

Fundamentos básicos sobre el Cambio Climático: Conceptos, causas y consecuencias



Autores: Iris Pérez Almeida, Ph.D.
y Alfredo Romero Santos, Mgtr.



**FUNDAMENTOS BÁSICOS
SOBRE EL CAMBIO
CLIMÁTICO:
CONCEPTOS, CAUSAS
Y CONSECUENCIAS**

AUTORES

**Iris Pérez Almeida, Ph.D.
Alfredo Romero Santos, Mgtr.**

2023

TÍTULO

FUNDAMENTOS BÁSICOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO: CONCEPTOS, CAUSAS Y CONSECUENCIAS

AUTORES:

Iris Pérez Almeida, Ph.D.

Alfredo Romero Santos, Mgtr.

AÑO

2023

EDICIÓN

Lcda. Alejandra González Andrade. -Departamento de Publicaciones Universidad ECOTEC

ISBN

978-9942-960-88-7

No. PÁGINAS

103

LUGAR DE EDICIÓN

Samborondón –Ecuador

DISEÑO DE CARÁTULA

¹Departamento de Relaciones Públicas y Marketing. Universidad ECOTEC

NOTA EDITORIAL:

Los capítulos del presente libro son resultado de investigaciones realizadas por parte de los autores en busca de contribuir con el desarrollo académico de los estudiantes de grado y posgrado, tributando a la Línea de Investigación de "*Medio Ambiente y Sociedad*", de la Universidad ECOTEC. Los autores del libro tuvieron la responsabilidad de seleccionar dichas investigaciones científicas, tomando en consideración el impacto y relevancia de la información, en virtud de la difusión del conocimiento.

¹ La portada se encuentra sujeta a cambios

CONTENIDO

DATOS DE LOS AUTORES	6
PRESENTACIÓN	8
CAPÍTULO 1: CONTEXTO INTRODUCTORIO	10
1.1 La ciencia y la tecnología del cambio climático.....	11
1.2 Implicaciones para la ecología humana y social	14
1.3 La percepción y conciencia acerca del cambio climático	15
1.4 La agenda política alrededor del cambio climático.....	18
CAPÍTULO 2: EL ORIGEN Y LOS MITOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO	20
2.1 La génesis del cambio climático	20
2.2 El efecto invernadero.....	20
2.3 Los gases de efecto invernadero (GEI)	22
2.4 La importancia del dióxido de carbono	26
2.5 Las emisiones de gases de efecto invernadero	27
2.6 El aumento en las concentraciones de los gases de efecto invernadero en la atmósfera	29
2.7 Visiones y controversias alrededor del Cambio Climático.....	31
2.8 Mitos popularizados acerca del cambio climático	34
2.9 Evidencias del cambio global en los eventos climáticos extremos.....	37
CAPÍTULO 3: CAUSAS Y CONSECUENCIAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO	41
3.1 Contexto general	41
3.2 Más allá de los límites	42
3.3 El cambio climático y sus efectos sobre la biósfera	45
3.4 El cambio climático está poniendo en riesgo la seguridad energética en todo el mundo	50
3.5 Un enfoque sinérgico entre la biodiversidad y el clima reduciría los efectos negativos	53
CAPÍTULO 4: LO QUE DICE LA CIENCIA AUTORIZADA (IPCC)	65
4.1 Síntesis de los resultados del IE6 (AR6) de evaluación del IPCC.....	67
4.2 Impactos del cambio climático sobre algunos ámbitos relevantes	73
CAPÍTULO 5: RESPUESTAS AL CAMBIO CLIMÁTICO	83
5.1 Adaptación y Mitigación del cambio climático	83
5.2 La política y la economía del cambio climático	86
5.3 Mecanismos e instrumentos de la política de cambio climático	89
EPÍLOGO	93
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1. Potenciales de calentamiento global (en una base másica) en relación con el dióxido de carbono para algunos gases cuyas vidas medias han sido bien caracterizadas26

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Anomalías previstas de la temperatura del aire a 2 m. frías/cálidas en tonalidades azules/rojas, respectivamente, a fecha de 1 de diciembre de 2022 en grandes zonas terrestres.....	13
Figura 2. Representación esquemática del efecto invernadero	21
Figura 3. Concentraciones de gases de efecto invernadero del año 1958 al 2022	29
Figura 4. Tendencia del total de emisiones de: (a) NH ₄ y (b) N ₂ O durante el período 1995-2022.....	30
Figura 5. Límites planetarios: el espacio operativo seguro para la humanidad	44
Figura 6. Relación entre el contenido de CO ₂ en la atmósfera y el Producto Interno Bruto mundial, entre 1992 y 2008.....	48
Figura 7. Interacciones entre el cambio climático y a biodiversidad y la desertificación.....	52
Figura 8. Tendencias del incremento de la temperatura promedio global en la superficie del planeta.....	68
Figura 9. Cambio global de la masa de hielo entre 1994 y 2017 dividido en diferentes componentes; flotantes (azules) y terrestres (púrpuras).....	69
Figura 10. Cambios de masa acumulados de la capa de hielo de la Antártida (AIS) y la capa de hielo de Groenlandia (GrIS). Los valores que se muestran están en gigatoneladas (Gton) y provienen de mediciones satelitales para el período 1992-2020	70
Figura 11. Tendencias de emisiones de GEI agregadas por grupos de GEI expresados en GtCO ₂ -eq convertidos en base a 6 potenciales de calentamiento global con un horizonte temporal de 100 años (GWP100).....	71

DATOS DE LOS AUTORES

Iris Betzaida Pérez Almeida

Ingeniero Agrónomo y Magister Scientiarum en la facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela. Doctora en Filosofía (PhD) en el Departamento de Botánica y Fitopatología de la Universidad Purdue, campus principal West Lafayette, Indiana (USA).

Actualmente Docente-investigadora en el Centro de Estudios para el Desarrollo Sostenible en la Universidad Ecotec, Samborondón (Ecuador), imparte materias profesionales en la Facultad de Ingenierías. También ha sido docente de la Maestría en Agropecuaria, mención Agronegocios, de la Universidad de Guayaquil, y de la Maestría en Agronomía, mención Agricultura Agrosostenible de la Universidad Técnica de Manabí. Ha sido asesora del Instituto de Innovación en Biotecnología e Industria (República Dominicana). Desde 2019, es profesora visitante de la Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja (Perú).

Es autora o coautora de numerosos artículos científicos indexados, artículos divulgativos especializados, varios libros o capítulos de libros, y forma parte del Consejo de Revisores de prestigiosas revistas científicas en el área de biología molecular. También ha asesorado tesis doctorales, tesis de maestría en ciencias, y de pregrado, así como recibido y capacitado numerosos pasantes en el laboratorio.

Ha sido directora de varios proyectos de investigación I+D dedicados a la investigación agrícola; ha participado en numerosos proyectos de investigación nacionales e internacionales, tres financiados por el BID, y dos de ellos como Investigadora Prometeo, financiados por la SENESCYT (Ecuador).

En las obras publicadas y proyectos de investigación sus líneas de estudio se han centrado en el uso de marcadores moleculares para la selección asistida en el mejoramiento de plantas para la resistencia a estreses bióticos y abióticos, y el incremento de la eficiencia de la metodología de trabajo con el ADN.

Alfredo Romero Santos

Ingeniero Agrónomo graduado en la Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela (1970). Magister Scientiarum en Comunicación y Transferencia de Tecnología de la Universidad de Wisconsin (EE. UU.) (1974). Editor jefe del Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias-FONAIAP (Hoy Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas-INIA), ha compilado y editado numerosas publicaciones monográficas, informes anuales institucionales y publicaciones corporativas. Fue el coordinador de la Comisión Nacional de Publicaciones del FONAIAP hasta el año 2001 y es autor o coautor de numerosos artículos y publicaciones técnico-divulgativas. Ha sido Editor de la Revista FONAIAP DIVULGA y fundador de la primera Revista digital del INIA (CENIAP HOY). Compilador y editor de la Serie Paquetes Tecnológicos para la producción, que incluyen los paquetes para Naranja, Sorgo, Café, Cebolla, Hortalizas, Cachama, y Palma Aceitera, así como de la serie Manuales de Cultivo del INIA, compilando y editando los manuales de Arroz, Hortalizas, Caraota, Merey y Papa.

Ha ejercido como coordinador del Proyecto Nacional de Capacitación del INIA, coordinador de subproyectos de Transferencia de Tecnología y Redes en Arroz, Leguminosas de grano, Sanidad Animal y Nutrición de Rumiantes del proyecto Nacional BID/FONACIT II de Fortalecimiento de la Biotecnología Agrícola de Venezuela.

Adicionalmente, ha sido Profesor Agregado de las cátedras de 'Metodología de Investigación Científica y Documental' y de 'Comunicación Científica y Redacción Técnica' en los Posgrados de las facultades de Agronomía y Ciencias Veterinarias de la Universidad Central de Venezuela y de la Universidad Nacional Experimental Rómulo Gallegos, y Profesor invitado de la Escuela Superior de Agricultura Tropical del INIA, en la cátedra de Comunicación Oral y escrita del doctorado de Biotecnología

PRESENTACIÓN

A través de este texto, escrito en un lenguaje sencillo, respetando los principios técnicos y científicos imperantes, se desea compilar en un solo lugar toda la información necesaria para entender y calibrar la significación del **cambio climático** como el proceso, natural o inducido, que está determinando el desenvolvimiento actual, y muy probablemente futuro, de nuestra vida sobre el planeta. Los cambios en el clima han ocurrido a lo largo de centenares de millones de años, desde el momento mismo en que emerge la vida en el planeta, influyendo ciertamente en su evolución y complejidad, hasta llegar a la situación actual, donde se ha convertido en un asunto existencial que nos afecta a todos, dados los hechos irrefutables que se han evidenciado en los últimos tiempos, pero cuyo nivel de conocimiento y conciencia en el grueso de la población es limitado.

Desafortunadamente, fuera de los reducidos círculos académicos, la ciudadanía se entera del cambio climático y sus diversas aristas mediante la prensa escrita y televisiva, y más frecuentemente a través de las redes sociales, en donde las principales fuentes son los políticos, seguidos de los periodistas y los científicos. Por esta razón, los autores hemos querido ofrecer al público interesado y a la ciudadanía en general un compendio del conocimiento básico requerido para reflexionar y actuar ante el problema global del cambio climático: su génesis, significado, causas, factores impulsores del mismo, impacto socioeconómico y perspectivas futuras.

El texto comprende cinco capítulos, el primero de los cuales ofrece un contexto general sobre el tema: la ciencia alrededor del cambio climático y sus implicaciones para los sistemas socioecológicos imperantes, el problema de la percepción del fenómeno en tiempo real y la agenda política que ha surgido progresivamente en relación con el cambio climático.

En el siguiente capítulo, se hace un paneo general sobre el tema, incluyendo los aspectos fundamentales relacionados con su origen, el papel de la actividad humana como factor determinante en los actuales momentos, el concepto de efecto invernadero y los gases que lo originan, así como el incremento progresivo de su concentración en la atmósfera terrestre.

El capítulo 3 detalla los basamentos científicos y los análisis más actuales en torno a los factores impulsores y el impacto del cambio climático en la biósfera, así como las perspectivas y controversias surgidas con el avance en su estudio, incluyendo los mitos y leyendas presentes en el imaginario socioeconómico y cultural. El capítulo 4 trata sobre las consecuencias directas del cambio climático sobre los ecosistemas y sus componentes y procesos y cómo afectan la creciente población mundial.

Por último, el capítulo 5 analiza las complejas respuestas técnicas y políticas de la sociedad ante el fenómeno, incluyendo las acciones e instrumentos de mitigación y adaptación que han venido conformándose a lo largo de los últimos 40 años.

Se culmina el texto con un Epílogo en el cual se destacan los mensajes principales argumentados al largo del texto, y a la vez se hace un llamado al lector acerca de la importancia y trascendencia del accionar de cada ciudadano en respuesta al cambio climático y a las terribles consecuencias que acarrea para todos, en caso de que continúe acentuándose en las distintas regiones del globo, dado el peligro que representa para nuestra supervivencia.

Esta apretada síntesis expositiva sobre el tema no pretende ser exhaustiva, pues, como se podrá evidenciar, la generación de información científico-técnica e institucional, las acciones de muchos gobiernos y la manifestación de los diversos grupos sociales ha sido abundante y continúa creciendo. Sólo esperamos que el lector pueda formarse un marco de entendimiento y reflexión que lo impulse a indagar y adquirir una conciencia más plena y certera de lo que ha sido considerado el problema más acuciante de la sociedad actual: el cambio climático.

CAPÍTULO 1: CONTEXTO INTRODUCTORIO

Los ecosistemas constituyen entidades complejas, en donde las interacciones y condicionamientos entre factores bióticos y abióticos determinan la emergencia de fenómenos y estados estacionarios, cuya permanencia depende de los contextos e intensidades de dichas interacciones. Tal es el caso del cambio climático, fenómeno altamente variable e influenciado por multitud de factores, y a la vez impulsor de otros procesos y fenómenos en todas las escalas.

La comprensión precisa del concepto y los procesos relacionados con el cambio climático requiere del conocimiento de los ciclos biogeoquímicos de la biósfera, que condicionan los procesos fundamentales de la vida. En términos sencillos, el cambio climático que nos afecta en la actualidad es simplemente la consecuencia de la alteración de dichos ciclos y sus efectos en el funcionamiento y procesos de la multitud de ecosistemas que se integran para conformar la biósfera. Recordemos que los ciclos biogeoquímicos son procesos complejos y caóticos, los cuales, por la propiedad de los sistemas complejos adaptativos, tienden a un estado de orden o equilibrio estacionario en el espacio y en el tiempo. Ello ocurre siempre y cuando la magnitud y fluctuaciones de la multitud de variables que determinan los cambios se mantengan en rangos dentro de los cuales la capacidad amortiguadora del sistema pueda regular tales variaciones, sin que ocurran cambios en el funcionamiento y procesos de los ciclos del carbono, nitrógeno, oxígeno y agua, principalmente.

Los factores ecológicos que determinan el cambio climático, actúan conjuntamente, como una totalidad, en la que sus interacciones —global, regional y localmente— son los que provocan las condiciones del ‘tiempo meteorológico’, esto es, la emergencia resultante de tales interacciones.

El clima, de acuerdo con el IPCC (2007), se define como:

...el “tiempo promedio”, o más rigurosamente, la descripción estadística en términos del promedio y la variabilidad de las magnitudes correspondientes durante un período de meses a miles o millones de años. El período clásico es de 30 años, según lo definido por la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Estas cantidades son a menudo variables de superficie, tales como temperatura, precipitación y viento. El clima en un sentido más amplio es el estado, incluyendo una descripción estadística, del sistema climático (IPCC, 2007: p.942).

El fenómeno del cambio climático se refleja precisamente en las variaciones y tendencias de los elementos o factores que lo determinan, a lo largo de períodos largos (30 años o más), modificando el estado de equilibrio inicial, y creando condiciones para que el funcionamiento de los ciclos se altere, al punto de modificar las condiciones de equilibrio que normalmente caracterizan el sistema climático.

A pesar de que el fenómeno del cambio climático es un hecho real, ampliamente discutido y comprobado por innumerables científicos y tecnólogos de las más variadas disciplinas, el hecho de no ser perceptible en el corto plazo y no afectar la inmediatez de la gran mayoría, aunado al desconocimiento generalizado de la sociedad acerca del sistema climático y su papel preponderante en la biósfera del planeta, ha conducido a que un porcentaje significativo de la población mundial no crea que tal fenómeno está sucediendo. Más aún, algunos lo consideran inexistente, argumentando que las variaciones que ocurren a lo largo del tiempo en las condiciones climáticas son procesos naturales que han ocurrido durante cientos de miles de años. Peor todavía, ciertos grupos de la sociedad lo niegan rotundamente, considerándolo un engaño por parte de algunos sectores científicos y académicos, con el objeto de justificar proyectos de investigación que de otra manera no tendrían asidero empírico. A esto se agrega el cabildeo realizado por numerosas empresas multinacionales relacionadas con la energía fósil, las cuales ven amenazadas sus ganancias y su hegemonía, ante los argumentos y directrices que ofrecen los defensores del cambio climático –en relación con la imperiosa necesidad de implantar la generación de energías renovables– como única opción para reducir o detener el incremento de las temperaturas en el globo, la acidificación de los océanos, el derretimiento de los casquetes polares y la nefastas consecuencias que estos procesos tendrían sobre la biodiversidad y la vida misma en la Tierra.

1.1 La ciencia y la tecnología del cambio climático

Los avances de la ciencia nos han permitido conocer con gran detalle, en la mayoría de los casos, todos los factores ecológicos naturales, incluyendo la génesis, rasgos característicos y procesos dinámicos que determinan el cambio climático. Algunos de los procesos determinantes explicados por la ciencia incluyen:

- Los fenómenos de la órbita terrestre y sus oscilaciones cíclicas, incluyendo la excentricidad, precesión e inclinación del eje de rotación del planeta (ciclos de Milankovitch).
- La radiación solar y sus fluctuaciones debidas a latitud, altitud y condiciones de la atmósfera (transparencia o turbidez), así como de la aparición periódica de las manchas solares cada 11 años.
- Los gradientes de temperatura y el ciclo del H₂O a través del océano, atmósfera y ecosistemas terrestres.
- La configuración y características de las masas continentales y su dinámica (tectónica de placas y vulcanismo).
- Los flujos de energía y reciclaje de materia que mantiene en funcionamiento la vida en los ecosistemas (cadenas tróficas e interacciones intra e interespecíficas).
- El efecto invernadero, fenómeno que hace posible la existencia de una atmósfera con una temperatura adecuada para la vida, está sufriendo graves alteraciones causadas por la creciente emisión de CO₂ y otros gases desde hace 250 años, modificando la composición de la atmósfera y al mismo tiempo atrapando la radiación infrarroja y provocando el incremento progresivo de la temperatura atmosférica. El resultado final es lo que conocemos como *cambio climático*.
- La actividad antropogénica, cuya intensidad se ha magnificado en los últimos 70 años, la cual es responsable de:
 - ✓ las alteraciones de los ciclos naturales de energía, debido al uso desmedido de energía fósil y la consecuente emisión de gases de efecto invernadero,
 - ✓ la implantación de los agroecosistemas (agricultura),
 - ✓ la transformación de materiales y recursos, que luego se convierten en residuos contaminantes y polución ambiental,
 - ✓ la transformación y fragmentación de hábitats, y
 - ✓ el continuo crecimiento de los centros urbanos.
- El ciclo biogeoquímico del carbono ha sido lo suficientemente estudiado, determinándose la dinámica, el balance y los depósitos o sumideros que funcionan en su tránsito permanente a través de la biósfera. Como componente esencial de las moléculas orgánicas

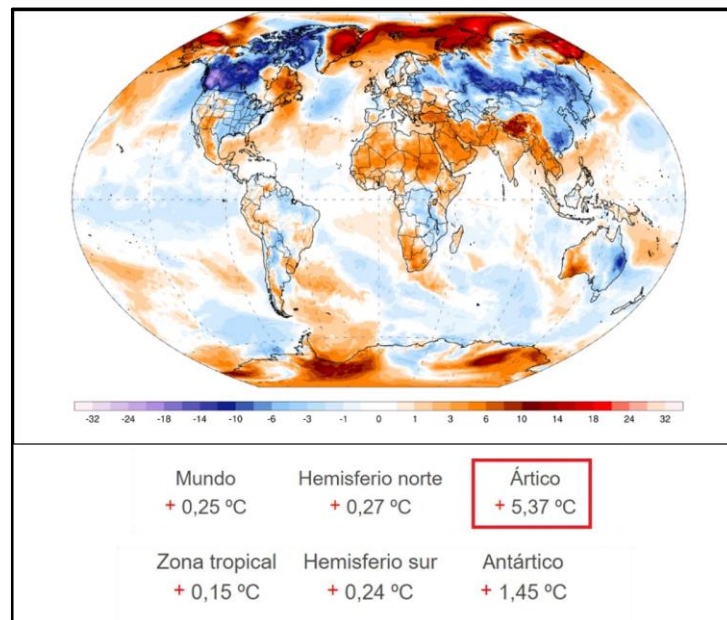
y de la vida, el carbono determina el funcionamiento del resto de los ciclos biogeoquímicos, especialmente el nitrógeno, y se acumula en el suelo (como materia orgánica), en la biomasa (especialmente los bosques) y en los océanos (tanto por la fotosíntesis como en los depósitos sedimentarios en el fondo).

Todos estos aspectos han sido ampliamente estudiados y analizados por los científicos y académicos en sus diferentes escalas espacio-temporales, utilizando la información científica disponible y mediante sofisticados modelos de computación, cuya interpretación permite integrar conocimientos y tendencias para simular la realidad y poder hacer alertas, previsiones, proyecciones (que no predicciones) prospectivas y retrospectivas, relacionadas con el sistema climático, con un alto grado de precisión y exactitud.

Por ejemplo, la Figura 1 muestra las variaciones anómalas de la temperatura (por encima de los valores promedio anuales a dos metros por encima del nivel del suelo).

Figura 1.

Anomalías previstas de la temperatura del aire a 2 m. frías/cálidas en tonalidades azules/rojas, respectivamente, a fecha de 1 de diciembre de 2022 en grandes zonas terrestres



Fuente: ClimateReanalyzer.org¹

¹ https://climatereanalyzer.org/reanalysis/monthly_maps/

Aun cuando las técnicas y métodos de modelaje a través de la simulación y la construcción de escenarios demuestran ser útiles en el estudio del clima, cada uno es elaborado bajo premisas específicas y con objetivos particulares, lo que dificulta la integración y explicación de los complejos procesos y variables que determinan el clima. Empero, los avances computacionales y el manejo integral de grandes cantidades de datos están logrando una integración y conciliación cada vez mayor entre las diversas metodologías e instituciones que se dedican al modelaje y la proyección del clima.

Al mismo tiempo, los avances de la ecología y sus numerosas disciplinas, han caracterizado los componentes bióticos, abióticos y sus interacciones que conforman el ecosistema, así como las variaciones o cambios que ocurren en el tiempo y en el espacio. Por ejemplo, las variaciones en las densidades de población, en los hábitats, las migraciones, e incluso las extinciones de las especies que componen la biodiversidad, constituyen elementos de análisis que se incorporan a los modelos de predicción del sistema climático, permitiendo llegar a conclusiones cada vez más precisas acerca del estado de salud o deterioro de los ecosistemas y ecorregiones, producto de las fluctuaciones del clima.

1.2 Implicaciones para la ecología humana y social

Pero por encima de todo esto, están los efectos producidos por la inmensa población de seres humanos (~8.100 millones al 31/04/2023)² que utilizan los recursos naturales bióticos y abióticos que proveen los ecosistemas. Al utilizarlos, modifican y alteran sus procesos, incluso hasta llegar a su completa degradación o agotamiento, acelerando los cambios naturales en los ciclos biogeoquímicos de los ecosistemas. Este efecto antropogénico es el que ha determinado en gran medida los desencadenantes de los cambios en el sistema climático global. Sin embargo, los seres humanos, en la generalidad de los casos –incluyendo los políticos y economistas, e incluso algunos científicos, interesados en el tema–, no son capaces de internalizar fácil y rápidamente el grave problema que implica su estilo de vida y sus acciones para los ecosistemas y, consecuentemente, para el cambio climático. Las razones para esta situación, según Urbina (2006), incluyen:

- La baja visibilidad del cambio global.
- La extrema dilación en evidenciarse la relación causa-efecto.

² <https://www.un.org/es/global-issues/population>

- La psicofísica de los eventos de baja probabilidad.
- La distancia social entre actores y víctimas del cambio ambiental.
- El bajo índice subjetivo de costo/efectividad de la conducta protectora del ambiente.

De la revisión de los diversos autores que han abordado la dimensión psicosocial del cambio climático, se desprende que nuestro comportamiento frente al cambio climático se basa en la forma cómo percibimos el fenómeno y las teorías y predicciones acerca de la realidad. La percepción representa el proceso psicológico por el que la gente reúne información del medio y le da sentido a su mundo, un aspecto de la individualidad del ser humano, de por sí complejo y cambiante, que desde el punto de vista de la ecología humana tiene grandes implicaciones en las estrategias y acciones que se plantean ante el problema del cambio climático. En algunas sociedades del primer mundo se ha desarrollado progresivamente un cierto nivel de conciencia del problema global del cambio climático, aun cuando el nivel de comprensión científica es escaso. En la mayor parte del mundo, sin embargo, el nivel de conciencia acerca del tema es mucho menor.

1.3 La percepción y conciencia acerca del cambio climático

En relación con la comprensión del público acerca de la ciencia relacionada con el cambio climático, Whitmarsh (2009) señala la creciente conciencia acerca del cambio climático y el efecto invernadero, a un grado tal que sólo 1% del público desconoce estos términos o no ha oído hablar de ellos. Similarmente, parece existir conciencia de las causas antropogénicas y su impacto sobre el clima, siendo capaces de identificar espontáneamente factores tales como la destrucción de los bosques y las emisiones de carbono por el transporte y las plantas generadoras de electricidad como contribuyentes del cambio climático. Sin embargo, existen diferencias cualitativas y cuantitativas en la percepción de los conceptos “cambio climático” y “calentamiento global”, destacando una mayor preocupación por el calentamiento global, aun cuando existen concepciones erradas acerca del mismo. Por ejemplo, la destrucción de los bosques se asocia más con la provisión de oxígeno que con las emisiones de CO₂.

El impacto del problema del cambio climático es percibido mayormente en el ámbito global, en comparación con los impactos en el nivel local o individual. Ello puede explicarse por el uso indiscriminado e inconsistente de ambos términos como sinónimos en la divulgación científica que realiza la prensa en general (periódicos, radio, TV, medios sociales), así como por la divulgación de visiones y opiniones, algunas veces segadas, orientadas a enmarcar el problema en función de intereses particulares. Al respecto, Hansen *et al.* (2012) consideran que, ante las

evidentes variaciones de la temperatura que experimentan comunidades e individuos y que dejan evidencias tangibles –como las muertes ocurridas por las intensas olas de calor o de frío ocurridas en los últimos 10 años–, es sólo recientemente que hay un creciente interés y preocupación ciudadana por los impactos del cambio climático. De allí la importancia de reorientar y enmarcar el tratamiento que se le da a este problema en los medios masivos, de manera de desarrollar una percepción adecuada y suficientemente informada acerca de lo trascendental de las consecuencias del cambio climático.

Sirva como ejemplo el estudio de Han y Ahn (2020), quienes abordaron la comprensión y las respuestas de un grupo de jóvenes activistas al cambio climático. Con base en discursos, documentos y sitios web de jóvenes activistas, entre ellos Greta Thunberg y sus asociados en Europa, los autores identificaron a los personajes de la narrativa del cambio climático como '*héroes, villanos y víctimas*'. Las víctimas son la Tierra, el ecosistema, las generaciones más jóvenes, los grupos marginados y los estados débiles; los héroes se refirieron a las generaciones más jóvenes, la ciencia del clima y los estados reformados; los villanos son las generaciones mayores, los medios de comunicación, la industria de los combustibles fósiles y los estados soberanos.

Un amplio estudio de los adultos estadounidenses (n=1.540), realizado por Kahan *et al.* (2011), encontró que la mayoría de los sujetos más educados, aritmética y científicamente, eran menos probables de ver el cambio climático como una amenaza, en comparación con los menos educados. Más importante aún, una mayor cultura científica y matemática se asoció con una mayor polarización cultural: los encuestados predispuestos por sus valores a desestimar la evidencia del cambio climático fueron más despectivos, y aquellos predispuestos por sus valores a dar crédito a la evidencia se mostraron más interesados, en la medida que aumentó la alfabetización de la ciencia y las matemáticas. Los autores sugieren que esta prueba refleja un conflicto entre dos niveles de racionalidad: el nivel individual, que se caracteriza por el uso eficaz de los ciudadanos de sus conocimientos y capacidades de razonamiento para formar una percepción de riesgo que expresan sus compromisos culturales; y el nivel colectivo, que se caracteriza por la insuficiencia de los ciudadanos a converger en la mejor evidencia científica disponible sobre la manera de promover su bienestar común.

