

**REAL ACADEMIA DE CIENCIAS
EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES DE ESPAÑA**

**OBSERVACIÓN DE LA TIERRA
Y CAMBIO GLOBAL:
¿QUÉ SABEMOS Y CÓMO
RESPONDEMOS?**

DISCURSO LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN
COMO ACADÉMICO DE NÚMERO POR EL
EXCMO. SR. D. EMILIO CHUVIECO SALINERO

Y CONTESTACIÓN DEL
EXCMO. SR. D. JOSÉ MANUEL MORENO RODRÍGUEZ

EL DÍA 29 DE OCTUBRE DE 2025



MADRID
Domicilio de la Academia: Valverde, 22
www.rac.es

ISSN: 0214-9540

ISBN: 978-84-87125-94-2

Depósito legal: M-20635-2025

ÍNDICE

Agradecimientos	5
Introducción	9
Relevancia del estudio del cambio global	11
Teledetección y cambio global	13
El papel de la teledetección en la ciencia del cambio global ..	13
Bases físicas de la teledetección global	15
Misiones de teledetección orientadas al cambio global	19
Tendencias presentes y futuras	24
Principales variables de interés global observables por teledetección	26
Metodologías para generar información climática por teledetección	26
Variables climáticas observadas por teledetección	33
Otras variables de interés global	38
Síntesis: ¿qué sabemos y qué hacemos?	39
Situación y tendencias	39
Respuestas (o más bien falta de)	44
¿Cómo cambiar? Conexión entre ciencia y motivaciones	
personales y sociales	47
El papel de la ciencia para cambiar conductas	47
Base ética de los problemas ambientales	48
Dimensiones éticas del cambio climático	50
Motivaciones para el cuidado ambiental	55
Algunas sugerencias de acción	59
Conectar conocimiento, convicciones y emociones.	59
Impactos climáticos de nuestro consumo	60
Cambios personales y sociales: el papel de los científicos	63
Conclusiones	66
Referencias	68
Contestación del Excmo. Sr. D. José Manuel Moreno Rodríguez	89
Bibliografía	98

*“Profesor: que te ilusione hacer comprender
a los alumnos, en poco tiempo, lo que a ti
te ha costado horas de estudio llegar a ver claro”*

SAN JOSEMARÍA ESCRIVÁ (*Surco*, 229)

Excelentísima Sra. Presidente de la Academia,
Excelentísimos señoras y señores académicos,
Señoras y señores.

AGRADECIMIENTOS

Inicio este discurso, como no puede ser de otra forma, agradeciendo a la corporación que hoy me acoge en su seno, la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, por elegirme para ocupar un puesto en tan prestigiosa institución, impulsora eminente del desarrollo científico de nuestro país, o lo que es lo mismo, de su progreso integral, pues no puede haber avance verdadero en una sociedad dejando a un lado el conocimiento científico. De modo particular, me gustaría agradecer a los Excmos. Sres. Académicos Luis Franco, Antonio Cendrero y José Manuel Moreno, quienes propusieron mi candidatura. Espero lograr, con mi humilde aportación a la vida de esta Academia, que no se arrepientan de tan generoso gesto. También quiero agradecer la ayuda de los Excmos. Académicos Dña. Ana María Crespo, hoy presidenta de la Academia, D. Jesús Serna, quien lo fue anteriormente y a quien conocí en la entrega de premios Rei Jaume I, y de modo muy especial al muy querido D. Ramón Llamas, que hoy quiero recordar con agradecimiento entrañable, pues fue el quien me animó a presentar mi candidatura como académico correspondiente, hace ya dos décadas, y me animó a contribuir activamente a las actividades de la Academia. De los tres he recibido consejos y apoyo que valoró muy sinceramente.

