las terrestres, 6 km por década. Se ha observado una tendencia a la expansión de las especies tropicales en entornos y hábitats considerados antes como templados.
- Comunidades. En respuesta a la redistribución de especies debido al cambio climático, las interacciones entre las especies se han alterado y han emergido nuevas. Estas nuevas interacciones pueden afectar, a su vez, a los impactos abióticos del cambio climático. Además, introducen nuevas relaciones tróficas que pueden alterar o generar disrupciones en la red trófica, como la sobrepredación. En conjunto, estos cambios pueden afectar de forma crítica en la productividad de los ecosistemas. Por ejemplo, se estima que ha habido una disminución del fitoplancton marino desde 1899 (1% por año) que está relacionada con el incremento de la temperatura de la superficie del mar.

3.3.2. *Impactos en los ecosistemas: cambios de estado en los ecosistemas*

De los 94 procesos ecológicos estudiados en este trabajo (Scheffers et al. 2016), un 82% presenta evidencias del impacto del cambio climático (y con un cambio global de sólo 1 °C). Tal y como se ha visto los impactos van desde genéticos y fisiológicos hasta respuestas en la abundancia y distribución de las poblaciones. Así pues, si los

ecosistemas siguen acumulando estrés, se pueden dar cambios abruptos que den lugar a estados totalmente diferentes del actual y altamente impredecibles.

3.3.3. *Impactos en el bienestar humano*

- Amenazas a la producción. La producción y la economía son dos áreas que se ven amenazadas por el cambio climático. En el sector pesquero, por ejemplo, las consecuencias del cambio climático son inciertas y no existe consenso sobre sus impactos. La redistribución de las especies es una de las tendencias más evidentes, pero sus costes y beneficios son altamente variables y discutidos. Se constata que en zonas Árticas la biomasa de las especies comerciales ha crecido debido al incremento en la productividad del plancton por la reducción de la capa de hielo, mientras que los cambios en productividad en los océanos del sur son menos claros. Sin embargo, los análisis muestran que la tendencia a largo plazo, debido al calentamiento del océano, lleva a la reducción del tamaño corporal de los individuos que, a su vez, conduce a un decrecimiento de la productividad de un 23% en la masa total producida de las especies comerciales.
- Plagas y enfermedades. Uno de los efectos más importantes del cambio climático está en los bosques, debido a la propagación de plagas que provocan un aumento de la mortalidad de los árboles con el consiguiente impacto en la producción de madera y de la captura de CO₂ atmosférico. Las masas forestales afectan también a la calidad del agua y a su volumen en las cuencas de los ríos. Al mismo tiempo, el cambio climático presenta impactos en las enfermedades transmitidas por vectores biológicos (por ejemplo, insectos) ya que, al cambiar los rangos de los hábitats y su distribución se pueden presentar enfermedades endémicas de unas áreas en otras que originalmente no lo eran. Estos cambios se constatan, por ejemplo, en las poblaciones de mosquitos extendiéndose a áreas originariamente más frías que sus hábitats naturales.
- Pérdida de ecosistemas intactos y sus funciones. Todos los cambios reportados implican que se ponga en riesgo la funcionalidad de los ecosistemas y que, por tanto, pierdan su capacidad para ser sumideros de CO₂, de regular las condiciones climáticas locales y reducir otros riesgos abióticos como inundaciones, sequías o el impacto de las mareas en ecosistemas costeros.

Finalmente, el artículo de **Scheffers et al. (2016)** hace propuestas sobre el papel de la ciencia y las acciones que deben llevarse a cabo en un mundo con una temperatura media más alta. Partiendo de la base de que la actual temperatura de la Tierra ya ha incrementado 1,2 °C respecto a la era preindustrial, los últimos acuerdos de la COP21 de Naciones Unidas se basan en mantener el ascenso futuro no más allá de los 2 °C. Por tanto, se trata en primer lugar de adaptarnos a esta nueva situación (1,2 °C) y de no empeorarla excesivamente (2 °C).

