



CAMBIO CLIMÁTICO: UNA HIPÓTESIS DE REDUCCIÓN DE TEMPERATURA. CÓMO VENTILAR EL "INVERNADERO"

Manuel LAGARÓN COMBA
Tribunal de Cuentas de España
manuel.lagaron@gmail.com

Recibido: 4 de enero del 2023

Enviado a evaluar: 16 de enero del 2023

Aceptado: 22 de junio del 2023

RESUMEN

Desde hace décadas vivimos un periodo de calentamiento global que es consecuencia directa de una intensificación del efecto invernadero. En la actualidad, la dificultad que supone el hecho de que toda la humanidad alcance el objetivo de reducir sistemáticamente su emisión de gases de efecto invernadero (GEI) es tan gigantesca que quizá sea conveniente explorar otras alternativas. A nosotros, como meros observadores, pero que somos parte interesada en ello como ciudadanos, nos parece razonable sugerir que la ciencia cambie el punto de mira y oriente su actuación en altura, en la troposfera media, de modo que sea posible eliminar el CO₂ antiguo allí situado desde hace más de un siglo utilizando para ello técnicas que en superficie se han mostrado eficaces; ventilando así el invernadero en el que la humanidad se ha visto protegida desde el comienzo de los tiempos.

Palabras clave: Cambio climático, temperatura, CO₂, Gases de Efecto Invernadero.

CLIMATE CHANGE: A TEMPERATURE REDUCTION HYPOTHESIS.
HOW TO VENTILATE THE "GREENHOUSE"

ABSTRACT

For decades we have been living through a period of global warming that is a direct consequence of an intensification of the greenhouse effect. At present, the difficulty of achieving the goal of systematically reducing its greenhouse gas (GHG) emissions for all humanity is so enormous that it may be worth exploring other alternatives. To us, as mere observers, but who are an interested party in it as citizens, it seems reasonable to suggest that science change the point of view and direct its action at altitude, in the middle troposphere, so that it is possible to eliminate old CO₂ located there for more than a century using techniques that have

proven effective on the surface; thus ventilating the greenhouse in which humanity has been protected since the beginning of time.

Keywords: Climate change, temperature, CO₂, Greenhouse Gases.

CHANGEMENT CLIMATIQUE: UNE HYPOTHÈSE DE RÉDUCTION DE LA TEMPÉRATURE. COMMENT VENTILER LA «SERRE»

RÉSUMÉ

Depuis des décennies, nous vivons une période de réchauffement climatique, conséquence directe d'une intensification de l'effet de serre. À l'heure actuelle, la difficulté d'atteindre l'objectif de réduction systématique de ses émissions de gaz à effet de serre (GES) pour l'ensemble de l'humanité est tellement énorme qu'il peut être intéressant d'explorer d'autres alternatives. A nous, simples observateurs, mais qui y sommes intéressés en tant que citoyens, il semble raisonnable de suggérer à la science de changer de point de vue et d'orienter son action en altitude, dans la moyenne troposphère, pour qu'il soit possible d'éliminer les anciens CO₂ qui s'y trouve depuis plus d'un siècle grâce à des techniques qui ont fait leurs preuves en surface; aérant ainsi la serre dans laquelle l'humanité a été protégée depuis la nuit des temps.

Mots-clés: Changement climatique, température, CO₂, Gaz à Effet de serre.

1. INTRODUCCIÓN

La ciencia se refiere al **cambio climático** como la alteración en el estado del clima identificable en la variabilidad de sus propiedades y que persiste durante largos periodos de tiempo¹.

Desde hace décadas vivimos un periodo de calentamiento global que es consecuencia directa de una intensificación del **efecto invernadero**, el cual se produce tanto por causas naturales como antropogénicas. Nuestro planeta dispone de una atmósfera envolvente con una composición y características que lo hacen único en el sistema solar del que formamos parte. Ésta nos protege, no sólo de las radiaciones electromagnéticas procedentes del Sol, meteoritos y desechos espaciales; sino que, gracias a dicho efecto invernadero, consigue mantener una temperatura media en la superficie que la hace compatible con la formación de agua y con el desarrollo vital de todas y cada una de las especies de fauna y flora que la habitan; la propia especie humana entre ellas.

En términos medioambientales, con la llegada de la Revolución Industrial, el género humano, como especie dominante que poblaba la Tierra, aprendió a desplegar su capacidad contaminadora mediante el uso de combustibles fósiles necesarios para su desarrollo. Hasta entonces, el planeta disponía de un sistema autónomo y equilibrado para calentar la atmósfera de modo que fuera habitable por los distintos ecosistemas establecidos. Los seres humanos, con el uso indiscriminado de los combustibles fósiles, no hemos

¹ IPCC, 2013: Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de Trabajo al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. "Cambio climático".

hecho otra cosa que romper ese equilibrio y aumentar la temperatura al punto de que puede llegar un momento en el que sólo las especies adaptables puedan sobrevivir.

En la actualidad, la dificultad que supone el hecho de que toda la humanidad alcance el objetivo de reducir sistemáticamente su emisión de gases de efecto invernadero (GEI) es tan gigantesca que quizá sea conveniente explorar otras alternativas. Es más, aunque se consiguiera tal objetivo, lo que hoy por hoy no parece probable, el cambio climático seguiría actuando durante décadas de modo que al menos toda una generación de seres humanos estaría gravemente afectada por una práctica de la que no sería en absoluto responsable.

Por tanto, nos surge la pregunta: ¿para mitigar el cambio climático, puede haber otras opciones además de la reducción de emisiones? Aunque es difícil responderla, al menos sí cabe teorizar sobre ello.

2. LA ATMÓSFERA: ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN

La masa gaseosa que envuelve la Tierra está dividida en capas concéntricas denominadas: troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera (ionosfera) y exosfera; a partir de ahí, el espacio exterior (Figura 1). Convencionalmente se considera que su límite superior está a 1.000 km de altitud², si bien la Norma ISO 14222:2022 la estima en 600 km, sin incluir la exosfera, cuya altitud no ha sido estandarizada internacionalmente³.