Como es lógico, mi agradecimiento se extiende a mis colegas y amigos del departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente de la Universidad de Alcalá, en donde he desempeñado la mayor parte de mi actividad profesional, tras mi estancia predoctoral de tres años en el entonces Instituto de Geografía Aplicada del CSIC. Aunque no voy a negar que al inicio de mi “desembarco” en Alcalá, allá por 1985, sentí un cierto sentimiento de

“destierro”, después de cursar mi licenciatura en la otra Complutense, no puedo sentirme más satisfecho de cómo la Universidad de Alcalá, la histórica Complutense, con las personas que pueblan sus aulas y despachos, me han tratado en estos 40 años. Llegué a Alcalá como un recién doctorado, y sentí enseguida el dinamismo de un profesorado joven, y de un estudiantado motivado y entusiasta. La sabia dirección que del departamento de Geografía realizó el Dr. José Sancho –modelo del hacer, del hacer hacer y del dejar hacer, y a quien tanto debo–, me permitió desarrollarme profesionalmente en Alcalá, crear con el resto de los profesores del área un programa de posgrado y un grupo de investigación que –además de bastante trabajo, por qué no decirlo– me han dado múltiples alegrías profesionales y humanas. Quiero hacer especial mención en este sentido al Dr. Francisco Javier Salas, y de las Dras. Inmaculada Aguado y Pilar Martín, con quienes colaboro desde hace más de tres décadas. Ellos fueron mis primeros doctorandos y ahora ocupan las máximas categorías profesionales, lo que me llena de un noble orgullo, aunque lo que más valoro, tras muchos años de relación, es que me permitan seguir considerándolos amigos. De ellos partieron otras muchas generaciones de doctorandos, ya casi una cincuenta, que ahora son investigadores, docentes y especialistas en empresas del sector. Aunque todos están en mi corazón, merecen especial mención aquí el Dr. Mariano García y las Dras. Patricia Oliva y Lucrecia Pettinari, que hoy comparten mi trabajo en el departamento, y del Dr. David Riaño, ejemplo de valía profesional y coraje humano. Sin duda, esa amplia lista de exdoctorandos es mi mayor satisfacción profesional. Por encima de las distinciones, las publicaciones o los proyectos conseguidos, están las personas a quienes hemos formado, que nos recordarán con cariño como alguien que fue significativo en su vida. Siguiendo a un autor español contemporáneo, creo que no hay nada más importante que “dejar buen poso” en la vida de los demás. En la mención de las personas con las que ahora comparto docencia e investigación no puedo dejar de citar a Mario Burgui, Carlota Segura, Miguel Ángel Torres, Amin Khairoun, Erika Solano, y Clara Ochoa, junto a los compañeros del departamento, en especial a su directora, la Dra. Montserrat Gómez.

Antes de terminar mis referencias a la Universidad de Alcalá, he de confesar que en ocasiones me venía a la cabeza la tentación de pensar que mi paso por la universidad tenía poca relevancia, al haberme centrado en la investigación y la docencia, sin ningún papel en la gestión universitaria y, quizá por ello, con poca notoriedad pública. En esas cavilaciones, recibí una llamada del Rector hace ahora tres años, proponiéndome para recibir la medalla de la Universidad, una distinción que se entregaba por primera

vez a docentes de la misma. Aunque he tenido luego la satisfacción de recibir otros premios, ése, pese a no tener ningún impacto económico, me llenó de especial alegría. Que pensarán en mí para esa distinción, entre los más de dos mil compañeros que ejercen con enorme dedicación su actividad en nuestra Universidad, venía a indicarme que el trabajo escondido y silencioso también es valorado, y que cada uno tiene que hacer, lo mejor que pueda, lo que sabe hacer, sin compararse con otros compañeros que tienen habilidades diferentes. Que eso tenga o no reconocimiento público, me parece que es secundario, aunque como somos seres sociales, tenerlos nos resulta siempre gratificante.