4. SEMEJANZAS Y DIFERENCIAS EN LOS IMPACTOS

Si examinamos detenidamente los efectos de un impacto de grandes proporciones, como el que produjo el cráter de Chicxulub, podemos observar que, tanto en el cambio climático actual como en una colisión cósmica, se producen transformaciones de gran envergadura en todo el planeta. Ambos eventos afectan aspectos diversos que van desde la atmósfera al océano y la biosfera. Si bien es cierto que las causas son diferentes, los efectos son comparables en cuanto a los procesos y el alcance. Las escalas temporales presentan diferencias considerables y, por ende, las consecuencias también tienen un tiempo de evolución distinto.

En el caso del cambio climático actual, uno de los fenómenos que se dan de manera progresiva es la retroalimentación, que son cambios que se aceleran a partir de un cierto umbral por su propia dinámica interna. En el caso de una colisión cósmica, estos procesos ocurren a una velocidad mucho mayor (tomando como referencia los rangos de tiempo humanos, es decir, meses o años). Además, ambos eventos presentan una gran interrelación entre las diferentes transformaciones, lo que significa que hay una gran conectividad que acentúa precisamente las retroalimentaciones que se han mencionado anteriormente.

Estos dos aspectos generan puntos de no-retorno multidimensionales que llevan al planeta en su conjunto a estados finales muy alejados de las situaciones iniciales de las que se partía. Esto produce un riesgo muy alto para las formas de vida existentes pre-impacto o pre-cambio climático y su posibilidad de adaptación.

Es importante destacar que el cambio climático es un proceso que ocurre a una escala de tiempo mucho mayor que el de una colisión cósmica. Esto significa que las consecuencias del cambio climático son menos inmediatas, pero no por ello menos graves. Además, el cambio climático es el resultado de la actividad humana, mientras que la colisión cósmica es un evento natural. Ambos tienen efectos comparables en cuanto a su impacto en el planeta, pero es importante tener en cuenta las causas para poder tomar medidas preventivas y correctivas. De igual modo, es relevante atender al grado de predictibilidad e incertidumbre de ambos fenómenos, siendo los efectos catastróficos del cambio climático inminentes pero caóticos, y de un impacto cósmico futuros, pero presumiblemente acotados dado el avance de la tecnología.

Estas diferencias condicionan la planificación y activación de estrategias de defensa. El cambio climático se puede describir esencialmente como un hiperobjeto, distribuido masivamente en tiempo y espacio, multidimensional y con un comportamiento aparentemente caótico. Estas características hacen que sea incomparable con el escenario de impacto cósmico. Sin embargo, los nuevos desafíos presentados por las crisis asociadas al cambio climático pueden ser útiles para enfrentar los problemas en el contexto de que un cuerpo celeste se dirija rumbo a la Tierra. El cambio climático es un fenómeno complejo y multifacético que involucra la interacción de diferentes factores como la temperatura, el clima, la biodiversidad, la calidad del aire, entre otros. Por otro lado, una colisión de un asteroide es un evento mucho más específico y dependiente de pocas variables, pero igualmente devastador en términos de impacto en la vida humana y

en los ecosistemas. Aunque estos dos eventos son muy diferentes entre sí, se pueden aplicar lecciones aprendidas de la lucha contra el cambio climático para hacer frente a una posible colisión de asteroides. En ambos casos, es importante tomar medidas preventivas y adoptar un enfoque proactivo para reducir el impacto y las consecuencias de tales eventos. Además, se requiere la colaboración de la comunidad científica, los gobiernos y la sociedad en su conjunto para abordar estos desafíos globales.

5. ESTRATEGIAS DE PREVENCIÓN, GESTIÓN Y ADAPTACIÓN COMUNES A AMBOS FENÓMENOS

La prospectiva es una disciplina que se dedica al análisis y evaluación de futuros plausibles con el objetivo de identificar tendencias, riesgos y oportunidades. En el contexto de las posibles catástrofes y crisis humanitarias, el análisis anticipatorio es fundamental para poder prevenir y prepararse adecuadamente ante situaciones de emergencia.