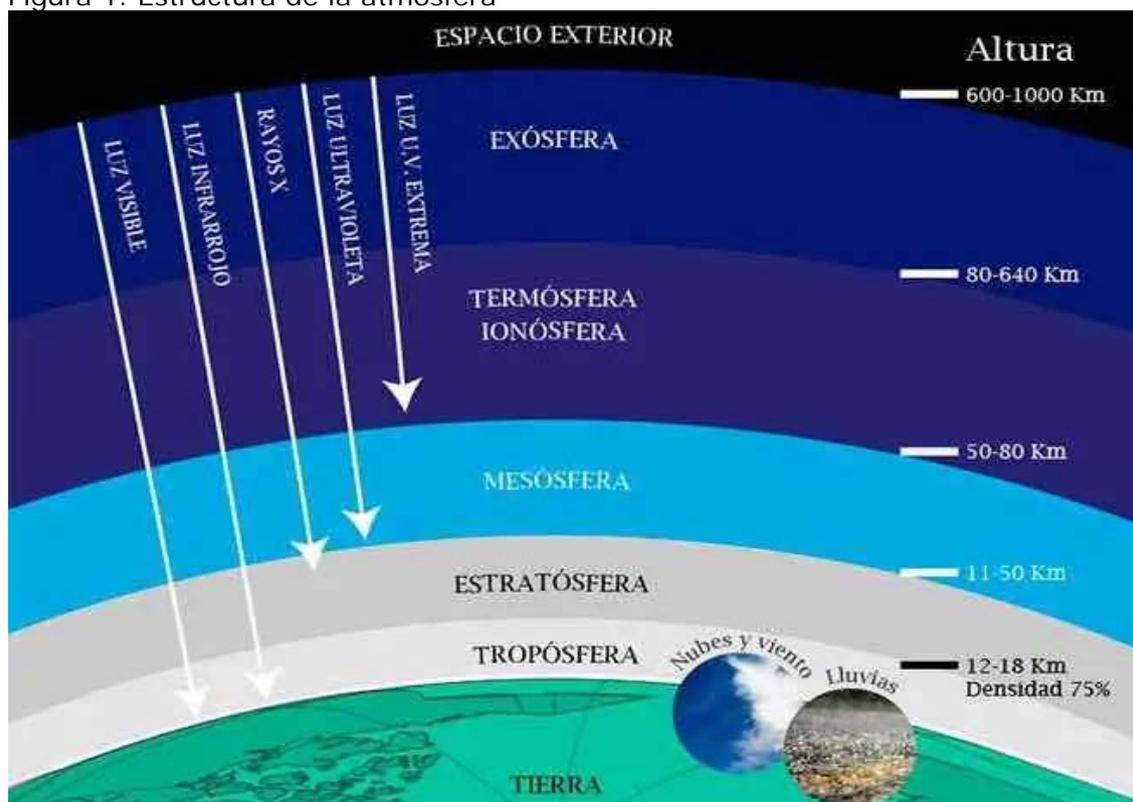
Cada una de esas capas está compuesta por gases que reaccionan de distinta manera frente a la radiación solar, haciendo que la temperatura de cada una difiera en gran medida de las que tiene sobre y bajo ella. Obviamente, al tratarse de gases, tales capas ni son estancas ni tienen unos límites definidos, sino que en parte se entremezclan con las más próximas.

Abundando en ello, la **troposfera** es la capa en la que se desarrolla la vida, tal y como la conocemos, y donde tienen lugar los fenómenos meteorológicos que configuran su temperatura. En ella se concentra más del 75 % del aire atmosférico y su espesor supera los 10 km de altitud media (18 km medidos desde la línea del ecuador). En ella también se registran temperaturas que, aunque pueden llegar a -60 °C en la zona más alta, la media aproximada al nivel del mar es de 15 °C; lo que permite que se desarrolle la vida vegetal y animal y, de forma muy especial y determinante, el ciclo del agua.

² Diccionario ilustrado de meteorología. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Gobierno de España. "Atmósfera". Disponible en: https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/675_atmosfera

³ ISO 14222:2022(en): *Space environment (natural and artificial) — Earth's atmosphere from ground level upward*

Figura 1. Estructura de la atmósfera



Fuente: El Blog Verde (2022).

Los gases más abundantes son Nitrógeno (N_2) 78 % y Oxígeno (O_2) 21 %; y en menor medida el vapor de agua (H_2O), Argón (Ar) y Dióxido de Carbono (CO_2), con apenas un 1 % los tres juntos⁴.

La **estratosfera** alcanza una altitud desde el ecuador de más de 50 km, lo que supone un espesor medio aproximado de 40 km. Representa el 24 % de la masa total atmosférica, estando compuesta fundamentalmente de Ozono (O_3) y en menores proporciones metano (CH_4) y CO_2 , éste último en la baja estratosfera. La temperatura media en las primeras subcapas es de -60 °C, ascendiendo notablemente hasta los 0 °C en las más altas.

Dentro de la estratosfera se extiende la **ozonósfera**, en la cual el porcentaje de O_3 es relativamente elevado, reuniendo el 90 % de este gas presente en toda la atmósfera. Su concentración máxima se encuentra aproximadamente entre los 20 y 25 km y absorbe entre el 97 y el 99 % de la radiación ultravioleta (UV) de alta frecuencia procedente del Sol, que es muy dañina para los seres humanos⁵.

Este gas protege eficazmente la superficie terrestre de dicha radiación, siendo un elemento fundamental para la vida. Paradójicamente, la capa de

⁴ IPCC, 2013: Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de Trabajo al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. "Atmósfera".

⁵ Meteoglosario visual. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Gobierno de España

ozono es la causante de que la temperatura en la alta estratosfera sea mucho más elevada que en la alta troposfera.

La **mesosfera** llega hasta los 80 km de altitud, siendo su espesor aproximado de 30 km. En esta capa, al igual que en la troposfera, también la temperatura va disminuyendo a medida que aumenta la altitud, hasta llegar a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. La mesosfera es la tercera capa y la más fría de la atmósfera, y contiene subcapas superiores que concentran vapor de sodio. La mesosfera tan solo contiene el 0,1 % de la masa total del aire, siendo importante por la ionización y las reacciones químicas que se producen en su interior. En ella se desintegran los meteoritos que se dirigen a la tierra provocando destellos de luz llamados estrellas fugaces.

La **termosfera** (ionosfera) es la capa que se encuentra entre 80 y 600 km de altitud. Se configura en subcapas formadas por átomos cargados eléctricamente llamados iones. Al ser una capa conductora de electricidad, favorece las transmisiones de radio y televisión por su propiedad de reflejar las ondas electromagnéticas. Los gases predominantes son N_2 y O_2 , mientras que la temperatura pasa de $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta llegar a $1.500\text{ }^{\circ}\text{C}$ en su límite superior.