Acabar con esta "Tragedia de los comunes"³ en la percepción del riesgo, debe entenderse como el objetivo central de la ciencia de la comunicación y la divulgación científica. Otro estudio relacionado con el anterior (Kahan *et al.* 2012) encontró que los miembros del público con los grados más altos de alfabetización científica y capacidad de razonamiento técnico no eran los más preocupados por el cambio climático. Más bien, eran aquellos entre quienes la polarización cultural era mayor. Estos resultados sugieren que las controversias públicas sobre el cambio climático no se derivan de la incompreensión de la ciencia por parte del público, sino de un conflicto de intereses distintivo: entre el interés personal que tienen los individuos en formarse creencias en línea con las de otros con quienes comparten vínculos estrechos; y el interés colectivo, uno que todos comparten al hacer uso de la mejor ciencia disponible para promover el bienestar común.

En los años recientes, se ha desarrollado una explicación convencional para la controversia sobre el cambio climático, que pone de relieve los obstáculos a la comprensión del público: un conocimiento limitado de la ciencia popularizada a través de los medios, la incapacidad de los ciudadanos comunes para evaluar la información técnica, y el uso generalizado de la heurística cognitiva resultante, no confiable para evaluar el riesgo. Petrescu-Mag *et al.* (2022), al analizar dos grupos (de Bélgica y de Rumania) evidenció similitudes y diferencias de puntos de vista entre los dos grupos de participantes con respecto a seis temas de cambio climático. Surgieron percepciones divergentes entre belgas y rumanos, por ejemplo, dentro del tema "Los héroes, villanos y víctimas del cambio climático". Así, mientras que los belgas consideraban a todas las personas, incluidos ellos mismos, responsables del cambio climático, los rumanos culpaban principalmente a otros, como las grandes empresas, los gobiernos y los consumidores. Además, ambos grupos afirmaron que el cambio climático existía, pero a diferencia de los belgas, los rumanos expresaron que el cambio climático se usaba a menudo como un tema exagerado y politizado. El análisis resalta que las percepciones sobre las causas y los impactos del cambio climático son construcciones sociales con un alto grado de variabilidad entre y dentro de los diferentes grupos y países.

³ La **Tragedia de los comunes** (en inglés *Tragedy of the commons*) es un dilema metafórico descrito por Garrett Hardin en 1968, y publicado en la revista *Science* (v.162:1243-1248), que describe una situación en la cual varios individuos, motivados sólo por el interés personal y actuando independiente pero racionalmente, terminan por destruir un recurso compartido limitado (el común) aunque a ninguno de ellos, ya sea como individuos o en conjunto, les convenga que tal destrucción suceda.

Muy recientemente, el Fondo Monetario Internacional (Dabla-Norris *et al.*, 2023) publicó los resultados de una encuesta a más de 30.000 informantes alrededor del mundo, en la cual una abrumadora mayoría del público ve el cambio climático como una amenaza inmediata y reconoce que la reducción de emisiones es una prioridad máxima. Desafortunadamente, muchas personas dicen que ya están siendo afectadas directamente por el cambio climático, incluso en la región de Asia y el Pacífico, lo que denota la urgencia de este desafío. Adicionalmente, el cambio climático es un objetivo común que solo se puede lograr si todos los países trabajan juntos. La encuesta muestra también que existen grandes lagunas en el conocimiento y el apoyo del público a las políticas clave. Y en muchos países, una gran parte de la población desconoce los compromisos nacionales para reducir las emisiones que han asumido los gobiernos respectivos.

1.4 La agenda política alrededor del cambio climático

La relevancia e impacto del cambio climático ha generado igualmente una agenda política en todos los ámbitos (regional, nacional y global), con activa participación de los organismos multilaterales y no gubernamentales, además de los gobiernos nacionales. Dicha agenda, a menudo heterogénea, incluye tanto las visiones y opiniones basadas en el consenso científico actual (el cual analizaremos más adelante), adelantado con gran éxito por el IPCC⁴, como la de los escépticos que, por diversas causas, cuestionan tal consenso y consideran que el cambio climático no existe ni representa una amenaza para la humanidad.

Dentro del conjunto de organismos multilaterales, no gubernamentales y gobiernos nacionales se discute intensamente y se intenta conciliar las opiniones y hallazgos científicos y técnicos con las realidades ecológicas, económicas, sociales y políticas imperantes en cada nación y/o región, emergiendo una política del cambio climático que, hasta la fecha, y desde hace 20 años, no termina de definirse, mucho menos aplicarse.

En los últimos 70 años se han establecido casi un centenar de acuerdos o convenios internacionales multilaterales relacionados con el medio ambiente, siendo la *Convención Marco sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas – CMUNCC* (UNFCC, por sus siglas en inglés) establecida en 1992 y vigente desde 1994, uno de los más importantes y significativos. El objetivo final de esta Convención y cualquier otro instrumento jurídico relacionado que la Conferencia de

⁴ El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) se creó en la asamblea general de las Naciones Unidas en diciembre de 1988, cuya tarea inicial fue preparar una revisión integral y recomendaciones con respecto al estado del conocimiento de la ciencia del cambio climático y su impacto social y económico

las Partes pueda adoptar es lograr, de conformidad con las disposiciones pertinentes de la Convención, la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático⁵.

Ese nivel debe alcanzarse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, para garantizar que la producción de alimentos no se vea amenazada y para permitir que el desarrollo económico avance de manera sostenible.

—0—

En este libro se tratarán diversos temas relacionados con el sistema climático y los cambios, algunas veces abruptos, que están teniendo lugar en la biósfera. De manera especial se describirá sucintamente un panorama general del proceso, los conceptos científicos que subyacen desde los puntos de vista meteorológico, ecológico y ecosistémico, las visiones y controversias alrededor del fenómeno, sus relaciones con los sectores energía, biodiversidad, agua, agricultura, bosques y océanos. Se identifican también los mitos (argumentos infundados y negación de la evidencia científica) y realidades que han surgido sobre el tema en la comunicación y tratamiento en los medios de comunicación masiva (periódicos, TV, radio, internet). De la misma manera, se analiza el impacto del cambio climático en los principales aspectos relacionados con los recursos naturales y los ecosistemas. Al final se tratan las implicaciones sociales y económicas de las políticas relacionadas con el cambio climático.

⁵ De acuerdo con el texto del convenio marco:

https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/conveng.pdf

CAPÍTULO 2: EL ORIGEN Y LOS MITOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

2.1 La génesis del cambio climático

La ciencia ha demostrado que el cambio climático se origina debido a una alteración en el funcionamiento del efecto invernadero que ocurre naturalmente en el planeta, resultado del aumento de las concentraciones de la cantidad y variedad de algunos de los gases que componen la atmósfera. La atmósfera es una mezcla de varios gases y aerosoles (partículas sólidas y líquidas en suspensión). Su composición es sorprendentemente homogénea, resultado de procesos de mezcla que en ella ocurren. 50% de la masa de la atmósfera está concentrado por debajo de los cinco kilómetros sobre el nivel del mar y donde predominan dos gases: el nitrógeno (78%) y el oxígeno (21%). De manera natural, la atmósfera contiene pequeñas cantidades de otros gases, entre los que se encuentran el argón, el helio, y algunos gases de efecto invernadero, como el vapor de agua (0,7%), dióxido de carbono (0,035%), metano (0,00015%), óxido nitroso (0,0000016%) y otros compuestos fluorados. Las alteraciones provocadas por el intenso crecimiento industrial, el cambio de uso de la tierra, la contaminación y la inacción político-económica hasta ahora evidente, exacerbaban la magnitud del cambio experimentado en el efecto invernadero.

2.2 El efecto invernadero

En la década de 1850, el físico irlandés John Tyndall fue el primero en demostrar el efecto invernadero, al demostrar que el vapor de agua y otros gases atmosféricos absorbían el calor radiante de la Tierra. Luego, en 1896, el científico sueco Svante Arrhenius fue el primero en calcular el poder de calentamiento del exceso de dióxido de carbono (CO₂). De sus cálculos, Arrhenius predijo que si las actividades humanas aumentaban los niveles de CO₂ en la atmósfera se produciría una tendencia al calentamiento (NRC, 2010).

El efecto invernadero es un fenómeno atmosférico natural mediante el cual se mantiene la temperatura del planeta dentro de un rango específico que permite el desarrollo de la vida, al retener parte de la energía proveniente del Sol. Como hemos señalado antes, la Tierra recibe de forma permanente un flujo energía en la forma de rayos solares; una parte de esos rayos son reflejados al espacio por las nubes, pero la mayor parte de estas ondas luminosas alcanzan

la superficie terrestre. La energía recibida del Sol calienta la superficie de la Tierra y los océanos. A su vez, la superficie de la Tierra emite su energía de vuelta hacia la atmósfera y hacia el espacio exterior en forma de ondas térmicas conocidas como radiación de onda larga (radiación infrarroja).

Sin embargo, no toda la energía liberada por la Tierra es devuelta al espacio; parte de ella queda atrapada en la atmósfera, debido a la existencia de ciertos gases, denominados gases de efecto invernadero (GEI), que tienen la propiedad de absorber y reemitir la radiación proveniente de la superficie de la Tierra. Los GEI atrapan el calor emitido por la Tierra y lo mantienen dentro de la atmósfera, actuando a modo de un "gigantesco invernadero". A este fenómeno se le conoce como efecto Invernadero (Figura 2). Debe acotarse que sin los GEI la Tierra sería demasiado fría para albergar la vida (Royal Society, 2015).

Como puede observarse en la Figura 2, no todo el calor que es absorbido por el efecto invernadero se mantiene en la atmósfera, sino que una parte regresa al espacio exterior. El clima terrestre depende, precisamente, del balance energético entre la radiación solar y la radiación emitida por la Tierra. Los gases de efecto invernadero son, como ya se ha reiterado, claves en este proceso.

Figura 2.

Representación esquemática del efecto invernadero



Fuente: UNEP (2009).

La intensidad del efecto invernadero depende, en gran medida, de las características de la atmósfera que permite y/o impide el paso de la energía radiante y por las formas en las que se presenta la energía. El efecto invernadero se da en cualquier planeta o satélite natural que tenga atmósfera. Si la Tierra no tuviera atmósfera, sería 33°C más fría, o sea, un planeta helado.

Analógicamente, en un invernadero se tiene una superficie envolvente transparente que permite el paso de la radiación solar, pero que impide que el calor producido por esa radiación salga rápidamente del interior. Esto da lugar a que se acumule el calor y que suba la temperatura del espacio interior. Para efectos de entender este fenómeno en nuestro planeta, esa superficie es, precisamente, la atmósfera. En ella, los rayos provenientes del sol son absorbidos por las diferentes partes del sistema climático: la propia atmósfera, los océanos, las zonas glaciares, los suelos y varias formas de vida. También, a través de la atmósfera, un porcentaje del calor absorbido es reflejado de regreso al espacio exterior.

El clima terrestre depende, precisamente, del balance energético entre la radiación solar recibida y la radiación térmica emitida por la Tierra. Las manifestaciones del flujo de energía en la atmósfera son las manifestaciones del clima: temperatura, lluvias, tormentas y vientos.

2.3 Los gases de efecto invernadero (GEI)

De acuerdo con la *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* (CMNUCC), se entiende por gases de efecto invernadero "*aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropogénicos (de origen humano), que absorben y reemiten radiación infrarroja*" (Artículo 1 de la CMNUCC, 1992).

Debido a que los GEI tienen la capacidad de retener el calor emitido por la superficie terrestre, actúan a manera de un gigantesco invernadero que mantiene y regula la temperatura en la Tierra. Aunque solo representan 1% de la composición atmosférica, cumplen funciones primordiales, ya que sin su existencia la Tierra sería demasiado fría para albergar la vida (IPCC, 2007; UNEP, 2009; Royal Society, 2015).

Los gases de efecto invernadero son:

- Vapor de agua (H₂O)
- Dióxido de carbono (CO₂)

- Metano (CH₄)
- Óxido nitroso (N₂O)
- Ozono (O₃)

Por su parte, además de los mencionados, los GEI generados por las actividades humanas son:

- Perfluorometano (CF₄) y perfluoroetano (C₂F₆)
- Hidrofluorocarbonos (HFC-23, HFCS-134a, HFC-152a)
- Hexafluoruro de azufre (SF₆)

Existen otros gases que, además de destruir la capa de ozono, también tienen la capacidad de retener el calor emitido por la Tierra. Tales gases son:

- Clorofluorocarbonos (CFC-11, CFC-12, CFC-113, CFC-114, etc.)
- Halones (Halon-1211, Halon-1301, Halon-2402, Halon-1202)
- Clorocarbonos: bromuro de metilo (CH₃Br), tetracloruro de carbono (CCl₄) metil cloroformo (CH₃CCl₃)
- Hidroclorofluorocarbonos (HCFC-22, HCFC-141b)

Estos gases tienen diferentes potenciales de retención de calor; es decir, algunos tienen una mayor capacidad que otros para detener la radiación de onda larga emitida por la Tierra. A dicha capacidad se le ha llamado potencial de calentamiento global. El potencial de calentamiento global de un GEI depende de su estructura molecular y de su tiempo de residencia en la atmósfera, antes de ser transformado en otro compuesto (IPCC, 2007; UNEP, 2009; Royal Society, 2015).

Vapor de agua. Es el mayor contribuyente al efecto invernadero natural y es el que está más directamente vinculado al clima y a la vez, el menos controlado por la actividad humana, pues está determinado por el ciclo global del agua en la biósfera. Por el contrario, las concentraciones de los demás gases están sujetas a la influencia fuerte y directa de las emisiones asociadas con la quema de combustibles fósiles y las actividades forestales, agrícolas e industriales.

Dióxido de carbono. El dióxido de carbono (CO₂) es el principal gas de efecto invernadero de larga duración en la atmósfera. Su concentración alcanzó 405,5 ppm en 2017, y de 423,3 ppm⁶

⁶ De acuerdo con: UNEP. World Environment Situation Room: Data, Information and Knowledge on the Environment. <https://data.unep.org/climate/>

en 2023, lo cual representa un incremento superior a 150% sobre su nivel en la era preindustrial (UNEP, 2023). Las emisiones de CO₂ para 2021, excluyendo las causadas por el uso y el cambio de uso de la tierra, se han estimado preliminarmente en 52,8 GtCO₂e, un ligero aumento en comparación con 2019, lo que sugiere que las emisiones globales totales de GEI en 2021 serán similares o incluso superarán los niveles récord de 2019 (UNEP, 2022)

Metano. El metano (CH₄) es el segundo gas de efecto invernadero de larga duración más importante y contribuye en más o menos un 17% al forzamiento radiativo⁷. Cerca de 40% del metano que se emite a la atmósfera procede de fuentes naturales (por ejemplo, fondo del océano, humedales y termitas), mientras que aproximadamente 60% proviene de actividades humanas como la ganadería de rumiantes, el cultivo de arroz, la explotación de combustibles fósiles, los vertederos y la combustión de biomasa. El CH₄ atmosférico alcanzó en 2019 un nuevo máximo de unas 1.877 ± 2 ppb⁸, por lo que se sitúa actualmente en el 260% de su nivel preindustrial (OMM, 2020). Existen fuentes naturales de metano en algunas zonas del fondo de los océanos y por el derretimiento del permafrost en las regiones circumpolares, así como fuentes antropogénicas que incluyen la agricultura (40%), combustibles fósiles (35%), desperdicios orgánicos en la basura (20%) y la obtención y uso de biocombustibles (5%). El gas tiene un potencial de calentamiento global de más de 80 veces superior al del dióxido de carbono en un horizonte de 20 años, y contribuye con 31% del impacto de calentamiento neto de la mezcla de emisiones de todos los gases de efecto invernadero. Las emisiones antropogénicas de metano representan un 60% de las emisiones totales de metano. Sin embargo, el metano tiene un tiempo más corto de vida en la atmósfera que el dióxido de carbono: sólo doce años, en comparación con varios cientos de años del CO₂.

Óxido nitroso. Las emisiones de óxido nitroso (N₂O) a la atmósfera provienen de fuentes naturales (en torno a 60%) y de fuentes antropogénicas (40%), incluidos los océanos, los suelos, la quema de biomasa, el uso de fertilizantes y diversos procesos industriales

⁷ Forzamiento radiativo: el cambio en el flujo neto, positivo o negativo, radiativo (expresado en W m⁻²) debido a un cambio en un impulsor externo del cambio climático, como un cambio en la concentración de dióxido de carbono (CO₂), la concentración de aerosoles o la salida del sol, contribuyendo así con el aumento o disminución de la temperatura promedio superficial mundial.

⁸ PPB: partes por billón, o partes por mil millones.

En 2017 su concentración atmosférica fue de 329,9 partes por mil millones, es decir, un 122% de su nivel en la era preindustrial. Este gas también contribuye significativamente con la destrucción de la capa de ozono estratosférico que nos protege de los rayos ultravioleta nocivos del Sol. Es el causante de un 6 % del forzamiento radiativo provocado por los gases de efecto invernadero de larga duración.

Los científicos han identificado el potencial de calentamiento global que tienen diversos gases, o la medida en que éstos tienen impactos en el efecto invernadero que provoca el cambio climático. Para establecer este potencial, se utiliza el CO₂ como referencia para el análisis, el gas predominante en el efecto invernadero (IPCC, 2007; UNEP, 2009; Royal Society, 2015).

En este contexto, el potencial de calentamiento global considera el tiempo de vida en la atmósfera de los gases que se estudian, contemplando un horizonte de tiempo de 20, 100 y 500 años, en función de los efectos directos o indirectos que pudiese tener un gas determinado en el calentamiento global de la atmósfera.

El carácter directo o indirecto de un gas de efecto invernadero se da por el hecho de que influya directamente en ocasionar el fenómeno o porque afecta el tiempo que otros gases permanecen en la atmósfera. El Cuadro 1 muestra los gases de efecto invernadero que han sido identificados como causantes del fenómeno, sus potenciales de calentamiento global en 20, 100 y 500 años y su tiempo de vida en la atmósfera.

También existen los GEI indirectos, porque tienen la capacidad de influir en la concentración atmosférica de otros gases de efecto invernadero. Estos gases son:

- *Óxidos de nitrógeno (NO_x)*. Este es un gas producto, principalmente, de la combustión.
- *Monóxido de carbono (CO)*. Este es un gas producto, en su mayor proporción, de la combustión.
- *Dióxido de azufre*. Este es un gas producto, principalmente, de la combustión de combustibles con alto contenido de azufre.
- *Compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COVNM)*.

Tabla 1.

Potenciales de calentamiento global (en una base másica) en relación con el dióxido de carbono para algunos gases cuyas vidas medias han sido bien caracterizadas

Gas	Vida Media (Años)	Potencial de Calentamiento Global Horizonte Temporal		
		20 años	100 años	500 años
Bióxido de carbono CO ₂		1	1	1
Metano CH ₄	12	72	25	7,6
Óxido Nitroso N ₂ O	114	289	298	153
CFC-12 CCl ₂ F ₂	100	11,02	10,9	5,2
-22 CHClF ₂	12	5,160	1,810	549

Fuente: IPCC (2007).

Todos estos gases, aunque sólo representan 1% de la composición atmosférica, cumplen funciones primordiales, ya que sin su existencia la Tierra sería demasiado fría para albergar la vida.

2.4 La importancia del dióxido de carbono

Aunque el CO₂ apenas representa una pequeña fracción del volumen de la atmósfera (0,0035%), es el gas más importante dentro de los GEI. El CO₂ es una de las varias formas que adquiere el carbono en el ciclo que tiene lugar continuamente en la biósfera (ciclo del carbono) y tiene que ver con los procesos de la vida en el planeta, ya que éste es permanentemente asimilado y liberado por los seres vivos. El problema es que la actividad humana ha alterado el ciclo del carbono al reducir la capacidad de absorción del mismo (al eliminar los bosques) y al liberar a la atmósfera una gran cantidad de este compuesto, acumulado por miles de años en los yacimientos de hidrocarburos, debido al consumo de energía fósil.

El carbono existe generalmente combinado con otros elementos y puede ubicarse en estado sólido, líquido y gaseoso. Es un elemento que se combina preferentemente con el oxígeno, el nitrógeno, el azufre, el fósforo y el hidrógeno y forma parte todos los compuestos orgánicos. Un ejemplo de esto son los hidrocarburos, un conjunto de compuestos orgánicos que contienen principalmente carbono e hidrógeno. Son los compuestos orgánicos más simples y son considerados como las sustancias principales de las que se derivan todos los

demás compuestos orgánicos. Los hidrocarburos más simples son gaseosos a la temperatura ambiente, pero a medida que aumenta su peso molecular se vuelven líquidos y finalmente sólidos. Sus tres estados físicos están representados por el gas natural, el petróleo crudo y el asfalto.

Al quemar carbón, leña o combustibles, una parte del carbono contenido en ellos reacciona y forma dióxido de carbono, que se libera a la atmósfera, donde permanece hasta ser asimilado de nuevo por medio de la fotosíntesis o absorbido por los ecosistemas acuáticos y terrestres. Es decir, el carbono se encuentra en constante circulación a través de la biósfera (OMM, 2020). Sin embargo, las crecientes emisiones a lo largo de los últimos 70 años han creado un desbalance en dicha circulación, y aunque la biomasa y el océano absorben buena parte del exceso, su acumulación en la atmósfera ha crecido sustancialmente, hasta los 423 ppm en la actualidad (UNEP, 2022).

Tal es el impacto que ha tenido el CO₂ en el ámbito científico relacionado con el cambio climático, que se acuñó el término “huella de carbono” para referirse al mismo en la jerga profesional. La huella de carbono es un indicador del total de emisiones de CO₂ generadas de forma directa e indirecta por una actividad o que son acumuladas durante el ciclo de vida de un producto o servicio (Wiedmann & Minx, 2008). El concepto nació entre los movimientos ambientalistas europeos que perseguían el objetivo del consumo preferencial de alimentos de orígenes locales, ya que estos no incluían las emisiones generadas en el transporte dentro de su ciclo de vida; logrando que el término se expandiera entre los distribuidores de alimentos y hacia el resto de los sectores interesados en la contaminación con GEI. La Huella de Carbono es considerada una de las más importantes herramientas para cuantificar las emisiones de gases efecto invernadero y en forma muy general, representa la cantidad de gases efecto invernadero emitidos a la atmósfera derivados de las actividades de producción o consumo de bienes y servicios (Espíndola y Valderrama, 2012).

2.5 Las emisiones de gases de efecto invernadero

Como se evidenciará más adelante, la actividad humana ha alterado el volumen y la proporción de los gases de efecto invernadero en la atmósfera. En particular, el volumen de estos gases ha ido aumentando cada vez de manera más acelerada y, consecuentemente, sus efectos. Esta situación no responde únicamente a procesos naturales, sino más bien a formas de organización social y productiva de la sociedad humana. Estos aumentos han ocasionado que

un fenómeno benéfico para la vida –como lo es el efecto invernadero–, se torne en una amenaza global, en un tema de preocupación para los científicos, los políticos y para la sociedad que se encuentra expuesta a las consecuencias de un cambio global en el clima.

Debido a la relación entre los gases de efecto invernadero y el cambio climático, es importante identificar los sectores emisores de dichos gases y las cantidades que liberan. Lo anterior permite conocer los sectores con mayor influencia en la emisión de gases de efecto invernadero, y teóricamente, sirve de base para el diseño de políticas y acciones de captura o reducción de emisiones.

Estudios desarrollados por investigadores alrededor del mundo permiten identificar las fuentes de origen humano de los gases de efecto invernadero. Las fuentes de CO₂ y N son:

- El uso industrial y doméstico de combustibles que contienen carbono (petróleo, carbón, gas natural y leña),
- La deforestación que provoca la descomposición de la materia orgánica, y
- La quema de la biomasa vegetal.

En el caso del metano, los emisores principales son las actividades agropecuarias, el uso de gas natural, los rellenos sanitarios, el aumento del rebaño ganadero, la quema de la biomasa vegetal y, más recientemente, el *fracking* para la extracción de petróleo y gas.

Sin embargo, el uso indiscriminado e ineficiente de los combustibles es el principal generador de la tendencia incremental en las emisiones de gases de efecto invernadero. Unas tres cuartas partes de las emisiones antropogénicas de CO₂ en la atmósfera durante los últimos 70 años se deben a la quema de combustibles de origen fósil. El resto se debe principalmente a cambios en el uso de la tierra, especialmente la deforestación.

Las emisiones de gases de efecto invernadero se discriminan en seis categorías, contempladas por el Protocolo de Kioto:

- Energía (Consumo de combustibles fósiles y emisiones fugitivas de metano)
- Procesos Industriales (generación de energía eléctrica, procesamiento y manufactura de productos agroindustriales y de consumo)
- Solventes
- Agricultura

- Uso de suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura
- Desechos y otros contaminantes.

2.6 El aumento en las concentraciones de los gases de efecto invernadero en la atmósfera

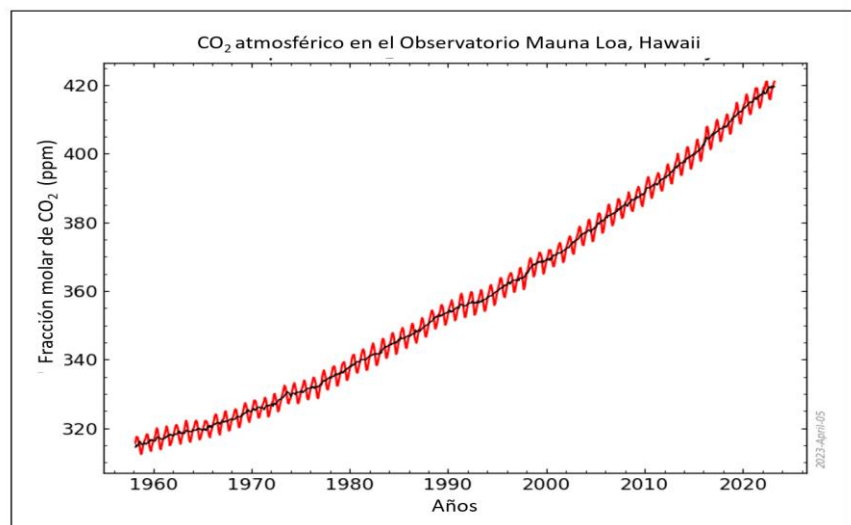
Las investigaciones sobre las concentraciones de gases en la atmósfera han revelado que las cantidades de los gases precursores del efecto invernadero, especialmente el dióxido de carbono, han aumentado progresivamente (Figura 3).

El uso masivo de combustibles fósiles y la intensidad de los procesos industriales han ocasionado, tan sólo durante el siglo XX, mayores concentraciones de gases efecto invernadero en la atmósfera, aunado a la quema de grandes porciones de bosques y vegetación para ampliar las tierras de cultivo. Las actividades humanas resultan en emisiones de cuatro de los principales gases de efecto invernadero: CO₂, CH₄, N₂O y los halocarburos.

El CO₂ ha aumentado globalmente alrededor de 130 ppm (partes por millón) en los últimos 250 años, de un rango de 275 a 285 ppm en la era preindustrial (1000-1750 d.C.) a 423 en la actualidad. El CO₂ ha aumentado por la utilización de los combustibles fósiles en la generación de electricidad, calefacción y aires acondicionados para viviendas, así como por los procesos industriales, incluida la producción de cemento y otros bienes. Asimismo, la deforestación libera CO₂ y reduce su absorción por las plantas.

Figura 3.