Esta cuestión topa con una visión extremadamente positivista de nuestra especie respecto a la naturaleza y con nuestra incapacidad, a nivel individual y colectivo, de aceptar la pérdida de algo que nos interpela profundamente, como es el colapso de nuestra sociedad. En consecuencia, no somos capaces de aceptar que nuestra sociedad no dure para siempre o, como mínimo, que desaparezca dentro de nuestro ciclo vital. Esta falta de capacidad para aceptar la pérdida de lo que conocemos y nos es familiar, nos impide afrontar de manera efectiva los grandes desafíos globales, como el cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la creciente desigualdad social. Debemos ser capaces de reconocer que nuestra sociedad actual es insostenible y buscar alternativas más sostenibles para poder asegurar un futuro próspero y justo para todas las formas de vida en el planeta.

El primer elemento está asociado al mito económico del crecimiento que nuestro modelo apoya bajo la idea de que la tecnología todo lo puede, de modo que mientras tengamos tecnología, podremos solucionar todos los problemas de forma rápida y eficiente. La falta de capacidad de gestionar la pérdida, de este sistema que hemos construido y de la sociedad tal como la conocemos, se alinea con el proceso de duelo descrito por Klüber-Ross en 1974 y para el que propone cinco fases: negación, ira, negociación, depresión y, finalmente, aceptación. Si aplicamos este proceso a nivel colectivo, podemos observar que socialmente estamos experimentando la fase de negación.

Este proceso de negación de una evidencia, que ya hace décadas era muy clara, se ha visto incluso en los informes del IPCC respecto al cambio climático: hasta este último informe (AR6) no se afirma rotundamente que el cambio climático es de origen antropogénico. Si en algo tan evidente como el cambio climático, la fase de aceptación, necesaria para poder actuar, ha sido tan lenta, se plantea un problema aún mayor en relación con la gestión y preparación ante posibles impactos cósmicos, ya que nos movemos con probabilidades relativamente bajas de que se dé en un tiempo que podemos

considerar razonable (nuestro tiempo de vida) y, por lo tanto, desincentiva esta movilización de recursos y capital para generar los mecanismos de emergencia necesarios.

Se puede observar esta situación en las diferencias de las políticas generadas para paliar el cambio climático en comparación con la respuesta a la COVID-19, por ejemplo. La cercanía e inminencia de la amenaza rompió el mantra de «primero la economía» entendiéndose que sin salud no había economía. Pero, aunque el problema del cambio climático es mucho más grave y gestionable (en lo que se refiere a la previsión y aplicación progresiva de medidas) no se actúa debido a que la percepción de riesgo queda demasiado proyectada en un futuro lejano.

Según lo dicho anteriormente, nos encontramos delante de un problema, la preparación ante desastres naturales, que presenta una difícil solución. Si se estudia cómo está respondiendo nuestra sociedad a estas situaciones nos encontramos repitiendo patrones que han seguido sociedades antiguas, aunque menos desarrolladas tecnológicamente. Los procesos de riesgo de colapso vistos desde una perspectiva de sistemas complejos nos arrojan luz sobre qué estrategias tenemos que seguir, teniendo en cuenta cómo cambios en las condiciones ambientales y de recursos en sociedades pasadas han afectado civilizaciones complejas, y haciendo analogías con las transiciones de fase de un sistema físico (Solé 2023).

En este sentido, una posible propuesta de actuación se enmarcaría en tres ejes (Solé 2023): políticas globales, medidas de gestión y financieras/económicas y, finalmente, concienciación, información y transparencia. Estas acciones pretenden abordar dos aspectos claves ante una emergencia global, sea esta el cambio climático, la crisis energética o un impacto cósmico. El primer aspecto clave es la transformación del actual sistema socioeconómico para liberar recursos que se puedan utilizar en la gestión de la emergencia. El segundo aspecto es que esta transformación social lleve a una sociedad más resiliente, capaz de poder sobrellevar eventos inesperados o bruscos como los cambios producidos en la Tierra por el impacto de un cuerpo de grandes dimensiones.