La **exosfera**. Allí los gases poco a poco se dispersan hasta que la composición es similar a la del espacio exterior. Es la última capa de la atmósfera y se localiza por encima de la termosfera, aproximadamente a 600 km, y se extiende hasta una altitud indeterminada en contacto ya con el espacio exterior, donde existe prácticamente el vacío.

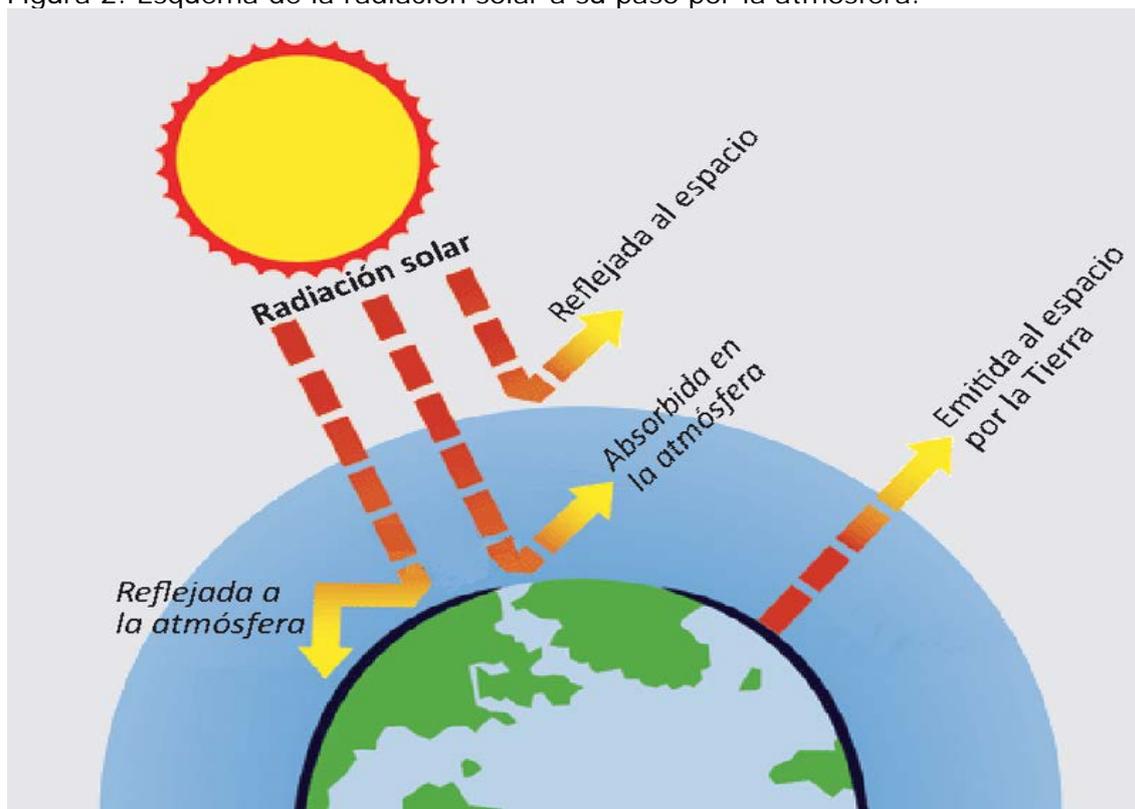
La temperatura en la exosfera varía enormemente, ya que puede oscilar entre 0 y $1.700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las temperaturas descienden por la noche y aumentan durante el día debido a la exposición solar. Los principales gases de la exosfera son los más ligeros, como H_2 y Helio (He).

3. LA RADIACIÓN SOLAR

Es la energía liberada por el Sol en forma de radiaciones electromagnéticas, las cuales, una vez que penetran en la atmósfera terrestre generan procesos físicos esenciales para la vida en el planeta (Figura 2).

La complejidad de la composición atmosférica proviene de las diversas reacciones que los gases integrantes de sus distintas capas generan por su interacción con la radiación solar a lo largo de su recorrido, la cual se manifiesta en forma de ondas de radio, microondas, radiación infrarroja, luz visible, radiación ultra- violeta, rayos X y rayos gamma. Al contrario que el sonido, no necesitan de un medio material para propagarse ya que se pueden difundir en el vacío.

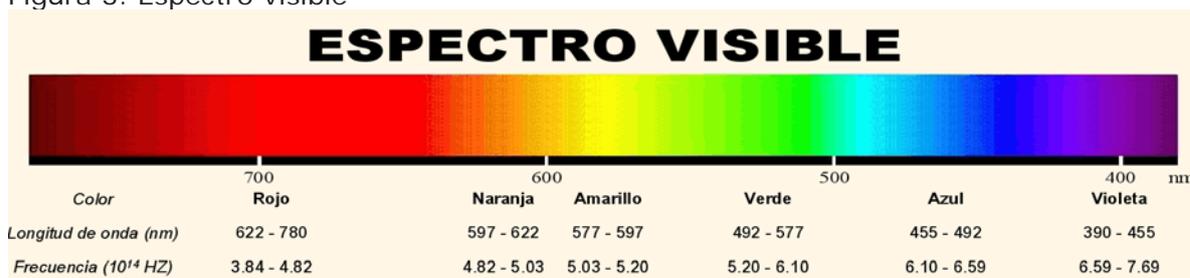
Figura 2. Esquema de la radiación solar a su paso por la atmósfera.



Fuente: Helioesfera (2022).

La radiación solar se distribuye desde el infrarrojo hasta el ultravioleta, tal y como se muestra en la imagen a continuación (Figura 3).

Figura 3. Espectro visible



Fuente: Esquema.net

Del espectro electromagnético, interesa señalar:

La **radiación infrarroja**, en esta región del espectro electromagnético, justo por debajo (infra) del rojo del espectro visible, se suele conocer como radiación térmica porque transmite este tipo de energía.

La **radiación ultravioleta (UV)**, su nombre proviene del hecho de que su rango empieza desde longitudes de onda más cortas de lo que el ojo humano identifica como luz violeta. Esta radiación es parte integrante de los rayos solares y produce varios efectos en la salud de los seres humanos.

Por suerte, la atmósfera bloquea alrededor del 77 % de los rayos UV del Sol, cuando éste está más alto en el cielo (en el cenit), y la absorción aumenta en las longitudes de onda UV más cortas. A nivel del suelo, con el Sol en el cenit, la luz solar es un 44 % de luz visible, un 3 % de ultravioleta y el resto de infrarrojos.