Junto al cariño que siento por Alcalá, no puedo terminar mi lista de agradecimientos profesionales sin citar a las personas que contribuyeron a mi formación en otras instituciones. En primer lugar, en el CSIC y en el Instituto Geográfico Nacional, especialmente a mis directores de tesis el Dr. José Manuel Casas Torres, maestro de geógrafos, y el Dr. Rodolfo Núñez de las Cuevas, ingeniero geodesta, exdirector del Instituto Geográfico Nacional, quien me abrió las puertas de la teledetección a través del centro de investigación que IBM tenía en la Universidad Autónoma, en un momento en donde casi nadie trabajaba en esta técnica en nuestro país. Ellos también me hicieron ver que era imprescindible establecer lazos de colaboración con especialistas de otros países. Mi primera experiencia con una beca Fulbright en la Universidad de Berkeley fue excelente, de la mano del Dr. Russel Congalton, a la que han seguido otras estancias en universidades anglosajonas, con especial relevancia la Universidad de Maryland, donde inicié mi línea de trabajo en observación de la Tierra a escala global, con el liderazgo del Dr. Chris Justice. Más reciente, pero también muy significativo, ha sido mi incursión en el campo de las éticas ambientales, y en especial el papel de las religiones en la conservación ambiental, con una excelente experiencia en la Universidad de Oxford, donde mi estancia sabática en el curso 2023-24 me permitió, además de disfrutar del ambiente académico de esa magnífica universidad, terminar un doctorado en ecoteología, rematando un proyecto personal que se había ido madurando en la última década.

La formación doctoral precisa de recursos, sin los cuales la investigación no sería posible. Por ello, creo que también es de justicia agradecer aquí a las entidades que han financiado mi actividad investigadora, en especial a la Agencia Espacial Europea y a los diversos programas de investigación de la Unión Europea, sin olvidar a las instituciones españolas, al Ministerio de Ciencia y de Medio Ambiente y a la Comunidad de Madrid. No

puedo olvidar aquí a la primera persona que me financió una propuesta de investigación en incendios forestales, el Dr. Ricardo Vélez, uno de los pocos gestores con mentalidad investigadora que he conocido, que ocupó durante muchos años la jefatura de la gestión de incendios en el antiguo ICONA. Mención especial merece también la Fundación Tatiana Pérez de Guzmán el Bueno, que impulsó mi dedicación a la ética ambiental, y en especial a su presidente D. Teodoro Sánchez-Ávila y a sus vicepresidentes Rosa Oliva y Álvaro Matud.

Por último, pero obviamente no por eso menos importante, es necesario citar entre los agradecimientos a mi familia y a mis amigos, que han compartido conmigo esta aventura apasionante de la investigación y la docencia universitaria. En primer lugar, a mis padres, José y Emilia, a quienes tanto debo. Eran personas sencillas, que se querían mucho y que nos quisieron mucho a mí y mis hermanos, que les tocó hacer una guerra y la perdieron, que supieron sobreponerse a las dificultades, vivir con sencillez y transmitirnos unos valores humanos que son, sin duda, su mejor legado. No tenían recursos materiales ni ciencia académica, pero aprobaron con creces las asignaturas de la universidad de la vida. Estoy seguro de que estarán muy contentos hoy, siguiendo desde el Cielo este acto. Mis hermanos y sobrinos han contribuido con su cercanía y cariño a sustentar mi pasión por aprender cosas nuevas.

Dice un refrán español que “Quien tiene un amigo tiene un tesoro”. Yo he tenido muchos tesoros en mi vida y no puedo estar más agradecido por ello. En muy distintas circunstancias, las relaciones sociales o profesionales, los viajes con ocasión de cursos o asistencia a congresos, he encontrado muchas personas en mi vida que han sido mucho más que compañía: he aprendido de ellos, he recibido su cariño y consuelo en momentos difíciles, su comprensión y consejo en los momentos de duda, su compañía y ayuda en las enfermedades, su alegría y entusiasmo en las celebraciones. Citarlos a todos sería muy extenso, pero al menos es de justicia hacerlo con Francisco Javier Martínez Vega, Esteban Daudén, Félix Blasco, Alfonso Careaga, Javier Berguizas, Juanto Cebrián, Enrique Vinagrero, María Ángeles Martín, Javier de Cendra, Marcela Sánchez, Luis Carvacho, Pablo Martínez, Sara Jurdao y Pepe Escudero.