Concentraciones de gases de efecto invernadero del año 1958 al 2022

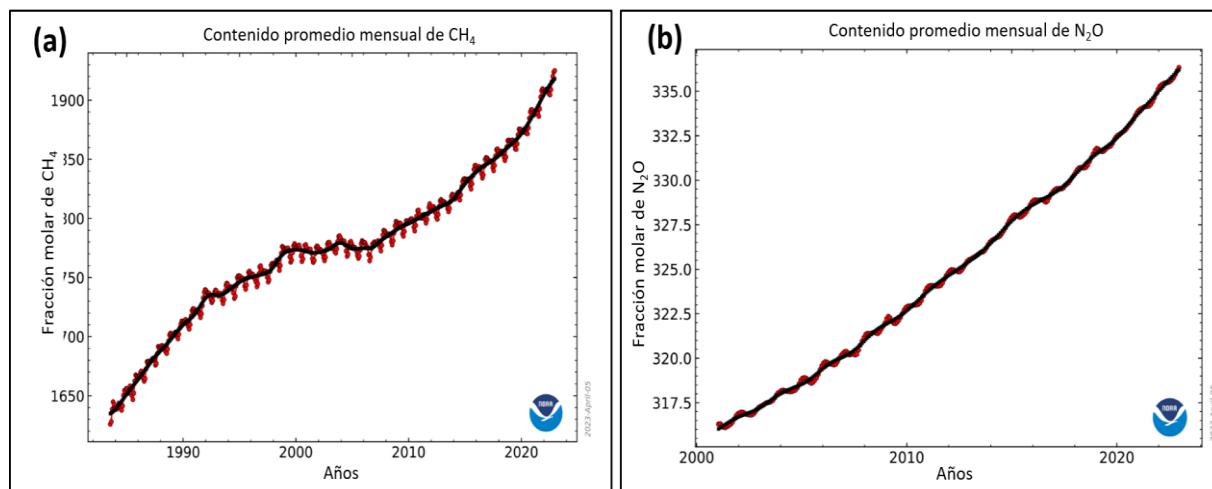


Fuente: IPCC (2021)

En la Figura 4a se puede observar el aumento significativo de **CH₄** como resultado de actividades humanas relacionadas con la agricultura y la ganadería, el gas natural y los rellenos sanitarios, aunque también es liberado por procesos naturales que ocurren, por ejemplo, en los pantanos y en los hidratos de metano en el fondo de los océanos. La cantidad de metano en la atmósfera se ha más que duplicado en los últimos 250 años. Ha sido responsable de aproximadamente una quinta parte del calentamiento global. Sin embargo, el aumento constante de las emisiones se detuvo en la década de 1990. Las emisiones se mantuvieron estables durante casi una década hasta 2007, pero luego se reanudó bruscamente su ascenso. Ello, probablemente debido a la fracturación de esquistos o fracking para la extracción de petróleo-gas y a la intensificación de la agricultura y la ganadería.

Figura 4.

Tendencia del total de emisiones de: (a) NH₄ y (b) N₂O durante el período 1995-2022.



Fuente: NOAA (2022)⁹

Aunque los procesos naturales en la biósfera liberan **N₂O**, las actividades humanas tales como el uso de fertilizantes químicos y la quema de combustibles fósiles, las industrias químicas, siderúrgica, petroquímica, aluminio y cemento, junto con la producción agropecuaria, generan altas cantidades de compuestos nitrogenados, generando un pronunciado incremento de N₂O en la atmósfera (Figura 4b).

⁹ <https://www.noaa.gov/news-release/greenhouse-gases-continued-to-increase-rapidly-in-2022>

Por su parte, Las concentraciones de **halocarbonos** se han incrementado principalmente por las actividades humanas, aunque los procesos naturales también son una fuente, aunque muy baja. Los halocarbonos incluyen los clorofluorocarbonos que son usados como agentes de refrigeración y otros procesos industriales, aunque su uso ha disminuido como resultado de negociaciones internacionales y regulaciones impuestas diseñadas para proteger la capa de ozono, mediante el Protocolo de Montreal de 1987¹⁰.

2.7 Visiones y controversias alrededor del Cambio Climático

En la abundante literatura académica y científica sobre el tema, se observa la consideración de las afirmaciones del IPCC con una actitud crítica y realista, interpretando –en sus análisis y elaboraciones– los hallazgos específicos que el informe detalla. En el ámbito de las organizaciones multilaterales que conforman la Organización de las Naciones Unidas, el apoyo al papel y vigencia de las conclusiones del IPCC es evidente. La ONU y la UNEP, en particular, están promoviendo la difusión masiva de información y conocimientos atinentes al problema, a través de consorcios y alianzas con diversas organizaciones del propio sistema de la ONU y con varias ONG interesadas y preocupadas por el pronóstico de los futuros cambios globales en el sistema climático.

Las conclusiones expuestas por el IPCC, las cuales pueden considerarse como agoreras de un futuro incierto, han sido recibidas en algunos sectores científicos, políticos y económicos con cierto escepticismo, en algunos casos, y en otros pocos como afirmaciones y declaraciones todavía carentes de un soporte empírico suficiente.

Es necesario recordar que, en filosofía, y específicamente en la filosofía de la ciencia, se practica comúnmente el escepticismo, una corriente que considera que el conocimiento verdadero y definitivo es realmente inalcanzable. Hay, sin embargo, dos tipos distintos dentro de los escépticos alrededor del cambio climático. Los escépticos verdaderos utilizan los principios científicos y datos bien establecidos para llegar a hipótesis y teorías comprobables que difieren del consenso científico actual acerca del cambio climático. Este desafío es absolutamente invaluable para avanzar y mejorar nuestra comprensión de este tema. Hasta la fecha, ningún reto de este tipo a los principios básicos del calentamiento global antropogénico ha sido exitoso. No se trata de una conspiración de izquierdas o de lavado de cerebro en centros de investigación o

¹⁰ <https://www.fluorocarbons.org/wp-content/uploads/2016/08/Handbook-for-the-Montreal-Protocol-2017-english.pdf>

universidades, sino lograr que la gente se familiarice con los principios científicos, los datos en bruto (muy abundantes y diversos) y la amplia literatura primaria relacionada con el calentamiento global antropogénico. De hecho, existen preguntas válidas que se pueden plantear sobre aspectos específicos del cambio climático. Estas preguntas son las que impulsan la investigación que se lleva a cabo permanentemente por miles de científicos de todo el mundo.

Vale la pena acotar que, en las dos últimas décadas, los escépticos de la realidad y la importancia del cambio climático antropogénico han frecuentemente acusado a los climatólogos de "alarmismo": de sobreinterpretar o exagerar a la evidencia de los impactos humanos en el sistema climático. Sin embargo, la evidencia disponible sugiere que los científicos han sido conservadores en sus proyecciones de los impactos del cambio climático. Brysse *et al.* (2013) han revisado estudios recientes que muestran que al menos algunos de los atributos clave del calentamiento por efecto de los gases de efecto invernadero atmosféricos han sido más bien subestimados, en particular en las evaluaciones del Grupo de Trabajo I del IPCC; los científicos no han sido alarmistas, sino más bien al revés: han hecho estimaciones cautelosas. Los científicos, escépticos por naturaleza, practican la adhesión a las normas científicas de moderación, objetividad, racionalidad, desapasionamiento y moderación. Por ello es muy significativo que la casi totalidad de los estudiosos del cambio climático (97%) pregonan y afirman que el cambio climático es real (Cook *et al.*, 2013), en contraposición con los que niegan su existencia, quienes por lo general no son científicos, sino cabilderos y/o empresarios con intereses creados alrededor del asunto.

Una categoría diferente de escépticos cuestiona los principios básicos del cambio climático con argumentos equivocados, engañosos y/o ignorantes de las investigaciones más recientes y del consenso científico alcanzado (Cook, 2010). Sus argumentos son bien conocidos en la comunidad científica y han sido refutados con frecuencia. Los escépticos a ultranza por lo general responden a las directrices y orientaciones de sectores económicos con intereses creados, tales como las grandes corporaciones multinacionales emisoras de gases invernadero y de contaminantes de la atmósfera y las aguas. Los argumentos esgrimidos en el cabildeo y los medios de comunicación masiva han dado origen a la creación en el imaginario popular de una serie de mitos, incertidumbres o concepciones desorientadoras acerca de la realidad y relevancia del cambio climático (Whitmarsh, 2009).

Los escépticos a ultranza se han conformado en un grupo que practica la “negación científica”, una estrategia de comunicación basada en una serie de características comunes, las cuales se describen a continuación:

1. *Teorías de la conspiración.* Cuando el abrumador peso de la opinión científica cree que algo es cierto, el negacionista no admite que los científicos han estudiado de forma independiente las pruebas para llegar a la misma conclusión. En su lugar, afirman que los científicos están implicados en una compleja y secreta conspiración.
2. *Falsos expertos.* Son individuos que pretenden ser expertos, pero cuyas opiniones son incompatibles con el conocimiento establecido. Fueron utilizados ampliamente por la industria del tabaco que desarrolló una estrategia para reclutar a los científicos que contrarrestasen la creciente evidencia de los efectos nocivos del humo en los fumadores pasivos. Esta táctica a menudo se complementa con la denigración de expertos verdaderos, tratando de desacreditar su trabajo.
3. *Parcialidad en la selección de evidencias.* Esto consiste selectivamente hacer uso de documentos aislados que desafían el consenso para desacreditar la vía principal de investigación. Un ejemplo de esto, es un artículo que describe anomalías intestinales en 12 niños con autismo, sugiriendo una posible relación con la inmunización. Esto ha sido ampliamente utilizado por los activistas contra la vacunación, a pesar de que 10 de los 13 autores del artículo, posteriormente se retractaron del posible vínculo entre ambas cosas.
4. *Impredicibilidad de los resultados de las investigaciones.* La empresa tabaquera Philip Morris trató de promover un nuevo estándar para la realización de estudios epidemiológicos. Estas estrictas directrices habrían invalidado de un plumazo una gran cantidad de investigaciones sobre el efecto del tabaco sobre la salud.
5. *Declaraciones falsas y falacias lógicas.* Las falacias lógicas incluyen el uso de hombres de paja, que argumentan erróneamente los argumentos contrarios, facilitando la tarea de refutarlos. Por ejemplo, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los EE.UU. determinó en 1992 que el humo ambiental del tabaco era cancerígeno. Este fue criticado nada menos que como una amenaza para la esencia misma de los valores democráticos y la política pública democrática.

2.8 Mitos popularizados acerca del cambio climático

Los mitos o argumentaciones enmarcados en las posiciones que consideran el cambio climático como una falacia conceptual se han identificado plenamente. Diversos grupos y organizaciones no gubernamentales difunden continuamente comunicados y reportes de prensa en los que intentan desbancar las evidencias y argumentaciones de los científicos especializados en el tema. Bajo la figura de fundaciones sin fines de lucro u organizaciones no gubernamentales, financiadas por conglomerados industriales conservadores en la mayoría de los casos (como el *Hearland Institute*¹¹, la *Marshall Foundation* y la *Heritage Foundation*), así como algunos científicos escépticos –cerca de 5% del total de científicos involucrados en el tema, de acuerdo con Anderegg y Harold (2009)– se han dedicado a criticar y cuestionar continuamente las conclusiones y recomendaciones de los científicos expertos en las ciencias relacionadas con el cambio climático, intentando desvirtuar sistemáticamente el consenso científico alrededor de las conclusiones y evidencias presentadas por el IPCC.

Los principales mitos que se han creado alrededor del cambio climático, y los argumentos científicos que refutan científicamente los mismos, son los siguientes (TRS, 2007; Cook, 2010):

- 1) *El clima de la tierra está cambiando constantemente y no tiene nada que ver con las acciones humanas.* Este argumento, carente de base científica, es refutable por el conocimiento consensual y las evidencias empíricas en las que se sustenta una de las principales conclusiones del IPCC: el cambio climático está ocurriendo por efecto del incremento de los gases de efecto invernadero, especialmente el CO₂, pero incluyendo otros compuestos gaseosos como el N₂ y el CH₄, producto de las actividades antropogénicas (NRC, 2010). Las emisiones volcánicas y la energía solar no son suficientes para explicar los aumentos de la temperatura, tanto en los ambientes terrestres como en los oceánicos.
- 2) *El CO₂ solo representa una pequeña porción de la atmósfera y no puede ser considerado responsable del calentamiento global.* El CO₂, a pesar de su pequeña proporción en la atmósfera, tiene una alta capacidad de absorber calor y de esa manera potenciar el efecto invernadero. Antes de la industrialización iniciada hace 250 años, la concentración de CO₂

¹¹ <http://heartland.org/>

en la atmósfera era de 280 ppm, mientras que actualmente dicha concentración es de 420 ppm en 2022, causada principalmente por las emisiones de CO₂ provenientes de las actividades humanas, especialmente de combustibles fósiles como el carbón y el petróleo.

- 3) *Los aumentos en los niveles del CO₂ en la atmósfera son resultado del aumento de los incrementos de la temperatura, y no al contrario.* Está demostrado que las causas naturales del cambio climático ocurridos a través de milenios, se iniciaron por los cambios en la órbita terrestre, que a su vez causaron el incremento del CO₂ en la atmósfera y el impacto del efecto invernadero, pero dichos cambios ocurren en escalas de tiempo mucho mayores (centenares o miles de años) y, por lo general no implican cambios abruptos en las variables climáticas, como los que están ocurriendo en los años recientes. Por lo tanto, el calentamiento ocurrido durante los últimos 30 años tiene lugar por efecto del aumento del CO₂ en la atmósfera, más que por causas naturales como los cambios en la órbita terrestre o las erupciones volcánicas (TRS, 2007; NRC, 2010; UNEP, 2009).
- 4) *Los modelos computarizados que predicen el cambio climático futuro no son confiables y se basan en supuestos, no hechos fehacientes.* El reciente desarrollo de las Ciencias de la Tierra, producto de la integración interdisciplinaria de los conocimientos generados por la Ecología, la Climatología, la Geología, la Sociología, las técnicas e instrumentos avanzados de teledetección y la expansión de la capacidad para manejar inmensas bases de datos (simulaciones), han permitido incrementar el entendimiento de los fenómenos climáticos y el poder de predicción de los modelos de simulación del clima. Más aún, los avances en la calibración y despliegue de técnicas de captación y medición de datos –a través de satélites con sensores remotos más precisos y un mayor número de estaciones de observación– facilitan a las diversas iniciativas de modelaje del clima la generación de resultados convergentes con mayor potencia predictiva, desde diversas instituciones de investigación, con objetivos específicos diferenciados y a través períodos y escalas temporales más amplias (décadas).

Recientemente se han generado nuevos modelos de simulación acerca de cómo los diferentes componentes del sistema climático (nubes de vapor de agua, océanos, radiación solar), incluyendo el componente vivo y los contaminantes de la atmósfera, se comportan e interactúan a través del tiempo. Ello ha permitido a los científicos reproducir el curso de los fenómenos climáticos a lo largo de los últimos 100 años, a través de diversos escenarios, sobre la base de premisas racionales basadas en las actividades humanas ya

conocidas y documentadas. Aunque los modelos de simulación permiten actualmente explicar eventos pasados y futuros del clima global, hasta el momento no están suficientemente desarrollados para explicar o proyectar con precisión los detalles del impacto a nivel regional y local (Hunt, Baldocchi, y Van Inghen, 2009).

- 5) *Todo tiene que ver con el Sol, por ejemplo, los vínculos entre los incrementos de temperatura y el número de manchas solares.* La radiación solar es un fenómeno natural, que, como se ha señalado, ha contribuido, junto con las erupciones volcánicas, con el calentamiento de la atmósfera y posterior enfriamiento, como se demostró en las recientes erupciones de 1963, 1982 y 1991, las cuales condujeron a leves enfriamientos, al bloquear parcialmente la entrada de rayos solares por las partículas aerosoles suspendidas de las cenizas volcánicas. Sin embargo, durante las tres últimas décadas, los nuevos telescopios espaciales y las mediciones satelitales directas no muestran cambios apreciables en el calor solar (UNEP, 2009). El incremento del CO₂, debido a la combustión de recursos energéticos fósiles, es la única explicación para el cambio climático en marcha, especialmente durante la segunda mitad del siglo XX y las primeras décadas del siglo actual.
- 6) *El cambio climático está influenciado por los rayos cósmicos.* Los rayos cósmicos son partículas provenientes del espacio a una altísima velocidad, que agregan carga eléctrica a algunos componentes de la atmósfera, que a su vez podrían relacionarse con la formación de nubes y con el efecto invernadero. El argumento central es que, a mayor actividad del sol, sus campos magnéticos desvían los rayos cósmicos que de otra forma entrarían en la atmósfera, resultando en menor cantidad de formación de nubes y consecuentemente, en una atmósfera más caliente (UNEP, 2010). Sin embargo, hasta ahora sólo se ha demostrado un efecto mínimo lo que, aunado a los niveles estables de actividad solar en las últimas tres décadas, no explica los aumentos de temperatura que hemos observado durante ese mismo período.
- 7) *La escala de los efectos negativos del cambio climático está sobreestimada y no hay necesidad de acciones urgentes al respecto.* Una de las conclusiones más resaltante del último informe de evaluación del IPCC (2022) señala la tendencia de un aumento de 2 a 4°C durante este siglo, lo que significa un cambio del clima de la Tierra muy superior a los experimentados durante los últimos 10.000 años. El cambio climático inducido por el hombre, incluidos los fenómenos extremos más frecuentes e intensos, ha causado efectos

adversos generalizados, impactos y pérdidas y daños relacionados con la naturaleza y las personas, más allá de la variabilidad climática natural. El aumento de los eventos extremos meteorológicos y climáticos ha provocado algunos impactos irreversibles en la medida que los sistemas naturales y humanos se ven empujados más allá de su capacidad de adaptación.

- 8) El impacto resultante se evidenciará en cambios en las variables climáticas del hemisferio norte, creando, por una parte, condiciones más apropiadas para la producción de alimentos en altas latitudes, por ejemplo, en el norte de los EE UU y el sur de Canadá, y sequías extremas en las zonas tropicales.

Existen muchas otras argumentaciones de los negadores a ultranza del cambio climático, así como la respuesta a cada una de ellas pueden consultarse en el sitio web “*Skeptical Science*”, debidamente traducidas al español.¹²

2.9 Evidencias del cambio global en los eventos climáticos extremos

De acuerdo con las conclusiones del Cuarto Informe del IPCC–AR4 (IPCC, 2007), refrendados por el Quinto informe (IPCC, 2014), y afirmadas enfáticamente en el sexto informe (IPCC, 2021; 2023) de proseguir las emisiones de GEI a una tasa igual o superior a la actual, el calentamiento aumentaría y el sistema climático mundial experimentaría durante el siglo XXI numerosos cambios, muy probablemente mayores que los observados durante el siglo XX:

- Aumentará la frecuencia de los valores extremos cálidos, de las olas de calor y de las precipitaciones intensas, así como los fenómenos de sequía intensa, en ciertas regiones de la Tierra.
- Aumentará la intensidad de los ciclones tropicales y menor confianza en que disminuya el número de ciclones tropicales en términos mundiales.
- Desplazamiento hacia los polos de las trayectorias de las tempestades extratropicales, con los consiguientes cambios de las pautas de viento, precipitación y temperatura.

¹² <http://www.skepticalscience.com/translation.php?lang=4>

- Aumentarán las precipitaciones en latitudes altas, y probablemente disminuirán en la mayoría de las regiones terrestres subtropicales, como continuación de las tendencias recientemente observadas.

La UNEP (2009, 2021) reconoce que ya no hay duda acerca de que la mayoría del incremento observado en la temperatura promedio global, desde mediados del siglo XX, es debida al incremento observado en los gases invernadero, resultantes de las actividades humanas. Al respecto, identifica igualmente las anomalías climáticas ocurridas entre 2007 y 2013 a lo largo del globo, identificando 62 regiones o áreas específicas, en las cuales se evidenciaron eventos climáticos extremos, entre los cuales se mencionan:

- La peor sequía en México en los últimos 70 años, que afectó 3,5 millones de campesinos y agricultores, 50.000 cabezas de ganado muertas y 8 millones de ha de cultivos arrasados o severamente afectados. La peor sequía en Chile, Argentina, Paraguay y Uruguay en los últimos 50 años, en el centro y sur del país.
- Varias provincias chinas sufrieron las peores sequías en 60 años, afectando casi 4 millones de personas y 10 millones de ha. Sequías similares ocurren en Taiwán, Liaonin-China, Francia y España.
- Inundaciones severas en el nordeste y en el sur de Brasil, afectando 180.000 y 1,5 millones de personas, respectivamente, así como lluvias récord en Ecuador y Bolivia, el Sureste de África y la India, Pakistán, Bangladesh y Vietnam. En 2009 Bangladesh y Filipinas sufrieron inundaciones severas por lluvias torrenciales que afectaron a 12 millones de personas y 200.000 desplazados, respectivamente.
- Ciclones y tifones de gran intensidad en la región intertropical, ocho en el Caribe y Centroamérica y ocho en el Sureste Asiático, además del huracán Katrina (2005) que constituyó que afectó severamente a New Orleans y el superhuracán Sandy que diezmó la ciudad de New York a finales de 2012.
- Olas de calor intenso en el Suroeste de Australia, e incendios forestales o de vegetación que afectaron miles de hogares y 210 muertes.
- Disminución del mar de hielo ártico e inviernos cálidos en las regiones más septentrionales del hemisferio norte, sí como en el sur de Australia y Nueva Zelanda.
- En la primera década del siglo XXI han ocurrido numerosos desastres (WRI,2011):

- ✓ En el verano de 2010, las inundaciones en una quinta parte de la superficie de Pakistán afectaron a más de 20 millones de personas y destruyeron 2,2 millones de hectáreas de cultivos.
- ✓ En el mismo momento, una ola de calor afectó el área de Moscú y sus alrededores, causando la muerte de 10.000 personas e inmensos incendios de turberas y bosques, así como la pérdida de la tercera parte del stock de granos rusos, lo que incidió en el aumento de los precios en todo el mundo.
- ✓ Las lluvias torrenciales en Brasil originaron inundaciones y deslaves que provocaron la muerte de aproximadamente 600 personas.
- Los eventos climáticos extremos afectan no solo las regiones del Sur, sino también a los países desarrollados. Por ejemplo, en los EE UU, la NOAA (2016) reporta la ocurrencia, entre 1980 y septiembre de 2016, de 83 tormentas severas, 34 huracanes tropicales, 26 inundaciones, 23 eventos de sequía, 14 tormentas invernales, 13 incendios forestales incontrolados y 7 heladas fuertes; cuyas pérdidas acumuladas totalizan más de 1.000 billones US\$.
- Más recientemente, el Centro de investigación en la Epidemiología de Desastres (CRED, 2023) ratifica las tendencias observadas en lo que va del siglo XXI, al informar sobre la ocurrencia, durante el año 2022, de 387 desastres reportados, 30.704 muertes, 185 millones de personas afectadas directa o indirectamente y pérdidas económicas que sobrepasan los 228 mil millones de \$. Por ejemplo, las olas de calor provocaron más de 16.000 muertes, solamente en Europa, mientras que las inundaciones en Pakistán afectaron a 33 millones de personas y provocaron 1.739 fallecidos y pérdidas por el orden de 15 mil millones de \$. Las torrenciales lluvias del Monsón afectaron a la India, Bangladesh y China, causando cerca de 2.000 muertes y pérdidas cercanas a los 17.000 millones de \$.
- De otra parte, la pérdida parcial del casquete de hielo en los polos y la expansión térmica de los océanos en escalas amplias de tiempo pueden originar el aumento del nivel del mar y, a su vez, generar inundaciones en vastas áreas del planeta: las pequeñas islas del Pacífico y las tierras bajas costeras alrededor de todos los continentes, que son las zonas de mayor densidad poblacional en el Globo (Alexeev *et al.*, 2013).

En el ámbito regional, un informe reciente de 60 investigadores, bajo los auspicios de la Academia Nacional de Ciencias, reporta el efecto negativo que está teniendo el cambio climático en Venezuela (López, 2023):

- Reducción de la actividad económica; entre 0,97 y 1,3% del PIB nacional se perdió debido al aumento de las temperaturas y los excesos de lluvias o sequías.
- La mayoría de las zonas coralinas del mar caribe Venezuela han sufrido, o están en riesgo de sufrir, blanqueamiento severo en los próximos 5 años, en una proyección cercana a 60%.
- La producción alimentaria de zonas emblemáticas como el Sur del Lago de Maracaibo, las mesetas productivas y valles de los estados andinos y regiones productoras de los estados Lara, Barinas y Guárico han sido afectadas por inundaciones debidas a lluvias torrenciales o sometidas a sequías por la escasez de húmedas para los cultivos y pastos.

CAPÍTULO 3: CAUSAS Y CONSECUENCIAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

3.1 Contexto general

Desde hace más de 60 años, los estudios ecológicos y climatológicos comenzaron a mostrar evidencias del proceso de cambio climático, esencialmente de los aumentos en la temperatura y en la concentración de los GEI. Como se reseñó en el capítulo anterior, una gran cantidad de gases se emiten continuamente a la atmósfera, derivados de la actividad humana, cambiando progresivamente la composición de la misma. Por lo que la concentración de varios de los gases de efecto invernadero ha aumentado considerablemente en los últimos 70 años.

Desde mediados del siglo XIX, los científicos saben que el CO₂ es uno de los principales gases de efecto invernadero de importancia en el balance energético de la Tierra. Las mediciones directas de CO₂ en la atmósfera y en el aire atrapado en el hielo muestran que el CO₂ atmosférico aumentó en más del 40% entre 1800 y 2019. Las mediciones de diferentes formas de carbono revelan que este aumento se debe a las actividades humanas. Otros gases de efecto invernadero (en particular, el metano y el óxido nitroso) también están aumentando como consecuencia de las actividades humanas. El aumento de la temperatura de la superficie global observado desde 1900 es consistente con los cálculos detallados de los impactos del aumento observado en los gases de efecto invernadero atmosféricos (y otros cambios inducidos por el hombre) en el balance energético de la Tierra.

Diferentes influencias sobre el clima tienen diferentes firmas en los registros climáticos. Estas huellas dactilares únicas son más fáciles de ver al sondear más allá de un solo número (como la temperatura promedio de la superficie de la Tierra) y al observar los patrones geográficos y estacionales del cambio climático. Los patrones observados de calentamiento de la superficie, cambios de temperatura a través de la atmósfera, aumentos en el contenido de calor del océano, aumentos en la humedad atmosférica, aumento del nivel del mar y mayor derretimiento de la tierra y el hielo marino también coinciden con los patrones que los científicos esperan ver debido a las actividades humanas.

Los cambios esperados en el clima se basan en nuestra comprensión de cómo los gases de efecto invernadero atrapan el calor. Tanto esta comprensión fundamental de la física de los gases de efecto invernadero, como los estudios de huellas dactilares basados en patrones muestran que las causas naturales por sí solas son inadecuadas para explicar los cambios climáticos

observados recientemente. Las causas naturales incluyen variaciones en la producción del Sol y en la órbita de la Tierra alrededor del Sol, erupciones volcánicas y fluctuaciones internas en el sistema climático (como El Niño y La Niña). Se han realizado cálculos utilizando modelos climáticos para simular lo que habría sucedido con las temperaturas globales si solo los factores naturales estuvieran influyendo en el sistema climático. Estas simulaciones arrojan poco calentamiento de la superficie, o incluso un ligero enfriamiento, durante el siglo XX y el XXI. Solo cuando los modelos incluyen influencias humanas en la composición de la atmósfera, los cambios de temperatura resultantes son consistentes con los cambios observados (Royal Society/National Academy of Sciences, 2020).

De otra parte, debe destacarse el hecho notorio del incremento en la producción de literatura científica en torno al cambio climático, especialmente en lo que ha transcurrido del siglo XXI. Fu y Waltman (2022) reportan la generación de más de 120.000 publicaciones científico-técnicas relacionadas con el cambio climático, solamente entre 2001 y 2018, en los ámbitos de las ciencias físicas, paleoclimatología, ecología del cambio climático, tecnología climática y política climática. Si se incluyen las estimaciones de las publicaciones del siglo XX y las producidas entre 2019 y 2023, es muy probable que se llegue a una cifra cercana a 200.000 publicaciones relacionadas con el cambio climático.