Llegados a este punto, cabe considerar ciertas particularidades que se producen como consecuencia de la interacción entre la atmósfera y la radiación solar, y que afectan de forma decisiva al cambio climático:

Primera: la atmósfera es diatérmica, es decir, que no se calienta directamente por la radiación solar, sino que lo hace de manera indirecta a través de la reflexión de dicha radiación en el suelo terrestre y en la superficie de mares y océanos.

Segunda: no toda la radiación solar alcanza la superficie de la Tierra, ya que las ondas ultravioleta más cortas son absorbidas en la estratosfera por el O₃.

Tercera: los fotones, como partículas portadoras de todas las formas de radiación electromagnética, según su longitud de onda, son capaces de excitar los electrones de un átomo y de disociar, hacer vibrar y rotar moléculas de los gases.

Cuarta: cuando un gas absorbe radiación electromagnética similar a su frecuencia vibracional, la energía resultante se transforma en movimiento molecular interno que produce aumento de la temperatura.

Quinta: Entre la troposfera media y la **tropopausa** (límite superior de la troposfera) se sitúa la mayor concentración de CO₂, mientras que el metano (CH₄) se disemina por toda la estratosfera y el O₃ se concentra en la estratosfera media.

Conocer estas cinco particularidades puede ayudar a comprender mejor lo que se detalla a continuación:

4. EL EFECTO INVERNADERO

Es un proceso natural que ha venido acompañando a la Tierra desde su formación definitiva hasta la actualidad, proporcionando un refugio imprescindible para proteger y generar vida en la biosfera (Figura 4).

La radiación solar, en su tránsito a través de la atmósfera terrestre, sufre un cierto debilitamiento debido al reflejo de las nubes y a la absorción por las moléculas de gases como el O₃, el vapor de agua y las partículas en suspensión (aerosoles). No obstante, la parte de radiación infrarroja que sí alcanza la superficie oceánica y continental; ésta, o bien es reflejada por el efecto albedo —desiertos, casquetes polares, tundra nevada y sistemas montañosos nevados que tienen las superficies más blanquecinas— o bien es absorbida—bosques, ciudades, océanos, reservas de agua, selvas y montañas no nevadas—, por ser estas superficies más oscuras.

Figura 4. Esquema básico del efecto invernadero.



Fuente: UNEP-GRIDArendal.

Así, la parte de radiación infrarroja absorbida, una vez que toca la materia de la superficie terrestre es devuelta en dirección al espacio exterior en forma de radiación térmica, debido al proceso de excitación de los electrones de sus átomos; pero una parte choca con los GEI que le impiden la salida, siendo reenviada hacia la atmósfera inferior donde transmite más calor a la superficie terrestre y dando lugar a lo que denominamos efecto invernadero.

En el caso de que tales GEI no estuvieran presentes, su ausencia haría que la temperatura media en superficie fuese $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que sería inviable para la mayoría de los actuales ecosistemas.

6. EL DIÓXIDO DE CARBONO Y OTROS GASES DE EFECTO INVERNADERO

Según el Inventario Europeo de Sustancias Químicas Comerciales Existentes⁶, que es un registro establecido por la Unión Europea, el CO_2 es un gas inodoro, incoloro, ligeramente ácido y no inflamable. Es soluble en agua cuando la presión se mantiene constante, y está formado por una molécula lineal de un átomo de carbono ligado a dos átomos de oxígeno.

A pesar de que a temperatura y condiciones ordinarias se encuentra en forma gaseosa, puede solidificarse si se somete a temperaturas inferiores de $-79\text{ }^{\circ}\text{C}$, y licuarse cuando se disuelve en agua.

En la naturaleza, la fuente más importante de emisión del gas son los procesos de respiración fotosintética. También constituyen un foco de emisión significativo los incendios forestales y la erupción de los volcanes,

⁶ EINECS (European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances)

ya que los primeros lo producen por la quema de combustibles como la madera y la biomasa, mientras que los segundos directamente lo liberan.

Figura 5. Años de vida de los Gases Efecto Invernadero

Nombre del gas	Fórmula química	Años de vida
Dióxido de carbono	CO ₂	30-95
Metano	CH ₄	12
Óxido nitroso	N ₂ O	121
Diclorodifluorometano	CCl ₂ F ₂	100
Clorodifluorometano	CHClF ₂	12
Tetrafluorometano	CF ₄	50 000
Hexafluoretano	C ₂ F ₆	10 000
Hexafluoruro de azufre	SF ₆	3 200
Trifluoruro de nitrógeno	NF ₃	500

Fuente: *Energy Information Administration*

Con respecto a los complejos industriales, el sector energético es responsable de la mayor parte de las emisiones de CO₂ con un 91,8 % del total, y dentro del mismo, el sector transporte figura con el 29,9 %, debido fundamentalmente a la quema de gas, gasolina y otros derivados del petróleo. La industria del cemento y las plantas de incineración de residuos representan el 6,4 % del total emitido, y como fuentes minoritarias, se encuentran la industria química y la industria metalúrgica con un 1,8 %⁷.

Para los seres humanos es un gas asfixiante, ya que la inhalación de elevadas concentraciones de CO₂ puede originar hiperventilación, pérdida del conocimiento, taquicardias y dolores de cabeza. No obstante, con la concentración actual en la baja troposfera, el CO₂ es un gas que cualquier ser pulmonado respira junto con otros que constituyen el aire, y sin que les produzca el más mínimo daño. Por otra parte, es el elemento imprescindible para que las plantas desarrollen el proceso de fotosíntesis que trae consigo la generación de O₂, el cual es un gas esencial para la vida⁸. En este orden de cosas, se cree que, contrariamente a lo que siempre se pensó, el O₂ generado por el fitoplancton de los océanos es muy superior al generado por las plantas terrestres.

Además, el CO₂ —el GEI más relevante por su elevada concentración y permanencia en la atmósfera—, hasta la llegada de la Revolución Industrial, se estima que la concentración de partículas por millón (ppm) era de 280, lo que suponía que el efecto invernadero estuviese equilibrado; es decir, que había en la atmósfera la concentración de este gas necesaria para que el sistema actuase de forma favorable. En el año 2020, por ejemplo, dicha concentración fue de 413, cifra que sin duda rompe dicho equilibrio,

⁷ Registro Estatal de Emisiones Fuentes Contaminantes. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Gobierno de España.

⁸ La **fotosíntesis** es el proceso en el cual la energía de la luz se convierte en energía química en forma de azúcares. En un proceso impulsado por la energía de la luz, se crean moléculas de glucosa (y otros azúcares) a partir de agua y dióxido de carbono, mientras que se libera oxígeno como subproducto. Las moléculas de glucosa proporcionan a los organismos dos recursos cruciales: energía y carbono fijo (orgánico).

aumenta el efecto invernadero y acelera el cambio climático. Hoy día, finales de 2022, la cifra ha aumentado hasta 416 ppm⁹.