Paso ahora a centrarme en la materia central de mi discurso.

INTRODUCCIÓN

El tema que he elegido para este discurso de entrada en la Academia de Ciencias intenta unir mis dos principales intereses profesionales. Por un lado, la observación de la tierra desde el espacio y, por otro, la reflexión sobre los valores y motivaciones que explican el comportamiento ambiental de las personas. La primera línea de trabajo, comúnmente denominada teledetección, ha sido mi principal actividad profesional desde que terminé mis estudios universitarios en 1982, cuando me incorporé al CSIC como becario pre-doctoral para colaborar en un proyecto piloto que ensayaba la aplicación de la teledetección a la generación de cartografía de la cobertura del suelo. Ahí pude familiarizarme con esta técnica en ese momento tan novedosa, gracias al apoyo recibido en el centro de investigación que IBM tenía en la Universidad Autónoma, pionero en ese momento del tratamiento digital de imágenes en nuestro país. Al terminar mi doctorado en 1985 continué por esta línea de trabajo, centrándola en su aplicación a la determinación del riesgo y de los efectos de los incendios forestales, primero a través de una beca Fulbright en 1987-88 en el *Department of Forestry and Natural Resources* de la Universidad de California en Berkeley, y más tarde en una estancia sabática en la Universidad de Maryland en 2007, cuando empecé a trabajar sobre observación del impacto de los incendios en el cambio global, línea de trabajo que se consolidó con mi participación, desde 2010, en la iniciativa de cambio climático de la Agencia Espacial Europea, en donde todavía continuo liderando la variable *Fire Disturbance*, y participando en un proyecto más reciente sobre orígenes e impactos de los incendios extremos y en otro sobre el papel del fuego en los balances de carbono.

La segunda línea de investigación, con la que quiero conectar en este discurso la relevancia del uso de la teledetección en el estudio del cambio global, es la dimensión ética y religiosa del comportamiento ambiental. Puesto que toda mi vida profesional la he dedicado a la observación de los problemas ambientales, ha ido aumentando mi convencimiento de que la solución a esos problemas está más allá del ámbito de la ciencia. Esto me ha llevado a dirigir durante más de una década una cátedra de ética ambiental que inicialmente financió la Fundación Tatiana Pérez de Guzmán el Bueno, y en los últimos años a realizar una segunda tesis doctoral, en este caso en ecoteología, en la Universidad de Oxford. Seguramente muchos de ustedes conocerán la muy citada reflexión que hacía Gus Speth, Decano de la *Forestry & Environmental Studies School* de la Universidad de Yale: “Antes pensaba que los principales problemas ambientales eran la pérdida de biodiversidad, el colapso de los ecosistemas y el cambio climático. Pero estaba equivocado. Los principales problemas medioambientales son el egoísmo, la codicia y la apatía (...) para hacer frente a esos problemas

necesitamos una transformación espiritual y cultural, y los científicos no sabemos cómo hacerlo.” Las tendencias parecen confirmar el análisis de Speth, pues un mayor conocimiento científico sobre los cambios globales no está suponiendo un cambio en las actitudes y comportamientos, tanto a nivel personal como social, como luego comentaré con más detalle.

Me propongo ofrecer algunas sugerencias para que conectar esos dos ámbitos del saber, el científico y el humanístico, que a algunos pueden parecer ajenos, e incluso antagónicos. Estoy convencido de que la ciencia es imprescindible para conocer los problemas y es necesaria para resolverlos, pero no es suficiente: necesitamos conectarlos con valores, emociones y virtudes, que es —al fin y al cabo— lo que mueve a los seres humanos a cambiar sus comportamientos.

El tema de este discurso inaugural no es nuevo, hace varios años que viene siendo motivo de mi reflexión. De hecho, tuve ocasión de introducirlo con ocasión de mi participación en el Programa de Promoción de la Cultura Científica y Tecnológica de la Academia de Ciencias del curso 2017-18, ofreciendo una conferencia sobre esta temática, que fue posteriormente publicada en la revista de la Academia (Chuvieco, 2022). Ahora voy a desarrollar las ideas allí apuntadas de forma más extensa y documentada.