Políticas globales:

- i. **Legislación penal:** El cambio climático y la crisis ecológica deben enmarcarse como un problema que afecta a toda la humanidad, de modo que hay que partir de la rigurosidad en lo que hacemos y cómo lo hacemos. Es necesario proveer un marco legal internacional penal que incluya los crímenes ambientales al mismo nivel que los crímenes contra la humanidad. Este marco legal se podría orientar de forma genérica como preparación de la sociedad para emergencias globales en las que entraría el impacto cósmico. Así, quien en los años anteriores haya hecho campañas de desinformación por intereses económicos es necesario que asuma sus responsabilidades. Si no lo hacemos ahora, lo hará la generación que sufrirá sus efectos más duros y nos acusarán de no haber hecho justicia (y quizás la aplicarán tarde y mal).
- ii. **Política:** La responsabilidad política en esta cuestión es mayúscula, los partidos políticos, todos, deben tenerla como prioridad número uno en su agenda. Aquellos que no lo hagan, ya sea por falta de comprensión del problema o por

desinterés, deberán ser objeto de la legislación penal anteriormente señalada. A la luz de las evidencias existentes y el tiempo transcurrido, resulta cada vez menos justificable sostener que es fruto de la ignorancia, es decir, de la falta de información o de comprensión acerca del alcance del problema.

Medidas de gestión y financieras:

- iii. **Gestión:** Si nos tomamos en serio los dos primeros puntos hace falta que los planes de acción de las administraciones y la sociedad civil hagan de este tema, de su información y de sus implicaciones, una prioridad informativa. La información debe empezar a centrarse principalmente en medidores físicos: emisiones y energía, poniendo referencias (y llegando a un consenso) de cuál es el nivel de consumo básico necesario en términos de estas cantidades para poder adaptarnos y gestionar la crisis climática y ambiental y, al mismo tiempo liberar recursos para la preparación de un impacto de meteorito. Tomando como ejemplo la pandemia COVID-19, de repente, todos los medios de masas hablaban de ello a todas horas para concienciar, lo justificaba la emergencia y la urgencia sanitaria. No se alzaron voces diciendo que no se debía crear pánico o alarmar sobre la situación. El miedo aparece cuando no hay opciones, cuando no se explica a la gente cómo podemos transitar el peligro de forma ordenada y colectiva. Si se pospone el problema y no se explica con toda su gravedad no sólo se creará pánico cuando la situación se agrave, sino que las posibilidades de gestión ordenada se reducirán por falta de confianza en las entidades que debían guiar y coordinar en las necesarias acciones colectivas. En este sentido, pues, hay que evitar y penalizar todas las estrategias de desinformación y de blanqueamiento de iniciativas (económicas) en direcciones divergentes o contrarias a la adaptación y lucha contra el cambio climático, la crisis ecológica y de recursos o la preparación para eventos súbitos como la colisión de un asteroide. En este supuesto, se tendría que reservar y destinar presupuesto a la construcción de telescopios que descubran y nos alerten de los OPP.
- iv. **Consumismo:** Planes de lucha contra el sobreconsumo y el desperdicio, concienciación de la población de la necesidad de reducir y reaprovechar. Hay que dejar claro que el consumo y sus derivadas (incremento de producción de bienes y gasto) enmarcadas en un modelo expansionista/crecentista, es lo que nos ha llevado al callejón sin salida actual. Por tanto, toda acción que sea efectiva pasa por repensar esta necesidad de incrementar (o mantener) el sistema consumista que, por otra parte, no aporta ningún bienestar a largo plazo. En el caso de un impacto cósmico, se tendrían que proponer planes de contingencia para la zona de impacto para que pudiese entrar en estado de alerta de forma rápida y sostenida (antes, durante y después del impacto). Esto implica pasar a una economía diferente (de guerra o subsistencia) de forma organizada y que cause el mínimo impacto social y ecológico.
- v. **Adaptación de internet:** Información del coste energético y de emisiones (aparte del precio) de mantener un volumen de datos puramente de ocio accesible en la red. La sociedad debe empezar a decidir qué se mantiene y qué se deja caer

en la red. Es decir, cuál es la cantidad máxima de información mantenida en la nube y su coste energético y en emisiones. Retomando la analogía del impacto cósmico, la comunicación tiene que estar asegurada después de la colisión, lo cual conlleva tener una infraestructura con una redundancia y resiliencia de la red y con un protocolo para la disminución del flujo de datos.