Paralelamente, la progresiva acumulación de datos y registros sobre la variación de los factores climáticos (temperatura, precipitación, concentración de CO₂ y otros gases, entre muchos otros) y el desarrollo de complejos modelos matemáticos y de simulación con apoyo de las técnicas computarizadas, han permitido establecer la certeza de los procesos de cambio global en el clima.

3.2 Más allá de los límites

Ya 14 años antes, un destacado grupo de científicos ambientales, incluyendo algunos sociólogos y economistas, (Rockström, Steffen, Noone, Chapin *et al.* 2009), en un artículo ampliamente citado y discutido en la comunidad científica desde entonces, consideran que las presiones antropogénicas en el sistema de la Tierra han llegado a una escala donde ya no puede negarse que existe un abrupto cambio ambiental global, proponiendo un nuevo enfoque de la sostenibilidad integral en el que definen los límites planetarios necesarios dentro de los cuales la humanidad funcione con seguridad. Transgredir uno o más límites planetarios puede ser perjudicial o incluso catastrófico, debido al riesgo de traspasar umbrales que desencadenen un

cambio del medio ambiente no lineal y abrupto, a escala continental y planetaria. Rockström *et al.* (2009) identifican nueve límites planetarios y, con base en conocimientos científicos probados, proponen las debidas cuantificaciones para siete de ellos:

- El cambio climático (concentración de CO₂ en la atmósfera <350 ppm y/o un cambio máximo de 1 W/m² en el forzamiento radiativo),
- Acidificación de los océanos (pH del agua de mar superficial estado de saturación con respecto a la aragonita ≥ 80% del nivel pre-industrial),
- El ozono estratosférico (<5% de reducción en la concentración del O₃ con respecto al nivel preindustrial de 290 unidades Dobson),
- Ciclo biogeoquímico del nitrógeno (limitar la fijación industrial y agrícola de N₂ a 35 Tg N/año) y el ciclo del fósforo (ingreso anual de P en los océanos que no exceda 10 veces el fondo natural desgaste del P),
- El uso mundial de agua dulce (<4.000 km³/año de uso consuntivo de los recursos de escorrentía),
- El cambio del sistema Tierra (<15% de la superficie terrestre libre de hielo bajo tierras cultivadas),
- La velocidad a la que se pierde la diversidad biológica (tasa anual de <10 extinciones por millón de especies).
- La contaminación química y
- La carga de aerosoles atmosféricos.

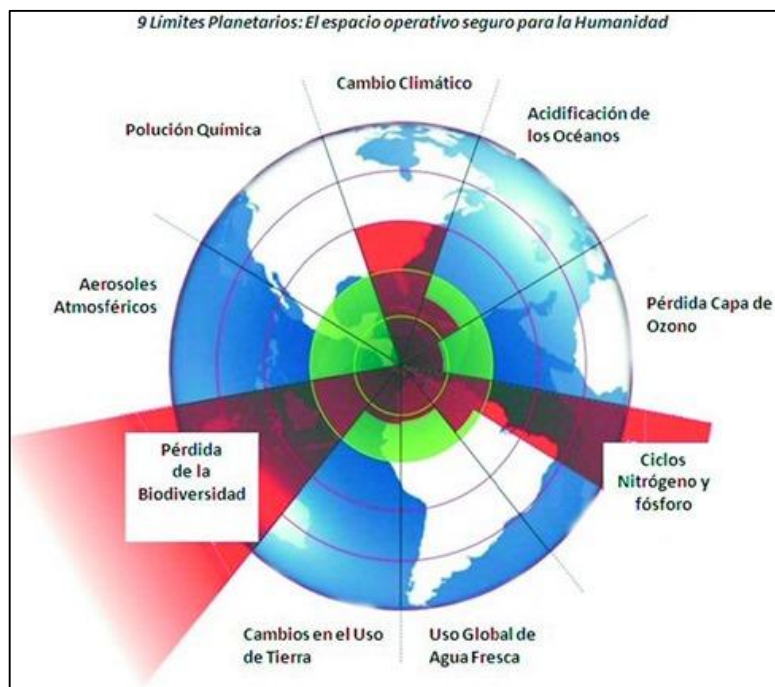
En la Figura 5 (próxima página) se visualizan los límites planetarios identificados por Rockström *et al.* (2009), quienes estiman que la humanidad ya ha transgredido tres límites planetarios: la pérdida de biodiversidad, el cambio climático y los cambios en los ciclos globales del nitrógeno y del fósforo. Los límites planetarios son interdependientes, porque uno de ellos puede transgredir o modificar la magnitud de otros o provocar su modificación. Los impactos sociales de transgredir estos límites estarán en función de la capacidad de recuperación socio-ecológica de las sociedades afectadas. Debe destacarse que seis años después, Rockström (2015), al actualizar el estudio de los límites planetarios, reiterativamente afirma que:

La humanidad se ha convertido en la fuerza dominante de cambio en la Tierra, superando en importancia a las fuerzas geofísicas que hasta ahora han dado forma a la biosfera. En esta nueva época geológica, a menudo llamada *Antropoceno*, se puede agregar un nuevo riesgo profundo a las preocupaciones convencionales sobre la disminución de los recursos y la contaminación local: la acción humana podría empujar al sistema terrestre a cambios abruptos e irreversibles de la ecósfera planetaria. Las repercusiones podrían resultar calamitosas a nivel local, regional y global. (Rockström, 2015: p.1).

Igualmente reconoce y alerta el citado autor que ya se ha sobrepasado un cuarto límite: los cambios de uso de la tierra, lo cual sugiere la probabilidad de que, en el año 2050, la capacidad de carga de la biósfera no pueda cubrir las necesidades de sustento alimentario de la población, que en ese momento estará cercana a los 9.100 millones de habitantes. Rockström propone de manera categórica que la humanidad tiene que cambiar el paradigma actual de producción, consumo y desgaste de los recursos de la biósfera, mediante una transformación radical en el comportamiento individual y colectivo frente al medio ambiente.

Figura 5.

Límites planetarios: el espacio operativo seguro para la humanidad



Fuente: Rockström *et al.*, (2009).

En el mismo contexto, McAlpine, Seabrook, Ryan *et al.* (2015) argumentan la necesidad de un cambio transformacional en las ideas, actitudes y comportamientos de la sociedad y sus líderes, mediante el cambio mental en el intelecto humano mediante la educación y la formación; así como en la motivación individual y colectiva para reconfigurar los valores, preferencias y comportamientos de los individuos y de las colectividades u organizaciones en las que hacen vida (vecindades, iglesias, organizaciones civiles, instituciones de educación, etc.), con base en principios éticos, espirituales y solidarios hacia los otros y hacia el entorno circundante.

Gerten *et al.* (2020), al analizar los planteamientos de los autores citados sobre los límites planetarios, concuerdan con la propuesta de lograr transformaciones significativas en los patrones de producción y consumo vigentes, mejor uso de los fertilizantes nitrogenados y del fósforo, hacia un uso sustentable y racional de los recursos disponibles (tierras y agua para riego), la disminución de sólo un 25% de las pérdidas y desperdicios de alimentos, así como un mejor aprovechamiento y distribución de las cosechas; todo ello permitiría según las proyecciones de Gerten y asociados, lograr niveles de producción alimentaria suficientes para alimentar una población mundial de 10.300 millones de personas más allá del año 2050.

Más recientemente, Ripple *et al.* (2022), en un documento que intenta alertar la inminente emergencia climática a la que nos dirigimos, denuncia que las actuales políticas nacionales e internacionales sobre el medio ambiente, muy a pesar del Acuerdo de París de 2015, conducen a que en el año 2100 el aumento de la temperatura global puede llegar los 3°C, un valor que no se había alcanzado en los últimos 3 millones de años.

3.3 El cambio climático y sus efectos sobre la biósfera

Como se evidenciará a lo largo de este capítulo, el impacto del cambio climático se manifiesta de maneras muy diversas y en ámbitos diferentes, lo cual dificulta la comprensión cabal del problema y sus implicaciones. Porque sucede que muy a menudo los cambios o alteraciones en alguno de los componentes de la biosfera, tiene consecuencias en algún otro o en varios de ellos.

A continuación, se amplía la información relacionada con las principales interacciones y consecuencias del cambio climático en el funcionamiento y procesos de los ecosistemas y sus componentes.

Nolan, Overpeck, Allen *et al.* (2018) indican que los ecosistemas terrestres son muy sensibles al cambio de temperatura y sugieren que sin reducciones importantes en las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera (es decir, en línea con las previstas en el Acuerdo de París de 2015), la mayoría de los ecosistemas terrestres en todo el mundo corren el riesgo de transformación importante, con la consiguiente interrupción de los servicios de los ecosistemas y los impactos en la biodiversidad.

El rápido cambio climático antropogénico está afectando a los ecosistemas a través de cambios en las condiciones medias y en la variabilidad climática, junto con otros cambios asociados, como el aumento de la acidificación de los océanos y las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera. También interactúa con otras presiones sobre los ecosistemas, incluida la degradación, la defaunación y la fragmentación. Es necesario comprender la dinámica ecológica de estos impactos climáticos, identificar puntos críticos de vulnerabilidad y resiliencia e identificar intervenciones de gestión que puedan ayudar a la resiliencia de la biosfera al cambio climático. Es necesario explorar y cuantificar los mecanismos, el potencial y los límites de las soluciones al cambio climático basadas en la naturaleza. Concluimos identificando algunas prioridades para la investigación académica y la implementación práctica, con el fin de maximizar el potencial para mantener una biosfera diversa, resistente y que funcione bien en las condiciones desafiantes del siglo XXI (Malhi, Franklin, Seddon *et al.*, 2020).

A) Energía y clima

En los últimos 200 años la energía fósil ha sido consumida por los seres humanos a una velocidad muy superior a la que se regenera, por lo que se considera no renovable. Esta energía no participa naturalmente en el balance de los ciclos biogeoquímicos del carbono y el oxígeno y los flujos unidireccionales de energía que ocurren en la biósfera, detonados por la energía solar incidente sobre la Tierra. Más bien, el consumo de energía no renovable y sus consecuencias crea perturbaciones en dichos ciclos, al inyectar grandes cantidades de CO₂ y otros gases a la biósfera. El acelerado desarrollo de la humanidad, durante los últimos 150 años, se ha basado en la capacidad de incrementar los aportes de energía requeridos para la transformación, aprovechamiento y producción de bienes y servicios, a partir de los recursos naturales renovables y no renovables. Entre los recursos no renovables esenciales están los combustibles fósiles, que no son más que la energía contenida en sumideros de carbono, acumulada durante los últimos 600 millones de años, depositada en capas profundas de la corteza terrestre en forma de carbón (hulla), petróleo y gas.

Esta energía, contenida en la biomasa producida en la época carbonífera, proviene de los procesos naturales de producción de los organismos vivos de la época. Una parte de esa biomasa, compuesta principalmente por fitoplancton, zooplancton, algas y otros seres vivos, se acumuló en las profundidades de los mares y la corteza terrestre, quedando enterradas en capas de sedimentos terrestres, producto de la dinámica tectónica y los cataclismos ocurridos en esa época. Dicha energía se denomina energía fósil, capturada en compuestos de carbono e hidrógeno, que al contacto con el oxígeno se libera como calor (Ahuja and Tatsutani, 2008).

El desarrollo científico/tecnológico actual y la capacidad de extracción y utilización de la energía contenida por millones de años en los depósitos de carbón, petróleo y gas han permitido que la raza humana, en aras de la satisfacción de sus necesidades y modos de vida, haya impulsado el desarrollo urbano e industrial en los países desarrollados, al mismo tiempo que ha introducido perturbaciones significativas en los procesos y funcionamiento de los ecosistemas. De esta manera, ha alterado, fragmentado o destruido hábitats en los distintos biomas y ecosistemas creando desbalances en los ciclos biogeoquímicos y el reciclaje de la materia.

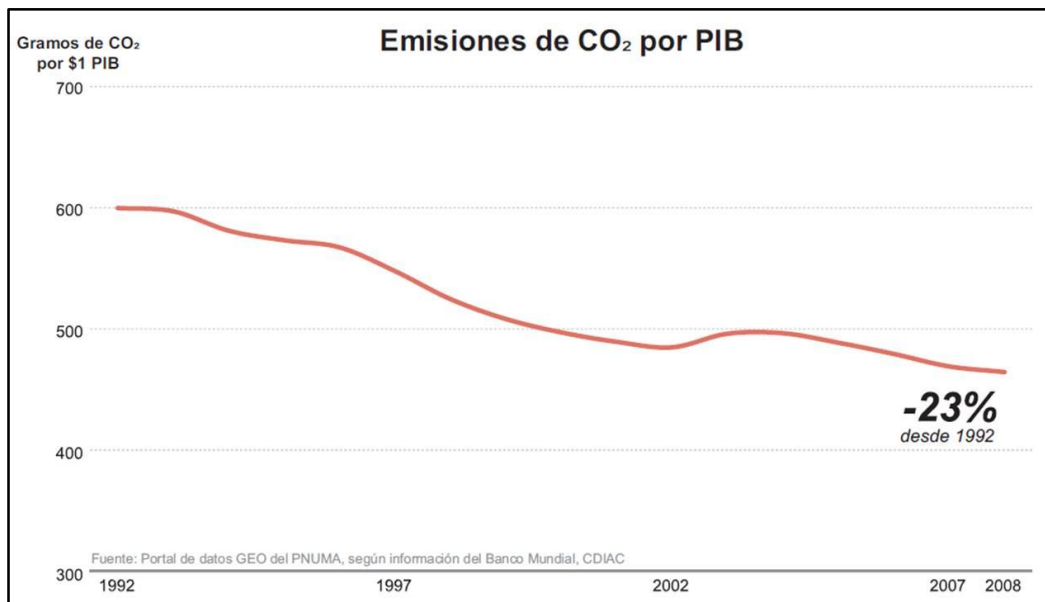
Los vehículos de transporte, fábricas industriales y plantas de generación de electricidad expulsan en la atmósfera miles de millones de toneladas de CO₂ anualmente. En este contexto, el consumo exacerbado de energía fósil provoca la emisión de grandes cantidades de CO₂ y otros compuestos contaminantes de la atmósfera. Esta transferencia de carbono desde las profundidades de la corteza terrestre a la atmósfera, combinada con las alteraciones y reducción de la cubierta vegetal y del carbono del suelo, constituyen factores determinantes en las alteraciones climáticas que nos afectan actualmente (Omer, 2010).

Aun cuando en los últimos 40 años se ha mejorado la eficiencia en el aprovechamiento de los recursos energéticos (Figura 6), en todo el mundo existe hoy día la necesidad urgente de una profunda transformación de la infraestructura de producción y uso de energía actuales hacia niveles de mayor eficiencia y sustentabilidad (UN Environment, 2019). Este hecho es ampliamente reconocido en el contexto de la creciente preocupación sobre el cambio climático global. Pero sucede a menudo que las preocupaciones sobre sostenibilidad a largo plazo del medio ambiente se ven eclipsadas por urgencias más inmediatas de acceso y costos de la energía.

De acuerdo con el informe sobre fuentes de energía y mitigación del cambio climático del IPCC (2011), la demanda de energía y servicios asociados, para cumplir con el desarrollo social y económico y mejorar la salud humana bienestar y la salud, va en aumento. Desde 1850, aproximadamente, el uso global de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) ha aumentado progresivamente hasta dominar el suministro de energía, dando lugar a un rápido crecimiento del dióxido de carbono (CO₂) liberado a la atmósfera. Para finales de 2008, las concentraciones han aumentado a más de 420 ppm, lo que representa un incremento de 47% sobre los niveles preindustriales.

Figura 6.

Relación entre el contenido de CO₂ en la atmósfera y el Producto Interno Bruto mundial, entre 1992 y 2008



Fuente: UNEP/GEO5 (2012).

No obstante, hay un reconocimiento unánime acerca de la necesidad de desarrollar y utilizar fuentes de energías renovables, o limpias, como las denominan los expertos, tales como energía eólica, energía solar, energía geotérmica y biocombustibles (etanol), en lugar de los combustibles fósiles altamente contaminantes. Estos temas relacionados con la energía renovable son pertinentes, particularmente desde la perspectiva de los países en desarrollo, donde una parte significativa de la población aún carece de acceso a servicios básicos de energía eléctrica.

Thomas Friedman, intelectual y columnista del New York Times y ganador de varios premios Pulitzer, plantea la hipótesis de que, a partir del año 2000, vivimos una nueva era: “la era del clima y la energía”, la cual viene determinada por una cadena de eventos históricos ya mencionados en secciones anteriores –crecimiento poblacional, creciente urbanización, globalización, crecimiento económico no sustentable, deterioro de los ecosistemas, pérdida de biodiversidad, cambio climático, entre otros– (Friedman, 2008). Pero destaca un aspecto que considera fundamental: el mundo emprendió en los años de la década de los 60 una senda en la que empezó a aumentar vertiginosamente la demanda global de energía, de recursos naturales y de alimentos. Ello ha permitido la reconstrucción económica de Europa y Japón después de la II Guerra Mundial y, posteriormente, un desarrollo acelerado en los países industrializados, alcanzando un gran bienestar y altos niveles de calidad de vida y mejorando la eficiencia en el uso de la energía. Pero en muchos países en desarrollo, en su deseo de alcanzar los niveles y calidad de vida de los industrializados, han incrementado similarmente la demanda de bienes y servicios, y aparejadamente la demanda de energía, todo ello facilitado por la globalización de la economía.

Sin embargo, la realidad indica que este proceso es insostenible en el tiempo; el consumo de energía basada en los combustibles fósiles es la causa principal de los problemas ambientales; ha habido una especie de ceguera desde el punto de vista medioambiental, en todos los niveles y estratos. A pesar de los esfuerzos realizados durante los últimos 20 años, la situación actual se ha empeorado, al punto de poder estar llegando a un punto de inflexión o umbral más allá del cual las consecuencias pueden ser catastróficas. La irrupción de los países emergentes (BRICS¹³) en la economía global está acelerando el proceso. Para Friedman, se necesita rediseñar y reinventar el modo de vida en los países industrializados (y en desarrollo¹⁴), a través de una economía más limpia, más eficiente, sobre la base de energía renovable limpia o “verde”, no contaminante, donde priven los valores y actitudes conservacionistas hacia los recursos naturales y la biodiversidad, las innovaciones tecnológicas limpias, el aprendizaje de las experiencias exitosas de producción y consumo limpios y los nuevos valores éticos como la responsabilidad individual, social e institucional sustentables, a escala global. De hecho, este es uno de los principios fundamentales sobre los cuales descansa la propuesta de la Economía verde.

¹³ Brasil, Rusia, China, India y Sur África

¹⁴ Añadido nuestro

3.4 El cambio climático está poniendo en riesgo la seguridad energética en todo el mundo

Así lo señala la Organización Meteorológica Mundial de forma tajante en su último Informe Anual sobre el Estado de los Servicios climáticos¹⁵, presentado en octubre de 2022, en la Consejo Mundial de Energía. El cambio climático afecta el suministro de combustible, la producción de energía y la resiliencia física de la infraestructura energética actual y futura. La generación de electricidad existente en la actualidad está siendo puesta a prueba debido a las olas de calor y las sequías, por lo que es aún más importante reducir las emisiones de combustibles fósiles. El impacto de estos fenómenos meteorológicos, hídricos y climáticos extremos más frecuentes e intensos ya es evidente.

En consecuencia, la preocupación por cómo repercute el aumento de la temperatura mundial en la seguridad energética es primordial en la carrera hacia las emisiones netas cero que promueve la ONU. Las emisiones netas cero se consiguen cuando el CO₂ emitido por las actividades humanas se equilibra mundialmente con el CO₂ que se elimina en un período específico.

Para 2050, las necesidades mundiales de electricidad —que aumentarán con el transcurso de los años, y en las que la electrificación será un factor estratégico fundamental para abordar los objetivos de las emisiones netas cero— *se cubrirán principalmente con energías renovables*, entre las que la energía solar será la mayor fuente de suministro. La transición a las energías renovables contribuirá a aliviar el creciente estrés hídrico mundial, puesto que la cantidad de agua utilizada para generar electricidad mediante la energía solar y eólica es mucho menor que la que utilizan las centrales eléctricas más tradicionales, las cuales se abastecen de combustibles fósiles o energía nuclear.

B. Biodiversidad y clima

La biodiversidad constituye la red vital de la que dependemos para muchísimas cosas —alimentos, agua, medicinas, un clima estable y crecimiento económico, entre otras. Más de la mitad del PIB mundial depende de la naturaleza. Más de mil millones de personas dependen de los bosques para su subsistencia. Y la tierra y el océano absorben más de la mitad de las emisiones de carbono. Pero la naturaleza está en crisis. El cambio climático desempeña un papel cada vez más importante en el declive de la biodiversidad. Como se mencionó en el capítulo 3, la pérdida de la biodiversidad es uno de los límites planetarios que ya ha sido transgredido, tanto en la biodiversidad genética como en la de especies.

¹⁵ <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate>

Es conveniente recordar las conclusiones de Charles Perrings, reconocido académico de la Universidad Estatal de Arizona, en un informe solicitado por el Banco Mundial (World Bank, 2010), quién resume acertadamente las implicaciones recursivas entre el cambio climático y la biodiversidad. Señala el autor que el cambio climático está induciendo una respuesta de adaptación por parte de la biodiversidad mundial. Esto incluye cambios en la distribución de las especies y la abundancia, los cambios en el momento de la reproducción en animales y plantas, los cambios en patrones de migración de animales y aves, y los cambios en la frecuencia y severidad de los brotes de plagas y enfermedades. Pero en la actualidad en muchos casos la adaptación no ha sido suficiente y los umbrales de desaparición de muchas especies se han alcanzado. Hasta un millón de especies están amenazadas por el riesgo de extinción, siendo para muchas de ellas cuestión de décadas. Ecosistemas únicos como partes de la selva amazónica están pasando de ser sumideros de carbono a fuentes de carbono debido a la deforestación. Y 85% de los humedales, como las marismas y los manglares, que absorben grandes cantidades de carbono, han desaparecido. El cambio climático ha transformado los ecosistemas marinos, terrestres y de agua dulce en todo el mundo. Ha provocado la pérdida de especies locales, el aumento de enfermedades y ha impulsado la mortalidad masiva de plantas y animales, dando lugar a las primeras extinciones provocadas por el clima (ONU, 2023).

El comportamiento de algunas especies está alterándose y ciertas relaciones mutualísticas de larga data pueden verse interrumpidas, así como la aparición de amenazas de extinción dentro de los hábitats y las condiciones que son necesarias para la supervivencia de especies migratorias (Mooney *et al.*, 2009). Algunos de estos efectos son el resultado directo de cambios en la temperatura, las precipitaciones, el nivel del mar o las tempestades. Otros son el efecto indirecto de los cambios, por ejemplo, en la frecuencia de los incendios forestales cada vez más frecuentes debido al incremento global de la temperatura.

En general, las especies se están moviendo de menor a mayor altitud, y de menores a mayores latitudes, a pesar de que la rapidez de la respuesta varía considerablemente. En cualquier ecosistema, los cambios en la frecuencia e intensidad de las perturbaciones determinan la velocidad de los cambios en los ensambles de plantas y animales y sus interacciones, algunas veces potenciadas, pero en otras con consecuencias que pueden ser letales (Walther, 2010).

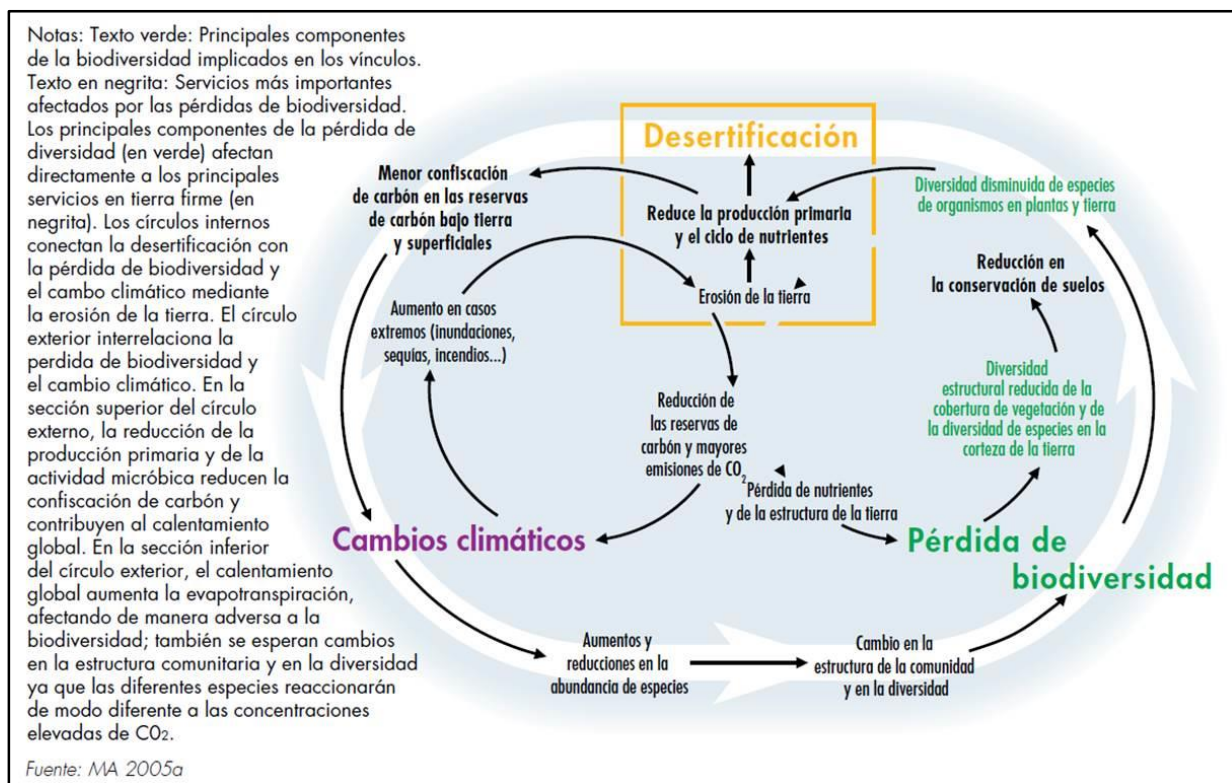
Desde una perspectiva conservacionista, la característica fundamental del cambio climático es que afecta diferencialmente la probabilidad de que las especies puedan ser llevadas a la extinción. Se ha argumentado que el riesgo de extinción es probable que aumente en muchas

especies que ya son vulnerables, debido en parte al tiempo que les toma a muchas especies adaptarse al cambio climático. Estos impactos sobre la biodiversidad son motivo de preocupación por el costo potencialmente alto asociado con las enfermedades zoonóticas emergentes y los cambios en la distribución de los vectores de enfermedades existentes. Concretamente, los cambios en las prácticas agrícolas han sido implicados en la aparición de una serie de enfermedades zoonóticas.

Las complejas interacciones entre la biodiversidad, el cambio climático y los ecosistemas han dado origen a situaciones emergentes, como lo es la desertificación de algunas regiones, como se pueden visualizar esquemáticamente en la Figura 7.

Figura 7.