La ciencia lo considera como un gas contaminante, por su condición de GEI, ya que absorbe y emite radiación dentro del rango infrarrojo. Junto con otros gases como el CH₄ generan concentraciones atmosféricas, en este momento excesivas, que retienen el calor atmosférico que debiera ser liberado a la atmósfera exterior en una proporción mayor a la que sería necesaria, provocando el aumento de efecto invernadero y, consecuentemente, la aceleración del calentamiento global.

Otros gases componentes de tales concentraciones atmosféricas son el vapor de agua (H₂O), el óxido nitroso (N₂O) y el O₃, si bien su importancia relativa es muy pequeña.

Cabe señalar que el CO₂, una vez que llega desde la superficie terrestre hasta la altitud donde más se concentra en la capa media troposférica (5.000-6.000 m), luego necesita entre cinco y siete años más para llegar a la atmósfera superior, donde se une a otros GEI y donde, lejos de calentar, lo que hace es justo lo contrario, enfriar aún más la atmósfera superior¹⁰. Su permanencia en la atmósfera se estima en casi 100 años, lo que lo hace muy persistente (Figura 5). Por su parte, el CH₄, aunque tiene un poder calorífico muy superior al del CO₂, se presume que ocupa en la atmósfera 220 veces menos que éste y además su permanencia es también muy inferior, por lo que el CH₄ contribuye de manera menos importante al efecto invernadero, lo mismo que ocurre con otros GEI¹¹.

7. LA VIGILANCIA DE LOS GEI: LOS CENTINELAS DEL CO₂

En julio de 2014, la NASA lanzó el satélite *Orbiting Carbon Observatory-2* (OCO-2), una misión desarrollada y dirigida en el marco del programa ESSP (*Earth System Science Pathfinder*). El objetivo era realizar observaciones globales de carbono existente en el espacio y medir la concentración de CO₂ atmosférico, proporcionando así datos detallados sobre la variación local y estacional del gas. Está situado en una órbita de 705 kilómetros de altitud que le permite cubrir toda la superficie de la Tierra cada 16 días. El sistema dispone de un modelo de computador llamado GEOS-5, el cual permite generar una simulación creada por científicos de la Oficina de Asimilación Global y Modelización del Centro Espacial de Vuelos Goddard de la NASA. Se considera que se encuentra entre las de mayor resolución jamás creada, siendo la primera en mostrar con detalle cómo el CO₂ se mueve realmente a través de la atmósfera (Figura 6).

OCO-2 puede medir la concentración de CO₂ con una precisión de entre el 0,3 % y el 0,5 %. Es decir, que puede detectar concentraciones de este gas con una precisión del orden de una o dos partes por millón (ppm).

La NASA comprobó con la ayuda del simulador la existencia de "*penachos de dióxido de carbono que en la simulación se arremolinan y cambian a medida que los vientos dispersan el gas de efecto invernadero lejos de sus*

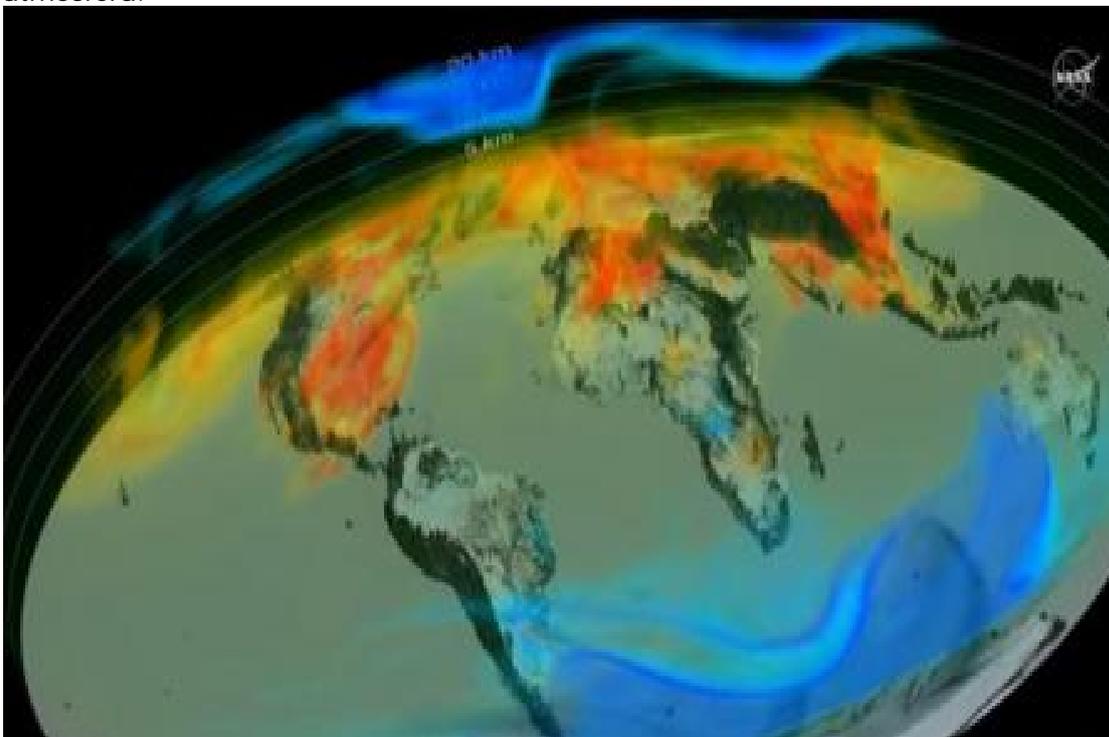
⁹ Earth System Research Laboratories. Global Monitoring Laboratory. Last updated: Oct 05, 2022

¹⁰ Instituto de Astrofísica de Andalucía, IAA-CSIC. Unidad de Divulgación y Comunicación (15/09/2015). Observación realizada por el instrumento SABER, a bordo del satélite TIMED (NASA)

¹¹ Voluntary Reporting of Greenhouse Gases Program. Energy Information Administration

fuentes. La simulación también ilustra las diferencias en los niveles de dióxido de carbono en los hemisferios norte y sur y los distintos cambios en las concentraciones globales de dióxido de carbono a medida que el ciclo de crecimiento de las plantas y los árboles cambia con las estaciones del año"¹².