- vi. Transporte: Reducción del transporte aéreo y marítimo y del transporte en general. Esto supondrá repensar el ocio y el turismo: es necesario rediseñar el sistema de ocio actual, más pensado para crear personas acríticas, distraídas e insatisfechas constantemente, y transitar a un sistema diferente que sirva para estimular los valores sociales y humanos, la empatía y la cohesión social. En los cálculos (muy conservadores) que se hicieron en el proyecto MEDEAS⁵ referentes al transporte, señalaban que para tener flotas de transporte totalmente renovables es necesario que los modos de transporte aéreo y marítimo se reduzcan a la mitad. Urge pues diseñar planes de adaptación del comercio y la economía de acuerdo con esta reducción de volumen de mercancías y pasajeros. En el escenario del impacto cósmico, un transporte menos dependiente de los combustibles fósiles y descentralizado entrañaría una mejor eficiencia en caso de destrucción de nodos clave o centros modales. Esto implica también una planificación necesaria con los protocolos de sustitución de flota o de rutas alternativas para la provisión de víveres en zonas arrasadas por el impacto.
- vii. Espacios naturales: Preservación y ampliación de las reservas naturales y espacios protegidos. Los espacios naturales no industrializados o débilmente antropizados actúan de protección, facilitan la adaptación al cambio climático y disminuyen el impacto en el deterioro de los ecosistemas. También hace falta aquí mucha pedagogía en cuanto al uso e invasión masiva de espacios protegidos y áreas rurales. El mantra «yo pago impuestos por tanto tengo el derecho de uso de cualquier lugar público» es de una visión cortoplacista que no tiene sentido, ya que implica no comprender que el hecho de pagar impuestos no es suficiente para liberarse de las responsabilidades sociales y cívicas. Los espacios naturales protegidos están pensados para preservar la biodiversidad y compensar la fuerte antropización del entorno natural que tenemos en nuestro país. La visión «urbanita» dominante suele considerar el «campo», el mundo rural y los espacios protegidos como simples parques temáticos para la diversión de la población. Este hecho está fundamentado en la visión utilitarista/mercantilista de nuestra sociedad que lo ve todo como objetos (cosas) monetizables, susceptibles de ser compradas/vendidas o alquiladas. En este sentido, para el impacto cósmico, si hubiese que desviar un asteroide, pero no se pudiera evitar la colisión se tendrían que priorizar zonas que no sean de alto interés para la biosfera (Amazonas, Antártida, etc.).
- viii. Agricultura y agua: Los usos y productos agrícolas deben cambiar de forma radical, transitando desde la agricultura y ganadería industrial a una sin el uso

⁵ www.medeas.eu.

intensivo de fertilizantes y pesticidas derivados de los combustibles fósiles y más adaptada a las necesidades locales. El sector agrícola y ganadero debe reconvertirse para proveer al territorio de los productos básicos y reducir la exportación a largas distancias. En esta línea, debería también repensarse la dieta actual (demasiado centrada en la proteína de origen animal) y los requerimientos de productos de lujo agrícola (fruta y verdura fuera de temporada), importaciones de carne y pescado de zonas lejanas, etc. También hay que tener en cuenta y evaluar los impactos del cambio climático en la producción agrícola y ganadera que harán que su gestión sea más difícil. Por ello, son necesarios planes de acción a medio o largo plazo, coordinados con la planificación de la explotación del suelo. Conectado con la agricultura tenemos el acceso a uso y aprovechamiento de los recursos hídricos que, en el futuro, sufrirán una disminución creciente añadida al incremento de su necesidad por la expansión de la energía renovable. Toda esta reorganización es clave también desde el punto de vista de un impacto cósmico de dimensiones considerables, ya que este afectaría, dependiendo de la zona devastada, a las cadenas de distribución globalizadas. Nuestro sistema actual muestra poca capacidad de resiliencia, ya que el cierre de un gran puerto como el de Shanghai o la obstrucción de un canal de navegación como el ocurrido con el Evergreen varado en el canal de Suez, produce un problema de distribución a escala global. Imaginemos qué pasaría si la colisión de un asteroide o un cometa afectara a alguno de estos centros neurálgicos o cuellos de botella. El problema de que los sistemas críticos estén muy centralizados o sean muy dependientes de tecnología compleja eleva las consecuencias negativas de un evento catastrófico en el caso del acceso a alimentos básicos y agua.

