

3. Retos para la sostenibilidad

Como vimos en el acápite anterior, la forma como la humanidad produce bienes y ofrece servicios trae consigo consecuencias positivas y negativas. A pesar del progreso en términos de crecimiento económico y bienestar social, hoy en día, la discusión enfoca con más énfasis los retos sociales y ambientales de este desarrollo. En este contexto se busca lograr un “desarrollo sostenible”, es decir un desarrollo que permite a las generaciones actuales y futuras contar con los recursos necesarios para la satisfacción de sus necesidades económicas y sociales, como, por ejemplo, alimentación, agua, servicios de salud o energía sin afectar la base de los procesos sistémicos de la tierra. O, en otras palabras: ¿Cómo tenemos que vivir hoy para que nuestros niños y nietos puedan vivir una vida en las mismas condiciones?

En los próximos dos acápites vamos a comentar como identificar y medir más al detalle que significa esto para el ámbito ecológico y social, y posteriormente entramos con más profundidad en el aspecto específico del cambio climático.

Definición: Desarrollo sostenible

Desarrollo sostenible es el desarrollo económico y social que permite a las generaciones actuales y futuras contar con los recursos necesarios para la satisfacción de sus legítimas necesidades económicas y sociales, como, por ejemplo, alimentación, agua, servicios de salud, educación o energía para permitir una vida digna sin afectar la base de los procesos sistémicos de la tierra.

3.1 Retos ambientales y ecológicos

Para lograr un desarrollo sostenible y el planeta en condiciones dignas para vivir se deben mantener los efectos ambientales negativos de las actividades humanas bajo ciertos límites. La “Red de Objetivos Basados en la Ciencia” (SBTN por sus siglas en inglés: Science Based Targets Network) desarrolló criterios y estableció límites para los diferentes subsistemas ecológicos de la tierra. Al pasar los límites en los diferentes procesos del sistema terrestre y umbrales se sale de “la zona segura de operación” entrando en “zonas de incertidumbre” seguidas por “zonas de alto riesgo” para los sistemas en cuestión. Esto implica el riesgo que cada uno de los sistemas y el conjunto de ellos cambia la tierra a un nuevo estado en el cual la vida ya no puede prosperar como en las condiciones actuales. El sistema fue introducido en 2009. En el siguiente cuadro se presentan sus componentes y la situación actual en los diferentes aspectos.

Tabla 1.1: Límites planetarios

Tipo de límite	Variable de control	Límite planetario	Valor actual y tendencia
Cambio climático	Concentración de CO ₂ en la atmósfera; ppm (partes por millón)	350 ppm (máximo)	425 ppm y subiendo (empeorando)
Pérdida de biodiversidad	Diversidad genética: índice de especies en extinción por millón especies por año Diversidad funcional: Índice de biodiversidad intacta (IBI)	10 (máximo) Mantener IBI en 90%	Entre 100 y 1,000 y subiendo (empeorando) 84% (aplicado solo a Sudáfrica)
Deforestación y cambio de sistema de tierras	Áreas forestadas en relación con áreas forestadas antes de alteración humana	Por lo menos 75%	62% y bajando (empeorando)
Uso de agua dulce	Consumo de agua azul; kilómetros cúbicos por año	4,000 km ³ (máximo)	Aprox. 2,600 km ³ y subiendo (intensificando)
Flujos bioquímicos	Fosforo aplicado a tierras como fertilizante; millones de toneladas por año Nitrógeno reactivo aplicado a tierras como fertilizante; millones de toneladas por año	6,2 millones de toneladas 62 millones de toneladas	Aprox. 14 millones de toneladas y subiendo (empeorando) Aprox. 150 millones de toneladas y subiendo (empeorando)
Acidificación de los océanos	Saturación promedio con carbonato de calcio en la superficie como porcentaje de niveles preindustriales	Por lo menos 80%	Aprox. 84% y bajando (empeorando)
Contaminación del aire	Profundidad óptica del aerosol; alta variedad a nivel regional, todavía sin definición de un nivel global	Todavía por definirse	-

Agotamiento de la capa de ozono	Concentración de ozono in la estratosfera; en Unidades Dobson (UD)	275 UD (máximo)	283 UD y subiendo
Contaminación química	Producción y consumo per cápita de químicos	Todavía por definirse	-

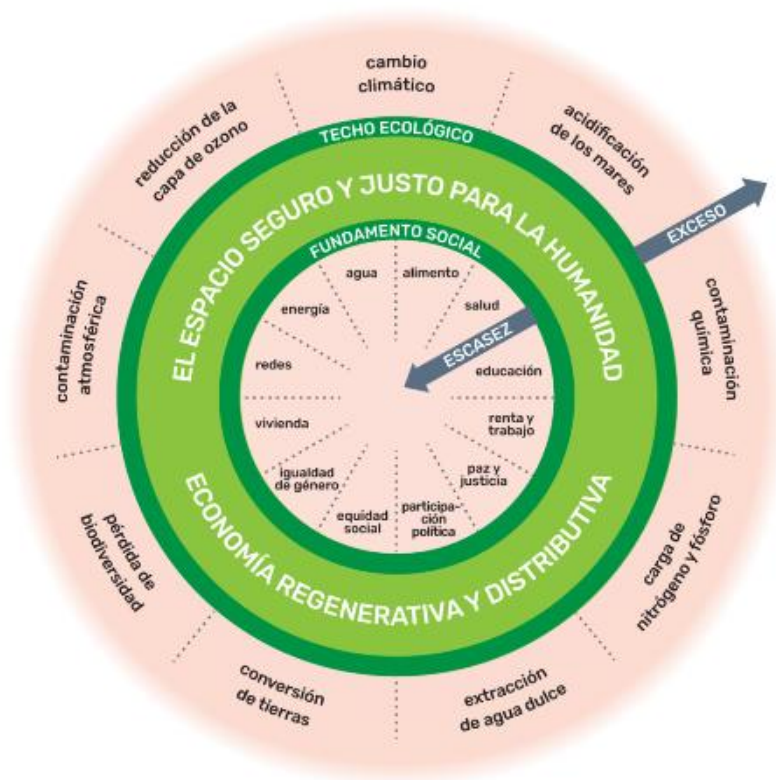
Fuente: (Richardson et al. 2023)

Como evidencian los datos del cuadro anterior, la humanidad ya ha superado, por lo menos, 6 de los 9 límites planetarios. En materia de cambio climático, las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono no deberían superar las 350 partes por millón (ppm), sin embargo, ya llegan a 425 ppm. En cuanto a la extinción de especies y pérdida de biodiversidad, ya el 84% de las especies en África se encuentran extintas. Con relación a la adición de fósforo, nitrógeno (y otros elementos) a cultivos y ecosistemas, el uso por año establecido es de aproximadamente 11 teragramos (Tg) de fósforo y 62 Tg de nitrógeno. Sin embargo, hoy se registran valores en torno a los 22 Tg de fósforo y 150 Tg de nitrógeno. En materia de deforestación y en el uso del suelo, se debería haber mantenido 75% de los bosques originarios pero el mundo tiene hoy solo el 62%.

La economía rosquilla

La relación entre los límites planetarios y el desarrollo sostenible ilustra el modelo llamado “economía rosquilla” de forma visual. Para garantizar una vida segura y justa, es necesario que la humanidad haga uso de recursos naturales – de otra forma la vida no sería posible. Así, por ejemplo, para una alimentación adecuada se requiere el consumo de agua potable y el uso de terrenos para la producción de alimentos. Partiendo de un punto “cero” (= ningún uso de recursos planetarios con ninguna vida humana posible) se incrementa el uso de recursos planetarios con una población creciente: Al pasar por la zona de escasez se llega a un nivel requerido para establecer el fundamento social que permite el bienestar de los humanos. No obstante, al incrementar el uso de recursos planetarios más allá, poco a poco se llega a los límites planetarios – es decir, a un nivel donde el uso excesivo de recursos pone en riesgo la base de vida en las condiciones requeridas para un desarrollo sostenible. El espacio entre el nivel mínimo requerido para una vida humana y los límites planetarios es el “espacio seguro y justo para la humanidad”. El modelo fue desarrollado por Kate Raworth y es presentado en el gráfico a continuación. Debido a que la “zona segura y justa” se encuentra entre los dos círculos (uso mínimo para la base social y límites planetarios) el modelo se llama “economía rosquilla” (en inglés conocido como: “doughnut economics”):

Gráfico 1.3: La economía rosquilla



Fuente: (Raworth, 2017)

3.2 Retos sociales

Nuestro sistema económico no sólo amenaza la sostenibilidad por el sobrepaso a los límites ecológicos. Sostenibilidad implica una combinación de límites ecológicos con una sólida base social que permite la convivencia de los seres humanos en el planeta. El trabajo infantil, trabajo en condiciones que amenazan la salud e integridad física, la violación de derechos humanos – que se encuentran típicamente en países en camino al desarrollo en la producción de bienes para los mercados en los países industrializados – son sólo algunos ejemplos que muestran los retos sociales para la sostenibilidad en nuestro sistema económico actual.

Los derechos humanos atribuyen a cada persona derechos esenciales como acceso a una alimentación adecuada, agua, atención sanitaria, educación, libertad de expresión, participación política y seguridad personal. Solo al respetar estos derechos se puede garantizar una base sostenible para el convivir de la humanidad. En este contexto, Raworth (2017) define 12 prioridades sociales como “bases sociales”, divididos entre tres grupos:

- **Garantizando el bienestar** a través de: seguridad alimenticia, ingresos adecuados, agua potable y gestión de residuos, vivienda adecuada y atención de salud
- **Garantizando la productividad** a través de: educación, condiciones laborales decentes, acceso a servicios de energía
- **Garantizando el empoderamiento** a través de: cooperación en redes, igualdad de género, igualdad social, permitiendo una voz política y de representación, paz, y justicia.

Actualmente, muchas personas no viven en las condiciones mencionadas arriba, y sufren de hambre, pobreza (con ingresos por debajo de USD 3.10 por día), no cuentan con acceso a educación o a una alimentación adecuada. Asimismo, regulaciones sociales que impiden trabajo excesivamente mal pagado, trabajo infantil y otras violaciones de derechos humanos, se encuentran establecidas en países industrializados pero no en países en camino al desarrollo. El siguiente cuadro muestra estos aspectos e ilustra la brecha entre las bases sociales requeridas y la realidad; posteriormente, presentamos el estudio de caso de Bangladesh que evidencia las condiciones de trabajo en fabricas de países de bajos ingresos donde se producen productos de consumo a ser vendidos en países de medio y altos ingresos:

Tabla 1.2: **Indicadores de base social a nivel mundial**

Dimensión	Indicador	%*	Año
Alimento	Población desnutrida	11%	2014-16
Salud	Población en países con mortalidad de niños menores a 5 años superando 25 por 1,000 nacidos vivos	46%	2015
	Población en países con esperanza de vida al nacer por debajo de 70 años	39%	2013

Educación	Población adulta (mayores a 15 años) que son analfabetas	15%	2013
	Niños entre 12-15 años fuera de escuela	17%	2013
Ingresos y situación laboral	Población viviendo por debajo del límite internacional de pobreza de USD 3.10 / día	29%	2012
	Población entre 15 y 24 años buscando, pero no encontrando trabajo	13%	2014
Agua y saneamiento	Población sin acceso a agua potable mejorada	9%	2015
	Población sin acceso a saneamiento mejorado	32%	2015
Energía	Población sin acceso a electricidad	17%	2013
	Población sin acceso a instalaciones de cocina limpias	38%	2013
Redes y contactos sociales	Población que expresa no poder contar con alguien en tiempos difíciles	24%	2015
	Población sin acceso al Internet	57%	2015
Vivienda	Población viviendo en barrios de pobreza en países en camino en desarrollo	24%	2012
Igualdad de genero	Brecha de representación en parlamentos nacionales entre mujeres y hombres	56%	2009
	Brecha de ingresos entre mujeres y hombres	23%	2009
Igualdad social	Población con una relación de Palma de 2 o mayor (relación entre los ingresos del 10.0 % de la población con los ingresos más altos y el 40.0 % de la población con los ingresos más bajos)	39%	1995-2012
Voz política	Población anotando 0.5 o menos (de 1.0) en el índice de voz y responsabilidad	52%	2013
Paz y justicia	Población en países anotando 50 o menos (de 100) en el índice de percepción de corrupción	85%	2014
	Población en países con un índice homicidio de 10 o más en 10,000	13%	2008-13

*) Porcentaje de la población mundial afectada por el criterio mencionado

Fuente: (Raworth, 2017)

Estudio de caso: La falta de sostenibilidad social – El infierno “Made in Bangladesh”

Un ejemplo que evidencia la falta de sostenibilidad social inherente al sistema de producción mundial es la situación de las fábricas que producen para las multinacionales de la industria de la moda como H&M, Benetton, Inditex, Wal-Mart o Marks & Spencer, entre otras. Bangladesh es uno de los países que fabrica la moda de consumo o “fast fashion” para estas empresas multinacionales. El sector textil es uno de los principales motores económicos de este país y da empleo a 4.4 de sus 160 millones de habitantes, principalmente a mujeres. Sin embargo, el éxito de este sector no se traslada a sus trabajadores: su remuneración asciende alrededor de 68 dólares – a nivel mensual. El costo de la forma de producción no sostenible de la “moda rápida” vendida en los países industrializados no solo se refleja en los bajos ingresos de los trabajadores, sino también en la falta de medidas mínimas para su seguridad.