Interacciones entre el cambio climático y a biodiversidad y la desertificación



Fuente: UNEP/GEO4 (2007)

3.5 Un enfoque sinérgico entre la biodiversidad y el clima reduciría los efectos negativos

El informe conjunto del IPCC y la Plataforma internacional para la Biodiversidad y los Servicios Ecosistémicos (IPBES) (Pörtner, Scholes, Agard *et al.*, 2021), constituye un recurso esencial para la comprensión del tema de esta sección, como lo describen los propios autores:

Los impactos del cambio climático y la pérdida de biodiversidad son dos de los desafíos y riesgos más importantes para las sociedades humanas; al mismo tiempo, el clima y la biodiversidad están entrelazados a través de vínculos mecánicos y retroalimentaciones. El cambio climático exacerba los riesgos para la biodiversidad y los hábitats naturales y gestionados; al mismo tiempo, los ecosistemas naturales y gestionados y su biodiversidad juegan un papel clave en los flujos de gases de efecto invernadero, así como en el apoyo a la adaptación climática. ... Limitar el calentamiento global para garantizar un clima habitable y proteger la biodiversidad son objetivos que se apoyan mutuamente, y su logro es esencial para brindar beneficios a las personas de manera sostenible y equitativa. (Pörtner *et al.*, 2021: p.14)

Las principales conclusiones del estudio conjunto IPCC/IPBES (Pörtner *et al.*, 2021) se sintetizan a continuación:

- El aumento del consumo de energía, la sobreexplotación de los recursos naturales y la transformación sin precedentes de los paisajes terrestres, de agua dulce y marinos, en los últimos 150 años, han ido aparejados con los avances tecnológicos y han respaldado mejores niveles de vida para muchas sociedades y regiones. Sin embargo, también han provocado cambios en el clima y una disminución acelerada de la diversidad biológica en todo el mundo, ambos afectando negativamente muchos aspectos de la buena calidad de vida. El reforzamiento mutuo del cambio climático y la pérdida de biodiversidad significa que la resolución satisfactoria de cualquiera de los problemas requiere la consideración del otro.
- Las políticas previas, hasta ahora, han abordado en gran medida los problemas del cambio climático y la pérdida de biodiversidad de forma independiente. Las políticas que abordan simultáneamente las sinergias entre la mitigación de la pérdida de biodiversidad oportunidad de maximizar los cobeneficios y ayudar a cumplir las aspiraciones de desarrollo para todos.

- *A medida que avanza el cambio climático, la distribución, el funcionamiento y las interacciones de los organismos y, por lo tanto, de los ecosistemas, se alteran cada vez más.* La capacidad de adaptación de la mayoría de los ecosistemas y sistemas socioecológicos se verá superada por el cambio climático antropogénico constante, y se requerirá una capacidad de adaptación significativa para hacer frente al cambio climático residual, incluso con una reducción ambiciosa de las emisiones.
- En un mundo cada vez más afectado por el cambio climático, *el mantenimiento de la biodiversidad depende de esfuerzos de conservación mejorados y bien enfocados, coordinados y respaldados por fuertes esfuerzos de adaptación e innovación.* Los enfoques de conservación de la biodiversidad, como las áreas protegidas, han sido esenciales para los éxitos hasta la fecha, pero, en conjunto, han sido insuficientes para detener la pérdida de biodiversidad a escala mundial.
- *Un nuevo paradigma de conservación abordaría los objetivos simultáneos de un clima habitable, una biodiversidad autosuficiente y una buena calidad de vida para todos.* Los nuevos enfoques incluirían tanto la innovación como la adaptación y ampliación de los enfoques existentes. Las acciones para proteger, gestionar de manera sostenible y restaurar los ecosistemas naturales y modificados que abordan los desafíos sociales, como la mitigación y adaptación climáticas, a menudo se denominan soluciones basadas en la naturaleza (SBN).
- Las SBN pueden desempeñar un papel importante en la mitigación del cambio climático, pero se debate su alcance y solo pueden ser efectivas con reducciones ambiciosas en todas las emisiones de gases de efecto invernadero causadas por el hombre. Las SBN pueden ser más efectivas cuando se planifican para la longevidad y no se enfocan únicamente en el secuestro rápido de carbono.
- El área de tierra y océano intacta y efectivamente protegida que se requiere para cumplir con los tres objetivos de un clima habitable, una biodiversidad autosuficiente y una buena calidad de vida aún no está bien establecida. Aunque la implementación de SBN también crea beneficios colaterales para la adaptación al cambio climático, para la naturaleza y sus contribuciones a las personas. Evitar y revertir la pérdida y degradación de ecosistemas terrestres y oceánicos ricos en carbono y especies es de suma importancia para las acciones combinadas de protección de la biodiversidad y mitigación del cambio climático con grandes cobeneficios de adaptación.

- Las prácticas agrícolas y forestales sostenibles pueden mejorar la capacidad de adaptación, aumentar la biodiversidad, aumentar el almacenamiento de carbono en las tierras agrícolas y los suelos y la vegetación de los bosques, y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Tanto en los sistemas terrestres como marinos, existen opciones para combinar medidas basadas en la naturaleza y basadas en la tecnología para la mitigación y adaptación al cambio climático, al mismo tiempo que se contribuye a la biodiversidad.

C. Agua y Clima

El agua es el principal medio a través del cual el cambio climático influye en los ecosistemas de la Tierra y por lo tanto los medios de subsistencia y el bienestar de las sociedades. Los cambios en las precipitaciones –debido a las temperaturas más altas que el promedio y las temperaturas extremas– afectarán la disponibilidad de recursos hídricos a través de cambios en la forma, frecuencia, intensidad y distribución de las precipitaciones, la humedad del suelo, el derretimiento de los glaciares y la capa de hielo de los polos y los flujos de aguas subterráneas. El calentamiento global tendrá un impacto sobre la temperatura del agua, que se espera que tengan un efecto sustancial en el flujo de energía y en el reciclaje de la materia. Esto a su vez puede dar lugar a proliferación de algas, un aumento en el afloramiento de cianobacterias tóxicas y en consecuencia una disminución de la biodiversidad. La composición y calidad del agua en ríos y lagos podrían verse afectados debido a las alteraciones en la precipitación y la temperatura de derivados del cambio climático (Bates *et al.*, 2008). Hay una creciente evidencia de que esto ya está ocurriendo en muchas regiones, provocando un mayor deterioro de la calidad del agua en el futuro. El panorama mundial, sin embargo, es complicado y desigual, en las diferentes regiones, cuencas hidrográficas y localidades, las cuales están siendo afectadas en diferentes grados y de diversas maneras (UNEP, 2009; 2010; UN-Water, 2019¹⁶).

Desde el lado de la oferta, UN-WATER (2010; 2019) resalta que el cambio climático afecta el ciclo del agua directamente y la cantidad y calidad de los recursos hídricos disponibles para satisfacer las necesidades de las sociedades y los ecosistemas de diversas maneras:

¹⁶ UN-WATER es una iniciativa interinstitucional de las 28 organizaciones que componen el sistema de las Naciones Unidas. Se encarga de reforzar la coordinación y la coherencia entre las entidades de las Naciones Unidas que abordan cuestiones relativas a todos los aspectos del agua dulce y del saneamiento tales como los recursos hídricos superficiales y subterráneos, la interfaz entre el agua dulce y el agua del mar y las catástrofes naturales relacionadas con el agua. Mayor información disponible en el sitio <http://www.unwater.org/index.html>.

- La creciente demanda mundial de agua conlleva un aumento de la necesidad de bombeo, transporte y tratamiento de agua con un alto consumo energético, y ha contribuido con la degradación de sumideros de carbono fundamentales que dependen del agua como, por ejemplo, las turberas. Asimismo, algunas medidas de mitigación del cambio climático, como el fomento del uso de biocombustibles, pueden exacerbar aún más la escasez de agua. El aumento de la intensidad de las precipitaciones, causada por el cambio climático, provoca una mayor escorrentía y menor recarga de los acuíferos.
- El retroceso de los glaciares, la descongelación del permafrost y los cambios en las precipitaciones de nieve y lluvia pueden afectar a los flujos estacionales.
- Los períodos secos más largos tienden a reducir la recarga de los acuíferos, reducir los caudales mínimos en los ríos y la disponibilidad de agua, la agricultura, el abastecimiento de agua potable, la fabricación y producción de energía, la refrigeración de las plantas térmicas y la navegación.
- El cambio climático afectará directamente la demanda de agua de la industria y uso doméstico o de riego. La demanda de agua para el riego aumentaría a medida que aumenta la transpiración, debido a las altas temperaturas.
- Un impacto de primer orden del cambio climático es la propagación de enfermedades infecciosas, muchas de las cuales se transmiten a través del agua y ya representan una carga considerable para las poblaciones vulnerables de todo el mundo. Las enfermedades transmitidas por el agua, como el cólera, son muy sensibles a los cambios de temperatura, precipitación y humedad.

Por otra parte, el aumento de la intensidad de las lluvias, el derretimiento del hielo glaciar y la deforestación a gran escala ya están aumentando la erosión del suelo y reduciendo los nutrientes en la capa arable. En consecuencia, habrá cambios en el funcionamiento de los ecosistemas, lo que probablemente incrementará la pérdida de la biodiversidad y los daños en los servicios ecosistémicos. El aumento del nivel del mar tendrá graves efectos sobre los acuíferos costeros, que suministran gran parte del agua a muchas ciudades y comunidades aledañas. La pérdida de humedales también pone en peligro la salud y la productividad futuras de los ecosistemas y amenaza a la biodiversidad, alterando la idoneidad de extensas regiones para la producción de alimentos y la presencia de poblaciones humanas, y contribuye a las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero. Por lo tanto, su protección y recuperación es un componente esencial en cualquier estrategia general de adaptación al clima.

Este fenómeno también tendrá un impacto severo en la producción de alimentos en las principales regiones deltaicas, las cuales constituyen fuentes de alimentos en muchos países. Los ecosistemas costeros también se verían profundamente afectados, incluyendo:

- la pérdida de la productividad de los estuarios,
- la eliminación de hábitats para la reproducción de especies,
- los cambios en las islas que actúan como barreras,
- la pérdida de humedales, y
- una mayor vulnerabilidad tanto a la erosión costera como a las inundaciones.

Una gestión conjunta de las aguas superficiales y subterráneas puede potenciar la resiliencia a las sequías y hacer frente a la escasez de agua, lo que permitiría ampliar la capacidad total de almacenamiento de agua en la región. Las iniciativas para la gestión conjunta del agua, como la recarga gestionada de los acuíferos y el control de crecidas para el riego son soluciones sostenibles, rentables y escalables y podrían ser especialmente importantes en el contexto de los países en desarrollo. Las intervenciones en forma de políticas, como la planificación urbana integrada, la gestión de riesgos, el uso generalizado de sistemas de alerta temprana y la participación de las comunidades pueden reducir la exposición de las ciudades al riesgo de crecidas y sequías (UN-Water, 2019).

D. Agricultura y Clima

Uno de los factores de mayor relevancia, relacionado con el cambio climático, es que la agricultura, además de constituir un servicio ecosistémico esencial para el ser humano, también es una fuente importante de emisión de CO₂, N₂O y de CH₄, tres de los principales gases invernadero. La continua expansión de la superficie cultivada a expensas de la deforestación, principalmente en los países en desarrollo, disminuye la capacidad natural de absorción del anhídrido carbónico.

La agricultura mayormente intensiva en los países desarrollados (Norteamérica y Europa y Japón) y emergentes (China, India, Brasil, entre otros) está basada en el uso masivo de energía, especialmente combustibles para la mecanización intensiva, la aplicación de grandes cantidades de fertilizantes para los cultivos y pasturas, sistemas de riego poco eficientes, y la aplicación generalizada de agroquímicos (herbicidas, insecticidas, fungicidas, antiparasitarios, antibióticos, entre otros). Ello trae como consecuencia la contaminación de suelos, ríos, lagos, acuíferos y, en general, un gran deterioro ambiental de las zonas y sistemas de producción intensiva, por lo

general cercanas a los grandes centros urbanos. Por otra parte, los rebaños ganaderos, especialmente los rumiantes (bovinos, caprinos y ovinos) generan grandes cantidades de CH₄ como producto de la digestión de la fibra que consumen, representando cerca de 13% de las emisiones globales de CH₄ (IPCC, 2014; 2022).

En contraposición, el cambio climático amenaza con provocar daños irreversibles a los recursos naturales de los cuales depende la agricultura. Aunque un calentamiento moderado puede mejorar ligeramente el rendimiento de los cultivos en algunas áreas, en general, las consecuencias negativas eclipsarán cada vez más a las positivas. Las inundaciones y sequías se están volviendo cada vez más frecuentes y graves, lo que probablemente afectará seriamente a la productividad agrícola y a los medios de subsistencia de las comunidades rurales de los países en desarrollo y aumentará el riesgo de que se produzcan conflictos por la tierra y el agua. En países como Etiopía, Somalia, Sudan y Benín las deficiencias en la precipitación y del agua para riego han provocado migraciones de ingentes grupos de población, que terminan por convertirse en refugiados ambientales, con todas las consecuencias socio-políticas que ello implica. En extensas regiones de todos los continentes, la explotación continuada del agua de los grandes acuíferos, está haciendo cada vez más difícil extracción, en tanto que la reposición natural de los mismos es mucho más lenta que la tasa de uso para riego y consumo a la cual están sometidos. Además, el cambio climático propicia la propagación de plagas y especies invasoras y puede aumentar el alcance geográfico de algunas enfermedades.

El reconocimiento de que el cambio climático podría tener consecuencias negativas para la producción agrícola ha generado el deseo de aumentar la resiliencia en sistemas agrícolas. La agricultura practicada bajo enfoques agroecológicos puede ayudar a mitigar el cambio climático, al favorecer la captura de carbono por el suelo, reducir el uso de recursos químicos (pesticidas y fertilizantes), mejorar y favorecer la biodiversidad y propiciar el reciclaje de recursos dentro de las unidades de producción. Un método racional y rentable puede ser la aplicación de una mayor diversificación de los cultivos agrícolas. La diversificación de cultivos puede mejorar la resistencia en una variedad de formas: al generar una mayor capacidad para suprimir los brotes de plagas y amortiguar la transmisión de patógenos, que pueden empeorar bajo escenarios climáticos futuros, así como por la sobrecarga de la producción agrícola debida a los efectos de una mayor variabilidad del clima y los fenómenos extremos. Sin embargo, los incentivos económicos que fomentan la producción de un selecto grupo de cultivos, el impulso de las estrategias de agrobiotecnología, y la creencia de que los monocultivos son más productivos que los sistemas diversificados, han sido obstáculos en la promoción de esta estrategia. No obstante, la

diversificación de cultivos puede ser implementada en una variedad de formas y de escalas, permitiendo a los agricultores elegir una estrategia que aumente tanto la resiliencia como la obtención de beneficios económicos (Lin, 2011).

Recientemente ha surgido el debate en torno a la interacción entre el uso de la tierra, la producción alimentaria y la producción de biocombustibles, referida a sus implicaciones para los programas como las Metas de Desarrollo del Milenio de la ONU, la Erradicación del Hambre y la Pobreza, el Desarrollo Sostenible y la mitigación/adaptación al cambio climático. Si bien es cierto que los biocombustibles se perfilan como una alternativa para reducir las emisiones causantes del cambio climático, no menos cierto es que el uso de la superficie cultivable para la producción de cultivos a ser utilizados en la producción industrial de biocombustibles (maíz, caña de azúcar, palma aceitera, yuca, entre otros) va en desmedro de la producción de alimentos para una población cada vez mayor en el planeta. La UNEP (2009) reconoce que esta situación, junto con los eventos climáticos extremos de los últimos años, los altos precios de los alimentos y la especulación en los mercados internacionales, son factores determinantes de la crisis e inseguridad alimentaria de los años recientes. Igualmente señalan que la competencia entre producción de alimentos y producción de combustibles, junto con la continua degradación de las tierras arables puede provocar en el futuro una disminución de 8 a 20% en la superficie agrícola requerida para mediados del siglo XXI.

En este contexto, Harvey y Pilgrim (2011) plantean que esta situación se debe, principalmente a la creciente demanda y el cambio de los patrones alimentarios, la demanda de energía y materiales derivados de la biomasa, en el contexto del agotamiento del petróleo, las emisiones de gases de efecto invernadero de las actuales prácticas agrícolas, el cambio de uso del suelo y el consecuente cambio climático en sí, como una restricción de los altos niveles de productividad sobre la tierra disponible para el cultivo. Consideran que la suposición de que el aumento de la demanda de materiales energéticos aumentará la competencia por la tierra se basa en la premisa de que, en primer lugar, los recursos petroquímicos serán menores y a un costo cada vez más alto y volátil, y que, en segundo lugar, los sustitutos de los combustibles fósiles para el transporte se obtendrán en medida significativa sólo por los biocombustibles y la biotecnología industrial. Ante la mayor demanda combinada de alimentos y de energía, la presión sobre la conversión de tierras se incrementa, dando lugar a un mayor cambio climático, que a su vez puede afectar la productividad y la disponibilidad de tierra, creando así un círculo vicioso potencial. A ello se agrega la tendencia a la disminución en la tasa de crecimiento de los rendimientos de los principales cultivos observada durante los últimos 40 años. Dada la urgencia y los cambios

radicales que se necesitan para cumplir con la compleja interacción energía-alimentos-ambiente, serán necesarios nuevos modos de gobernanza económica, a escala nacional, regional e internacional, incluyendo nuevos marcos regulatorios para la sustentabilidad y nuevos enfoques en las relaciones geopolíticas y económicas globales entre países y sectores económicos.

A partir de 2010, la FAO viene promoviendo el concepto y la estrategia de la “agricultura climáticamente inteligente”, como una alternativa para hacer frente a los efectos deletéreos que el cambio climático pueda tener sobre más de 800 millones de almas en el globo que dependen enteramente de la producción agrícola de subsistencia (FAO, 2016). La agricultura climáticamente inteligente (CSA, siglas en inglés) constituye un enfoque que ayuda a orientar las acciones necesarias para transformar y reorientar los sistemas agrícolas con el fin de apoyar eficazmente el desarrollo y garantizar la seguridad alimentaria en el contexto de un clima cambiante. La CSA persigue tres objetivos principales: el aumento sostenible de la productividad y los ingresos agrícolas, la adaptación y la creación de resiliencia ante el cambio climático y la reducción y/o absorción de gases de efecto invernadero, en la medida de lo posible.

La CSA constituye un enfoque para desarrollar estrategias agrícolas encaminadas a garantizar la seguridad alimentaria sostenible en el marco del cambio climático. Para la FAO, la CSA provee los medios para ayudar a las partes interesadas a identificar, en los niveles local, nacional e internacional, estrategias agrícolas acordes con las condiciones de cada lugar.

El punto de partida para el análisis de la agricultura climáticamente inteligente son las tecnologías y prácticas a las que los países ya han dado prioridad en sus políticas y planificación agrícolas. Se utiliza información sobre las tendencias del cambio climático recientes y previstas a corto plazo para evaluar el potencial de estas tecnologías y prácticas con respecto a la seguridad alimentaria y la adaptación climática en condiciones de cambio climático específicas de cada lugar, y determinar los ajustes que pueda ser necesario realizar. Entre los ejemplos de estos tipos de ajustes se incluyen la modificación de las épocas de siembra y la adopción de variedades resistentes al calor y a la sequía; el desarrollo de nuevos cultivares; la modificación de la variedad de cultivos y ganado de la granja; la mejora de las prácticas de gestión del suelo y del agua, incluyendo la agricultura de conservación; la integración del uso de previsiones climáticas en la toma de decisiones sobre los cultivos; la ampliación del uso del riego; el aumento de la diversidad agrícola regional; y el cambio a fuentes de subsistencia no agrícolas. Puesto que las condiciones locales varían, una característica esencial de la agricultura climáticamente inteligente es determinar los efectos de las estrategias de intensificación agrícola sobre la

seguridad alimentaria, la adaptación y la mitigación en lugares específicos. Esto es especialmente importante en los países en desarrollo, donde el crecimiento agrícola es generalmente una prioridad absoluta (FAO, 2016).

E. Bosques y Clima

Los bosques desempeñan un papel importante en el ciclo global del carbono. Los árboles absorben carbono de la atmósfera y lo acumulan en la madera; ese carbono se libera a la atmósfera cuando la madera se quema o se descompone. Se calcula que la combustión de madera por sí sola es responsable de la sexta parte de todas las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por el hombre, debido principalmente a la deforestación. De la misma manera, los bosques se ven afectados por el cambio climático. Las variaciones en los regímenes de temperatura y precipitación pueden tener efectos en la ecofisiología de los ecosistemas forestales, así como en las comunidades de animales (vertebrados e invertebrados) que hacen vida en ellos.

Sin embargo, los bosques juegan un papel esencial en la prestación de servicios ecosistémicos aprovechables por el hombre, pues contribuyen a almacenar el carbono en la madera y raíces, al tiempo que facilitan el mismo proceso en la capa arable del suelo (carbono orgánico del suelo y de la materia orgánica que contiene).

A finales de 2010 se acordó en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático establecer un mecanismo para recompensar a los países en vías de desarrollo que reduzcan sus emisiones de carbono debidas a la deforestación y a la degradación de los bosques. Se trata del mecanismo de Reducción de emisiones por deforestación y degradación de los bosques (REDD+), una de las alternativas planteadas dentro de los mecanismos de desarrollo limpio, el cual se expondrá en el último capítulo.

De acuerdo con lo señalado por la FAO (2022), el cambio climático constituye hoy día un importante factor de riesgo para la salud de los bosques. Por ejemplo, hay indicios de que la incidencia y la gravedad de los incendios forestales y las plagas están aumentando. Los árboles y los bosques son medios destacados para luchar contra el cambio climático. Los bosques contienen 662 000 millones de toneladas de carbono, lo que constituye más de la mitad de las reservas de carbono mundiales de los suelos y la vegetación. A pesar de la disminución constante de su superficie, entre 2011 y 2020 los bosques absorbieron más carbono del que emitieron gracias a la reforestación, la mejora de la gestión forestal y otros factores.

Los bosques tienen otras múltiples repercusiones en el cambio climático, por ejemplo, emiten aerosoles y afectan al albedo y el vapor de agua atmosférico. La deforestación en los trópicos amazónicos y africanos podría tener efectos regionales considerables sobre las precipitaciones y, por tanto, sobre la agricultura de secano. Las repercusiones de los bosques en las condiciones climáticas pueden ser importantes en todos los ámbitos, desde el local hasta el regional; los árboles de las zonas urbanas, p. ej., reducen hasta en 12°C las temperaturas de la superficie terrestre en Europa central durante verano y en picos de calor (FAO, 2022).

F. Océanos y clima

Aunque uno de los más importantes efectos del cambio climático es la acidificación de los océanos (ver capítulo 10, sección 10.18), la revisión de diversos estudios recientes indica que el rápido aumento las concentraciones de gases de invernadero está conduciendo a los sistemas oceánicos hacia condiciones no observadas u ocurrentes en millones de años, con el riesgo asociado de transformación ecológica fundamental e irreversible (Hoegh-Guldberg y Bruno, 2010). Los impactos del cambio climático antropogénico hasta la fecha incluyen:

- la disminución de la productividad del océano,
- la alteración de la dinámica de la red alimentaria,
- la reducción de abundancia de especies formadoras de hábitat, cambios en su distribución, y
- una mayor incidencia de enfermedades en muchas especies animales y vegetales.

De la misma manera, Doney (2010) argumentan que el cambio climático, el aumento de dióxido de carbono en la atmósfera, los aportes de nutrientes en exceso, y la contaminación en sus múltiples formas están alterando fundamentalmente la química del océano, a menudo en una escala global y, en algunos casos, a tasas muy superiores a las del registro geológico histórico y reciente. La mayoría de las tendencias observadas incluyen un cambio en la química ácido-básica del agua marina, la reducción de oxígeno en el subsuelo, tanto cerca de la costa aguas costeras como en alta mar, el aumento de los niveles costeros de nitrógeno y el aumento generalizado de mercurio y contaminantes orgánicos persistentes. La mayoría de estas perturbaciones, encadenadas directa o indirectamente con la combustión de combustibles fósiles, el uso de fertilizantes y la actividad industrial humana, se prevé que crezcan en las próximas décadas, lo que resulta en el aumento de los impactos negativos sobre la biota del océano y los recursos marinos.

Boyd y Hutchins (2012) han revisado diversos estudios sobre la respuesta de la biota marina ante los cambios globales recientes, y una de las conclusiones se refiere a las diferentes respuestas de la biodiversidad oceánica, dependiendo de su posición en las cadenas tróficas, dada la heterogeneidad I y la interacción de los factores impulsores de los cambios. Los más afectados por los factores impulsores son los productores primarios y descomponedores, los que, en muchos casos, son afectados por la temperatura, los nutrientes disueltos y el pH, mientras que los de 2^o y 3^{er} niveles tienen mayores posibilidades de adaptación, debido a su plasticidad fenotípica y capacidad de movimiento hacia otros hábitats. Los peces y otras especies de la zona pelágica, a su vez, son menos afectados que los de la béntica, aunque los factores de carácter global, como la temperatura y la concentración de CO₂, son los que más alteraciones causan en las zonas pelágicas de altamar. En cambio, en las zonas costeras, el exceso de nutrientes y las partículas orgánicas persistentes provocan mayores alteraciones sobre la biota.

A escala mundial, aproximadamente mil millones de personas dependen de la pesca como su principal fuente de proteína y la mitad de ellas dependen de la pesca y de la acuicultura como medio de vida, sobre todo en los países en desarrollo. La producción primaria anual de los océanos ha disminuido aproximadamente 6% en los últimos 30 años (1980-2010). El cambio climático está afectando la estabilidad y riqueza en los arrecifes coralinos, el pasto marino, los estuarios, las salinas y los manglares, incluyendo a miles de especies que tienen sus hábitats en estos ecosistemas marinos, creando enormes desafíos y altos costos para las sociedades en todo el mundo, particularmente en los países en desarrollo. El cambio climático se prevé que conducirá a una redistribución a gran escala de la pesca comercial, incluyendo una caída de hasta 40% de la captura en los mares tropicales.

Los arrecifes coralinos están siendo impactados negativamente por el cambio climático, especialmente por el incremento de la temperatura en los océanos (Crabbe, 2009), dado que su rango de temperatura para el crecimiento es estrecho, así como por el incremento de CO₂ disuelto, el cual afecta la formación de los compuestos de calcio que los constituyen. El blanqueo de los corales, debido a la pérdida de los flagelados autótrofos *zooxanthellae* –que interactúan simbióticamente con foraminíferos y radiolarios–, es producto del incremento de la temperatura, así como la reducción de su crecimiento y productividad, pudiendo llegar incluso a desaparecer y, con ellos, la diversidad que habita en los arrecifes coralinos.

Debido a su ubicación en áreas con alta densidad poblacional, los estuarios sufren degradación por muchos factores, incluyendo sedimentación, por la erosión del suelo y la deforestación; sobrepastoreo y otras prácticas agrícolas pobres; sobrepesca; drenaje y relleno de humedales; residuos de eutrofización debido a excesivos nutrientes de las aguas residuales; contaminantes como metales pesados, PCB, radionúclidos e hidrocarburos de aguas residuales.

CAPÍTULO 4: LO QUE DICE LA CIENCIA AUTORIZADA (IPCC)

Aunque ya a mediados de la década de los años 60, la investigación sobre el clima había señalado que estaban ocurriendo cambios en los factores climáticos, el fenómeno del cambio climático alcanzó relevancia científica y política a partir de 1988, con la creación del Panel Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés)¹⁷ en una iniciativa conjunta de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, o UNEP, por sus siglas en inglés). El IPCC trabaja con los aportes voluntarios de miles de científicos de todo el mundo, analizando, interpretando e integrando los datos y el conocimiento que ellos generan en sus investigaciones, apoyado financieramente por las Naciones Unidas. A lo largo de sus 35 años, el IPCC ha elaborado seis (6) informes de evaluación, a través de los cuales se ha hecho evidente la evolución indiscutible del proceso de cambio climático global que está ocurriendo actualmente en el planeta. Es de destacar que el segundo informe, publicado en 1995, sentó las bases para el establecimiento, dos años después, del Protocolo de Kioto, por la Organización de Naciones Unidas, a través de la Convención Marco sobre Cambio Climático. Sucesivos informes han avanzado en la determinación de los factores impulsores, procesos, escenarios prospectivos y en el impacto que tienen sobre el sistema climático y sus resultados son objeto de consideración y discusión en el sistema de Naciones Unidas y la mayoría de la comunidad de naciones del mundo.

La revisión del conocimiento disponible que realiza el IPCC a través de centenares de científicos expertos que constituyen sus grupos de trabajo I, II y III, para la preparación de sus informes de Evaluación periódicos, le otorga la legitimidad y el valor científico-técnico con el que cuenta en la actualidad.