Campaña de información y concienciación:

- ix. (In)justicia climática: Los planes de transición que dejen (implícita o explícitamente) a poblaciones atrás deben ser penalizados siguiendo las directrices del primer punto de legislación penal descrito. Ahora mismo no hay acuerdo internacional sobre qué hacer y cómo hacerlo (más allá de los Acuerdos de París que ya han quedado obsoletos y no han servido para reducir las emisiones). El principal escollo es quién paga, un argumento sin sentido, porque el mal llamado «tercer mundo» ha pagado desde siempre (deuda histórica) para que, en el «primer mundo», podamos nadar en la abundancia material y en la miseria moral de tolerar hambre en el mundo con la excusa de hipotéticos futuros mejores. En la presente cuestión, se argumenta a favor de una política de financiamiento en la que aquellos con mayores recursos económicos sean los principales contribuyentes, dado que en última instancia son los principales beneficiarios de décadas de degradación ambiental. En este sentido, se hace un llamado a que los países desarrollados asuman su responsabilidad y contribuyan económicamente a la solución de los problemas ambientales actuales. Se enfatiza la importancia de tomar medidas inmediatas, dado que la posibilidad de postergar la acción podría llevar a una situación en la que el sistema ya no pueda ser salvado. Hay que imponer que las grandes corporaciones y multi-

nacionales empiecen a tributar por el volumen de destrucción creada (deuda histórica) y reconduzcan los beneficios hacia planes de adaptación y lucha contra el cambio climático o emergencias planetarias, sean estas pandemias o impactos de meteoritos (es decir cualquier evento disruptivo). Los impuestos deben ser progresivos hacia las estructuras que, más temprano que tarde, desaparecerán en una sociedad des-globalizada como la que nos espera. Esto no significa que no tenga que haber intercambios comerciales o de personas a nivel internacional, pero su volumen será distinto. La preparación ante la amenaza de un OPP también debe ser financiada y, de una manera similar a la articulación de la respuesta al cambio climático, esto implica la aportación de dinero por parte de los Estados más ricos hacia los países más desfavorecidos. Pensemos que una situación de emergencia, sea climática o cósmica, supone movilización de equipos, víveres, medicamentos de forma rápida y eficiente. Pese a que este tipo de acciones no pueden dejarse a la improvisación, actualmente no hay acuerdos globales ni protocolos para que financiera y económicamente se dedique dinero a la preparación o adaptación a un impacto cósmico.

- x. Propaganda: Reducción progresiva de estrategias de publicidad y marketing de productos, estilos de vida o actuaciones altamente contaminantes o que impliquen ataques a la biodiversidad y/o salud de los ecosistemas. Por ejemplo, podrían aplicarse moratorias que, cuando expiren, en caso de no haberse adaptado, supongan la aplicación del punto de legislación penal detallado. En esta primera fase, un ejemplo claro es lo que se conoce como «lavado verde» (*greenwashing*), una táctica estética que hacen muchas empresas simulando que simpatizan con la causa ambiental, pero sin transformar de manera sustancial sus acciones ni principios. Esto es equivalente en el caso de un impacto cósmico, ya que el papel de los medios periodísticos y cómo explican la situación es esencial para concienciar y que la gente disponga de datos fidedignos sobre los peligros y las posibilidades de actuación, así como herramientas para afrontar esta situación de emergencia desde el punto de vista social, de recursos necesarios y de su preparación psicológica.