El mundo empezó a ver las condiciones precarias de trabajo en 2013 en la tragedia de Rana Plaza. Esta fábrica textil en la cual 5,000 trabajadores fabricaban ropa para 30 marcas internacionales, Mango, Primark y Benetton, entre otras, se derrumbó el 24 de abril de 2013. A pesar de que sus empleadas habían denunciado el mal estado del edificio los dueños no habían tomado medidas para mejorar la seguridad. Como resultado, perdieron la vida 1,130 personas y más de 2,000 resultaron heridas. No obstante, el desastre no terminó ahí: cinco años después del derrumbe, la mitad de las trabajadoras que salieron heridas a causa del derrumbe seguían sin posibilidad de trabajar. El dinero de la compensación laboral apenas cubría parte de los costos médicos, y muchas de ellas se vieron en la necesidad de sobre endeudarse para poder subsistir. Como consecuencia del derrumbe de Rana Plaza se crearon iniciativas empresariales y se realizaron inspecciones en más de 2,000 fábricas. No obstante, los avances en la mejora de las condiciones laborales son modestos: las trabajadoras de la industria textil de Bangladesh se siguen enfrentando a carencias en muchos casos inhumanas, sin acceso, por ejemplo, a una seguridad social o a seguros por accidentes. Las trabajadoras tienen que dedicar excesivas horas extras para mejorar sus ingresos, la mitad de las costureras trabaja más de 60 horas semanales.

La creciente demanda por ropa barata en los países industrializados también eleva la demanda de trabajo. No obstante, este desarrollo no fortalece la posición de las trabajadoras. Por un lado, muchas trabajadoras manifiestan el miedo de denunciar las malas condiciones en las cuales trabajan, y la persecución de aquellas que se afilian a los sindicatos es una práctica constante en la industria textil. Por el otro lado, las grandes fábricas de Bangladesh afrontan el incremento de la demanda destinando carga de trabajo a subcontratas de menor tamaño. En estos centros de producción, pequeños e informales, se ignoran los riesgos, las normas y las medidas de seguridad.

Fuente: Olazábal (2018)

3.3 El cambio climático

Actualmente, de todos los límites planetarios, el cambio climático es el límite con más presencia en las noticias y los discursos. A pesar de que aquí vamos a dedicar también un subcapítulo entero a este fenómeno, cabe destacar que no se debe perder de vista los demás límites mencionados. No sólo porque sin cada uno de los sistemas protegidos por los límites planetarios la vida en la tierra no será posible, sino también porque los diferentes aspectos están interconectados. El incremento de la temperatura global, por ejemplo, puede agrandar zonas marginales de desiertos, y de esta forma, contribuir a la reducción en número o la extinción de ciertas especies. Por el otro lado, el cambio de sistema de tierras, por ejemplo, por la deforestación de áreas de selva tropical, a su vez, reduce la capacidad de la tierra de absorber carbón dióxido e incrementa el cambio climático.

Definición: Cambio climático

El cambio climático es la variación significativa del clima que puede ser identificado (por ejemplo, al aplicar análisis estadísticos) en el promedio y/o la variabilidad de sus características durante un período extenso, típicamente, durante décadas o más tiempo.

El hecho de que el cambio climático atraiga más atención que otros aspectos del desarrollo sostenible se puede, probablemente, atribuir a las siguientes razones:

- En gran medida, el cambio climático está relacionado con el uso de energías fósiles como columna vertebral de nuestra economía (generación de energía, transporte, producción industrial, edificios); el cambio de modelos de negocio, costumbres de consumo y otros elementos centrales de nuestras sociedades afecta prácticamente a todos los seres humanos.
- La relación causal entre las actividades humanas (emisión de gases invernaderos) y el calentamiento global está bien analizado y consensuado entre el 99.94% de los científicos (Powell 2017).
- Basado en escenarios científicos el volumen restante de gases invernaderos que todavía pueden ser emitidos a la atmósfera antes de causar efectos irreversibles es conocido y limitado; asimismo, el tiempo para frenar este desarrollo está también muy limitado.
- Las consecuencias del cambio climático, ya son visibles y afectan la vida en casi todas las regiones del mundo.

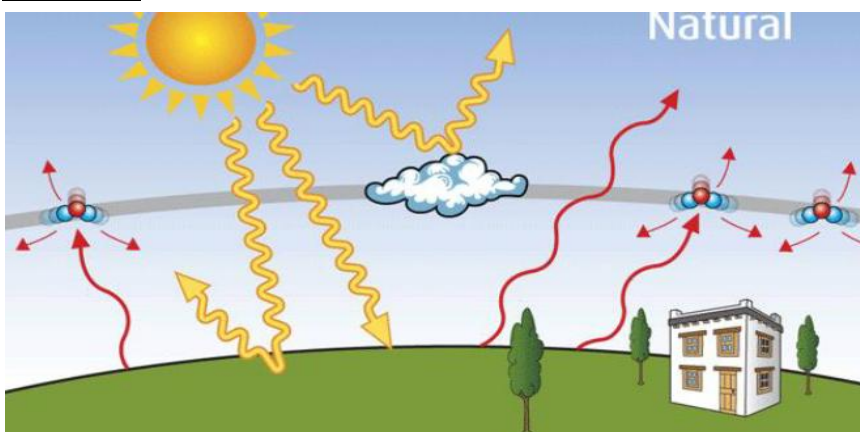
A continuación, vamos a conocer la base científica atrás del cambio climático, sus causas y consecuencias, diferentes escenarios científicos así como formas de responder a este fenómeno.

3.3.1 Clima, tiempo y el efecto invernadero

Para comprender los aspectos científicos que explican el cambio climático, es importante entender la diferencia entre “tiempo” y “clima”. La expresión “tiempo” describe los cambios diarios en temperatura, viento, lluvia, humedad y otros elementos del tiempo en el corto plazo. Los cambios ocurren rápidamente, dentro de horas, días o semanas. A diferencia, la expresión “clima” se refiere a las condiciones promedio del tiempo durante un período largo de tiempo, típicamente durante 30 años. Basado en esta definición, el “Intergovernmental Panel on Climate Change” (IPCC, en español: Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático) de las Naciones Unidas (para más detalle sobre el IPCC véase el acápite 4.3.5) define cambio climático como “un cambio en el estatus del clima que puede ser identificado (por ejemplo, al aplicar análisis estadísticos) como el promedio y/o la variabilidad de sus características y que persiste durante un periodo extenso, típicamente, durante décadas o más tiempo”.

El elemento clave que ha causado el cambio climático es el llamado efecto invernadero. Es un mecanismo esencial que – en su forma natural – facilita la vida en nuestro planeta, pero debido a la intervención humana ha llegado a una dimensión que puede convertirse en una amenaza.

Gráfico 1.4: El efecto invernadero natural



Como ilustra el gráfico, la tierra recibe energía solar que en partes reflejan nubes y aerosoles en la atmósfera. La radiación solar que llega a la tierra, parcialmente se absorbe por el suelo u océanos y, posteriormente, se emite como calor en forma de radiación infrarroja. Pero no toda la energía que llega a la tierra sale al espacio otra vez. Parte de la radiación infrarroja se conserva a través de una capa de gases en la atmósfera: estos gases (como, por ejemplo, dióxido de carbono) consisten en moléculas que reflejan la radiación en diferentes direcciones, entre otros, hacia la superficie de la tierra. En consecuencia, esta capa de Gases de Efecto Invernadero (GEI) contribuye a la retención de parte de la energía procedente del sol en la atmósfera. Sin esta capa de protección la temperatura en la tierra sería 18 grados Celsius bajo cero (-18°C) – un nivel de temperatura no adecuada para la vida en nuestro planeta.

La existencia de gases de efecto invernadero en la atmósfera mantiene la temperatura global en un nivel que permite la vida sobre la tierra. Mientras que una menor concentración de GEI baja la temperatura, su incremento retiene más energía y calienta la atmósfera.

A pesar de su efecto fuerte en la temperatura los GEI representan una parte mínima en la atmósfera: Se compone principalmente por nitrógeno (78%), oxígeno (21%) y argón (0.9%). Solo el 0.1% de la atmósfera consiste en GEI de los cuales los más relevantes son los siguientes:

- **Dióxido de carbono (CO₂):** En términos de volumen CO₂ es el gas más relevante para el calentamiento global, y según estudios científicos de la NASA se mantiene entre 300 y 1,000 años en la atmósfera. El análisis de pruebas de hielo (que permiten obtener información sobre la concentración de diferentes gases en la atmósfera durante cientos de miles de años), la concentración actual de CO₂ es la más alta durante los últimos 800,000 años. Desde el inicio de la revolución industrial su concentración ha aumentado en el 45%, llegando a 420 ppm (0,042%). La fuente principal de CO₂ en la atmósfera es la quema de combustibles fósiles (carbón, gas natural, petróleo).
- **Metano (CH₄):** CH₄ es 25 más eficiente en retener energía que el CO₂. Por lo tanto, a pesar de que se mantiene solo 12-15 años en la atmósfera, tiene un impacto muy significativo en el efecto invernadero. Sus niveles actuales en la atmósfera exceden los niveles preindustriales por el 150% y han llegado a 1,934 ppb (partes por billones). Las fuentes de emisiones de CH₄ incluyen la extracción de gas natural, agricultura y ganadería.
- **Óxido de nitrógeno (N₂O):** La concentración de N₂O ha incrementado en el 20% comparado con los niveles preindustriales, y actualmente, están en 337 ppm. Su emisión se debe principalmente actividades agrícolas (fertilizantes, abono, residuos) y la quema de combustibles fósiles. N₂O se mantiene en la atmósfera durante 120 años.

Para hacer comparable el impacto de los diferentes GEI y poder expresar su volumen en una sola unidad se ha introducido la unidad Dióxido de Carbono Equivalente (CO₂e) según la siguiente definición:

Definición: CO₂e – Dióxido de carbono equivalente

CO₂ equivalent (equivalente a CO₂): El dióxido de carbono equivalente (en inglés: Carbon Dioxide Equivalent – CO₂e) es una medida universal para indicar el potencial de calentamiento global de los diferentes gases con efecto invernadero durante un determinado periodo de tiempo (normalmente 100 años). El potencial de efecto invernadero se diferencia dependiendo del impacto y de la persistencia en la atmósfera de los diferentes gases. Al comparar el potencial de calentamiento global (GWP por sus siglas en inglés: Global Warming Potential) se asigna al dióxido de carbono el potencial 1 de calentamiento (como valor de referencia), y resulta para metano el potencial 28-36 (i.e. una unidad de metano tiene 22 veces la capacidad de calentamiento que una unidad de dióxido de carbono) y para óxido de nitrógeno el potencial de 265-298.

Fuente: (European Environment Agency, 2023)

3.3.2 El origen histórico de las emisiones de GEI

Como mencionamos anteriormente, la concentración de los GEI ha aumentado significativamente en comparación con los niveles preindustriales: La concentración del CO₂ incrementó en 45%, la de CH₄ en 150% y la concentración del N₂O en 20%. ¿Pero realmente existe una relación causal entre la industrialización (un proceso llevado a cabo por el ser humano) y el nivel de GEI, y en qué consiste? Para poder comprender este contexto y sus implicaciones a la actualidad, es útil echar un breve vistazo a la historia de la industrialización y su impacto. El siguiente resumen se basa en Herrmann (2022), Smil (2017) y Hampshire-Waugh (2021).

La industrialización tiene su origen en Inglaterra a partir de 1760. El desarrollo inició con varios inventos que permitían la mecanización de la producción de tela a través del telar mecánico. Inicialmente, la mecanización se concentró exclusivamente en el sector textil, y demoraba décadas hasta el reemplazo del último telar de mano por un telar mecánico. Aunque las nuevas máquinas eran más eficientes que telares de mano, tenían un costo relativamente elevado: su precio estaba 70 veces más alto que un telar de mano. Por lo tanto, estas inversiones sólo eran rentables si se podía ahorrar costos considerables para la mano de obra – en países con una mano de obra muy barata no tenía sentido invertir en la mecanización; dado que en Inglaterra los sueldos eran más altos que en el resto del mundo, el proceso de la mecanización de la producción de tela avanzó más rápido en la isla británica. En los años 1780 se encontraban aproximadamente 150 telares mecánicos en Inglaterra, mientras que en Francia habían solo cuatro, y ninguno en India.