Figura 6. Las zonas rojizas muestran las concentraciones más elevadas de CO₂ en la atmósfera.



Fuente: NASA

OCO-2 también forma parte de la constelación de satélites de la NASA 'A-train' para el estudio de la Tierra, formada por los satélites Aqua, CloudSat y Aura, así como el satélite francés CALIPSO y el japonés Shizuku (GCOM-W1). Desde su puesta en órbita, complementa las observaciones del satélite japonés Ibuki (GOSAT), también dedicado a la medición de las concentraciones del gas desde la órbita y que fue lanzado en enero de 2009 (Figura 7).

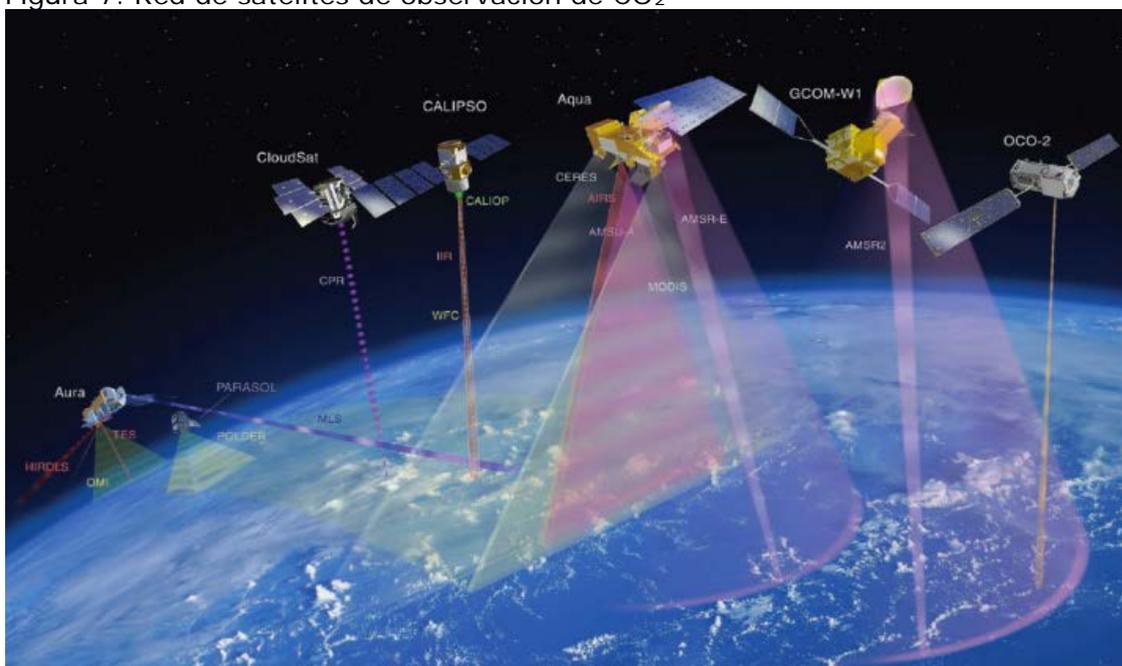
Previamente, el primer instrumento espacial en medir independientemente de día y de noche el CO₂ atmosférico, y bajo condiciones claras y soleadas en todo el globo, es la sonda infrarroja atmosférica AIRS del satélite Aqua de la NASA. AIRS es uno de los seis instrumentos que vuelan a bordo de dicho satélite. Lanzado el 4 de mayo de 2002, está diseñado para respaldar la investigación climática y mejorar la predicción meteorológica.

Por su parte, el instrumento SABER, a bordo del satélite TIMED (NASA), ha hallado un aumento de entre un 5 % y un 12 % por década en la concentración de CO₂ en la alta atmósfera. También ha descubierto que, como ya se ha citado, si en la troposfera su comportamiento es de GEI y su

¹² Patrick Lynch. NASA's Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland. USA

incremento produce un aumento de temperatura, en las capas medias y altas la situación se invierte y el CO₂ produce un enfriamiento¹³.

Figura 7. Red de satélites de observación de CO₂



Fuente: NASA

Finalmente, el programa COPERNICUS, que es un componente del Programa Espacial de la Unión Europea y que se espera que esté completamente operativo en 2026, podrá determinar con exactitud el origen de las emisiones de GEI que tengan lugar en nuestra atmósfera, lo que permitirá reducirlas o eliminarlas. Los científicos de COPERNICUS podrán evaluar y medir las emisiones producidas por la actividad humana tanto de CO₂ como las de CH₄ y lo harán con "una precisión y detalle sin precedentes y prácticamente en tiempo real"¹⁴.

8. EL PUNTO DE MIRA ACTUAL: ESTADO DE LA TECNOLOGÍA

Los gobiernos, buscando la mejor forma de paliar el problema cierto que para la ciudadanía y los ecosistemas de la biosfera supone el cambio climático, han puesto toda su atención en su mitigación mediante la reducción paulatina y programada de la emisión de GEI. Esto se está llevando a cabo de acuerdo con un calendario previsto, y con la idea de involucrar a la población mundial a través de los convenios suscritos desde hace casi tres décadas por sus representantes políticos y líderes mundiales que han estado paulatinamente a favor de ello¹⁵.

¹³ Instituto de Astrofísica de Andalucía, IAA-CSIC. Unidad de Divulgación y Comunicación (15/09/2015). Observación realizada por el instrumento SABER, a bordo del satélite TIMED (NASA)

¹⁴ El Periódico de la Energía. "COPERNICUS anuncia una herramienta que puede monitorizar las emisiones de CO₂ y CH₄ antropogénicas en tiempo real" (02/11/2021)

¹⁵ Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), que fue firmada inicialmente por 166 países y entró en vigor, finalmente, el 21 de marzo de 1994. En la actualidad, ha sido ratificada por 197 países.

Esta política ha ido acompañada paradójicamente de otras políticas y estrategias a escala nacional de **adaptación** al cambio climático, lo que sugiere el reconocimiento implícito de la extraordinaria dificultad de conseguir a escala mundial la reducción de emisiones y desarrollando así, y en paralelo, otras formas; no sólo de mitigar, sino de enfrentarse con el menor riesgo posible a un problema que en este momento es casi ineludible.