Finalmente, es esencial que definamos y acordemos indicadores que reflejen el progreso en la implementación del decálogo propuesto o, en otras palabras, alguna señal que dé idea de que algo se mueve. Desde mi punto de vista, una señal clara de que algo está cambiando sería que los ministerios y consejerías de medio ambiente dependieran directamente de presidencia y que el gobierno gestionara sus políticas según criterios ambientales, de recursos y climáticos, en lugar de basarse en indicadores cortoplacistas de crecimiento económico que, aunque nos resistimos a aceptarlo, son inútiles ante situaciones de emergencia global. El mismo desafío se presenta ante el impacto cósmico: nuestra sociedad parece no estar preparada para enfrentar riesgos lejanos en el tiempo o con una probabilidad baja, lo que nos lleva a no asignar recursos (financieros, de tiempo en gestión, de previsión y planificación) ni esfuerzos para prevenirlos. Además, el sistema socioeconómico actual y el paradigma crecientista en el que vivimos no están diseñados para contingencias de este tipo, y la falta de herramien-

tas (económicas, sociales, psicológicas e incluso éticas) nos deja en una situación de vulnerabilidad. En la respuesta a esta situación, en lugar de caer en un pesimismo que nos lleve a la desmovilización, debemos reflexionar sobre qué paradigma alternativo necesitamos para enfrentar estos retos, el cual no sólo mejorará nuestra capacidad de gestionar el impacto cósmico o el cambio climático, sino que nos llevará a un estilo de vida más saludable y sostenible (con recursos mejores y más sanos) para los seres humanos y para los ecosistemas en los que vivimos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bardeen, C. G., Garcia, R. R., Toon, O. B y Conley, A. J. (2017). On transient climate change at the Cretaceous-Paleogene boundary due to atmospheric soot injections. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(36), E7415-E7424.
- Barnosky, A., Hadly, E., Bascompte, J. et al. (2012). Approaching a state shift in Earth's biosphere. *Nature* 486, 52-58.
- Brett, R. (1992). The Cretaceous-Tertiary extinction: a lethal mechanism involving anhydrite target rocks. *Geochem Cosmochim Acta*, 56, 3603-3606.
- Bobrowsky, P.T. y Rickman, H. (2007). *Comet/asteroid impact and Human Society. An interdisciplinary approach*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Caesar, L., McCarthy, G.D., Thornalley, D.J.R. et al. (2021). Current Atlantic Meridional Overturning Circulation weakest in last millennium. *Nat. Geosci.* 14, 118-120.
- Chapman, CR. y Morrison, D. (1994). Impacts on the Earth by asteroids and comets: assessing the hazard. *Nature*, 367, 33-39.
- Collins, GS., Melosh HJ. y Marcus, RA. (2005). Earth Impact Effects Program: a web-based computer program for calculating the regional environmental consequences of a meteoroid impact on Earth. *Meteoritics and Planet Sci*, 40, 81-840.
- Condamine, F.L., Guinot, G., Benton, M.J. et al. (2021). Dinosaur biodiversity declined well before the asteroid impact, influenced by ecological and environmental pressures. *Nat Commun*, 12, 3833.
- Ens, T. A., Brown, P. G., Edwards, W. N. y Silber, E. A. (2012). Infrasound production by bolides: A global statistical study. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 80, 208-229.
- Grieve R. y Therriault A. (2000). Vredefort, Sudbury, Chicxulub: three of a kind? *Ann Rev Earth Planet Sci*, 28, 305-338.
- Henehan, M.J., Ridgwell, A., Zhang, S., Alegret, L., Schmidt, D.N., Rae, J.W.B., James, Witts, D., Landman, N.H., Greene, S.E., Huber, B.T., Super, J.R., Planavsky, N.J. y Pincelli M. (2019). Rapid ocean acidification and protracted Earth system recovery followed the end-Cretaceous Chicxulub impact. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(45), 22500-22504.
- Husen S., Taylor R., Smith RB. y Healsler, H. (2004). Changes in geyser eruption behavior and remotely triggered seismicity in Yellowstone National Park produced by the 2002 M 7.9 Denali fault earthquake, Alaska. *Geology*, 32, 537-540.

- IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson–Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)].
- Junium C.K., Zerkle A.L., Witts J.D., Ivany L.C., Yancey T.E., Liu C. y Claire M.W. (2022). Massive perturbations to atmospheric sulfur in the aftermath of the Chicxulub impact. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(14).
- Jones, E.M. y Kodis, J.W. (1982). Atmospheric effects of large body impacts: the first few minutes. En LT., Silver y PH., Schultz (Ed.), *Geological implications of impacts of large asteroids and comets on the Earth* (pp. 175-186). Geol Soc Amer Sp Pap 190.
- Kübler-Ross, E. (1974). *Questions and Answers on Death and Dying*. Macmillan.
- Kring, D.A. (1999). Meteor Planet, *Sci*, 34, A67-A68.
- Kring D.A., Melosh H.J. y Hunten, D.M. (1995). *Possible climatic perturbations produced by impacting asteroids and comets*. *Meteoritics* 30, 530.
- Melosh, H.J. (1989). *Impact Cratering: A Geologic Process*. Oxford University Press, New York.
- Morgan, J. V., Bralower, T. J., Brugger, J. y Wünnemann, K. (2022). The Chicxulub impact and its environmental consequences. *Nature Reviews Earth y Environment*, 3(5), 338-354.
- Parkhomenko, V. P. (2021). The longtime global climatic consequences modeling of the Chicxulub asteroid impact event. *Journal of Physics Conference Series*, 2090(1).
- Range, M. M., Arbic, B. K., Johnson, B. C., Moore, T. C., Titov, V., Adcroft, A. J., et al. (2022). The Chicxulub impact produced a powerful global tsunami. *AGU Advances*, 3, e2021AV000627.
- Robertson, D. K. y Gislis, G. R. (2019). Near and far-field hazards of asteroid impacts in oceans. *Acta Astronautica*, 156, 262-277.
- Scheffers, B. R., De Meester, L., Bridge, T. C., Hoffmann, A. A., Pandolfi, J. M., Corlett, R. T., ... y Watson, J. E. (2016). The broad footprint of climate change from genes to biomes to people. *Science*, 354(6313), aaf7671.
- Sigurdsson H., D'Hondt S. y Carey, S. (1992). The impact of the Cretaceous/Tertiary bolide on evaporite terrane and generation of major sulfuric acid aerosol. *Earth and Planetary Science Letters*, 109, 543-559.
- Solé, J. (2023). Climate and Energy Crises from the Perspective of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Trade-Offs between Systemic Transition and Societal Collapse? *Sustainability*, 15(3), 2231.
- Stark, M.A., Davis, S.D. (1996). Remotely triggered microearthquakes at The Geysers geothermal field, California. *Geophys Res Lett*, 23, 945-948.
- Tabor, C. R., Bardeen, C. G., Otto-Bliesner, B. L., Garcia, R. R. y Toon, O. B. (2020). Causes and climatic consequences of the impact winter at the Cretaceous–Paleogene boundary. *Geophysical Research Letters*, 47, e60121.
- Toon, O.B., et al. (1982). Evolution of an impact-generated dust–cloud and its effects on the atmosphere. *Geol Soc Amer Spec Pap*, 190, 187-200.

- Toon, OB., Zahnle, K., Turco, RP. y Covey, C. (1994). Environmental perturbations caused by impacts. En T. Gehrels (Ed.), *Hazards due to comets and asteroids* (pp. 791-826). Univ of Arizona Press, Tucson.
- Ward, SN. y Asphaug, E. (2000). Asteroid impact tsunamis: a probabilistic hazard assessment. *Icarus*, 145, 64-78.
- (2003). Asteroid impact tsunami of 2880 March 16. *Geophys J. Int*, 153, F6-F10.