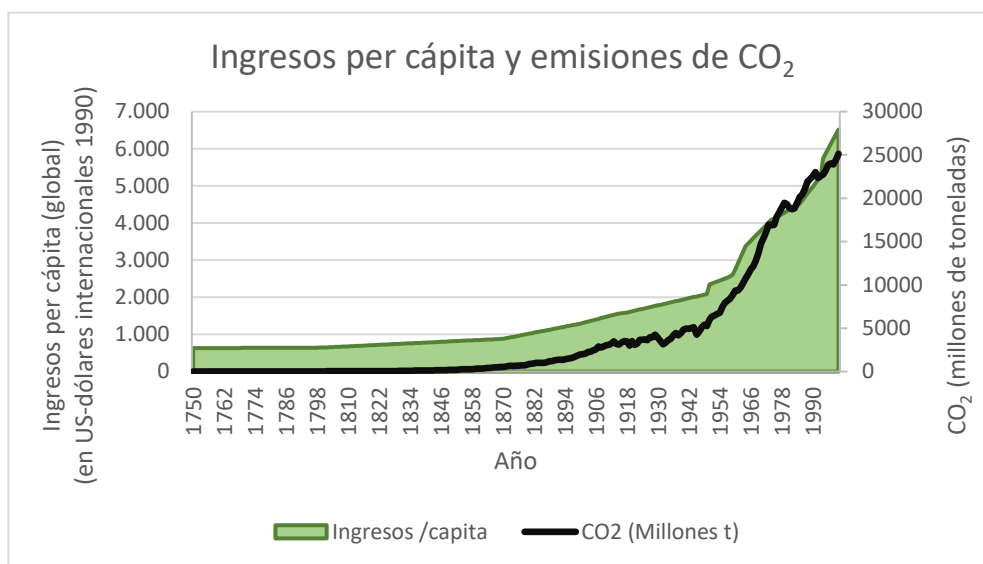
A pesar del mejoramiento de eficiencia a través de la mecanización de la producción de tela, las máquinas todavía sufrían de una restricción: requerían energía para su funcionamiento. Al inicio trabajaron con fuerza hidráulica cuya disposición era limitada. Por lo tanto, el verdadero éxito de esta tecnología llegó con el invento de la máquina de vapor. Con esta tecnología se podía convertir carbón en energía cinética para máquinas. El principio es simple: en un cilindro de metal se calienta agua hasta que se convierta en vapor; la presión del vapor mueve un pistón hacia arriba, el agua condensa y se crea un vacío dentro del pistón; por la presión del aire el pistón se mueve nuevamente abajo; vigas que están vinculadas con el pistón pueden mover bombas u otros dispositivos mecánicos. Con esta tecnología se podía convertir la energía guardada en el carbón en calor y posteriormente en energía cinética.

Para el uso de esta tecnología era necesario el acceso al carbón y la capacidad de transportarlo. Nuevamente, Inglaterra lideró este proceso. Primero, desarrollaron máquinas que usaron la energía del carbón para sacarlo de la tierra; luego inventaron el ferrocarril (con la primera ruta desde la región carbonera Durham hasta el mar en 1825) y las máquinas de vapor fueron implementadas en todos los sectores de la producción. Este desarrollo incrementó la productividad y duplicó el ingreso per cápita de los británicos entre 1770 y 1870. A pesar de que en el mismo período los sueldos de los trabajadores sólo aumentaron en 30%, el poder adquisitivo de la población creció con lo que inició el desarrollo hacia la sociedad de consumo que conocemos hoy.

El empuje para la dinamización del desarrollo económico era factible con el uso de combustibles fósiles (carbón, y posteriormente también petróleo y gas) que consisten en material orgánico que había absorbido energía solar hace mucho tiempo y que fue convertido por presión y calor en carbón, petróleo y gas natural. Sólo por el acceso fácil y a bajos costos a esta fuente de energía

guardada en el pasado y por su transformación de nuevo en energía la humanidad podía lograr un incremento de producción nunca visto antes en la historia. Al generar energía requerida para la producción de bienes y otros fines como el transporte inició la producción masiva de bienes de consumo y el crecimiento económico medido en ingresos por cápita. No obstante, este avance causó un efecto secundario: dado que al quemar un kilogramo de carbón se emite 3.7 kilogramos de dióxido de carbono (CO_2) el incremento de CO_2 en la atmosfera era parte inherente de este proceso. El siguiente gráfico ilustra el contexto entre el crecimiento económico y la emisión de CO_2 .

Gráfico 1.5: Ingresos per cápita y emisiones de CO_2 (1750-2000)

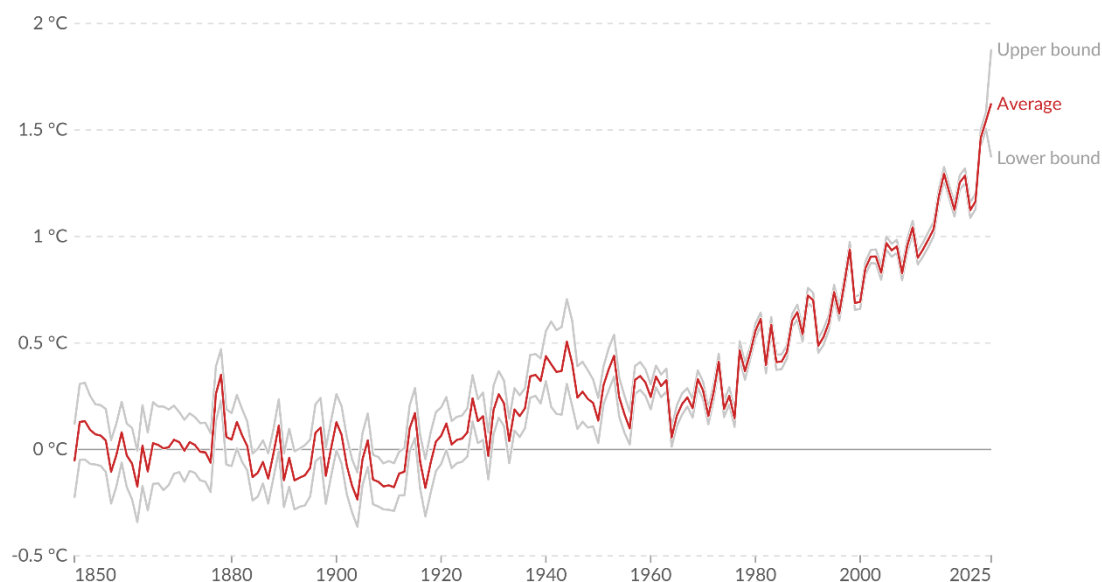


Fuente: Gráfico propio, basado en datos de:

- 1) Maddison Project Database 2020 (Bolt and van Zanden, 2020) – with minor processing by Our World in Data
- 2) Global Carbon Budget (2023b)

Como consecuencia del incremento de la concentración de CO_2 y otros GEI, el efecto invernadero se fortaleció, contribuyendo al aumento de la temperatura global. Desde finales del siglo XIX, la temperatura media de la Tierra ha aumentado en 1.2 grados centígrados. Esto es un síntoma del impacto de las actividades humanas en nuestro planeta, especialmente de las emisiones de gases de efecto invernadero. Por ello, se habla del “cambio climático antropogénico”, derivado de las palabras griegas “anthropos” (ser humano) y “genos” (engendrar). El efecto comentado aquí se ilustra en el siguiente gráfico en el cual se presenta el cambio de la temperatura global con referencia a la línea base (establecida como media entre 1961—1990):

Gráfico 1.6: Cambio de la temperatura global (1850-2025)



Fuente: (National Aeronautics and Space Administration (NASA), Goddard Institute for Space Studies (GISS) – processed by Our World in Data)



Vínculos externos con videos relacionados al tema:

Explicación del efecto invernadero:

<https://www.youtube.com/watch?v=TdLUgNXQ-NI&t=335s>

[9 min]

Resumen de aspectos básicos del cambio climático:

<https://www.youtube.com/watch?v=fPyNZHZXo80&t=330s>

[24 min]

Sobre causas e historia del cambio climático:

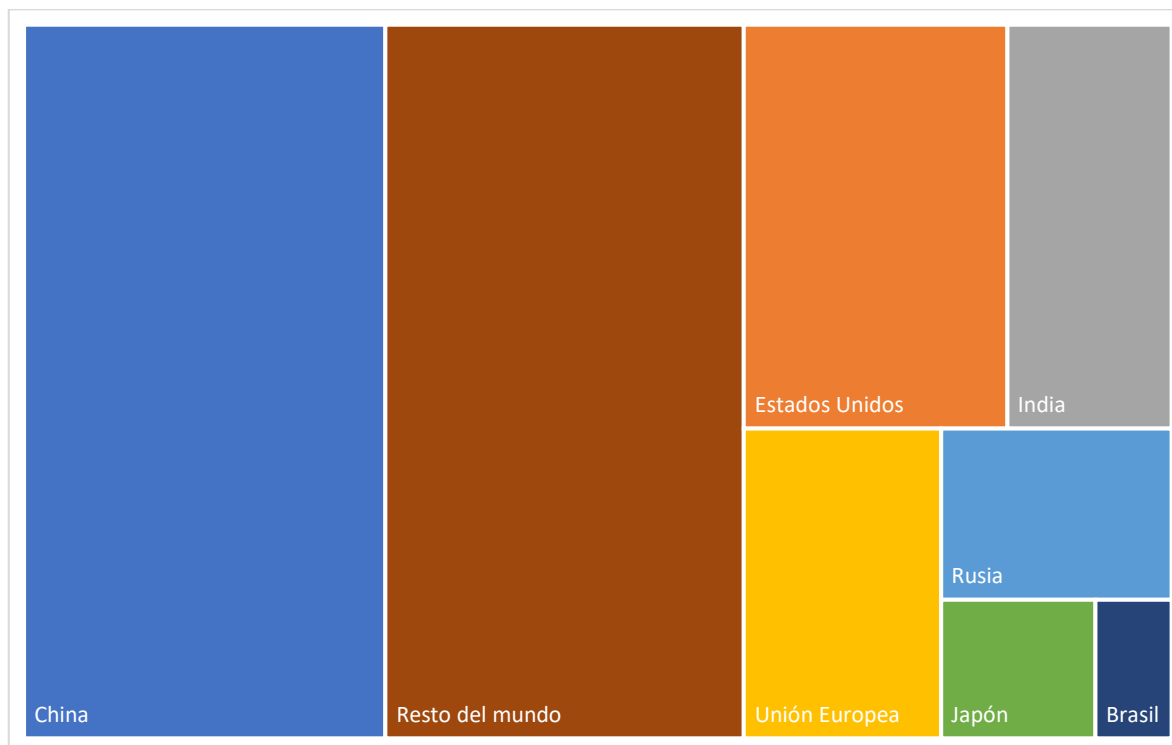
<https://www.youtube.com/watch?v=IQ6tzcLncI>

[4 min]

3.3.3 ¿De dónde vienen las emisiones en la actualidad?

El país con más emisiones de GEI absolutas en la actualidad es China: su dinámico desarrollo económico ha incrementado la necesidad de energía, lo que, entre otros, sigue contribuyendo a más emisiones. Como muestra el gráfico a continuación, en el año 2022, China emitió más GEI que las de los EE. UU. y la Unión Europea en conjunto.