En el último informe de evaluación (AR6) sobre el cambio climático, el IPCC (2021; 2022; 2023) reconoce enfáticamente que el calentamiento de la atmósfera, el océano y la tierra debido a la influencia humana es inequívoco. Se han producido cambios rápidos y generalizados en la atmósfera, el océano, la criósfera y la biósfera. La escala de los recientes cambios en el sistema climático en su conjunto, así como el estado actual de muchos aspectos del sistema climático, no tienen precedentes a lo largo de muchos siglos a muchos miles de años (IPCC, 2021).

¹⁷ <https://www.ipcc.ch/about/>

Continúa el IPCC (2021) informando que en 2019 las concentraciones atmosféricas de CO₂ fueron más altas que en cualquier momento en, al menos, 2 millones de años –alcanzando actualmente 421 ppm¹⁸ frente a los 315 ppm hace 65 años–. Similarmente, las concentraciones de CH₄ y N₂O fueron más altas que en cualquier momento en, al menos, 800.000 años. Desde 1750, los aumentos de las concentraciones de CO₂ (47%) y CH₄ (156%) superan con creces –y los aumentos de N₂O (23%) son similares– a los cambios naturales multimilenarios entre períodos glaciares e interglaciares durante, al menos, los últimos 800.000 años.

El cambio climático causado por las actividades humanas ya influye en muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos en todas las regiones del mundo. Desde la publicación del informe de evaluación AR5, en 2014, hay muchas más evidencias de que los fenómenos extremos –como olas de calor, precipitaciones intensas, sequías y huracanes (ciclones) tropicales– están evolucionando hacia una mayor severidad, lo cual se debe a la influencia humana. Es prácticamente seguro que ha aumentado la frecuencia y la intensidad de los episodios de calor extremo (incluidas las olas de calor) en la mayoría de las regiones terrestres desde la década de 1950, mientras que los fenómenos de frío extremo (incluidas las olas de frío) se han vuelto menos frecuentes y menos intensos.

El IPCC (2023) confirma un resultado que es preocupante para la comunidad científica y los gobiernos de la mayoría de países: las actividades humanas han causado un calentamiento global de aproximadamente 1,07°C con respecto a los niveles preindustriales, con un rango probable de 0,8°C a 1,2°C. Es probable que el calentamiento global llegue a 1,5°C entre 2030 y 2050 si continúa aumentando al ritmo actual. En muchas regiones y estaciones del año se está experimentando un calentamiento superior al promedio mundial anual y, particularmente en el Ártico, el calentamiento llega a entre el doble y el triple.

El calentamiento causado por las emisiones antropogénicas desde el período preindustrial hasta la actualidad durará de siglos a milenios y seguirá causando nuevos cambios a largo plazo en el sistema climático, tales como:

- Un aumento del nivel del mar, acompañados de impactos asociados; no obstante, es improbable que esas emisiones por sí solas causen un calentamiento global de 1,5°C.

¹⁸ De acuerdo con: UNEP (2023). <https://data.unep.org/climate/essential-climate-variables-ecv/atmospheric-co2-concentration>

- Se prevé que las temperaturas extremas en tierra aumenten más que la temperatura media global en superficie: el aumento de las temperaturas de los días de calor extremo, en las latitudes medias se prevé en hasta aproximadamente 3°C con un calentamiento global de 1,5°C y hasta aproximadamente 4°C con un calentamiento global de 2°C.
- En algunas regiones se prevé que los riesgos debidos a las sequías y los déficits de precipitación sean mayores con un calentamiento global de 2°C que con uno de 1,5°C. Se calcula que los riesgos de episodios de precipitaciones intensas serán mayores con un calentamiento global de 2°C que con uno de 1,5°C en varias regiones de latitudes altas o a gran altitud en el hemisferio norte, en el este de Asia y en el este de América del Norte.
- Más aún, el calentamiento global antropogénico en escalas de tiempo multidecenales se detendría sólo si se alcanzaran y mantuvieran emisiones antropogénicas globales netas de CO₂ iguales a cero y se redujera el forzamiento radiativo neto distinto del CO₂ (IPCC,2021).

4.1 Síntesis de los resultados del IE6 (AR6) de evaluación del IPCC

A continuación, se reproducen las conclusiones sólidas más importantes que reporta el Sexto Informe de Evaluación del IPCC – IE6 (AR6, en inglés), sintetizados a partir del análisis de las tres publicaciones que lo integran (IPCC, 2021; 2022; 2023):

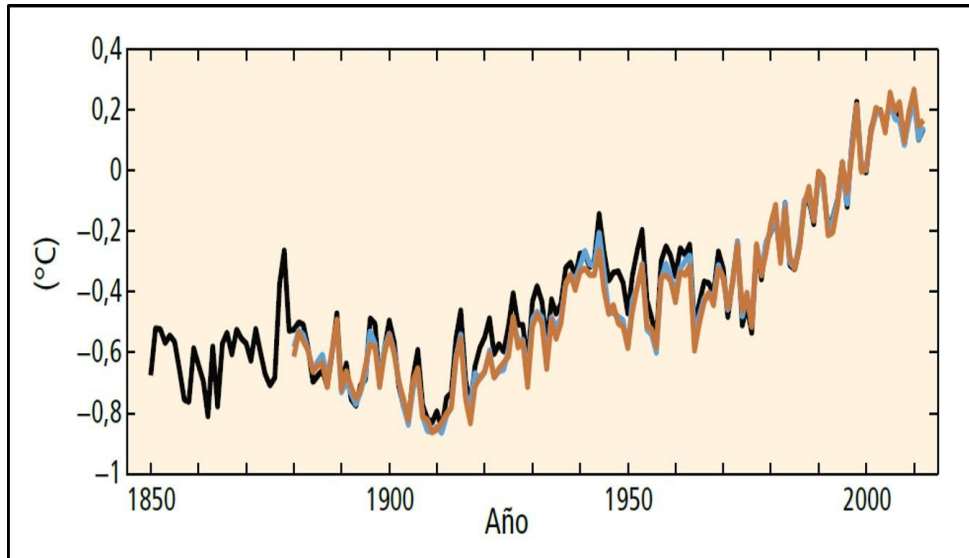
A. Cambios observados en el clima: causas y efectos

- La influencia humana en el sistema climático es clara, y *las emisiones antropogénicas recientes de gases de efecto invernadero son las más altas de la historia*. Los cambios climáticos recientes han tenido impactos generalizados en los sistemas humanos y naturales. Desde el Cuarto Informe de Evaluación (AR4) se ha comprobado que los impactos de los cambios recientes en el clima en los sistemas naturales y humanos ocurren en todos los continentes y en los océanos. Los cambios observados en la atmósfera, los océanos, la criósfera y la biósfera brindan evidencia inequívoca de un mundo que se ha calentado. En las últimas décadas, los indicadores clave del sistema climático se encuentran cada vez más en niveles no vistos en siglos o milenios, y están cambiando a un ritmo sin precedentes en al menos los últimos 2000 años.
- *El aumento de la temperatura promedio global en la superficie del planeta en las dos primeras décadas del siglo XXI (2001–2020) fue 0,99 [0,84–1,10] °C más alta que entre*

1850 y 1900. Cada una de las últimas cuatro décadas ha sido sucesivamente más cálida que todas las décadas anteriores desde 1850. Durante los últimos 50 años, la variación observada ha aumentado a un ritmo sin precedentes en al menos los últimos 2000 años, como se observa en la Figura 8 (IPCC, 2021).

Figura 8.

Tendencias del incremento de la temperatura promedio global en la superficie del planeta



Fuente: IPCC (2021)

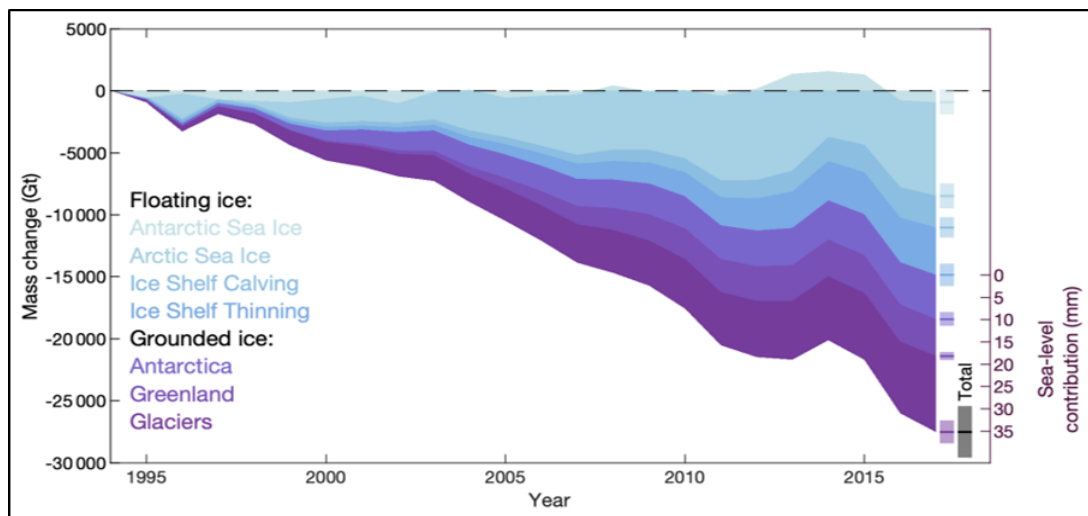
- El calentamiento a corto plazo y el aumento de la frecuencia, gravedad y duración de los fenómenos extremos pondrán a muchos ecosistemas terrestres, de agua dulce, costeros y marinos en riesgo alto o muy alto de pérdida de biodiversidad (variable según el ecosistema que se trate).
- Los riesgos a corto plazo de pérdida de biodiversidad son de moderados a altos en los ecosistemas forestales, algas marinas y ecosistemas de pastos marinos y alta a muy alta en el hielo marino del Ártico y ecosistemas terrestres y arrecifes de coral de aguas cálidas. El aumento continuo y acelerado del nivel del mar invadirá los asentamientos y la infraestructura costeros y comprometerá los ecosistemas costeros de baja altitud a la inmersión y la pérdida.
- Si continúan las tendencias de urbanización en áreas expuestas, *esto exacerbará los impactos, con más desafíos donde la energía, el agua y otros servicios están limitados.* El

número de personas en riesgo por el cambio climático y la pérdida de biodiversidad asociada aumentará progresivamente. Los conflictos violentos y, por separado, los patrones migratorios, en el corto plazo serán impulsados por las condiciones socioeconómicas y la gobernanza más que por el cambio climático.

- Es muy probable que la superficie media anual del *hielo marino del Ártico haya disminuido durante el período 1979-2017 en un rango de 3,5% a 4,1% por decenio*. La extensión del hielo marino del Ártico ha disminuido en cada estación y en cada decenio sucesivo desde 1979, siendo en verano cuando se ha registrado el mayor ritmo de disminución en la extensión media decenal (Figura 9).

Figura 9.

Cambio global de la masa de hielo entre 1994 y 2017 dividido en diferentes componentes; flotantes (azules) y terrestres (púrpuras)



Fuente: Slater *et al.* (2021)

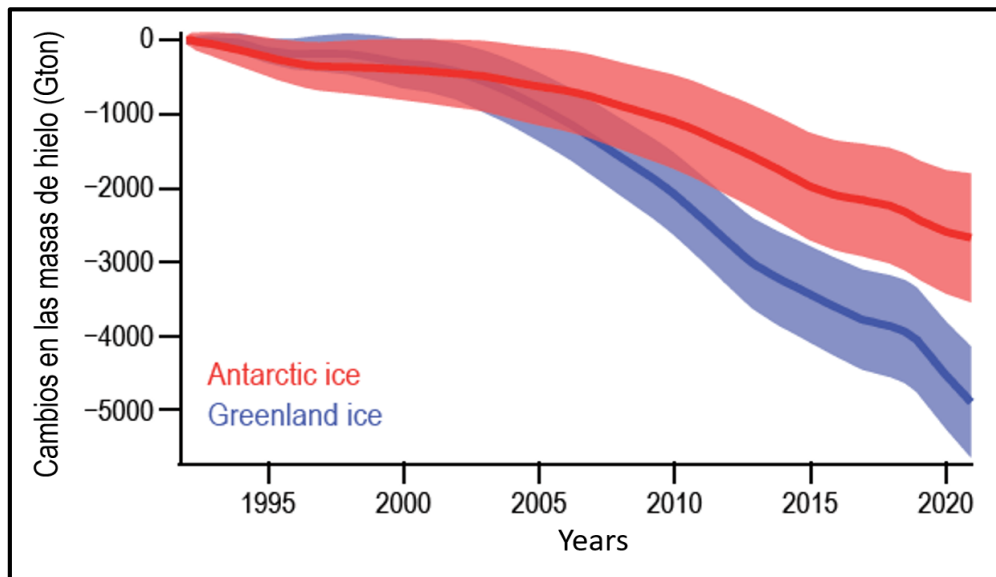
La situación de las masas de hielo es igualmente reportada por IPCC (2021) para la Antártida y Groenlandia, tal y como se muestra en la Figura 10.

¹⁹ Nota: Las barras sombreadas a la derecha indican el cambio de masa acumulado y la incertidumbre estimada para cada componente de hielo individual (azules, violetas) y su suma (negro). La contribución equivalente del nivel del mar debido a la pérdida de hielo en tierra de la Antártida, Groenlandia y los glaciares de montaña se muestra en el eje y del lado derecho.

- *La mayor parte del aumento observado del promedio mundial de temperatura desde mediados del siglo XX se debe muy probablemente al aumento observado de las concentraciones de GEI antropogénicos, como se ilustra en las figuras 3 y 4 en el capítulo anterior. Específicamente, cada uno de los tres últimos decenios ha sido sucesivamente más cálido en la superficie de la Tierra que cualquier decenio anterior desde 1850. Es probable que el período 1983-2012 haya sido el período de 30 años más cálido de los últimos 1.400 años en el hemisferio norte, donde es posible realizar esa evaluación. Los datos de temperatura de la superficie terrestre y oceánica, combinados y promediados globalmente, calculados a partir de una tendencia lineal, muestran un calentamiento de 1,01°C, durante el período 1880-2019 (IPCC, 2021).*

Figura 10.

Cambios de masa acumulados de la capa de hielo de la Antártida (AIS) y la capa de hielo de Groenlandia (GrlS). Los valores que se muestran están en gigatoneladas (Gton) y provienen de mediciones satelitales para el período 1992-2020



Fuente: IPCC (2021)

B. El aumento de los GEI y sus tendencias

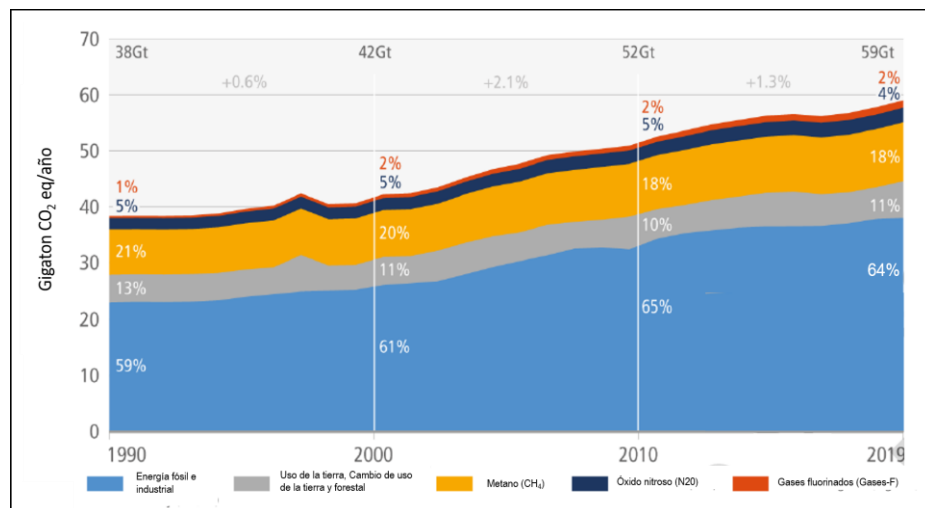
- Las emisiones antropogénicas netas totales de GEI han seguido aumentando durante el período 2010-2019, al igual que las emisiones netas acumuladas de CO2 desde 1850. Las emisiones anuales promedio de GEI durante 2010-2019 fueron más altas que en cualquier década anterior, pero la tasa de crecimiento entre 2010 y 2019 fue menor que entre 2000 y

2009. Las emisiones antropogénicas netas de GEI han aumentado desde 2010 en todos los sectores principales a nivel mundial. Una parte cada vez mayor de las emisiones puede atribuirse a las zonas urbanas.

- Las emisiones antropogénicas globales netas de GEI fueron de $59 \pm 6,6$ GtCO₂-eq en 2019, aproximadamente un 12% (6,5 GtCO₂-eq) más que en 2010 y un 54% (21 GtCO₂-eq) más que en 1990. El promedio durante la década 2010-2019 fue de $56 \pm 6,0$ GtCO₂-eq, 9,1 GtCO₂-eq/año más que en 2000-2009. Este es el mayor aumento registrado en las emisiones promedio por década. La tasa de crecimiento anual promedio se desaceleró del 2,1%/año entre 2000 y 2009 al 1,3%/año entre 2010 y 2019 (Figura 11).
- El crecimiento de las emisiones antropogénicas ha persistido en todos los principales grupos de GEI desde 1990, aunque a ritmos diferentes. Para 2019, el mayor crecimiento absoluto de las emisiones se produjo en el CO₂ de los combustibles fósiles y la industria, seguido del CH₄, mientras que el mayor crecimiento relativo se produjo en los gases fluorados, partiendo de los bajos niveles de 1990.

Figura 11.

Tendencias de emisiones de GEI agregadas por grupos de GEI expresados en GtCO₂-eq convertidos en base a 6 potenciales de calentamiento global con un horizonte temporal de 100 años (GWP100)



Fuente: IPCC (2022).

- Las reducciones de emisiones de CO₂ de los combustibles fósiles y los procesos industriales, debido a las mejoras en la intensidad energética del PIB y la intensidad de carbono de la energía, han sido menores que los aumentos de emisiones debido al aumento de los niveles de actividad global en la industria, el suministro de energía, el transporte, la agricultura y los edificios.
- *El cambio climático futuro, inducido por las emisiones atmosféricas de gases de efecto invernadero, afectará al ciclo global del carbono, lo que, a su vez, influirá en la fracción de gases de efecto invernadero antropogénico que permanece en la atmósfera, lo que intensificará el cambio climático.* Esta retroinformación se denomina acoplamiento clima-carbono.

C. Detonantes y proyecciones de cambios climáticos futuros

- De subsistir las políticas actuales de mitigación del cambio climático y las correspondientes prácticas de desarrollo sostenible, *las emisiones de GEI mundiales seguirán aumentando durante los próximos decenios.*
- Durante los próximos dos decenios, las proyecciones indican un calentamiento de aproximadamente 0,2°C por decenio. El mantenimiento de las emisiones de GEI en tasas actuales o superiores ocasionaría un mayor calentamiento e induciría numerosos cambios en el sistema climático mundial durante el siglo XXI, que muy probablemente serían mayores que los observados durante el siglo XX.
- La pauta de calentamiento futuro en la que la tierra firme se calienta más que los océanos adyacentes y en mayor medida en latitudes altas septentrionales aparece en todos los escenarios previstos.
- El calentamiento tiende a reducir la incorporación de CO₂ atmosférico por el ecosistema terrestre y por los océanos, incrementando así la fracción de emisiones antropogénicas que permanece en la atmósfera. La incorporación de CO₂ antropogénico desde el año 1750 ha intensificado la acidez de las capas superficiales del océano.
- *El calentamiento antropogénico y el aumento de nivel del mar proseguirían durante siglos, aunque las emisiones de GEI se redujesen lo suficiente para estabilizar sus concentraciones,* debido a las escalas de tiempo en que se desarrollan los procesos y la retroalimentación en los sistemas climáticos. Es muy improbable que la sensibilidad climática en equilibrio sea inferior a 1,5°C.

- Es probable que algunos sistemas, sectores y regiones resulten especialmente afectados por el cambio climático. Los sistemas y sectores son: ciertos ecosistemas (tundras, bosques boreales, montañas, ecosistemas de tipo mediterráneo, manglares, marismas, arrecifes coralinos, y el bioma de los hielos marinos), las costas bajas, los recursos hídricos en algunas regiones secas de latitudes medias, en los trópicos y subtropicos secos y en las áreas que dependen de la nieve y el hielo derretidos, la agricultura en regiones de latitud baja, y la salud humana en áreas de escasa capacidad adaptativa. Las regiones son: el Ártico, África, las islas pequeñas, y los grandes deltas de Asia y África.
- En otras regiones, incluso en algunas con alto nivel de ingresos, ciertas poblaciones, áreas y actividades pueden estar particularmente en riesgo. Algunos fenómenos climáticos de gran escala tienen el potencial de causar impactos muy grandes, especialmente después del Siglo XXI.
- Es muy probable que los impactos aumenten debido a una mayor frecuencia e intensidad de ciertos fenómenos meteorológicos extremos. Sucesos recientes han evidenciado la vulnerabilidad de algunos sectores y regiones, incluso en países desarrollados, a olas de calor, ciclones tropicales, crecidas y sequías, que resulta más preocupante que en las conclusiones de la evaluación previa.

4.2 Impactos del cambio climático sobre algunos ámbitos relevantes

La evaluación del del IPCC (2021;2022;2023) incluye igualmente un análisis de los efectos que el cambio climático tiene en ámbitos como los ecosistemas, el agua, los océanos y la salud humana, cuyas principales conclusiones se reproducen a continuación:

A) Efectos específicos sobre los Ecosistemas

- *La resiliencia de numerosos ecosistemas se verá probablemente superada en el presente siglo por una combinación sin precedentes del cambio climático, perturbaciones asociadas –por ejemplo, inundaciones, sequías, incendios incontrolados, insectos, acidificación del océano– y otros detonantes del cambio global, por ejemplo, el cambio de uso de la tierra, polución, fragmentación de los sistemas naturales y sobreexplotación de recursos.*
- *Durante el presente siglo, la incorporación neta de carbono de los ecosistemas terrestres alcanzará probablemente un máximo antes de mediados del siglo para, seguidamente, debilitarse o incluso invertirse, amplificando de ese modo el cambio climático.*

- *Entre 20% y 30% aproximadamente de las especies vegetales y animales estudiadas hasta la fecha estarán probablemente expuestas a un mayor riesgo de extinción* si los aumentos del promedio mundial de temperatura exceden de entre 1,5 y 2,5°C. De sobrepasar los 3,5°C, las proyecciones de los modelos predicen un nivel de extinciones cuantioso (entre 40% y 70% de las especies consideradas) en todo el mundo. A pesar de que se ha obtenido cierto éxito de conservación en la recuperación de varias especies amenazadas y se han redescubierto algunas especies que se creían extinguidas, es factible que a lo largo de las próximas décadas los ritmos de extinción se incrementen en el orden de 1.000–10.000 veces con respecto a los ritmos registrados como antecedentes (UNEP, 2005).
- Para aumentos del promedio mundial de temperatura superiores a entre 1,5 y 2,5°C y las correspondientes concentraciones de CO₂ en la atmósfera, las proyecciones indican *importantes cambios en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, en las interacciones ecológicas y desplazamientos del ámbito geográfico de las especies*, con consecuencias predominantemente negativas para la biodiversidad y para los bienes y servicios ecosistémicos (por ejemplo, suministro de agua y alimentos).
- Actualmente, *los ecosistemas terrestres eliminan más carbono de la atmósfera, 2,5 – 4,3 Gt/año, de lo que emiten (+1,6 ± 0,7 Gt/año)*, por lo que actualmente son un sumidero neto de $-1,9 \pm 1,1$ Gt/año.
- Las selvas tropicales intactas, el permafrost del Ártico, las turberas y otros ecosistemas saludables con alto contenido de carbono brindan un servicio ecosistémico global vital para prevenir la liberación de carbono almacenado.
- Las extinciones de poblaciones locales causadas por el cambio climático han sido generalizadas entre plantas y animales, detectadas en 47% de las 976 especies examinadas y asociadas con aumentos en las temperaturas anuales más altas.
- Aproximadamente la mitad de las especies han cambiado sus áreas de distribución a latitudes o elevaciones más altas y dos tercios de los eventos fenológicos de primavera han avanzado, impulsados por los cambios climáticos regionales.
- Múltiples líneas de evidencia, combinadas con las tendencias fuertes y consistentes observadas en todos los continentes, hacen que sea muy probable que muchos de los cambios observados en los rangos, fenología, fisiología

y morfología de las especies terrestres y de agua dulce puedan atribuirse a cambios climáticos regionales y globales, particularmente aumentos en la frecuencia y severidad de los eventos extremos.

B) Efectos sobre el Agua

- Hay creciente evidencia de que los cambios observados en el ciclo hidrológico están afectando las poblaciones y los ecosistemas. Una porción significativa de dichos cambios impacta negativamente y de manera desproporcionada a comunidades vulnerables.
- Actualmente, cerca de la mitad de la población mundial (~ 4.000 millones de personas) se estima que experimentan escasez severa de agua parcialmente durante el año, debido a factores climáticos y no climáticos.
- *Los glaciares continúan reduciéndose en todo el mundo, como resultado del cambio climático, afectando la escorrentía y los recursos hídricos aguas abajo.* El cambio climático es el principal motor del calentamiento y descongelación del permafrost en las regiones montañosas de alta latitud y alta elevación. Los sistemas hidrológicos han cambiado en muchas regiones debido a cambios en la precipitación o fusión de la criósfera, que afectan los recursos hídricos, la calidad del agua y el transporte de sedimentos, poniendo en riesgo las poblaciones y los ecosistemas en las regiones boreales y polares.
- La pérdida parcial de los mantos de hielo en tierras polares y/o la dilatación térmica del agua marina podría ocasionar, a escalas de tiempo muy prolongadas, aumentos de nivel del mar de varios metros, importantes alteraciones de las líneas costeras e inundaciones en extensiones bajas, y sus efectos serían máximos en los deltas pluviales e islas bajas.
- La intensificación del ciclo hidrológico debido al cambio climático inducido por el hombre está afectando los aspectos físicos de la seguridad del agua, lo que exacerba las vulnerabilidades existentes relacionadas con el agua causadas por otros factores socioeconómicos.
- Los eventos climáticos extremos que causan inundaciones y sequías de gran impacto se han vuelto más probables y (o) más severos debido al cambio climático antropogénico.
- El cambio climático antropogénico ha contribuido a aumentar la probabilidad y la gravedad del impacto de las sequías (especialmente las sequías agrícolas e hidrológicas) en muchas regiones. Se prevé que los riesgos de sequía e inundación y los daños sociales aumenten con cada grado de calentamiento global.

C) Efectos sobre los océanos

- El cambio climático antropogénico ha expuesto los ecosistemas oceánicos y costeros a condiciones sin precedentes durante milenios, y esto ha impactado enormemente la vida en el océano y a lo largo de sus costas. Los cambios fundamentales en las características físicas y químicas de los océanos, actuando individualmente y en conjunto, están modificando el calendario de las actividades estacionales, la distribución y la abundancia de los organismos oceánicos y costeros, desde los microbios hasta los mamíferos y desde los individuos hasta los ecosistemas, en todas las regiones. La evidencia de estos cambios es evidente a partir de observaciones multidecenales, estudios de laboratorio y mesocosmos, así como metaanálisis de datos publicados.
- Los cambios en el área de distribución geográfica de las especies marinas generalmente siguen el ritmo y la dirección del calentamiento climático: el calentamiento de la superficie desde la década de 1950 ha desplazado taxones y comunidades marinas hacia los polos a un promedio de $59,2 \pm 15,5$ km por década, con una variación sustancial en las respuestas entre taxones y regiones.
- Los eventos estacionales ocurren $4,3 \pm 1,8$ días a $7,5 \pm 1,5$ días antes por década entre los organismos planctónicos y en promedio $3 \pm 2,1$ días antes por década para los peces. A escala local o regional, el cambio climático empeora los impactos sobre la vida marina de factores antropogénicos no climáticos, como la degradación del hábitat, la contaminación marina, la sobrepesca y la sobreexplotación, el enriquecimiento de nutrientes y la introducción de especies no autóctonas.
- Aunque los impactos de múltiples impulsores climáticos y no climáticos pueden ser beneficiosos o neutrales para la vida marina, la mayoría son perjudiciales. El calentamiento exagera la eutrofización costera y la hipoxia asociada, lo que provoca "zonas muertas", que provocan graves impactos en los ecosistemas costeros y de la plataforma marina, incluidas mortalidades masivas, reducción del hábitat e interrupciones de la pesca. La sobrepesca exagera los efectos de múltiples impulsores inducidos por el clima sobre los depredadores en la parte superior de la cadena alimentaria marina.