A parte de las políticas de reducción de emisiones más o menos eficaces, son conocidos los experimentos científicos de captación de CO₂ en superficie como el ORCA (Islandia), donde se ha construido la planta de captura de carbono más grande del mundo, con capacidad para tratar anualmente hasta 4.000 toneladas de CO₂ de la atmósfera para liberar aire limpio; o propuestas de iluminación de las nubes marinas que un grupo internacional de científicos atmosféricos y otros expertos ha desarrollado bajo el nombre de Proyecto *Marine Cloud Brightening*¹⁶, con el fin de que se refleje la radiación solar al espacio y reducir así el impacto del calentamiento global; o propuestas de reverdecimiento del planeta mediante la plantación racional de árboles adecuados a cada ecosistema a lo largo y ancho de toda la superficie terrestre para obtener la mayor captación posible de CO₂.

Otro proyecto científico, en este caso nacional, ha sido desarrollado por el Servicio General de Espectrometría de Masas del Centro de Láseres Pulsados Ultracortos Ultraintensos (CLPU), el Servicio de Apoyo a la Investigación NUCLEUS de la Universidad de Salamanca y la empresa Iberdrola Ingeniería. Se trata de un dispositivo capaz de eliminar casi el 100 % de las emisiones industriales de CO₂ y para el que los investigadores ya han presentado una patente nacional de un primer prototipo, que es el resultado del proyecto de I+D SIGMA. La técnica consiste en ionizar los gases mediante radiación láser y extraer sus componentes a través de campos eléctricos y magnéticos.

Este instrumento es también un captador en superficie que evita que el gas llegue a la atmósfera, y está diseñado especialmente para las centrales térmicas, así como para todo tipo de industrias que generan emisiones. Sus responsables aseguran que han logrado un sistema más barato que otras vías de capturar CO₂ exploradas estos últimos años¹⁷.

Otro proyecto singular, por el hecho de actuar no en superficie sino en altura, es una técnica de geoingeniería estadounidense consistente en rociar con aerosoles de sulfatos la estratosfera, para que parte de la radiación que llega del Sol rebote y vuelva al espacio. Esto, según los cálculos de los científicos, bajaría la temperatura de nuestro planeta de manera casi inmediata. Además, la técnica sería barata porque no hace falta aplicar esos aerosoles por toda la estratosfera. Los propios vientos estratosféricos se encargan de repartir las partículas alrededor del planeta de forma relativamente rápida. No obstante, y pese al desconocimiento de las consecuencias reales de su aplicación, algunos científicos ya han advertido de que este tipo de técnicas son susceptibles de convertirse en algo tan catastrófico para el planeta como la propia crisis climática, ya que *"puede crear cambios meteorológicos que afecten a los patrones de lluvia. Esto*

¹⁶ Proyecto de iluminación de nubes marinas.

Disponible en: http://faculty.washington.edu/robwood2/wordpress/?page_id=954.

¹⁷ Libertad Digital. "Un dispositivo español para eliminar las emisiones de CO₂ de la industria" (6/11/2013).

*podría provocar sequías en algunas partes del mundo, como la desaparición del monzón asiático, e inundaciones en otros lugares*¹⁸.

Como puede verse, estos proyectos, así como otros que no hemos señalado, intentan reducir emisiones mediante su captación o bajando la temperatura atmosférica a través de un mayor reflejo de la radiación solar; unos lo hacen en superficie y este último en altura, pero siempre se refieren a emisiones actuales, no abordan el problema que generan en el presente las emisiones del pasado que ya están establecidas en la atmósfera desde hace mucho tiempo y que permanecerán allí durante décadas. Ellas son las verdaderas causantes de que el invernadero en el que vivimos no pueda "ventilarse" para bajar así la temperatura.

Por tanto, nos preguntamos, ¿podría afrontarse la situación de otra manera? ¿A caso se está haciendo ya?

9. CAMBIAR EL PUNTO DE MIRA Y "VENTILAR EL INVERNADERO"

Pues bien, sin cejar en las tareas de reducción de emisiones y de su captura, ya que es del todo imprescindible con una perspectiva de futuro inmediato, cabe también plantearse la hipótesis de poner el punto de mira en otro lugar de la atmósfera además de la antroposfera; concretamente entre la troposfera media (5-6 km) y la tropopausa (18 km), allí donde se acumulan en exceso las concentraciones en forma de penachos de CO₂ a los que hace referencia el experimento OCO-2, los cuales retienen el calor atmosférico del que una parte excedente debiera ser liberado a la atmósfera exterior hasta equilibrar el efecto invernadero, y que son el verdadero obstáculo para bajar la temperatura. En definitiva, que habría que "ventilar el invernadero" que protege la biosfera para expulsar el calor que evita que volviéramos a temperaturas previas a la Revolución Industrial.

De acuerdo con esta hipótesis inicial, nos planteamos lo siguiente: ¿sería posible desde la superficie terrestre eliminar o transformar los GEI allí instalados? ¿De ser posible, cuál sería el procedimiento más eficaz para llevar a cabo esa tarea?

Estas son preguntas que tan sólo la comunidad científica podría responder con solvencia, pero vistos los avances realizados hasta el momento se nos ocurre apuntar algunas consideraciones. Ante todo, y para simplificar la labor, seguramente convendría elegir un único GEI sobre el cual actuar, y que siendo el más concentrado tenga una estabilidad mayor, lo que le convierte en el más perjudicial; y esto podría eliminar a todos a excepción del CO₂, cuya permanencia ronda, como ya se ha mencionado, los 100 años.

En cuanto al procedimiento, en 2014 un grupo de investigadores de la Universidad de California (EEUU) encontró una forma de romper la molécula de CO₂ y obtener átomos de carbono y moléculas de oxígeno en lugar de moléculas de monóxido de carbono y un átomo de oxígeno. Para ello, usaron la longitud de onda más corta de los rayos ultravioleta, a lo que ellos llaman luz ultravioleta de vacío, para romper las moléculas de CO₂. Ésta, fue provista en forma de un disparo de rayo láser para la ruptura y otro

¹⁸ El Confidencial. "Amazon busca cómo enfriar la Tierra a gran velocidad" (6/12/2021).

láser para ionizar las piezas de la molécula rota y así poder medirlas con un espectrómetro de masa¹⁹.

Del proceso resultó que un 5 % de las moléculas de CO₂ se dividieran en moléculas de O₂ y átomos de carbono. Si bien los resultados no fueron muy halagüeños en términos relativos, sí fue suficiente para demostrar que el proceso puede ser usado para obtener oxígeno molecular del dióxido de carbono.

Ahora bien, y teniendo en cuenta que el experimento se diseñó para actuar en superficie, habría que adaptarlo para trasladar esta tecnología a más de 6.000 m de altitud y con temperaturas bajo cero. ¿Sería esto posible?