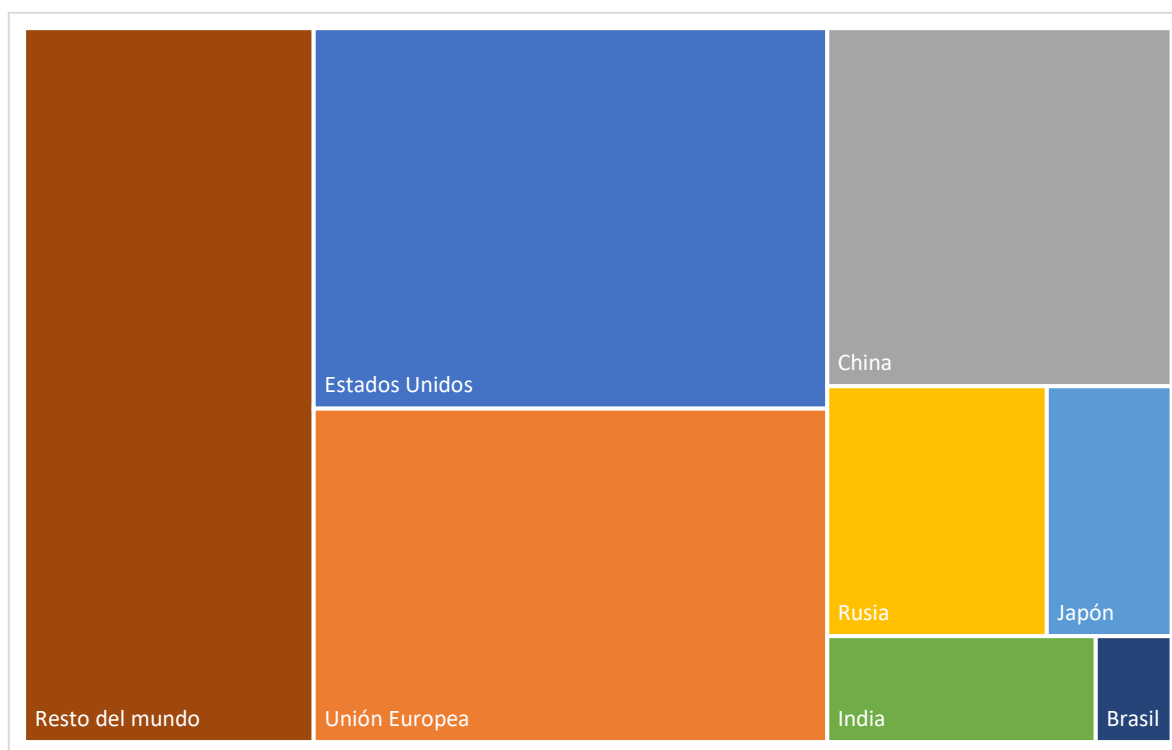
Gráfico 1.7: Origen de emisiones GEI por país en 2023



Fuente: (Gráfico propio basado en datos de Global Carbon Budget (2025c); Population based on various sources (2025) – with major processing by Our World in Data)

Este panorama cambia al considerar las emisiones históricas acumuladas desde el inicio de la industrialización. El segundo gráfico visualiza que las dos regiones más industrializadas del mundo (Unión Europea y EE. UU.) han emitido casi la mitad de todos los GEI en la atmósfera. Este dato no sólo confirma la relación causal entre industrialización, prosperidad económica y el calentamiento global, sino a la vez es uno de los aspectos críticos que influye las negociaciones a nivel internacional sobre los esfuerzos comunes que se deben realizar para frenar este desarrollo.

Gráfico 1.8: Origen de emisiones GEI acumuladas por país (1750-2023)



Fuente: (Gráfico propio basado en datos de Global Carbon Budget (2025d); Population based on various sources (2025) – with major processing by Our World in Data)

Emisiones per cápita: emisiones territoriales versus emisiones basadas en el consumo

En la comparación de emisiones absolutas por país – actuales o acumuladas – se abstrae de la población en los diferentes países: Es obvio que un país como China que con más de 1.4 mil millones de habitantes representa alrededor del 18% de la población mundial, emite más GEI que los Estados Unidos (4.2% de la población mundial) y la Unión Europea (5.7%). Para obtener datos sin esta distorsión se usan las emisiones per cápita. En general, se toma como base las GEI emitidas por la producción u otras actividades en un país o una región. Es decir, si un país A importa bienes producidos en un país B, las emisiones relacionadas a esta producción se atribuyen al país B – a pesar de que el consumo de estos bienes se realiza en el país A. Por ello, esta forma de establecer emisiones per cápita se llama **emisiones territoriales o emisiones basadas en la producción**. Es el estándar del cálculo aplicado, y si no se menciona otro criterio, las emisiones per cápita en estadísticas se refieren a emisiones territoriales.

Evidentemente, esta forma de cálculo atribuye emisiones en países cuya producción satisface una demanda en países importadoras al país de producción – y no al país que causa las emisiones con su demanda. Este principio es cuestionado, por ejemplo, por países como China, países con economías emergentes o regiones de bajos costos laborales a las cuales compañías de países industrializados han transferido su producción. Siguiendo esta argumentación, no es adecuado

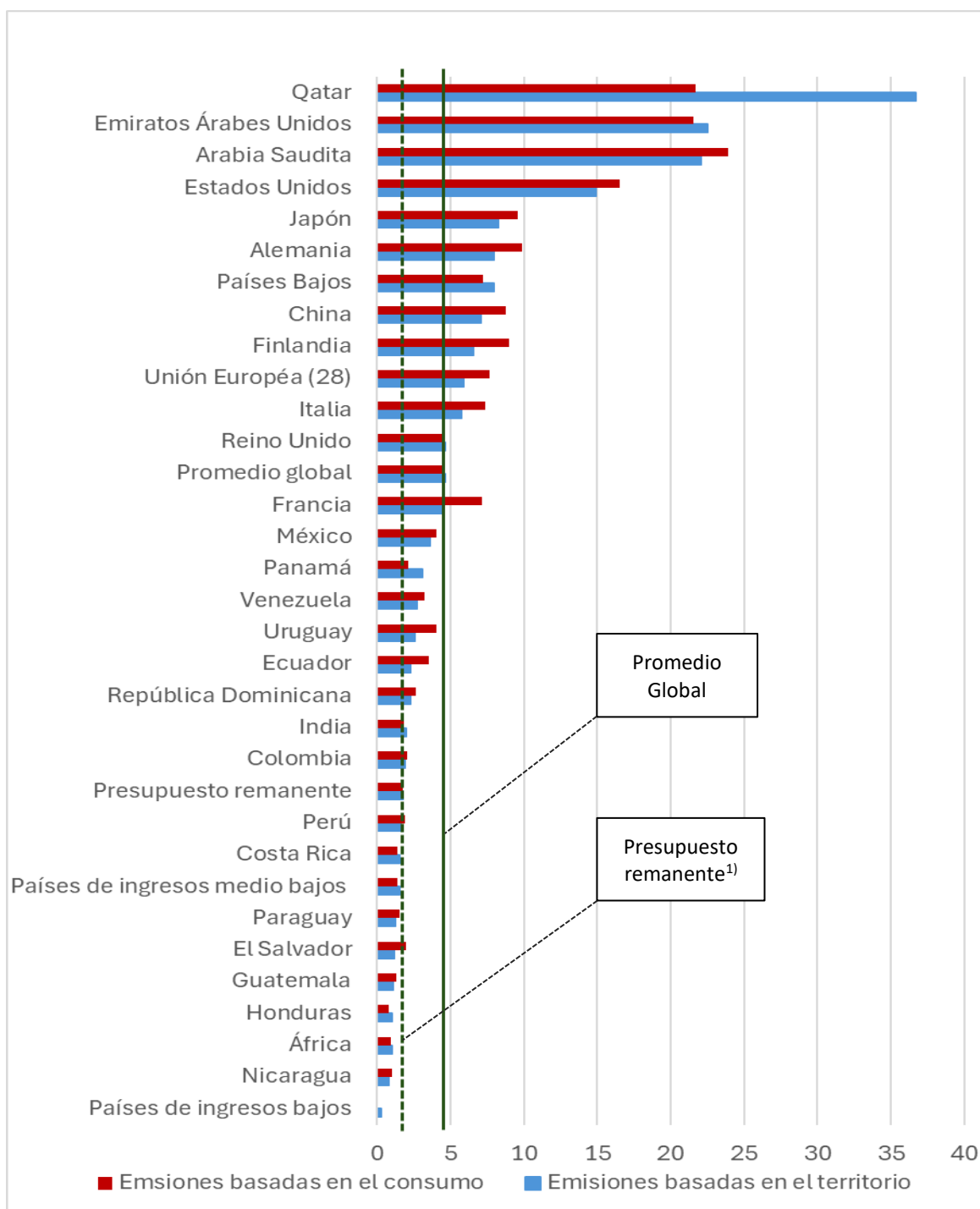
atribuir emisiones generadas por la producción, por ejemplo, de ropa en Bangladesh o un televisor en China a los países de origen si el comprador final se ubica en Europa o en los EE. UU.

En consecuencia, estos países proponen, aplicar el criterio de **emisiones basadas en el consumo** que atribuyen las emisiones generadas en la producción de bienes y servicios según el lugar donde fueron consumidas, en lugar de donde fueron producidas. Los datos se calculan ajustando las emisiones basadas en la producción por el comercio: las emisiones basadas en el consumo son iguales a las emisiones basadas en la producción, menos las emisiones incorporadas en las exportaciones, más las emisiones incorporadas en las importaciones.

Si las emisiones basadas en el consumo de un país son mayores que sus emisiones de producción, es un importador neto de dióxido de carbono. Si sus emisiones basadas en el consumo son menores, entonces es un exportador neto.

El gráfico a continuación refleja la diferencia entre las emisiones basadas en la producción y el consumo. Como se puede apreciar de los datos, la mayoría de los países industrializados se caracteriza por mayores emisiones basadas en el consumo mientras que en la mayoría de los países del Sur Global la situación es al revés. Asimismo, se puede observar la brecha en las emisiones per cápita. Mientras que los países europeos o los EE.UU. emiten un múltiple del promedio global de las emisiones per cápita, los países en América Latina o África se ubican considerablemente por debajo de este valor; incluso, un africano típico podría incrementar sus emisiones y todavía estar por debajo del límite permitido para no sobrepasar el límite de calentamiento de 1.5°C, mientras que un típico europeo tendría que reducir sus emisiones, por lo menos, en 75% para bajar al mismo nivel de contribución.

Gráfico 1.9: Emisiones per cápita basadas en el territorio y en el consumo por país 2022 (en tCO₂)



¹⁾ Emisiones per cápita permitidas hasta 2050 para mantener el calentamiento global por debajo de 1.5°C con una probabilidad de 67% (datos del IPCC).

Fuente: (Gráfico propio basado en datos de Global Carbon Budget (2025a))



Discusión

¿Cuál de las formas de atribuir emisiones de GEI a diferentes países le parece la más adecuada y justa? ¿Cuál es la práctica actual de registrar emisiones, y cuáles son las razones que explican esta práctica?

Reflexione sobre las preguntas y comparte sus argumentos en el foro.

3.3.4 El impacto del cambio climático

El cambio climático está compuesto por más factores que sólo el calentamiento global, como, por ejemplo, el cambio de las épocas de lluvia, el incremento del nivel del mar, el retroceso de los glaciares, el deshielo en la región antártica o en Groenlandia. En este contexto es importante entender que el clima está influenciado por diferentes factores que interactúan entre sí. Los 5 componentes más influyentes son los siguientes:

- **Atmósfera:** Es la capa de gases que circulan alrededor del planeta. Es la parte del sistema climático que cambia más rápidamente. Una de las funciones más importantes es el transporte de calor del ecuador hacia los polos.
- **Océano:** Es la superficie cubierta por agua; aproximadamente el 70% de la superficie de la tierra esta cubierta por agua, la función de los océanos consiste en el transporte de energía.
- **Críósfera:** Es una parte integral del sistema climático global cubierta por hielo y nieve. Su rol es reflejar radiación solar.
- **Biósfera:** El componente en el cual hay vida terrestre y marina, que juega un rol importante en el proceso de absorber y procesar carbón, por ejemplo, por el proceso de fotosíntesis de plantas.
- **Litósfera:** Es la superficie con vegetación que es clave para la absorción de energía solar, la regulación del aire que recorre sobre la tierra y el ciclo de agua.

La interacción entre estos componentes es clave para mantener el clima global en un nivel estable y garantizar un balance entre la radiación solar entrante al planeta y la radiación emitida/reflejada.

El calentamiento causado por los cambios en la atmósfera a su vez causa un calentamiento en los océanos. Los “best-case” escenarios contemplan un incremento de 2°C hasta 2100 en el nivel de los primeros 100 metros de los océanos. Debido a la expansión térmica del agua, intensificada por el insumo adicional de agua del descongelamiento de los polos y de los glaciares se proyecta una subida del nivel del mar entre 0.26-0.98 metros hasta el fin del siglo XXI.

Los cambios en la criósfera no sólo contribuyen a la subida del nivel del mar. El descongelamiento de los polos y de los glaciares, así como la reducción de regiones de nieve y heladas permanentemente disminuye la capacidad de la tierra de reflejar la radiación del sol que pasa por la atmósfera. Según el IPCC la pérdida de hielo de Groenlandia ha acelerado desde 1992 de 34 mil millones a 215 mil millones toneladas por año en 2001. Este desarrollo equivale a un incremento de la subida del nivel del mar de 9 mm por año (1992) a 59 mm por año (2001). Adicionalmente a la

disminución de áreas de hielo en los polos, se proyecta una reducción del volumen de los glaciares de hasta 85% antes del fin del siglo.

Además de los efectos ya descritos, el IPCC advierte que, por ejemplo, un calentamiento global por 1.5 °C pone en riesgo la base de la vida de 20-30 por ciento de las especies existentes que puede llegar a su extinción. Asimismo, hay impactos fuertes en la vida humana y las sociedades. Aunque estos impactos afectan a toda la humanidad, la dimensión difiere significativamente en diferentes regiones, causando daños más graves en los países en camino al desarrollo. La mitad más pobre de la población global ha causado menos que 10% de todas las emisiones; a la vez es la más afectada por las emisiones que han causado los 10 por ciento más rico (que han emitido más que 50%) de los GEI.