- Los impactos provocados por el clima en los entornos marinos y costeros han causado cambios medibles en industrias específicas, pérdidas económicas, daños emocionales y actividades culturales y recreativas alteradas en todo el mundo.
- El cambio climático está aumentando la propagación geográfica y el riesgo de patógenos transmitidos por el mar como *Vibrio* sp, que ponen en peligro la salud humana y disminuyen el aprovisionamiento y los servicios ecosistémicos culturales. Los impulsores inducidos por el clima y los impulsores no climáticos que interactúan mejoran el movimiento y la bioacumulación de toxinas y contaminantes en las redes alimentarias marinas, y aumentan la salinidad de las aguas costeras, los acuíferos y los suelos, lo que pone en peligro la salud humana.
- Algunos ecosistemas costeros que forman hábitats, incluidos muchos arrecifes de coral, bosques de algas marinas y praderas de pastos marinos, sufrirán cambios de fase irreversibles debido a olas de calor marinas con niveles de calentamiento global $>1,5^{\circ}\text{C}$ y corren un alto riesgo este siglo, incluso en escenarios de $<1,5^{\circ}\text{C}$ que incluyen períodos de sobrepaso de temperatura más allá de $1,5^{\circ}\text{C}$. Los arrecifes de coral corren el riesgo de sufrir un declive generalizado, pérdida de integridad estructural y transición a la erosión neta a mediados de siglo debido al aumento de la intensidad y la frecuencia de las olas de calor marinas. Debido a estos impactos, es muy probable que la tasa de aumento del nivel del mar supere la del crecimiento de los arrecifes para 2050, en ausencia de adaptación.
- Otros ecosistemas costeros, incluidos los bosques de algas, manglares y pastos marinos, son vulnerables a los cambios de fase hacia estados alternativos a medida que se intensifican las olas de calor marinas. Se espera que la pérdida de bosques de algas marinas sea mayor en el borde cálido de baja latitud de las áreas de distribución de las especies.
- Los crecientes impactos del cambio climático en la vida marina alterarán aún más la biomasa de los animales marinos, el momento de los eventos ecológicos estacionales y los rangos geográficos de los taxones costeros y oceánicos, alterando los ciclos de vida, las redes alimentarias y la conectividad ecológica en toda la columna de agua. Es muy probable que los riesgos derivados del aumento del nivel del mar para los ecosistemas costeros y las personas se multipliquen por diez mucho antes de 2100 sin las medidas de adaptación y mitigación acordadas por las Partes del Acuerdo de París. El aumento del nivel del mar en escenarios de emisiones que no limitan el calentamiento a $1,5^{\circ}\text{C}$

aumentará el riesgo de erosión costera y sumergimiento de las tierras costeras, la pérdida de ecosistemas y hábitats costeros y empeorará la salinización de las aguas subterráneas, lo que pondrá en peligro los ecosistemas costeros y los medios de subsistencia.

D) Impactos en la producción de alimentos (Agricultura)

- Los impactos del cambio climático están estresando la agricultura, la silvicultura, la pesca y la acuicultura, lo que dificulta cada vez más los esfuerzos para satisfacer las necesidades humanas. *El calentamiento inducido por el hombre ha frenado el crecimiento de la productividad agrícola en los últimos 50 años en latitudes medias y bajas.* El rendimiento de los cultivos se ve comprometido por el ozono superficial.
- *Las emisiones de metano han tenido un impacto negativo en el rendimiento de los cultivos al aumentar las temperaturas y las concentraciones de ozono en la superficie.*
- *El calentamiento está afectando negativamente la calidad de los cultivos y los pastizales y la estabilidad de la cosecha.* Las condiciones más cálidas y secas han aumentado la mortalidad de los árboles y las perturbaciones forestales en muchos biomas templados y boreales, lo que tiene un impacto negativo en los servicios de aprovisionamiento.
- *El calentamiento ha alterado la distribución, la idoneidad del área de cultivo y el momento de los eventos biológicos clave, como la floración y la aparición de insectos, lo que afecta la calidad de los alimentos y la estabilidad de la cosecha.* Es muy probable que el cambio climático esté alterando la distribución de especies cultivadas, silvestres, terrestres, marinas y de agua dulce. En latitudes más altas, el calentamiento ha ampliado el área potencial, pero también ha alterado la fenología, lo que puede causar desajustes entre plantas, polinizadores y plagas.
- *Los extremos relacionados con el clima han afectado la productividad de todos los sectores agrícolas y pesqueros, con consecuencias negativas para la seguridad alimentaria y los medios de vida (nivel de confianza alto).* La frecuencia de las pérdidas repentinas de producción de alimentos ha aumentado desde al menos mediados del siglo XX en tierra y mar.
- *Las sequías, las inundaciones y las olas de calor marinas contribuyen a la reducción de la disponibilidad de alimentos y al aumento de los precios de los alimentos, lo que amenaza la seguridad alimentaria, la nutrición y los medios de subsistencia de millones de personas.*

Las sequías inducidas por El Niño de 2015-2016, parcialmente atribuibles a la influencia humana, causaron una aguda inseguridad alimentaria en varias regiones, incluidos el este y el sur de África y el corredor seco de América Central.

- El cambio climático afecta a todos, pero los grupos vulnerables, como las mujeres, los niños, los hogares de bajos ingresos, los grupos indígenas u otros grupos minoritarios y los productores a pequeña escala, corren un mayor riesgo de desnutrición, pérdida de medios de subsistencia, aumento de los costos y competencia por los recursos. La creciente competencia por la tierra, la energía y el agua exacerba los impactos del cambio climático en la seguridad alimentaria.
- Las invasiones de especies han aumentado en las últimas décadas en todo el mundo, especialmente en los ecosistemas de agua dulce, causando a menudo la pérdida de biodiversidad u otros impactos negativos. Una vez establecidos en un nuevo entorno, muchas especies introducidas se han convertido recientemente en invasoras debido al cambio climático.
- Según Malhi (2021), el cambio en el patrón climático o meteorológico de un área aumentará la susceptibilidad de un cultivo a diversas plagas, enfermedades y malezas. Aunque se proyectan mayores rendimientos en países de latitudes altas y medias, se prevé que los rendimientos disminuyan en latitudes más bajas. Sin embargo, hay proyecciones de un aumento del 10 a 25% en las pérdidas debido a la infestación de plagas de insectos con un aumento de la temperatura de un grado. El cambio climático tiene el potencial de aumentar la población de plagas y su migración, lo que puede tener un impacto adverso en los rendimientos agrícolas e incluso en la viabilidad, ya que la población de plagas depende principalmente de factores abióticos como la humedad y la temperatura.

Dentro de los *Impactos proyectados en la agricultura*, el IPCC (2022) señala que:

- *El cambio climático hará que algunas áreas actuales de producción de alimentos no sean adecuadas.* Las áreas agrícolas y ganaderas mundiales actuales se volverán cada vez más inadecuadas desde el punto de vista climático en un escenario de emisiones altas.
- *El aumento de los extremos climáticos potencialmente simultáneos aumentará periódicamente las pérdidas simultáneas en las principales regiones productoras de alimentos.* Los impactos en la disponibilidad de alimentos y la calidad nutricional aumentarán el número de personas en riesgo de hambre, desnutrición y mortalidad relacionada con la dieta.

- *El cambio climático aumentará el número de personas en riesgo de hambre a mediados de siglo, concentradas en el África subsahariana, el sur de Asia y América Central.* El cambio climático expondrá cada vez más a los trabajadores al aire libre y a los animales al estrés por calor, lo que reducirá la capacidad laboral, la salud animal y la producción de carne y lácteos
- *El cambio climático reducirá la eficacia de los agentes polinizadores a medida que se pierdan especies en ciertas áreas o se interrumpa la coordinación de la actividad de los polinizadores y la receptividad de las flores en algunas regiones.* Las emisiones de gases de efecto invernadero tendrán un impacto negativo en la calidad del aire, el suelo y el agua, lo que exacerbará los impactos climáticos directos en los rendimientos.
- El cambio climático alterará significativamente los servicios de suministro de alimentos acuáticos y la seguridad del agua con variaciones regionales. *El cambio climático reducirá la productividad de la pesca y la acuicultura marina, alterando las especies que se pescarán o cultivarán y reduciendo el hábitat de la acuicultura en áreas tropicales y subtropicales.*
- La biomasa animal oceánica mundial disminuirá entre un 5 % y un 17 % con RCP 2,6 y 8,5, respectivamente, entre 1970 y 2100, con una disminución media del 5% por cada 1°C de calentamiento, lo que afectará al suministro de alimentos, el valor de los ingresos y la distribución.

E) Impactos sobre la salud humana

- Las enfermedades relacionadas con el clima, las muertes prematuras, la desnutrición en todas sus formas y las amenazas para la salud mental y el bienestar están aumentando. Los peligros climáticos son un impulsor creciente de la migración y el desplazamiento involuntarios (nivel de confianza alto) y son un factor que contribuye a los conflictos violentos. Estos impactos a menudo están interconectados, se distribuyen de manera desigual entre las sociedades y dentro de ellas, y se seguirán experimentando de manera desigual debido a las diferencias en la exposición y la vulnerabilidad.
- Se alcanzaron nuevos acuerdos internacionales sobre cambio climático (Acuerdo de París), reducción del riesgo de desastres (RRD) (Acuerdo de Sendai), desarrollo sostenible (Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)), urbanización (Nueva Agenda Urbana), migración (Pacto Mundial para la Seguridad, Migración Ordenada y Regular) y refugiados (Pacto Mundial sobre Refugiados) que, de lograrse, reducirían los impactos del

cambio climático en la salud, el bienestar, la migración y los conflictos. Sin embargo, los desafíos para implementar estos acuerdos se destacan por la pandemia de la enfermedad COVID-19, que expuso debilidades sistémicas a nivel comunitario, nacional e internacional en la capacidad de las sociedades para anticipar y responder a los riesgos globales.

- El desarrollo resiliente al clima tiene un gran potencial para generar beneficios colaterales sustanciales para la salud y el bienestar y para reducir los riesgos de desplazamiento involuntario y conflicto. El desarrollo sostenible y resiliente al clima que disminuye la exposición, la vulnerabilidad y la inequidad social y que aumenta la adaptación y mitigación oportunas y efectivas de manera más amplia, tiene el potencial de reducir, pero no necesariamente eliminar, los impactos del cambio climático en la salud, el bienestar, la migración involuntaria y los conflictos.
- Los peligros climáticos están contribuyendo cada vez más a un número creciente de resultados adversos para la salud (incluidas las enfermedades transmisibles y no transmisibles (ENT)) en múltiples áreas geográficas. Los impactos netos son en gran medida negativos en todas las escalas (nivel de confianza muy alto), y hay muy pocos ejemplos de resultados beneficiosos del cambio climático en cualquier escala. Si bien la incidencia de la malaria ha disminuido en todo el mundo debido a factores socioeconómicos no climáticos y respuestas del sistema de salud, se ha observado un cambio a mayores altitudes a medida que el clima se calienta.
- La variabilidad y el cambio climático (incluida la temperatura, la humedad relativa y las precipitaciones) y la movilidad de la población se asocian significativa y positivamente con: aumentos observados del dengue a nivel mundial; virus chikungunya en Asia, América Latina, América del Norte y Europa (nivel de confianza alto); *Ixodes scapularis*, vector de la enfermedad de Lyme en América del Norte y el vector de la enfermedad de Lyme y la encefalitis transmitida por garrapatas *Ixodes ricinus* en Europa.
- Las temperaturas más altas, las precipitaciones intensas y las inundaciones se asocian con un aumento de las enfermedades diarreicas en las regiones afectadas, incluido el cólera, otras infecciones gastrointestinales y enfermedades transmitidas por los alimentos debido a *Salmonella* y *Campylobacter*.

- La variabilidad y el cambio climáticos contribuyen a la inseguridad alimentaria, que puede conducir a la desnutrición, incluido el sobrepeso y la obesidad, y a la susceptibilidad a las enfermedades en los países de ingresos bajos y medianos. Las poblaciones expuestas a fenómenos meteorológicos y climáticos extremos pueden consumir alimentos inadecuados o insuficientes, lo que provoca desnutrición y aumenta el riesgo de enfermedades.

CAPÍTULO 5: RESPUESTAS AL CAMBIO CLIMÁTICO

Uno de los referentes más popularizados en relación con el cambio climático es la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Los científicos han demostrado, como hemos visto en secciones anteriores, que el principal detonante del cambio climático actual es la creciente emisión de GEI, mayormente debida a la acción antropogénica. De los GEI, el CO₂ es el que tiene mayor impacto sobre el sistema climático. Las respuestas que emergen ante este proceso se refieren a la adaptación y mitigación del cambio climático y a las políticas que se han establecido para enfrentar el problema.

5.1 Adaptación y Mitigación del cambio climático

La **adaptación** se refiere al ajuste de los sistemas naturales y humanos en respuesta a los estímulos esperados del clima o sus efectos. Específicamente, la adaptación incluye las iniciativas y medidas orientadas a reducir la vulnerabilidad o a incrementar la resiliencia de los sistemas naturales y humanos frente a los impactos actuales o proyectados del cambio climático (WRI, 2010; IPCC, 2021).

En relación con la Adaptación al cambio climático, el IPCC (2007) concluye:

- Es muy probable que se impongan costos anuales netos que aumentarán con el tiempo, ya que las temperaturas globales están aumentando.
- Algunos esfuerzos de adaptación están ocurriendo hoy día que, observados y proyectados en función del cambio climático futuro, sin embargo, tienen un resultado limitado.
- La adaptación será necesaria para abordar los impactos resultantes del calentamiento que ya es inevitable debido a las emisiones pasadas.
- Una amplia gama de opciones de adaptación está disponible, pero la adaptación más extensa que la que en la actualidad ocurre es necesario para reducir la vulnerabilidad al cambio climático en el futuro. Hay barreras, límites y los costos, pero no se compaginan completamente.
- La **vulnerabilidad** al cambio climático puede verse agravada por la presencia de otros factores de estrés. La vulnerabilidad futura depende no sólo del cambio climático, sino también de las modalidades de desarrollo.

- Muchos de los impactos pueden evitarse, reducirse o retrasarse por medio de mitigación.
- Una cartera de medidas de adaptación y mitigación pueden disminuir los riesgos asociados con el cambio del clima.

La **mitigación** es el conjunto de cambios en las actividades o cambios tecnológicos que reducen la vulnerabilidad de un sistema natural o humano a los efectos del cambio climático, y que buscan reducir el consumo de recursos y las emisiones por cada unidad de producto. Aunque varias políticas sociales, económicas y tecnológicas podrían lograr una reducción de las emisiones, en relación con el cambio climático, la mitigación significa implantar políticas que reduzcan la emisión de GEI y promuevan la captura y almacenamiento del carbono. La capacidad de mitigación se refiere a las habilidades, competencias, idoneidad y aptitud que un país ha alcanzado y depende de la tecnología, instituciones, infraestructura, equidad y manejo de información sobre los aspectos relacionados con el cambio climático.

A pesar del aparente nivel de conciencia en los ámbitos internacionales y nacionales, las iniciativas tendientes tanto a la adaptación como a la mitigación del cambio climático propenden a ser más reactivas que proactivas, especialmente en los países en desarrollo donde, cuando ocurren, es como consecuencia de episodios de desastres climáticos o pérdidas en las capacidades de obtener beneficios ecosistémicos. En los países desarrollados se observa una mayor proactividad, especialmente en las políticas nacionales gubernamentales de planificación o previsión, aun cuando a nivel regional, local e individual no siempre existe la respuesta esperada, a menos que existan razones utilitarias o de riesgo inminentes para los involucrados, si no se instrumentan tales iniciativas (Berrang-Ford *et al.*, 2011).

El IPCC (2011) considera que hay un alto nivel de confianza y abundante evidencia de que, con las políticas actuales de mitigación de los efectos del cambio climático –y con las prácticas de desarrollo sostenible que aquellas requieren–, las emisiones mundiales de GEI seguirán aumentando en los próximos decenios.

En este contexto, un aspecto relevante de un informe del IPCC (2014) tiene que ver con las respuestas de los ámbitos políticos y económicos ante la realidad inescapable del cambio climático en curso. Dentro de sus conclusiones, destacan algunos aspectos álgidos, que se deben considerar antes de tratar el tema de las políticas nacionales e internacionales emergidas para enfrentar la gran amenaza futura que representa el cambio climático:

- Existe ya un cierto grado de adaptación planificada (de las actividades humanas) para reducir la vulnerabilidad al cambio climático, pero será necesario que la misma sea de mayor alcance.
- Se dispone ya (o se dispondrá de aquí a 2030, según las proyecciones) de un amplio abanico de opciones de mitigación en todos los sectores. El potencial de mitigación económico bastaría para compensar el crecimiento proyectado de las emisiones mundiales o para reducir las emisiones a unos niveles inferiores a los actuales en el año 2030.
- En ausencia de medidas de mitigación, el cambio climático desbordaría probablemente, a largo plazo, la capacidad de adaptación de los sistemas naturales, gestionados y humanos.
- Muchos impactos pueden ser reducidos, retardados o evitados mediante medidas de mitigación. Los esfuerzos y las inversiones de los dos o tres próximos decenios influirán en gran medida en las oportunidades de conseguir unos niveles de estabilización más bajos. Un aplazamiento de la reducción de emisiones limita considerablemente las oportunidades de alcanzar unos niveles de estabilización más bajos e incrementa el riesgo de impactos más graves del cambio climático.
- Los niveles de estabilización para las concentraciones de GEI estudiadas pueden conseguirse implantando una cartera de tecnologías disponibles en la actualidad, más otras que previsiblemente se comercializarán en los decenios próximos, siempre y cuando haya unos incentivos apropiados y eficaces y se eliminen los obstáculos. Además, sería necesario insistir en las actividades de I&D para mejorar el rendimiento técnico, reducir costos y conseguir la aceptación social de las nuevas tecnologías. Cuanto más bajo sean los niveles de estabilización, mayor será la necesidad de invertir en nuevas tecnologías durante los próximos decenios.
- La modificación de las estrategias de desarrollo para conseguir un desarrollo más sostenible puede contribuir en gran medida a las medidas mitigación y adaptación al cambio climático y a la reducción de la vulnerabilidad. Las decisiones sobre políticas macroeconómicas y de otra índole aparentemente no relacionadas con el cambio climático, pueden afectar considerablemente a las emisiones.

Una de las iniciativas con gran potencial para la mitigación y adaptación al cambio climático son las áreas protegidas que desde los años 60 se vienen incrementando en diferentes regiones y países del mundo, con el apoyo y asesoría de la red de organismos multilaterales de la ONU. Las áreas protegidas y las áreas bajo regímenes de administración especial constituyen un medio efectivo y comprobado para mantener los servicios ecosistémicos y los ecosistemas naturales a escala de los paisajes terrestres y marinos. Están respaldadas por planes de gestión en muchos países aptos para facilitar respuestas rápidas ante nueva información o condiciones nuevas relacionadas con el cambio climático. Cuentan con equipos y personal dotados de conocimientos técnicos y de capacidad de gestión, inclusive para entender cómo gestionar ecosistemas para generar determinados servicios ecosistémicos vitales para la adaptación al cambio climático. Sin embargo, las áreas protegidas por sí solas no son suficientes para contrarrestar los efectos adversos del cambio climático, de acuerdo con las evaluaciones del IPCC.

Otro ejemplo de mitigación lo constituyen iniciativas que aplican el enfoque de soluciones basadas en la naturaleza, como por ejemplo la siembra masiva de árboles en zonas previamente sometidas a deforestación; o la creación de corredores verdes en las grandes ciudades, al limitar la circulación de vehículos de motor y promover la siembra de árboles o jardines urbanos

5.2 La política y la economía del cambio climático

Aunque previamente se reconoce que existe consenso general acerca del problema de la contaminación y degradación del medio ambiente, la Convención sobre el Cambio Climático de la ONU²⁰ (UNFCCC, por sus siglas en inglés), establecida en 1992, marca el inicio de las negociaciones, acuerdos y programas para estabilizar las concentraciones de GEI en la atmósfera en un nivel que previniera las interferencias antropogénicas en el sistema climático, de tal manera que los ecosistemas pudieran adaptarse naturalmente al cambio climático, la producción de alimentos no se viera amenazada y el desarrollo económico se hiciera sustentable. Sin embargo, el tratado no establece límites mandatorios en la emisión de GEI ni mecanismos obligantes para los países. Cinco años después, en 1997, se firma el Protocolo de Kioto, el cual establece las obligaciones de los países miembros para reducir sus emisiones de GEI, a través

²⁰ Para una información más amplia sobre esta Convención, establecimiento, historia, conferencias y alcances, vea: <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/que-es-la-convencion-marco-de-las-naciones-unidas-sobre-el-cambio-climatico>

de mecanismos flexibles que incluyen los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL), más conocidos como CDM (por sus siglas en inglés) el Comercio Internacional de Emisiones y la Implementación Conjunta (los cuales reseñamos más adelante).

Dentro de esta Convención, por ejemplo, se oficializó en 1997 el *Protocolo de Kioto* y, posteriormente, los *Mecanismos de Desarrollo Limpio (CDM)*, el *Programa REDD+* y el *Acuerdo de París* en 2015. los cuales han recibido críticas sustantivas de los diferentes sectores involucrados. De allí la importancia de revisar y sopesar los procesos y resultados de tales esfuerzos de negociación, la relevancia de las propuestas y acuerdos logrados, así como la trascendencia de los mismos, en cuento a su operatividad, equidad y justicia social. Diversas conferencias de las partes (COP) sobre el tema a lo largo de los años (Bali, Estocolmo, Copenhagen, Cancún, Durban, Doha, Warsaw, Lima, Paris, Marrakech, Bonn, Katowice, Madrid, Glasgow, y Sharm el-Sheikh, la más reciente) no han logrado ponerse de acuerdo en relación con una política global y los compromisos de los diversos países para reducir sus emisiones de GEI, en un proceso transparente para todas las partes, con el fin de enfrentar el problema del cambio climático creciente. En Cancún (2010) se discutió y aprobó la propuesta de creación del *Fondo Climático Verde*, con el fin de proveer el financiamiento para los programas y proyectos de reducción de las emisiones, y en Varsovia (2013) se avanzó en establecer los criterios para solicitar el establecimiento de las *Contribuciones Determinadas a nivel Nacional* de cada país.

Apenas en diciembre de 2015, en la Cumbre climática de París, la Conferencia de las Partes # 21 del UNFCCC, logró el consenso necesario para la firma del Acuerdo de París. Después de arduas discusiones y negociaciones durante numerosas reuniones en 2014 y 2015 se estuvo de acuerdo en los valores de las contribuciones por país y en la meta de reducción del límite de temperatura de 2 a 1,5°C.

Las metas del acuerdo de París se pueden resumir así:

- (a) Mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de los 2°C por encima de los niveles preindustriales y proseguir los esfuerzos para limitar el aumento de la temperatura a 1,5°C por encima de los niveles preindustriales, reconociendo que esto reduciría significativamente los riesgos e impactos del cambio climático;

- (b) Aumentar la capacidad de adaptarse a los impactos adversos del cambio climático y fomentar la resiliencia climática y el desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, de una manera que no amenace la producción de alimentos;
- (c) Hacer que los flujos de financiación sean coherentes con un camino hacia un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero y resiliente al clima.

Las partes del Acuerdo de París son responsables de establecer sus propios objetivos para reducir las emisiones. Estos se presentan como las llamadas 'Contribuciones determinadas a nivel nacional' (NDC, por sus siglas en inglés), que se revisan cada 5 años y se pueden 'ajustar' para volverse más ambiciosas a medida que avanzan las tecnologías y se materializan nuevas acciones. En dichas NDC deben definirse y explicarse los planes y programas de mitigación de los GEI y adaptación a los efectos del cambio climático que ejecutarán los países en el período determinado, como las mejoras en el transporte sustentable, uso de energías renovables o los impuestos a los combustibles fósiles (Mitigación) y reducción del impacto de las inundaciones o sequías, y las alertas tempranas para reducir la vulnerabilidad de las poblaciones involucradas (Adaptación).

La polarización entre los países desarrollados (Unión Europea, EE UU, Canadá, Japón, Australia), los países emergentes (Brasil, China, India, Rusia y Sur África) y los países en desarrollo (el resto de países) continúa siendo la piedra de tranca fundamental para las decisiones y compromisos concretos que realmente enfrenten el problema de las altas emisiones de GEI.

Durante 2016 al 2021 las conferencias de las partes avanzaron modestamente en las negociaciones, desarrollando progresivamente el libro de normas para la aplicación definitiva del Acuerdo de París. Las NDC continúan avanzando, y hay 169 países que han presentado o renovado su informe, de acuerdo con el reporte de la CMNUCC en septiembre de 2022.

Finalmente, en la COP 27 realizada en Sharm el-Sheikh, Egipto, se logró un avance significativo en algunos aspectos álgidos relacionados con la ambición que cada país manifiesta, con el reconocimiento de las pérdidas y daños y con el financiamiento en general, que pone el acuerdo de París en modo implementación, pero con decisiones todavía pendientes que pueden comprometer las metas planteadas en 2015.

Un análisis más profundo y detallado del desarrollo de las COP puede leerse en las sucesivas ediciones del '*Boletín de Negociaciones de la Tierra*', publicado por el Instituto Internacional de Desarrollo Sostenible canadiense, el cual compila la historia y los avances de todas las COP realizadas hasta el momento²¹.

5.3 Mecanismos e instrumentos de la política de cambio climático

Los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL)²², definidos en el artículo 12 del protocolo de Kioto, e iniciados en la práctica en 2005, es el principal programa internacional de compensación que existe en la actualidad, y aunque no es perfecto, ha ayudado a establecer un mercado global para la reducción de las emisiones. Los MDL generan compensaciones a través de la inversión en proyectos de reducción, eliminación y/o secuestro de carbono en países en desarrollo, coordinados a través de la UNFCCC, que ha establecido un conjunto de metodologías, reglas, procedimientos y estructuras institucionales para su implementación. Hasta 2011 se había establecido un fondo de US\$ 2,7 billones, con el cual se están financiando 3.500 proyectos en 72 países en desarrollo, incluyendo China, India, México, Brasil, Chile, Perú, Nicaragua, Costa Rica, Honduras, Camboya, Malasia, Tailandia, entre otros.

El MDL está regido por los signatarios del Protocolo a través de la Junta Ejecutiva. Este mecanismo ofrece a los países industrializados la posibilidad de transferir tecnologías limpias a países en vías de desarrollo, mediante inversiones en proyectos de reducción de emisiones o sumideros, recibiendo a cambio certificados de emisión que servirán como suplemento a sus reducciones internas, dichas reducciones deberán ser verificadas y certificadas por entidades independientes. Para obtener la certificación de las emisiones, tanto el país industrializado como el país en desarrollo receptor del proyecto, deberán demostrar una reducción de las emisiones mensurable y prolongada en tiempo real. El MDL funciona bajo tres modalidades: Bonos de carbono, Aplicación conjunta y la iniciativa REDD+.

A) Bonos de Carbono (o Comercio internacional de emisiones)

Los bonos de carbono son un mecanismo internacional de desconta-minación para reducir las emisiones contaminantes al medio ambiente; es uno de los tres mecanismos propuestos en el Protocolo de Kioto para la reducción de emisiones causantes del calentamiento global.