También en 2010, otro grupo español de investigadores de la Universidad de Cádiz (España) desarrolló un sistema de reacciones de carbonatación mineral capaz de eliminar el CO₂ atmosférico mediante reacción de dicho gas con el hidróxido de calcio y obteniendo de este modo carbonato cálcico ($\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$).

La idea del grupo parte de la base de que *"ciertos minerales como los silicatos reaccionan con dicho gas para formar otros como los carbonatos, que son minerales inertes ambientalmente hablando"*. Los investigadores precisan que *"para aplicar esa idea a nivel industrial es importante tener en cuenta que en el proceso natural la velocidad de reacción es muy lenta"*. No obstante: *"diversos estudios internacionales han puesto de manifiesto que si el mineral (silicato) es triturado en laboratorio y sometido a alta presión y temperatura, la velocidad de reacción se incrementa notablemente"*²⁰.

Aunque esta tecnología planteada a nivel industrial sí que parece viable, lo cierto es que también fue diseñada para actuar en superficie, por lo que habría que adaptarla para trasladarla a más de 6.000 metros de altitud y con temperaturas bajo cero. De nuevo, ¿sería esto posible?

Pues no lo sabemos, pero al parecer, para la eliminación del CO₂; éstas podrían ser algunas de las opciones: la separación molecular mediante ionización y la carbonatación mineral. Incluso, la licuefacción, la solidificación y la reducción fotocatalítica del gas, quizás también lo serían. En su caso, se actuaría a lo largo de una franja atmosférica de altitud aproximada de 12 km de grosor (entre el km 6 y el km 18), preferentemente en el hemisferio norte, en invierno y primavera, estaciones del año en las que la concentración es máxima. En teoría, cualquier actuación en este sentido podría ventilar el invernadero bajando la temperatura hasta niveles aconsejables.

Caso de acometerlas, y por ilusorias que parezcan estas opciones, es más lógico intentar actuar en la "desactivación" del CO₂ en altura mediante estos sistemas u otros similares, que conseguir alcanzar los objetivos en la reducción de emisiones, viendo los resultados de la COP-27 del pasado mes de noviembre de 2022²¹.

¹⁹ Phys.org. "Researchers discover a way to tease oxygen molecules from carbon dioxide" by Bob Yirka (3/10/2014).

²⁰ SINC. EARTH. "Hacia la captura y eliminación del CO₂ en la atmósfera", UCA (26/05/2010).

²¹ Real Instituto El Cano: "COP27: expectativas y limitaciones" (22/11/2022).

10. CONCLUSIÓN

El esfuerzo que a escala global está llevando a cabo la sociedad para reducir emisiones no está alcanzando las previsiones del Acuerdo de París de 2015. Tal y como afirma el IPCC en un Comunicado de Prensa de 9 de agosto de 2021: *"en el informe [de 2021] se ofrecen nuevas estimaciones sobre las probabilidades de sobrepasar el nivel de calentamiento global de 1,5 °C en las próximas décadas, y se concluye que, a menos que las emisiones de gases de efecto invernadero se reduzcan de manera inmediata, rápida y a gran escala, limitar el calentamiento a cerca de 1,5 °C o incluso a 2 °C será un objetivo inalcanzable"*²².

Es más, poco después, el Informe de síntesis actualizado de NDC (Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional) de 17 de septiembre de 2021, de Naciones Unidas Cambio Climático, solicitado por las Partes del Acuerdo de París, también confirma que: *"para todas las NDC disponibles de las 192 Partes consideradas en conjunto, se prevé un aumento considerable, de alrededor del 16 %, en las emisiones mundiales de GEI en 2030 en comparación con 2010. La comparación con las últimas conclusiones del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) muestra que tal aumento, a menos que se modifique rápidamente, puede conducir a un aumento de la temperatura de unos 2,7 °C a finales de siglo"*²³.

No en vano, la población mundial está sometida a graves situaciones, a veces impredecibles, como conflictos armados, emergencias sanitarias y climáticas, olas de calor e inundaciones, crisis energéticas, económicas, alimentarias y del transporte; en definitiva, multitud de contingencias que no dejarán nunca de surgir y que siempre distraerán la atención de la clase política para afrontar el desafío climático. Estos acontecimientos reales no justifican por sí mismos el retraso en el cumplimiento de los objetivos del Acuerdo de París, pero si explican por qué se postergan reiteradamente.

La sensación que transmiten los dirigentes mundiales concienciados con el cambio climático es que no encuentran ni el momento ni la forma de acometer decididamente el problema. Hasta ahora, han ideado recomendar a miles de millones de ciudadanos de todo el mundo que reduzcan sus emisiones a través del compromiso de sus Estados. Así, mediante la firma de convenios no siempre suscritos por los países más contaminantes, conseguir el cumplimiento de unos objetivos de reducción conforme a un calendario y con el fin último de limitar el calentamiento del planeta, de aquí a fin de siglo, en no más de 1,5 °C²⁴. En este sentido, la población mundial lleva 30 años incumpliendo sistemáticamente los acuerdos puesto que los indicadores a escala global así lo revelan; lo que confirma que no hay eficacia en las acciones emprendidas.

Otra sensación que transmiten los líderes es la de ignorar la enorme diferencia en el grado de responsabilidad que hay entre los ciudadanos de a pie, que no disponemos más que de una voluntad individual, y la que corresponde a las entidades colectivas que más emiten, especialmente, los centros industriales, energéticos, agrarios y logísticos que son responsables objetivos de la mayor parte del problema. De alguna manera todos

²² Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Comunicado de Prensa (9/08/2021).

²³ "Informe de síntesis actualizado de NDC: Se confirman las tendencias preocupantes" Comunicado ONU Cambio Climático (26/10/2021).

²⁴ Objetivo adoptado por 196 países en la COP21 en París, el 12 de diciembre de 2015.

contribuimos al cambio climático, pero no todos somos igualmente responsables de ello.

De modo que, como en otras ocasiones, y pese al enorme empeño realizado hasta el momento por la ciencia, a ésta se le presenta la oportunidad de actuar con ingenio y autonomía, y buscar y proponer otras soluciones eficaces de forma inmediata.

A nosotros, como meros observadores, pero que somos parte interesada en ello como ciudadanos, no nos parece disparatado sugerir, en el caso de que no se haya hecho ya, **cambiar el punto de mira** y orientar la actuación en altura, en la troposfera media, de modo que sea posible eliminar el CO₂ antiguo allí situado "abriendo la trampilla" que permita ventilar el invernadero que tan laboriosamente ha estado albergando a la humanidad desde el comienzo de los tiempos.