Los impactos del cambio climático no se limitan a fenómenos naturales, sino abarcan un amplio abanico de aspectos económicos y sociales. Los efectos más relevantes incluyen, pero no se limitan a los siguientes:

- **Agricultura:** Es el más relevante sector para muchos países en camino al desarrollo. Escenarios de calentamiento global por encima de 1.5 °C pronostican una mayor frecuencia y severidad de eventos naturales extremos como, por ejemplo, más períodos de sequía u olas de calor. A su vez, estos fenómenos contribuyen a una degradación del suelo y afectan la productividad de actividades de agricultura.
- **Acuicultura:** Según el “Worldwide Fund for Nature” los océanos y la vida marina llegan a límites críticos a partir de un calentamiento de 1.5 °C. Los arrecifes corales ya están afectadas por una reducción significativa por 70-90 por ciento, y con un calentamiento de 2 °C desaparecerán por completo. A nivel mundial más que 500 millones de personas dependen de los peces en los arrecifes corales.
- **Acceso al agua:** Actualmente, el número de personas que viven en áreas con escaso acceso a agua limpia asciende alrededor de 2 mil millones. Se espera que este número crecerá a casi 3 mil millones para el 2025, debido a sequías y la reducción de lagos y otros almacenadores de agua dulce.
- **Migración:** En consecuencia de los cambios mencionados, mucha gente perderá su base para sustentar su vida y/o la capacidad de generar ingresos a través de sus actividades económicas. El IPCC espera que hasta 2050 hasta 150 millones de personas tendrán que migrar desde las regiones en las cuales viven actualmente. Este fenómeno incluye también la población de islas situadas a poco nivel del mar.
- **Salud:** El cambio climático afecta los factores claves que determinan la salud: la calidad de aire, el acceso a agua potable, así como el abastecimiento con alimentos y la disponibilidad de la seguridad y protección de casas. La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que entre 2030 y 2050 el cambio climático causará aproximadamente 250,000 muertos adicionales por año, debido a enfermedades como Malaria y Diarrea, pero también por desnutrición y estrés de calor. El daño directo relacionado a la salud puede llegar a USD 2-4 mil millones anuales hasta 2030.
- **Propiedad e infraestructura:** La frecuencia y la severidad de efectos naturales extremos (p. ej., inundaciones, huracanes y tormentas, lluvias fuertes) implicarán la necesidad de reconstruir casas y edificios o fortalecerlos para prepararlos para estos riesgos. Asimismo, el subiendo nivel

del mar afectará áreas usadas para la agricultura y el valor de terrenos y edificios construidos cerca de la costa.

- **Seguridad:** Dado que el acceso a recursos naturales (como agua, suelo, alimentos) se limitará, la competitividad para acceder estos recursos incrementará. Expertos no solo temen más conflictos entre comunidades locales/regionales, sino pronostican conflictos entre naciones y estados. Este desarrollo, a su vez, contribuirá (entre otros) a una mayor migración y los problemas relacionados con ella.



Vínculos externos con videos relacionados al tema:

Sobre la relación entre el cambio climático, la agricultura y el consumo en el Norte Global:

<https://www.youtube.com/watch?v=rkBHpS5DMnw>

[14 min]

Sobre el impacto del cambio climático en América Latina:

https://www.youtube.com/watch?v=_PguOSdRcOg

[7 min]

<https://www.youtube.com/watch?v=ZXDUoDaCTDU>

[6 min]

https://www.youtube.com/watch?v=upJMrRN_aJY

[7 min]

Sobre el cambio climático en México:

<https://www.youtube.com/watch?v=lbYOyy7KEgl>

[25 min]

<https://www.youtube.com/watch?v=tB6Diujq-AA>

[24 min]

Sobre el cambio climático y su impacto en los ecosistemas de Los Andes del Perú:

<https://www.youtube.com/watch?v=wITrnv2019Y>

[17 min]

3.3.5 Respondiendo al cambio climático: mitigación y adaptación

En principio, existen dos formas de responder al cambio climático: reducir sus causas o adaptarse a sus consecuencias, es decir, mitigación y adaptación. Mitigación se refiere a todas las actividades que reduzcan la presencia de GEI en la atmósfera, o eviten/reduzcan la emisión de GEI. Esta mitigación se puede lograr a través de actividades que reduzcan las fuentes de las emisiones o incrementan los sumideros de carbono que captan y guardan GEI.

Adaptación describe las actividades y medidas que incrementan la resiliencia a efectos económicos adversos y a efectos físicos destructivos del cambio climático. Así, por ejemplo, el uso de semillas de plantas que resisten mejor la sequía. Obviamente, el uso de estas medidas depende del contexto: plantas que resisten la sequía no son adecuadas para aquellas regiones en las cuales se espera un incremento de lluvias y de humedad.

Definición: Mitigación y adaptación

Como respuesta al cambio climático se diferencian entre los dos tipos de medidas:

- **Adaptación:** Cambios en las respuestas y medidas aplicadas a los efectos reales o esperados que buscan la reducción de la vulnerabilidad o mejorar la resiliencia frente al cambio climático
- **Mitigación:** Medidas e iniciativas que contribuyen a la reducción de las emisiones de GEI y del calentamiento global

Vínculos externos con videos relacionados al tema:

Sobre mitigación del cambio climático:

<https://www.youtube.com/watch?v=BFV5xCF4tSI>

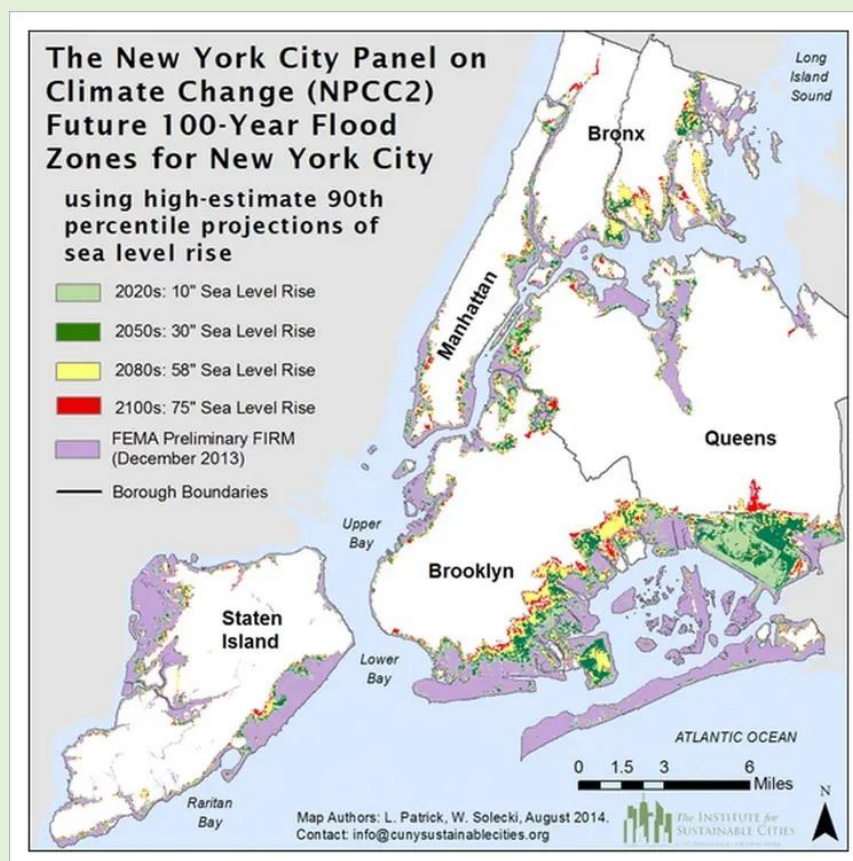
[24 min]



A continuación, veremos el ejemplo de la Ciudad de Nueva York y las medidas de adaptación que aplica para adaptarse a las consecuencias del cambio climático.

Estudio de caso: La ciudad de Nueva York y sus medidas de protección contra inundaciones

Cuando se fundó la ciudad de Nueva York hace aproximadamente 400 años se establecieron los primeros asentamientos por encima de varias islas y penínsulas; debido a su ubicación entre el Hudson River y el East River la ciudad tenía un acceso a rutas comerciales hacia el interior del continente que contribuyeron rápidamente a su prosperidad y su desarrollo como el puerto más importante de la costa Este. Así que no sorprende que la ciudad era el lugar más atractivo para migrantes llegando de Europa, y creció constantemente en número de habitantes. No obstante, el crecimiento poblacional chocaba con las características del paisaje: para establecer más y más edificios, era necesario desecar grandes áreas de pantanales, alinear ríos y aplanar cerros y colinas. De esta forma se ganaba el terreno necesario sobre el cual establecieron los edificios que debido al reducido espacio se construyeron hacia arriba: hoy en día, se encuentran más de 300 rascacielos sobre un terreno con un subsuelo inicialmente húmedo y poco estable, muchos de ellos directamente en la costa. Sin embargo, el aspecto más crítico es el hecho que la ciudad se encuentra solamente 40 cm (y en algunas zonas solamente 12 cm) por encima del nivel del mar.



En el contexto del cambio climático estas características constituyen una fuerte amenaza para la ciudad: en primer lugar, se espera que el nivel del mar subirá hasta 2 metros hasta el final del siglo XXI. El mapa evidencia el impacto en las áreas costeras de la ciudad – cada uno de los cinco distritos estaría inundado.

En segundo lugar, la frecuencia y fuerza de huracanes y eventos similares aumentará. Mientras que, en el siglo XX, había sólo dos huracanes fuertes (en 1938 y en 1972), en los primeros años de este siglo ya ocurrieron dos de estos eventos: en 2011 (huracán Irene) y en 2012 (huracán Sandy). En particular, el huracán Sandy tuvo un impacto devastador. Era la tormenta más fuerte desde la fundación de Nueva York y entró con más de 150 km/h, causando la muerte de, por lo menos, 43 personas y dejando la mayoría de la gente en la ciudad sin energía eléctrica para una semana.

En vista de esta amenaza, la Ciudad de Nueva York ha establecido un plan de contingencia contra este tipo de desastres. El plan busca proteger los 800 km de zona costera con medidas adaptadas a las características de las diferentes zonas.

Manhattan: Se pondrá un anillo protector alrededor del cono de Manhattan, llamado “Big U” (debido a su forma), que consiste en:

- **Malecones y murallas**, básicamente en el East Side de Manhattan, donde hay muchas áreas abiertas
- **Colinas** para reforzar un relieve natural
- **Paredes de protección rebatibles hacia abajo** y armadas en la parte de abajo del puente “Franklin D. Roosevelt East River Drive”; al bajar las redes de protección se arma un muro de acero entre el nivel horizontal del puente y el mar
- **Paredes abatibles hacia arriba** en partes de la costa

Staten Island: Dado que hay pocos habitantes en la isla, la construcción de un muro o de un malecón económicamente no tendría sentido. Así se implementa una solución más “natural”, reestableciendo un ecosistema que ya había existido en el pasado (pero que debido a destrucción humana había desaparecido):

- **Bancos de ostras:** un total de 9 bancos de ostras artificiales con una longitud conjunta de 1 km representan una protección contra mareas vivas

Sistema del metro: El sistema del metro de Nueva York transporta 4.8 millones de personas por día. Como consecuencia del huracán Sandy en 2012 los túneles del metro estaban inundados y por más de una semana el metro no funcionó, causando caos en el tráfico cuando los empleados tenían que usar sus carros para desplazarse entre sus hogares y lugares de trabajo. Para evitar tal situación, se implementaron las siguientes medidas:

- **Puertas de acero** que cierran los elevadores para acceder a los niveles más bajos del metro
- **Puertas horizontales** para cerrar desde arriba las escaleras en las entradas del metro

Túneles de autopistas: Muchos de los túneles para el tráfico de vehículos corren por debajo del nivel del mar, y por debajo del nivel de algunos ríos subterráneos. Estos se protegen contra inundaciones con

- **Puertas masivas de acero** que se pueden cerrar cuando hay una amenaza de un huracán y/o de una marea viva a la vista
- **Globos inflables** que se colocan atrás de las puertas de acero; sirven como una protección adicional y se inflan en 10 a 15 minutos; al mismo tiempo se cierra el túnel por completo para evitar cualquier entrada de agua que pase por las puertas de acero.