²¹ <https://enb.iisd.org/archives>

²² <http://cdm.unfccc.int/about/index.html>

La transacción de los bonos de carbono –un bono de carbono representa el derecho a emitir una tonelada de dióxido de carbono– permite mitigar la generación de gases invernadero, beneficiando a las empresas que no emiten o disminuyen la emisión y haciendo pagar a las que emiten más de lo permitido. El sistema ofrece incentivos económicos para que empresas privadas contribuyan a la mejora de la calidad ambiental y de esa manera regular la emisión generada por sus procesos productivos, considerando el derecho a emitir CO₂ como un bien canjeable y con un precio establecido en el mercado.

Las reducciones de emisiones de GEI se miden en toneladas de CO₂ equivalente y se traducen en Certificados de Emisiones Reducidas (CER). Un CER equivale a una tonelada de CO₂ que se deja de emitir a la atmósfera, y puede ser vendido en el mercado de carbono a países del Anexo I (industrializados, de acuerdo a la nomenclatura del Protocolo de Kioto). Los tipos de proyecto que pueden aplicar a una certificación son, por ejemplo, generación de energía renovable, mejoramiento de eficiencia energética de procesos, forestación, limpieza de áreas costeras, lagos y ríos. Una autoridad central (normalmente un gobierno o una organización internacional) establece un límite sobre la cantidad de gases contaminantes que pueden ser emitidos.

Las empresas son obligadas a gestionar un número de bonos (también conocidos como derechos o créditos), que representan el derecho a emitir una cantidad determinada de residuos. Las compañías que necesiten aumentar las emisiones por encima de su límite deberán comprar créditos a otras compañías que contaminen por debajo del límite que marca el número de créditos que le ha sido concedido. La transferencia de créditos es entendida como una compra. En efecto, el comprador está pagando una cantidad de dinero por contaminar, mientras que el vendedor se ve recompensado por haber logrado reducir sus emisiones. De esta forma se consigue, en teoría, que las compañías que hagan efectiva la reducción de emisiones son las que lo hagan de forma más eficiente (a menor coste), minimizando la factura agregada que la industria paga por conseguir la reducción.

El comercio de derechos de emisión es visto como un enfoque más eficiente que la tasación o la regulación directa. Puede ser más barato y, políticamente más deseable para las industrias existentes, puesto que la concesión de permisos se hace con determinadas exenciones, proporcionales a las emisiones históricas. Además, la mayoría del

dinero generado por este sistema se destina a actividades medioambientales. Las críticas al comercio de derechos de emisión se basan en la dificultad de controlar todas las actividades de la industria y de asignar los derechos iniciales a cada compañía.

B) Aplicación conjunta (AC)²³

A través de la AC, un país industrializado (su Gobiernos, empresas u otras organizaciones privadas) podrá invertir en otro país industrializado y operar en un proyecto encaminado a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero o incrementar la absorción por los sumideros. Cabe rescatar que existen una serie de requisitos que deben cumplirse debidamente para poder hacer uso de este mecanismo y, en cualquier caso, los proyectos deberán someterse a su certificación por entidades independientes. Los beneficios para el inversor consisten en obtener certificados para reducir emisiones a un precio menor del que le habría costado en su ámbito nacional. El país receptor será beneficiario de la inversión y la tecnología. Estos proyectos podrían haber entrado en funcionamiento desde el 2000, pero los certificados entraron en vigencia a partir de 2008.

C) La iniciativa REDD+ (Reducción de emisiones por deforestación y degradación de los bosques)²⁴

Auspiciada por la FAO, PNUD y UNEP en 2008, la iniciativa de reducción de emisiones por deforestación y degradación de los bosques (REDD+) tiene como objetivo materializar el mandato de la COP-13 (Bali) de la UNFCCC, luego ratificado por la COP-16 (Cancún) de diseñar estrategias y mecanismos alternativos de reducción de emisiones de GEI (FAO/PNUD/UNEP, 2008). En esencia, el programa REDD+ es una inversión orientada a mantener y mejorar el capital natural, específicamente los bosques, con miras a detener, disminuir o revertir los factores impulsores de la deforestación y degradación de los bosques en los países tropicales, contribuyendo así al mejoramiento de los servicios ecosistémicos y la conservación de la amplia biodiversidad contenida en los bosques tropicales (Sukhdev et al., 2011). El objetivo de este programa es combatir estas emisiones mediante el desarrollo de programas de gestión sostenible de los bosques, poniendo en valor, además de los recursos madereros, los otros bienes y servicios que pueden aportar los bosques a las

²³ <http://ji.unfccc.int/index.html>

²⁴ http://unfccc.int/methods_science/redd/items/7377.php

regiones donde se encuentran y a sus países, centrándose en las comunidades y en los usuarios de los bosques. Un grupo de países desarrollados ha establecido un fondo financiero para la implantación del programa REED+, de proyectos en 14 países: Bolivia, Cambodia, República Democrática del Congo (DRC), Ecuador, Indonesia, Nigeria, Panamá, Papúa New Guinea, Paraguay, Filipinas, Islas Salomón, Tanzania, Viet Nam y Zambia²⁵. En tanto que estos proyectos apenas se han iniciado, es difícil determinar el impacto que puedan tener en las economías de dichos países, pero se reconoce el gran potencial que presenta para mejorar los esfuerzos de desarrollo sustentable de los mismos. Hasta el año 2022 se han prometido más de 4.000 millones de dólares para tomar acciones inmediatas. Pero la gran cantidad de problemas y la falta de gobernanza en estas actividades han generado numerosas críticas, muchas de ellas documentadas, sobre la formulación e implantación de los proyectos en diversos países, Guyana, Tailandia, Indonesia y Bolivia, entre otros²⁶. Lo expuesto en esta sección sobre la respuesta ante el cambio climático intenta dibujar un panorama sintético de las iniciativas de la sociedad actual sobre el tema. Como es de esperarse, en la corriente científica relacionada con la economía política del cambio climático se puede encontrar una inmensidad de estudios, investigaciones y propuestas, por lo general con muchas divergencias y convergencias en los análisis, discusiones, reflexiones, programas y proyectos sobre el estado actual de los procesos que están en marcha o deberían iniciarse, y de las políticas e instrumentos innovadores que podrían detener un proceso que viene avanzando irremediablemente desde hace más de 30 años, afectando directa o indirectamente la estabilidad y permanencia de la civilización, tal y como la vivimos hoy. Pero este es un tema más inherente a la Ecología política, que escapa al propósito fundamental de este libro.

²⁵ <http://www.un-redd.org/AboutUNREDDProgramme/tabid/583/Default.aspx>

²⁶ Por ejemplo, en el sitio <http://www.redd-monitor.org/> se documentan constantes denuncias de las poblaciones y regiones afectadas por la mala implantación del sistema, incluso de comunidades enteras que han sido estafadas, por los llamados “piratas del carbono”.

EPÍLOGO

Ha sido nuestra intención ofrecer al estudiante, al público interesado y a la ciudadanía en general un compendio del conocimiento básico requerido para reflexionar y actuar ante el problema global del cambio climático. Habiendo recorrido brevemente este panorama que se dibuja, si prestamos atención a toda la información presentada para entender y calibrar la significación del cambio climático, deberíamos haberlo internalizado como el proceso, natural o inducido, que está determinando el desenvolvimiento actual, y muy probablemente futuro, de nuestra vida sobre el planeta.

A pesar de los términos sencillos, quizás continúe siendo difícil aceptar y asumir que el cambio climático que nos afecta en la actualidad es simplemente la consecuencia de la alteración de los complejos ciclos biogeoquímicos y sus efectos en el funcionamiento y procesos de la multitud de ecosistemas que hemos intervenido y alterado en la biósfera. Pero, el hecho de no ser perceptibles en el corto plazo y no afectar la inmediatez de la gran mayoría, aunado al desconocimiento generalizado de la sociedad acerca del sistema climático, probablemente incremente tal dificultad.

Entendido o no, una cosa es cierta: el cambio climático inducido por el hombre, ha causado efectos adversos generalizados, incluidos los fenómenos extremos más frecuentes e intensos; impactos, pérdidas y daños relacionados con la naturaleza y las personas, más allá de la variabilidad climática natural. El aumento de los eventos extremos meteorológicos y climáticos ha provocado algunos impactos irreversibles en la medida que los sistemas naturales y humanos se ven empujados más allá de su capacidad de adaptación: la ocurrencia, durante el año 2022, de 387 desastres reportados, 30.704 muertes, 185 millones de personas afectadas directa o indirectamente y pérdidas económicas que sobrepasan los 228 mil millones de dólares. Por ejemplo, solamente en Europa, las olas de calor provocaron más de 16.000 muertes, mientras que las inundaciones en Pakistán afectaron a 33 millones de personas y provocaron 1.739 fallecidos y pérdidas por el orden de 15 mil millones de dólares.

Da la impresión de que los seres humanos, –incluyendo los políticos y economistas, e incluso algunos científicos, interesados en el tema–, en la generalidad de los casos no somos capaces de internalizar el grave problema que implica nuestro estilo de vida para los ecosistemas. Peor aún, surge entre nosotros mismos la controversia sobre el cambio climático, que pone de relieve los obstáculos a dicha comprensión: un conocimiento limitado de la ciencia popularizada a través de los medios, la incapacidad de los ciudadanos comunes para evaluar la información técnica, y el uso generalizado de un estilo cognitivo no confiable para evaluar el riesgo.

El acelerado desarrollo de la humanidad, durante los últimos 150 años, se ha basado en la capacidad de incrementar los aportes de energía requeridos para la transformación, aprovechamiento y producción de bienes y servicios, a partir de los recursos naturales renovables y no renovables. Entre los recursos no renovables esenciales están los combustibles fósiles, que no son más que la energía contenida en sumideros de carbono, acumulada durante los últimos 600 millones de años, depositada en capas profundas de la corteza terrestre en forma de carbón (hulla), petróleo y gas.

Como lo señaláramos al principio, en la naturaleza, el CO₂ es una de las varias formas que adquiere el carbono en el ciclo que tiene lugar continuamente en la biósfera (ciclo del carbono) y tiene que ver con los procesos de la vida en el planeta, ya que éste es permanentemente asimilado y liberado por los seres vivos. El problema es que nuestra actividad ha alterado el ciclo del carbono al reducir la capacidad de absorción del mismo (al eliminar los bosques) y al liberar a la atmósfera una gran cantidad de este compuesto, acumulado por miles de años en los yacimientos de hidrocarburos, debido al consumo de energía fósil. Efectivamente, la actividad humana ha alterado el volumen y la proporción de los gases de efecto invernadero en la atmósfera. Esta situación no responde únicamente a procesos naturales, sino más bien a formas de organización social y productiva de la sociedad humana. Estos aumentos han ocasionado que un fenómeno benéfico para la vida –como lo es el efecto invernadero–, se torne en una amenaza global, en un tema de preocupación para los científicos, los políticos y para la sociedad que se encuentra expuesta a las consecuencias de un cambio global en el clima.

Por si fuera poco, la cantidad de metano en la atmósfera se ha más que duplicado en los últimos 250 años, siendo responsable de cerca de una quinta parte del calentamiento global. Sin embargo, el aumento constante de las emisiones se detuvo en la década de 1990. Las emisiones se mantuvieron estables durante casi una década hasta 2007, pero luego se reanudó bruscamente su ascenso. Ello, probablemente debido a la fracturación de esquistos o *fracking*

para la extracción de petróleo-gas y a la intensificación de la agricultura y la ganadería requerida para la creciente demanda de alimentos de los 8.100 millones de almas esparcidas por el mundo, además del derretimiento progresivo del permafrost en las zonas boreales y en los polos.

Este panorama, de por sí sombrío, se complica aún más, cuando algunas fundaciones “sin fines de lucro” u organizaciones no gubernamentales, financiadas por conglomerados industriales, conservadores en la mayoría de los casos, así como algunos científicos escépticos –cerca de 3% del total de científicos involucrados en el tema– se han dedicado a criticar y cuestionar continuamente las alarmas y advertencias basadas en la mejor evidencia, de los académicos y expertos en las ciencias relacionadas con el cambio climático, intentando desvirtuar sistemáticamente el consenso científico alrededor de las conclusiones y hallazgos presentados por el IPCC desde 1990 a la fecha. El reciente desarrollo de las Ciencias de la Tierra, producto de la integración interdisciplinaria de los conocimientos generados por la ecología, la climatología, la geología, la sociología, las técnicas e instrumentos avanzados de teledetección y la expansión de la capacidad para manejar inmensas bases de datos (simulaciones), han permitido a los científicos y expertos en el tema, incrementar el entendimiento de los fenómenos climáticos y el poder de predicción de los modelos de simulación del clima. De la misma manera han aprendido que la humanidad tiene que cambiar el paradigma actual de producción, consumo y desgaste de los recursos de la biósfera, mediante una transformación radical en el comportamiento individual y colectivo frente al medio ambiente. La necesidad de un cambio transformacional en las ideas, actitudes y comportamientos de la sociedad y sus líderes, mediante un cambio mental en el intelecto humano a través de la educación y la formación es inevitable y obligante; así como en la motivación individual y colectiva para reconfigurar los valores, preferencias y comportamientos de los individuos, de las colectividades y organizaciones.

El aumento del consumo de energía, la sobreexplotación de los recursos naturales y la transformación sin precedentes de los paisajes terrestres, de agua dulce y marinos, durante los últimos 150 años, han provocado cambios inesperados en el clima y una disminución acelerada de la diversidad biológica en todo el mundo, ambos afectando negativamente muchos aspectos de la buena calidad de vida. El reforzamiento mutuo del cambio climático y la pérdida de biodiversidad significa que la resolución satisfactoria de cualquiera de los problemas requiere la consideración del otro.

A medida que avanza el cambio climático, se alteran cada vez más la distribución, el funcionamiento y las interacciones originales de los organismos y de los ecosistemas, ante la falta de acciones efectivas que contrarresten esta senda autodestructiva. La capacidad de adaptación de la mayoría de los sistemas socioecológicos se verá superada por el cambio climático antropogénico constante, y se requerirá una capacidad de adaptación significativamente mayor para hacer frente al cambio climático residual, incluso con una reducción ambiciosa de las emisiones.

Un nuevo paradigma de conservación se hace imperativo, a través del cual se abordarían los objetivos simultáneos de un clima habitable, una biodiversidad autosuficiente y una buena calidad de vida para todos. Los nuevos enfoques deberán incluir tanto la innovación como la adaptación y ampliación de los enfoques existentes, como las acciones para proteger, gestionar de manera sostenible y restaurar los ecosistemas naturales, antes de que se llegue a la sexta extinción masiva, y con ella el fin de nuestra civilización.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahuja, D; Tatsutani M. (2008). Sustainable energy for Developing Countries. Trieste, The Academy of sciences for the developing world (TWAS). 48 p. Consultado el 5/01/2012. Disponible en <http://twas.ictp.it/publications/excellence-in-science/publications/twas-reports>
- Alexeev, VA; Ivanov VV; Kwok, R; Smedsrud, LH. (2013). North Atlantic warming and declining volume of arctic sea ice. *The Cryosphere Discussions* (7):245-265.
- Anderegg, W.; Harold, J. (2009). Climate Science and the Dynamics of Expert Consensus. Stanford, Center for Conservation Biology/Stanford University. 24 p.
- Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W; Wu, S. Palutikof, J. P. (Eds.). (2008). El Cambio Climático y el Agua. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Secretaría del IPCC, Ginebra, 224 págs.
- Berrang-Ford, L; Ford, J. D; Paterson, J. (2011). Are we adapting to climate change?. *Global Environmental Change* 21(1):25-33.
- Boyd, PW; Hutchins, D. A. (2012). Understanding the responses of ocean biota to a complex matrix of cumulative anthropogenic change. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 470:125-135.
- Brysse, K; Oreskes, N; O'Reilly, J; Oppenheimer, M. (2013). Climate change prediction: Erring on the side of least drama? *Global Environmental Change* 23(1):327-337.
- CRED – Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. (2023). 2022 Disasters in Numbers. Univ. of Lovain/WMO/USAID, Brussels.
- CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático) (1992). <https://unfccc.int/es/documents>
- Cook, J. 2010. The Scientific Guide to Global Warming Skepticism. <http://www.skeptical.com>.
- Cook, J; Nuccitelli, D; Green, S. A.; Richardson, M; Winkler, B; Painting, R; ... & Skuce, A. 2013. Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature. *Environmental research letters*, 8(2), 024024. 7pp.
- Crabbe M, J. C. 2009. Climate change and tropical marine agriculture. *Journal of Experimental Botany* 60(10):2839–2844.

- Dabla-Norris and others. 2023. *Public Perceptions of Climate Mitigation Policies: Evidence from Cross-Country Surveys*. Staff Discussion Note SDN2023/002. International Monetary Fund, Washington, DC.
- Doney, SC. 2010. The growing human footprint on coastal and open-ocean biogeochemistry. *Science* 328(5985):1512-1516.
- EEA – European Environment Agency. (2017). Key findings - Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016 <http://www.eea.europa.eu/publications/climate-change-impacts-andvulnerability-2016/key-findings>.
- Espíndola, C. & Valderrama, J. O. (2012). Huella del Carbono. Parte 1: Conceptos, Métodos de Estimación y Complejidades Metodológicas. *Información tecnológica*, 23(1), 163-176 <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642012000100017>
- FAO (Organización de las naciones Unidas para la para la Alimentación y la Agricultura). (2016). El estado mundial de la Agricultura y la alimentación 2016: cambio climático, agricultura y seguridad alimentaria. Roma, FAO. 191p. <http://www.fao.org/3/a-i6030s.pdf>
- FAO. (Organización de las naciones Unidas para la para la Alimentación y la Agricultura). (2022). El estado de los bosques del mundo 2022. Vías forestales hacia la recuperación verde y la creación de economías inclusivas, resilientes y sostenibles. Roma, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb9360es>
- Fu, H. Z., & Waltman, L. (2022). A large-scale bibliometric analysis of global climate change research between 2001 and 2018. *Climatic Change*, 170(3-4), 36.
- Gerten, Dieter, *et al.* (2020). Feeding ten billion people is possible within four terrestrial planetary boundaries. *Nature Sustainability* 3.3:200-208.
- Han H., y Ahn SW. (2020) Movilización de Jóvenes para Detener el Cambio Climático Global: Narrativas e Impacto. *Sostenibilidad*, 12 :4127. doi: 10.3390/su12104127.
- Hansen, J; Sato, M; Ruedy, R. (2012). Perception of climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(37): E2415-E2423.
- Harvey, M; Pilgrim, S. 2011. The new competition for land: Food, energy, and climate change. *Food Policy* Vol 36 (Suppl. 1): S40-S51
- Hoegh-Guldberg, O; Bruno, J. F. 2001. The Impact of Climate Change on the World's Marine Ecosystems. *Science* 32(1523):1523-1528.

- Hunt, J; Baldocchi, D; Van Inghen. C. 2009. Redefining ecological science using data. *In* Hey T; Stewart T; Tolle, K. (Eds.). *The Fourth paradigm: data-intensive scientific discovery*. Redmond, Microsoft Corporation. 252 p
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- IPCC (Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático). 2014. *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del IPCC*. Ginebra, Suiza.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC Secretariat Geneva, Switzerland. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2023). *Synthesis Report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6). Longer Report*. IPCC Secretariat Geneva, Switzerland
- Kahan, D. M., Jenkins-Smith, H., & Braman, D. (2011). Cultural cognition of scientific consensus. *Journal of risk research*, 14(2), 147-174.
- Kahan, D. M., Peters, E., Wittlin, M., Slovic, P., Ouellette, L. L., Braman, D., & Mandel, G. (2012). The polarizing impact of science literacy and numeracy on perceived climate change risks. *Nature climate change*, 2(10), 732-735.
- Lin, B. B. (2011). Resilience in agriculture through crop diversification: adaptive management for environmental change. *BioScience*, 61(3), 183-193.
- López, M. (7 de mayo, 2023). Tres datos sobre el impacto del cambio climático en Venezuela. EFECTO COCUYO. <https://efectococuyo.com/cambio-climatico/cambio-climatico-en-venezuela-datos/>

- Malhi, Y., Franklin, J., Seddon, N., Solan, M., Turner, M. G., Field, C. B., & Knowlton, N. (2020). Climate change and ecosystems: Threats, opportunities and solutions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1794), 20190104.
- Malhi, G.S.; Kaur, M.; Kaushik, P. (2021). Impact of Climate Change on Agriculture and Its Mitigation Strategies: A Review. *Sustainability*, 13, 1318. <https://doi.org/10.3390/su13031318>
- McAlpine, C. A., Seabrook, L. M., Ryan, J. G., Feeney, B. J., Ripple, W. J., Ehrlich, A. H., & Ehrlich, P. R. (2015). Transformational change: creating a safe operating space for humanity. *Ecology and Society*, 20(1). <https://www.jstor.org/stable/26269773?seq=5>
- Mooney, H., Larigauderie, A., Cesario, M., Elmquist, T., Hoegh-Guldberg, O., Lavorel, S., ... & Yahara, T. (2009). Biodiversity, climate change, and ecosystem services. *Current opinion in environmental sustainability*, 1(1), 46-54. DOI 10.1016/j.cosust.2009.07.006
- Nolan, C., Overpeck, J. T., Allen, J. R., Anderson, P. M., Betancourt, J. L., Binney, H. A., ... & Jackson, S. T. (2018). Past and future global transformation of terrestrial ecosystems under climate change. *Science*, 361(6405), 920-923.
- NRC (National Research Council). 2010. *Advancing the Science of Climate Change*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/12782>.
- Omer, AM. 2010. Sustainable Energy Development and Environment. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, 2(2):55-75
- Naciones Unidas – Acción por el clima. (05 de enero de 2023). Biodiversidad: nuestra defensa natural más fuerte contra el cambio climático. <https://www.un.org/es/climatechange/science/climateissues/biodiversity#:~:text=El%20cambio%20clim%C3%A1tico%20ha%20transformado,extinciones%20provocadas%20por%20el%20clima>.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2020). Estado de los gases de efecto invernadero en la atmósfera según observaciones mundiales realizadas en 2019. Boletín sobre gases de efecto invernadero, (16), noviembre 2020. https://library.wmo.int/?lvl=notice_display&id=21819
- Ortiz-Bobea, A., Ault, T. R., Carrillo, C. M., Chambers, R. G., & Lobell, D. B. (2021). Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. *Nature Climate Change*, 11(4), 306-312.

- Petrescu-Mag R. M, Burny P, Banatean-Dunea I, Petrescu D. C. (2022). How Climate Change Science Is Reflected in People's Minds. A Cross-Country Study on People's Perceptions of Climate Change. *Int J Environ Res Public Health*. Apr 2;19(7):4280. doi: 10.3390/ijerph19074280.
- Pörtner, H.O., Scholes, R. J., Agard, J., Archer, E., Arneth, A., Bai, ...& Ngo, H.T. (2021). IPBES-IPCC co-sponsored workshop report on biodiversity and climate change; IPBES and IPCC. DOI:10.5281/zenodo.4782538.
- Ripple, W. J., Wolf, C., Gregg, J. W., Levin, K., Rockström, J., Newsome, T. M., ... & Lenton, T. M. (2022). World scientists' warning of a climate emergency 2022.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F. S., Lambin, E., ... & Foley, J. (2009). Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and society*, 14(2).
- Rockström, Johan. (2015) "Bounding the planetary future: Why we need a great transition." *Great Transition Initiative* 9: 1-13.
- Rockström, J., Schellnhuber, H. J., Hoskins, B., Ramanathan, V., Schlosser, P., Brasseur, G. P., ... & Lucht, W. (2016). The world's biggest gamble. *Earth's Future*, 4(10), 465-470. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016EF000392>
- Romm, J. J. (2022). *Climate change: What everyone needs to know*. Oxford University Press.
- Royal Society (2015). *Climate Change Evidence & Causes*. London, Royal Society. <https://royalsociety.org/topics-policy/projects/climate-change-evidence-causes/>
- Royal Society / National Academy of Sciences (2020). *Climate Change Evidence & Causes*. Update 2020. <https://royalsociety.org/topics-policy/projects/climate-change-evidence-causes/>
- Slater, T., Lawrence, I. R., Otosaka, I. N., Shepherd, A., Gourmelen, N., Jakob, L., ... & Nienow, P. (2021). Earth's ice imbalance. *The Cryosphere*, 15(1), 233-246. <https://doi.org/10.5194/tc-15-233-2021>

- Sukhdevb, P; Prabhua, R; Kumara, P; Bassic, A; Patwa-Shaha, W; Entersa, T; ... Greenwalta, J. (2011). REDD+ and a Green Economy: Opportunities for a mutually supportive relationship. Geneva, UN-REDD Program Secretariat. (UN-REDD Programme Policy brief # 01),
- TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity). 2010. Biodiversity, ecosystems and ecosystem services. (Chap. 2) - The Economics of Ecosystems and Biodiversity: The Ecological and Economic Foundations. Nairobi (Ken). UNEP. 96 p.
- TRS (The Royal Society). 2007. Climate change controversies: a simple guide. London, Met Office. Consultado el 28-12-2011. Available in www.metoffice.gov.uk.
- UN Environment (2007). Global Environment Outlook – GEO4: Environment for development. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/global-environment-outlook-4>
- UN Environment (2012). Global Environment Outlook – GEO5: Environment for the future we want. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/global-environment-outlook-5>
- UN Environment (2019). Global Environment Outlook – GEO6: Healthy Planet, Healthy People. Nairobi. DOI 10.1017/9781108627146.
- United Nations Environment Programme (UNEP). 2005. Millennium Ecosystem Assessment – MEA: Ecosystems and Human Well-being: Current state and trends. Washington, DC, Island Press. <http://www.maweb.org/documents/document.356.aspx.pdf>.
- UNEP (United Nations Environment Program). (2009). Climate in Peril: a popular guide to the latest IPCC reports, UNEP. 60p.
- UNEP (United Nations Environment Programme). UNEP. 2010. Clearing the waters: a focus on water quality solutions. Nairobi, UNEP. 88 p.
- UNEP (United Nations Environment Programme). 2012. Global Environmental Outlook: environment for development (GEO-5). 525 p.
- UNEP (United Nations Environment Program). (2022). Emissions Gap Report 2022: The Closing Window — Climate crisis calls for rapid transformation of societies — Exec. Summary. Nairobi. <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2022>
- Urbina, Javier. 2006. Dimensiones psicológicas del cambio ambiental global. En: Urbina Javier y Martínez, Julia. 2006. Más allá del cambio climático. Las dimensiones psicosociales del cambio ambiental global. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. Universidad Nacional Autónoma de México/Facultad de Psicología. México, 288 p.

- Wahab, A., Abdi, G., Saleem, M. H., Ali, B., Ullah, S., Shah, W., ... & Marc, R. A. (2022). Plants' physio-biochemical and phyto-hormonal responses to alleviate the adverse effects of drought stress: A comprehensive review. *Plants*, 11(13), 1620.
- Walther, GR. (2010). Community and ecosystem responses to recent climate change. *Phil. Trans. R. Soc. B* 365 (1549):2019-2024,
- Wiedmann, T., & Minx, J. (2008). A definition of 'carbon footprint'. *Ecological economics research trends*, 1(2008), 1-11.
- Whitmarsh, L. 2009. What's in a name? Commonalities and differences in public understanding of "climate change" and "global warming". *Public Understand. Sci.* 18:401-420,
- World Bank. 2010. Biodiversity, Ecosystem Services, and Climate Change: The Economic Problem. Washington, World Bank. (Environmental Economics Series # 120).
- WMO (World Meteorological Organization). (2022). United in Science 2022: A multi-organization high-level compilation of the most recent science related to climate change, impacts and responses. https://public.wmo.int/en/resources/united_in_science
- (WRI) World Resources Institute. (in collaboration with United Nations Development Programme, United Nations Environment Programme, and World Bank). 2011. World Resources 2010–2011: Decision Making in a Changing Climate—Adaptation Challenges and Choices. Washington, DC: WRI.



ISBN: 978-9942-960-88-7



9 789942 960887