Protección especial/individual de ciertos edificios: Algunos de los edificios particularmente expuestos por su ubicación directamente en la costa se han equipado con medidas especiales, como muestra el caso del American Copper Building, un rascacielos de dos torres conectadas y ubicado de la orilla al East River en Manhattan:

- **Columnas de acero de 90 metros:** para fortalecer su estabilidad en el suelo, el edificio está amarrado en un estrato de roca, 90 metros por debajo de la superficie a través de columnas de acero
- **Sistemas de captar agua** antes de que entre al edificio y se canaliza hacia tanques subterráneos; al normalizarse el nivel del agua el agua captada sale de los tanques hacia el mar
- **Sistemas de bombas** que – adicionalmente a los sistemas mencionados arriba – logran vaciar el sótano y niveles subterráneos del edificio; el sistema es redundante, es decir, cada bomba cuenta con una bomba de reserva
- **Sistema auxiliar para la generación de energía eléctrica:** en el piso más alto del edificio se han instalado varios generadores de energía para abastecer el edificio con energía durante – por lo menos – una semana.

Las inversiones en la adaptación al cambio climático que realiza Nueva York son enormes. Sólo las medidas de la protección costera implican una inversión entre 680-800 millones de US-dólares. A diferencia con otras ciudades y regiones del mundo, Nueva York cuenta con estos recursos, por lo menos, en principio. No obstante, es obvio que el presupuesto necesario para estas medidas sobrepasa el presupuesto estatal de varios países pequeños en Centro América y el Caribe, o en la región de África y de Asia.

Fuente: (Debois, 2020)

La captura y almacenamiento de carbono (CCS) y la captura y utilización de carbono (CCU)

Una forma de mitigación (i.e. medidas que reducen al cambio climático) son las tecnologías de CCU (Captura y Utilización de Carbono) y CCS (Captura y Almacenamiento de Carbono). Tanto CCS como CCU tienen como objetivo evitar que el CO₂ llegue a la atmósfera, ya sea almacenándolo de forma permanente (CCS) o reutilizándolo en productos útiles (CCU), contribuyendo así a reducir la concentración de GEI.

- **CCS se centra en capturar el CO₂ de fuentes industriales o energéticas y almacenarlo** de forma permanente en formaciones geológicas subterráneas, evitando que llegue a la atmósfera y ayudando a cumplir los objetivos de reducción de emisiones establecidos en acuerdos internacionales como el Acuerdo de París.
- **CCU implica capturar el CO₂ y reutilizarlo** en la fabricación de productos como combustibles sintéticos o materiales de construcción. Aunque en algunos casos el CO₂ puede volver a liberarse a la atmósfera tras el uso, muchas aplicaciones de CCU permiten reducir, evitar o incluso remover CO₂, contribuyendo también a la mitigación.

Ambas tecnologías son reconocidas por organismos internacionales como el IPCC y la ONU como herramientas clave para la descarbonización de sectores difíciles de abatir y para alcanzar los objetivos de reducción de emisiones globales. No están clasificadas como medidas de adaptación (que buscan ajustarse a los impactos del cambio climático), sino como estrategias para evitar que el problema se agrave. Ambas tecnologías implican ventajas y desventajas:

Tabla 1.3: Ventajas y desventajas de las tecnologías CCS y CCU

	CCS	CCU
Pro	<p>Efectividad: Es la tecnología más eficaz actualmente para eliminar grandes volúmenes de CO₂ de emisiones industriales.</p> <p>Capacidad de almacenamiento: Formaciones geológicas en Norteamérica, por ejemplo, podrían almacenar emisiones equivalentes a 900 años de producción.</p> <p>Integración con bioenergía: Al aplicarse en plantas de biomasa, puede generar emisiones negativas.</p>	<p>Economía circular: Transforma el CO₂ en productos comerciales, como combustibles sintéticos (metanol) o materiales de construcción, generando ingresos.</p> <p>Neutralidad carbónica: Si el CO₂ se reutiliza en productos permanentes (ej. hormigón), se evita su liberación.</p> <p>Tecnologías innovadoras: Incluye métodos como la captura directa de aire (DAC) y la reducción electroquímica.</p>
Contra	<p>Costos elevados: Incrementa los costos energéticos entre 21% y 91%, dependiendo del tipo de planta.</p> <p>Riesgo de fugas: El almacenamiento a largo plazo en formaciones geológicas o océanos presenta incertidumbre y posibles fugas.</p> <p>Demanda energética: La captura y compresión de CO₂ requiere un 25-40% más de combustible en centrales de carbón.</p>	<p>Limitaciones de escala: Muchas aplicaciones aún son experimentales y no están listas para implementación masiva.</p> <p>Dependencia de mercados: La viabilidad económica depende de la demanda de productos derivados del CO₂.</p> <p>Energía requerida: Procesos como la síntesis de metano a partir de CO₂ e hidrógeno consumen grandes cantidades de energía.</p>

3.3.6 Escenarios del cambio climático

Hasta ahora hemos visto los diferentes impactos del cambio climático en los ámbitos ambientales y sociales y, de una forma general, las principales respuestas que la humanidad puede dar. No obstante, los actores económicos y políticos necesitan información específica para diseñar sus estrategias. Por ejemplo, una institución financiera enfocada en financiar actividades de agricultura querrá saber en qué medida la capacidad de pago de sus clientes se verá afectada por el incremento de la frecuencia e intensidad de lluvias y/o sequías. Un fondo de inversiones debe formarse una idea sobre sectores que pueden beneficiarse de las políticas aplicadas y cuales tendrán que cambiar su modelo de negocio (por ejemplo, el incremento de demanda por energía renovable vs. la industria carbonera). O, una compañía de seguros necesita una estimación del incremento de riesgos físicos a los cuales están expuestos activos asegurados (por ejemplo, edificios en zonas costeras) debido a eventos climáticos extremos. Las variables que influyen estas respuestas, como el grado del calentamiento global, el avance con la aplicación de medidas de mitigación y adaptación, regulaciones políticas y su impacto, la velocidad de transición hacia una economía sostenible etc., son múltiples, interconectados y cambiantes. Por lo tanto, el enfoque tradicional basado en datos (estadísticos) del pasado y su extrapolación hacia el futuro no produce respuestas razonables.

El instrumento que permite desarrollar una perspectiva más razonable es el uso de escenarios. Escenarios describen diferentes estatus del mundo en el futuro basado en supuestos sobre el posible desarrollo de ciertas variables que lo influyen. Por lo tanto, los escenarios no predicen el futuro de manera exacta y detallada, pero proveen un rango potencial de diferentes desarrollos, o, en otras palabras, “mundos alternativos”. Para cumplir con este objetivo, los escenarios deben ser plausibles, distintivos, consistentes, relevantes y diferenciarse de la situación actual.

Existen varios escenarios del cambio climático que varían en su metodología y enfoque. A continuación, introducimos uno de los escenarios más frecuentemente usado y referido en la literatura y la discusión política: el escenario del “Intergovernmental Panel on Climate Change” (IPCC, en español: Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático).

El escenario del “Intergovernmental Panel on Climate Change”

El “Intergovernmental Panel on Climate Change” (IPCC) es un organismo científico internacional de las Naciones Unidas. Fue establecido en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Su objetivo principal es proporcionar una evaluación objetiva y científica del cambio climático y sus impactos en el medio ambiente en la sociedad.

Los miles de científicos y expertos del IPCC no realizan nuevas investigaciones, sino revisan y sintetizan la evidencia científica más reciente sobre el cambio climático y sus causas, consecuencias y posibles soluciones. El panel publica informes periódicos conocidos como reportes de evaluación (“AR” por su nombre en inglés: “Assessment Reports”) que presentan un resumen del conocimiento científico actual del cambio climático, incluyendo proyecciones futuras (escenarios) y recomendaciones para la toma de decisiones a nivel político.

Por un lado, el impacto del cambio de climático depende del volumen de GEI en la atmósfera y el calentamiento resultante. Para estimar este efecto el IPCC usa diferentes “Trayectorias de la

Concentración Representativa” (RCP por sus siglas en inglés: “Representative Concentration Pathway”) que modelan la relación entre las emisiones de GEI y el incremento de radiación captada en la atmósfera en comparación con la época preindustrial (año de referencia: 1750). Sin embargo, los futuros escenarios dependen también de desarrollos socioeconómicos en el planeta, como, el crecimiento de la población, crecimiento económico, educación y desarrollos tecnológicos. El conjunto de estos factores está considerado en las “Trayectorias Socioeconómicas Compartidas” (SSP por sus siglas en inglés: “Shared Socioeconomic Pathway”).

En su último reporte de evaluación, el AR6, el IPCC parte de cinco diferentes Trayectorias Socioeconómicas Compartidas. Cada uno de los SSP 1-5 contiene múltiples parámetros técnicos y sociales que influyen el resultado del escenario. A continuación, resumimos la narrativa que forma parte de cada una de las diferentes SSPs:

Tabla 1.4: Las diferentes Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) del IPCC

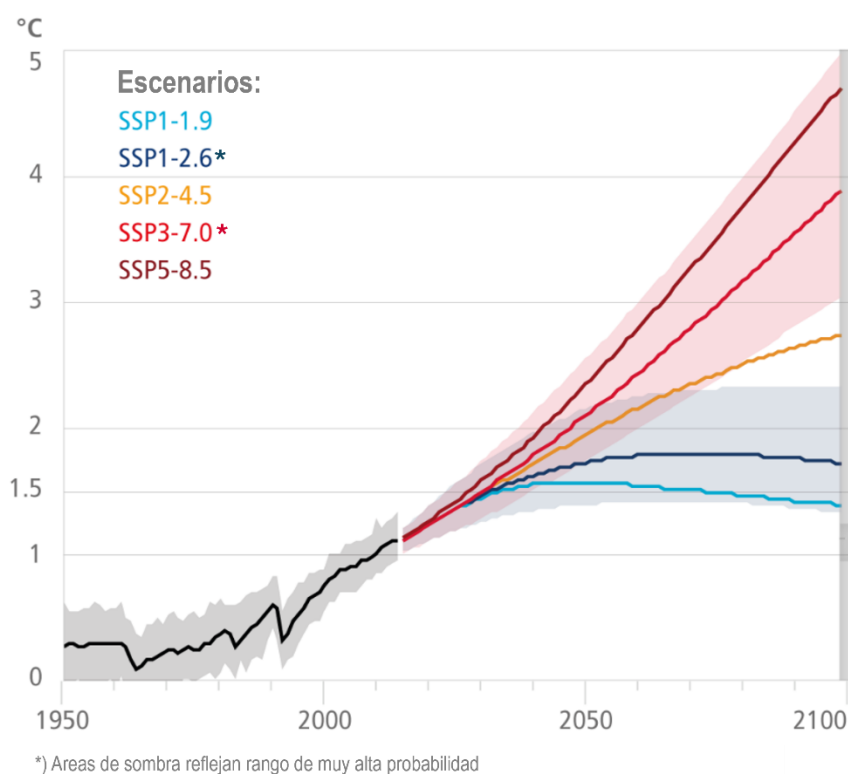
SSP 1	Sostenibilidad - Tomando el Camino Verde (Bajas dificultades para la mitigación y adaptación) Calentamiento global hasta 2100: 1.4°C (1.0°C – 1.8°C)
	<p>El mundo cambia gradual pero ampliamente hacia un camino más sostenible, enfatizando un desarrollo más inclusivo que respeta los límites ambientales percibidos. La gestión de los bienes comunes globales mejora lentamente, las inversiones en educación y salud aceleran la transición demográfica, y el énfasis en el crecimiento económico se desplaza hacia un enfoque más amplio en el bienestar humano. Impulsado por un compromiso creciente de alcanzar los objetivos de desarrollo, la desigualdad se reduce tanto entre países como dentro de ellos. El consumo se orienta hacia un crecimiento material bajo y una menor intensidad de recursos y energía.</p>
SSP 2	Camino Intermedio (Desafíos moderados para la mitigación y adaptación) Calentamiento global hasta 2100: 1.8°C (1.3°C – 2.4°C)
	<p>El mundo sigue un camino en el que las tendencias sociales, económicas y tecnológicas no cambian marcadamente de los patrones históricos. El desarrollo y el crecimiento económico avanzan de manera dispareja, con algunos países progresando relativamente bien, mientras que otros no cumplen con las expectativas. Las instituciones globales y nacionales trabajan para lograr los objetivos de desarrollo sostenible, pero progresan lentamente. Los sistemas ambientales experimentan degradación, aunque también hay algunas mejoras y, en general, la intensidad del uso de recursos y energía disminuye. El crecimiento poblacional global es moderado y se estabiliza en la segunda mitad del siglo. La brecha de ingresos persiste o mejora solo lentamente y persisten los desafíos para reducir la vulnerabilidad a cambios sociales y ambientales.</p>
SSP 3	Rivalidad Regional Calentamiento global hasta 2100: 2.7°C (2.1°C – 3.5°C)
	<p>Un Camino Difícil (Altos desafíos para la mitigación y adaptación) Un resurgimiento del nacionalismo, preocupaciones sobre competitividad y seguridad, y conflictos regionales</p>

	<p>llevan a los países a enfocarse cada vez más en cuestiones nacionales o, como máximo, regionales. Con el tiempo, las políticas se orientan cada vez más hacia cuestiones de seguridad nacional y regional. Los países se centran en lograr objetivos de seguridad energética y alimentaria dentro de sus propias regiones a expensas de un desarrollo más amplio. Las inversiones en educación y desarrollo tecnológico disminuyen. El desarrollo económico es lento, el consumo implica el desgaste de muchos materiales y las desigualdades persisten o empeoran con el tiempo. El crecimiento poblacional es bajo en los países industrializados y alto en los países en desarrollo. La baja prioridad internacional para abordar las preocupaciones ambientales conduce a una fuerte degradación ambiental en algunas regiones.</p>
SSP 4	<p>Desigualdad Calentamiento global hasta 2100: 3.6°C (2.8°C – 4.6°C)</p> <p>Un Camino Dividido (Bajas dificultades para la mitigación, altos desafíos para la adaptación) Inversiones altamente desiguales en capital humano, combinadas con disparidades crecientes en oportunidades económicas y poder político, conducen a crecientes desigualdades y estratificación tanto entre países como dentro de ellos. Con el tiempo, se ensancha la brecha entre una sociedad conectada internacionalmente que contribuye a sectores de la economía global con altos niveles de conocimiento y capital, y una colección fragmentada de sociedades de bajos ingresos y menores niveles de educación que trabajan en una economía laboral intensiva y baja en tecnología. La cohesión social se degrada y los conflictos y disturbios se vuelven cada vez más comunes. El desarrollo tecnológico es alto en la economía de alta tecnología y en sectores. El sector energético globalmente conectado se diversifica, con inversiones tanto en combustibles intensivos en carbono como el carbón y el petróleo no convencional, como en fuentes de energía baja en carbono. Las políticas ambientales se centran en problemas locales en áreas de ingresos medios y altos.</p>
SSP 5	<p>Desarrollo basado en Combustibles Fósiles Calentamiento global hasta 2100: 4.4°C (3.3°C – 5.7°C)</p> <p>Tomando la Autopista (Altos desafíos para la mitigación, bajas dificultades para la adaptación) Este mundo deposita una fe creciente en mercados competitivos, innovación y sociedades participativas para producir un progreso tecnológico rápido y el desarrollo del capital humano como el camino hacia el desarrollo sostenible. Los mercados globales están cada vez más integrados. También hay fuertes inversiones en salud, educación e instituciones para mejorar el capital humano y social. Al mismo tiempo, el impulso para el desarrollo económico y social se combina con la explotación de abundantes recursos de combustibles fósiles y la adopción de estilos de vida que requieren muchos recursos y energía en todo el mundo. Todos estos factores conducen a un crecimiento rápido de la economía mundial. Los problemas ambientales locales, como la contaminación del aire, se gestionan con éxito. Se confía en la capacidad para gestionar efectivamente los sistemas sociales y ecológicos, incluyendo la geoingeniería si es necesario.</p>

Fuente: (Riahi et al., 2017)

Cada una de las narrativas está asociada con un potencial cambio de la temperatura. Dado que los escenarios – por definición – no “predicen” un valor exacto, se expresa este cambio en un rango y un valor promedio esperado. Según el IPCC, todavía es posible limitar el calentamiento global hasta el fin del siglo a un rango entre 1.0°C – 1.8°C con un valor promedio esperado de 1.4°C. No obstante, este escenario parte de un cambio gradual, pero a la vez consecuente hacia una economía sostenible. Al otro extremo de los escenarios se visualiza lo que puede suceder si esencialmente se continua con la trayectoria actual (fuertes inversiones y uso de dinámicas del mercado, pero a la vez, continuación con el “modelo fósil” para la economía y la sociedad): en este caso se proyecta un calentamiento global de 3.3°C – 5.7°C con un valor promedio esperado de 4.4°C. La figura siguiente ilustra los resultados más importantes de los escenarios. Mientras que las líneas consecutivas representan el desarrollo esperado del valor promedio en cada uno de los escenarios hasta 2100, las áreas reflejan el rango de los escenarios SSP 1 (azul) y SSP 3 (rosado).

Gráfico 1.10: Cambio de la temperatura de la superficie: incremento relativo al período del 1850 - 1900 en función a los diferentes escenarios



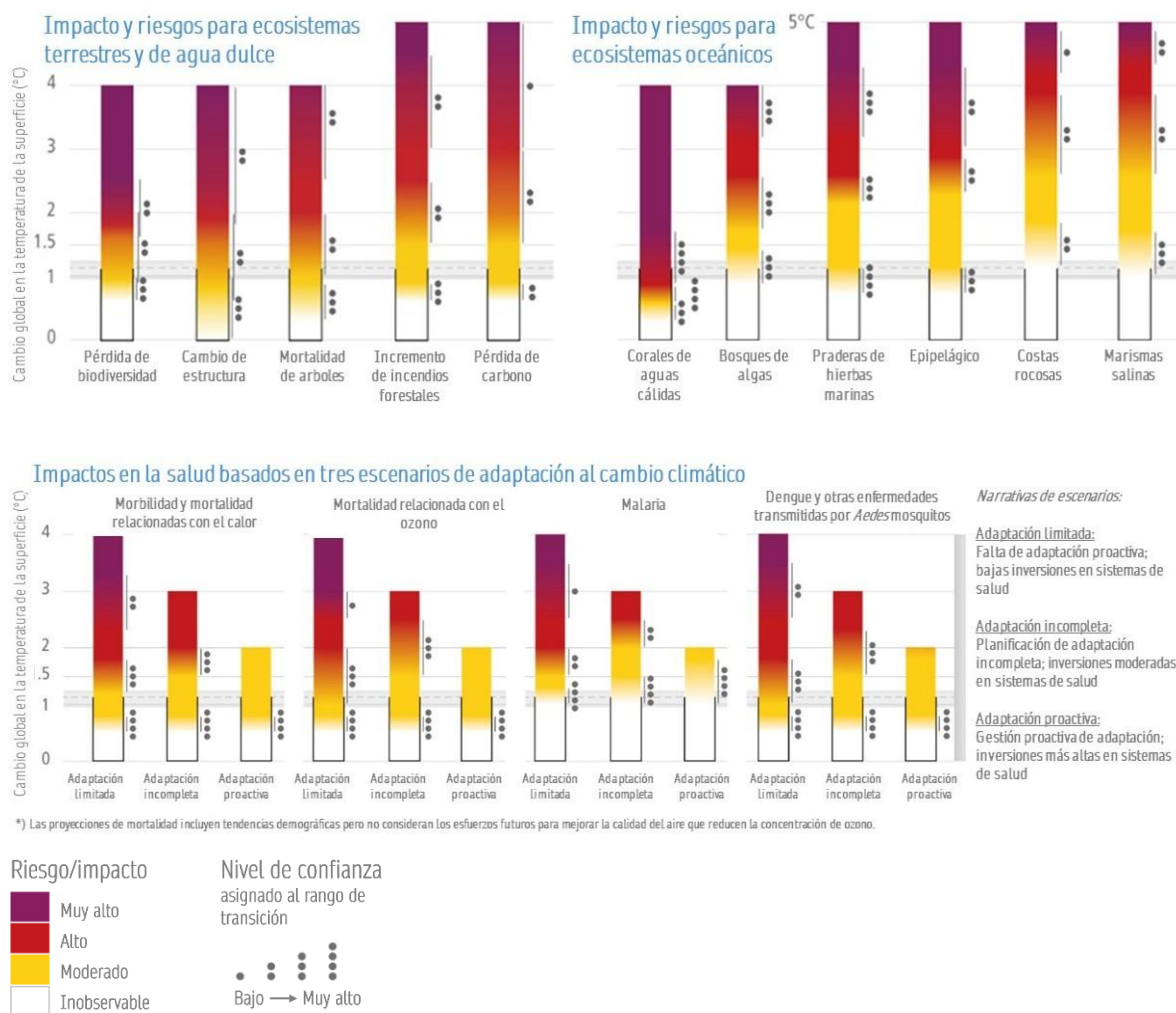
Fuente: (IPCC, 2021a)

El impacto de los diferentes escenarios

El impacto del cambio climático ya ha sido comentado de forma general. El escenario del IPCC provee un panorama más diferenciado, y distingue entre los impactos basados en diferentes niveles

de calentamiento. A nivel de ejemplo, el siguiente gráfico muestra el nivel de riesgo para diferentes ecosistemas terrestres, de agua dulce y de los océanos en función del calentamiento. En la segunda parte del gráfico se presentan los riesgos para la salud, basado en el nivel de calentamiento y tres diferentes escenarios de adaptación.

Gráfico 1.11: Impacto del cambio climático en ecosistemas seleccionados y en el sector de salud



Fuente: (IPCC, 2022a)

Riesgos e impactos claves para América Central y América del Sur

Pocos estudios en la literatura se enfocan en riesgos graves en la región de Latinoamérica, y escasos estudios consideran específica y explícitamente los impulsores del riesgo en la región, como el nivel de calentamiento, el nivel de exposición, la vulnerabilidad y la adaptación. No obstante, el AR6 proyecta posibles desarrollos y escenarios a nivel regional. A continuación, presentamos los riesgos e impactos más significativos identificados para América Central y América del Sur.

Tabla 1.5: Riesgos e impactos claves del cambio climático para América Central y América del Sur

Riesgo	Consecuencia que haría el riesgo grave	Cambios asociados en peligros
Riesgo de inseguridad alimentaria debido a sequías frecuentes/extremas	Decremento sustancial en el rendimiento de cultivos clave, interrupción de las cadenas de suministro de alimentos, capacidad reducida o producción de bienes reducida, disminución de la seguridad alimentaria y aumento de la desnutrición.	Períodos de sequía más frecuentes y/o prolongados; disminución en las precipitaciones anuales, disminución severa de las lluvias al inicio de la temporada de lluvias; desertificación de regiones semiáridas.
Riesgo para la vida y la infraestructura debido a inundaciones y deslizamientos de tierra	Muerte y efectos graves en la salud, interrupción de infraestructuras críticas y sistemas de servicios.	Tormentas más frecuentes y severas y eventos de precipitación intensa; cambios en las condiciones de nieve y deshielo del permafrost; retroceso de los glaciares, formación de lagos glaciares, aumento del riesgo de inundaciones glaciares (GLOF).
Riesgo de inseguridad hídrica	Cambio y disminución estacional de la disponibilidad de agua debido a la reducción de glaciares, cambio en la cobertura de nieve, períodos secos más pronunciados y una gestión deficiente o fallida del agua y la gobernanza.	Reducción de los glaciares, cambio en la cobertura de nieve, períodos secos más pronunciados, cambios en la precipitación y la circulación.
Riesgo de efectos graves en la salud debido al aumento de epidemias (en particular, enfermedades transmitidas por vectores)	Aumento de la tasa de epidemias de enfermedades transmitidas por vectores (malaria, dengue, Zika, leishmaniasis) junto con enfermedades diarreicas. Efectos graves en la salud y daño a los sistemas de salud en países con baja capacidad de adaptación y donde la endemidad original es alta y el estado de control es deficiente.	El aumento de las temperaturas amplía el rango geográfico de los vectores, lo que lleva a la expansión de áreas climáticamente adecuadas.

Riesgos sistémicos de superar las capacidades de infraestructura y sistemas de servicios públicos	Colapso de sistemas de servicios públicos, incluyendo infraestructuras y servicios de salud, debido a impactos en cascada de desastres naturales y epidemias, afectando a una gran parte de la población.	Mayor frecuencia y magnitud de eventos relacionados con el clima (tormentas, inundaciones, deslizamientos), junto con un aumento en la distribución espacial y temporal de patógenos/vectores para la malaria, el dengue, el Zika y la leishmaniasis.
Riesgo de cambios a gran escala y desplazamientos de biomas en la Amazonía	Transición de bosques tropicales a otros biomas como bosques estacionales o sabanas debido a la degradación y deforestación del bosque; riesgo de pasar de sumidero de carbono a fuente.	Períodos de sequía más frecuentes, intensos y persistentes; aumento de la temperatura y reducción en las precipitaciones anuales.
Riesgo para los ecosistemas de arrecifes de coral debido al blanqueo de coral	Degradación y posible muerte de arrecifes de coral mesoamericanos, el segundo arrecife más grande del mundo; daño grave al hábitat de especies marinas, degradación de la protección costera y otros servicios ecosistémicos, disminución de la seguridad alimentaria de la pesca, falta de ingresos por turismo.	Aumento de la temperatura superficial del océano, disminución del pH del agua de mar y niveles de carbonato debido al aumento de los niveles de CO ₂ atmosférico, lo que conduce a la acidificación del océano y al blanqueamiento de los corales.
Riesgos para los sistemas socioecológicos costeros debido al aumento del nivel del mar, marejadas y erosión costera	Inundaciones y erosión costeras causando daños graves a la población e infraestructuras costeras; pérdida de pesquerías, degradación de arrecifes y disminución de la protección costera debido al aumento de marejadas y olas; intrusión de agua salada y subsidencia del terreno.	Trayectorias continuas de aumento del nivel del mar; inundaciones costeras más intensas y persistentes, intrusión de agua salada, erosión costera.

Fuente: (IPCC, 2022a)

Presupuestos de carbono: ¿Cuánto dióxido de carbono todavía podemos emitir?

Para limitar el calentamiento global y mitigar los efectos del cambio climático es importante reducir el nivel de las emisiones de GEI. ¿Pero cuantos tCO₂ podemos todavía emitir y hasta que nivel tenemos que reducir las emisiones y en cuánto tiempo? En este contexto es útil usar el concepto de los presupuestos de carbono. Un presupuesto de carbono define el volumen de GEI que la humanidad todavía puede emitir para mantener el calentamiento global bajo cierto nivel. No obstante, como es parte de la lógica de un escenario, no existen valores absolutos exactos para estos límites. En lugar de esto, se puede asociar ciertos volúmenes de emisiones con probabilidades de llegar a ciertos niveles de calentamiento. La siguiente tabla ilustra esto contexto, y describe el presupuesto de carbono remanente hasta llegar a una economía cero neto, manteniendo el incremento de la temperatura global por debajo de 1.5°C, 1.7°C, y 2.0°C, respectivamente.

Tabla 1.6: Estimaciones del presupuesto de emisiones de CO₂ dependiendo del escenario del cambio climático¹

Límite de calentamiento global desde la línea base 1850-1900:	Incremento del calentamiento global desde la línea base 2010-2019 para llegar al límite:	Volumen de emisiones de CO ₂ remanente para limitar el calentamiento global al límite establecido en GtCO ₂ (con las siguientes probabilidades)				
		17%	33%	50%	67%	83%
1.5°C	0.43°C	900	650	500	400	300
1.7°C	0.63°C	1.450	1.050	850	700	550
2.0°C	0.93°C	2.300	1.700	1.350	1.150	900

¹⁾ Basado en un calentamiento global de 1.07°C desde 1850-90 hasta 2010-2019 y emisiones acumuladas de 2.390 GtCO₂ entre 1850 y 2019; ejemplo como leer el cuadro: “Para limitar el calentamiento global desde 1850-1900 a 1.7°C quedan todavía 0.63°C; para lograr este objetivo con una probabilidad de 67% se puede todavía emitir un volumen de 700 GtCO₂ a partir de 2020.”

Fuente: (IPCC, 2021a)

De los datos de la tabla se puede deducir que para limitar el calentamiento a 1.5°C con una probabilidad de 50%, la humanidad todavía puede emitir 500 GtCO₂e, y para lograr el mismo objetivo con una probabilidad de 67% el presupuesto se reduce a 400 GtCO₂e. Además, los datos evidencian la diferencia en el esfuerzo requerido para limitar el calentamiento global a 1.5°C comparado con 2.0°C: para mantenerlo con una probabilidad de 67% en el nivel más bajo se permiten solamente 400 GtCO₂e versus 1,150 GtCO₂e de emisiones adicionales para mantenerlo en el nivel de 2°C.

3.3.7 Trayectorias de transformación

La mayoría de los escenarios del cambio climático concluye que se deben reducir drásticamente las emisiones de GEI y lograr emisiones “netas cero” hasta el año 2050 para mantener el calentamiento global hasta 2100 bajo 1.5°C. “Cero neto” describe un concepto donde los GEI emitidos adicionalmente no superan los GEI removidos de la atmósfera en el mismo tiempo. La realidad actual se encuentra lejos de este objetivo: según la IEA (2023; “International Energy Agency”, en español: “Agencia Internacional de Energía”) se emitieron 36 GtCO₂e a nivel global en el 2022. Este volumen corresponde a un incremento anual de 321 MtCO₂e o de 0.9%, respectivamente. La IEA estima que aproximadamente, el 75% de las actuales emisiones de GEI están relacionadas con el sector de energía, lo que enfatiza la importancia lograr una transformación completa en la forma como producimos, transportamos y consumimos energía.

La trayectoria hacia “cero neto” en el escenario de la Agencia Internacional de Energía

En su reporte “Net Zero by 2050” la IEA (2021) presenta de manera extensa una trayectoria que describe la transición hacia una economía “cero neto”. La trayectoria descrita por la IEA enfoca las condiciones requeridas para llegar a un sector global de energía que logra “cero neto” en 2050. En este contexto la IEA asume que la economía global crece en 40% hasta 2030 con un uso de energía reducida en 7%. Para el 2050 se asume, a nivel global, una economía dos veces más grandes que hoy y una población crecida en 2 mil millones adicionales. No obstante, en la trayectoria de la IEA la demanda global de energía se reduce en el 8% (comparado con la actualidad).

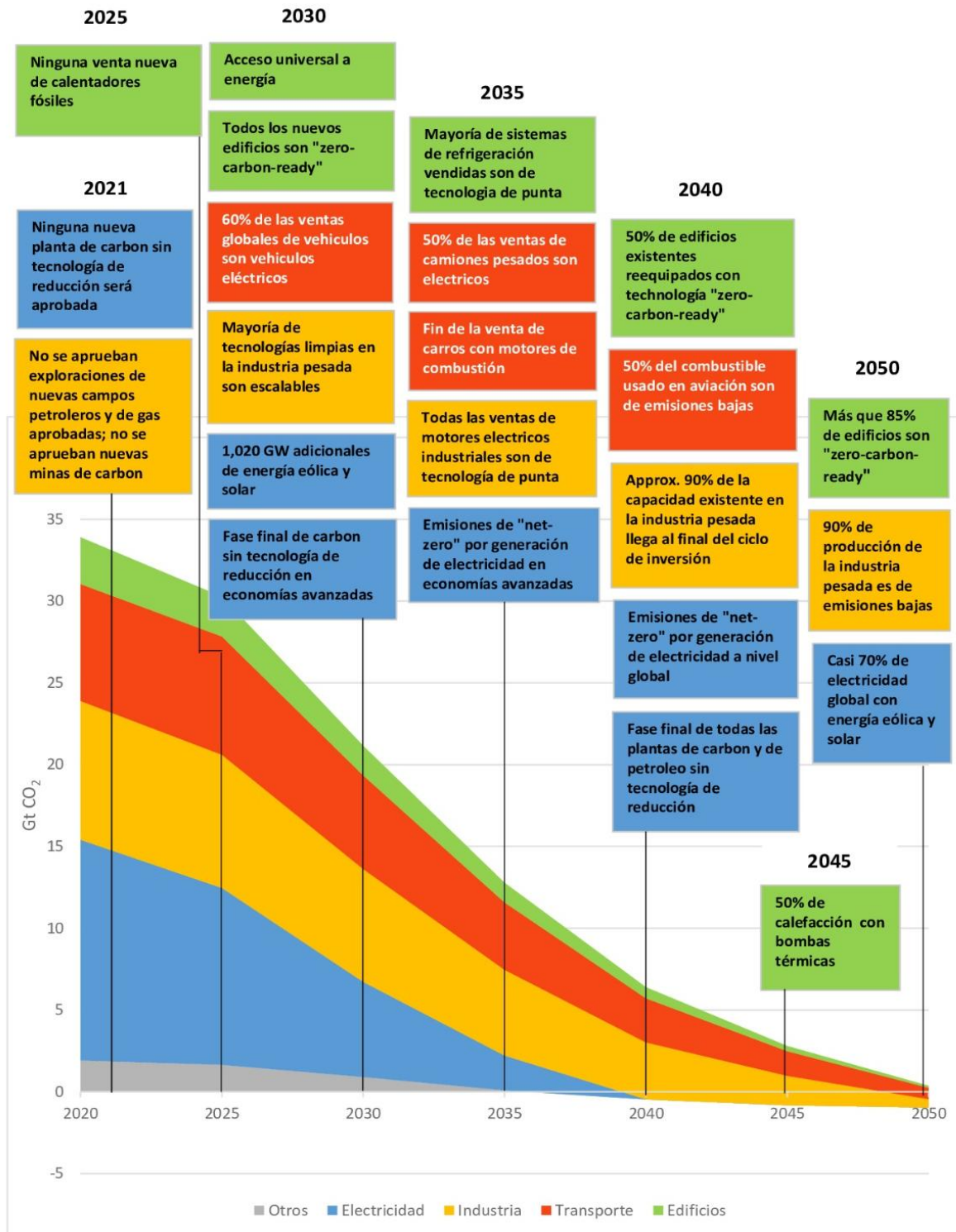
Se pretende lograr este objetivo con un incremento de eficiencia energética como parte esencial del proceso. Esto requiere innovaciones tecnológicas como el avance en baterías, electrolizadores de hidrógeno, así como en la técnica de capturar y guardar dióxido de carbón (“CCS” por sus siglas en inglés: “Carbon Capture and Storage”). Asimismo, se prevé un crecimiento del uso de fuentes de energía renovable (solar, energía eólica, hidroeléctrica, geotérmica, bioenergética) que en el escenario planteado deberían llegar a dos tercios de la demanda total en 2050. Esto implica un incremento por 20 veces de la capacidad de energía fotovoltaica y de 11 veces de la energía eólica. Logrando estos avances, ya no se requiere el acceso a fuentes de energía fósil adicionales; el uso de energía fósil caería a 20% del total de la energía consumida (comparado con 80% hoy), y se limitaría su uso a sectores donde es más complejo (hasta imposible) aplicar tecnologías de bajas emisiones.

La IEA parte de la premisa que la reducción de emisiones no se puede lograr con la misma velocidad en todos los sectores de la economía. En el sector de electricidad y calefacción, por ejemplo, se puede reemplazar energía fósil por energía renovable, usando tecnologías existentes (paneles solares, por ejemplo) que son eficientes y accesibles a costos relativamente bajos. Por lo tanto, la transición a “cero neto” en este sector se puede (y se debe) realizar más rápidamente que la transición en el sector industrial donde se requiere la construcción de una nueva infraestructura, como, por ejemplo, plantas de fabricación basadas en el uso de hidrógeno y de tecnologías de CCS. Por lo tanto, en la trayectoria de la IEA, la reducción de emisiones y la transición hacia “cero neto” se realizará con diferentes velocidades según el principio de eficiencia de costos: dónde es menos costoso realizar los cambios necesarios, se espera una mayor velocidad de reducción y, dónde el proceso es más costoso se prevé un cambio más lento.

El gráfico presentado a continuación, muestra – de manera consolidada – para cada uno de los sectores principales (edificios, transporte, industria, electricidad y calefacción) su trayectoria hacia “cero neto” hasta 2050. Como se puede observar, existe un remanente de emisiones que en el escenario no puede ser reducido, dado que vienen de procesos donde no es posible evitar emisiones de GEI por razones tecnológicas. Un ejemplo de esto es la producción de cemento que requiere la creación de clinker que se forma tras calcinar caliza y arcilla en procesos químicos de altas temperaturas. Este proceso inevitablemente causa emisiones, y dado que cemento es un material indispensable solo existe la solución (cara) de capturar y guardarlas. Los volúmenes correspondientes a este proceso CCS están reflejados por debajo de eje “X” en el gráfico.

El gráfico también presenta los hitos claves que en los distintos sectores se deben lograr para estar alineados con la trayectoria proyectada hasta 2050. Entre otros, caben mencionar, el incremento de la venta de vehículos eléctricos a 60% del total de las ventas y el impedimento de la venta de vehículos nuevos con motores de combustión. Tecnologías limpias en la industria serán escalable y más que el 90% de la producción industrial se realiza con tecnologías con bajas emisiones. El 85% de los edificios estarán en las condiciones para emitir cero carbón (“zero-carbon-ready”) y el 70% de la generación de energía eléctrica se basa en energía renovable.

Los ejemplos muestran que los retos a superar para llegar a una transición exitosa a una economía “cero neto” son enormes. Según la IEA, el número de países comprometidos a llegar a “cero neto” ha incrementado y cubre aproximadamente el 70% de las emisiones de CO₂. No obstante, la IEA también observa que, en la mayoría de los casos, todavía no existen políticas y medidas de corto plazo para avanzar en este camino. Y aún si se lograra cumplir los compromisos actuales, la humanidad todavía emitiría 22 GtCO₂ por encima de los límites requeridos llegando a un incremento de la temperatura global de aproximadamente 2.1°C hasta 2100.

Gráfico 1.12: Trayectoria a “cero neto” de la IEA y los hitos claves hasta 2050

Fuente: (IEA, 2021)