He dudado sobre si el título que debía incluir en este discurso debía recoger la expresión “cambio climático” o “cambio global”. Finalmente, he optado por esta última, porque entiendo que las alteraciones de las variables que afectan al clima terrestre también lo hacen en otros múltiples procesos que no suelen catalogarse como climáticos. La pérdida de biodiversidad, la deforestación de los bosques tropicales, la desecación de humedales, la contaminación del aire y del agua en muchos lugares del mundo no suelen relacionarse con el cambio climático, que parece restringirse a las variables atmosféricas, aunque de hecho todos estos procesos están asociados en una doble dirección: por un lado, afectan al clima terrestre y por otro están afectados por él. Por ejemplo, el aumento de las temperaturas o la ocurrencia de fenómenos extremos inciden directamente sobre la distribución de especies vegetales y animales, mientras la deforestación tropical afecta al balance de carbono almacenado en la biomasa terrestre o la desecación de humedales supone la liberación de preocupantes cantidades de metano, con un efecto de forzamiento radiativo mucho más elevado que el del CO_2 . En consecuencia, emplear el término “cambio global” implica considerar todas las variables que de una forma u otra afectan a los procesos geobioquímicos que regulan el sistema terrestre, y por tanto me parece un concepto más comprehensivo que el de cambio climático, aunque de alguna forma lo contiene.

RELEVANCIA DEL ESTUDIO DEL CAMBIO GLOBAL

Ya nos refiramos específicamente al cambio climático o al más genérico de cambio global, parece obvio indicar que se trata de uno de los temas científicos con mayor impacto social, ya que las medidas para su mitigación o adaptación van a afectar al conjunto de los ciudadanos. Lamentablemente, a la base científica de estudio se añade un enorme componente ideológico, inexistente o marginal a otros temas científicos contemporáneos, lo que genera un debate que en muchas ocasiones nubla la transmisión de los principales argumentos y, por ende, la adopción de medidas eficaces para contribuir a la mitigación del problema.

Basta utilizar cualquiera de los motores de búsqueda de artículos científicos para hacerse idea de la gran actividad investigadora en torno a estas cuestiones. Por ejemplo, sobre cambio climático aparecen más de 10 millones de ítems en *Google Scholar*, con algo más de 17.000 solo en lo que llevamos de año (último acceso el 28 de agosto de 2025). Se trata además de un tema recurrente en los medios de información masivos (prensa, radio, Tv) y en las redes sociales.

Como es bien sabido, el estudio sistemático del cambio global se comenzó a estructurar con motivo de la cumbre de la Tierra, celebrada en 1992 en Rio de Janeiro, si bien la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de NN.UU. para el Medio Ambiente (UNEP) ya habían creado el Panel Internacional de Cambio Climático (IPCC) en 1988. En la cumbre de Rio se acordaron tres convenciones de gran calado ambiental: la Convención de Naciones Unidas sobre cambio climático (UNFCCC), la Convención de Naciones Unidas para combatir la desertificación (UNCCD) y la Convención sobre Diversidad Biológica (CBD). Estos acuerdos, junto al tratado de Montreal (1987) para eliminar las sustancias que estaban destruyendo la capa de Ozono, abrieron una nueva dimensión legislativa en la gestión ambiental, reconociéndose por vez primera que los problemas ambientales tienen una dimensión global y, por tanto, requieren el acuerdo de todos los países.

Con distintos altibajos, en términos de eficacia de los acuerdos adoptados, cada una de las tres convenciones ha implicado reunir anualmente a los gobiernos de todos los estados firmantes para analizar la evolución de los problemas y plantear medidas comunes de mitigación. En el caso concreto del cambio climático, han sido especialmente relevantes las Conferencias de las Partes (COPs) celebradas en Kioto, en 1997, y en París, en 2015. En la primera de ellas se firmó un protocolo que estableció com-

promisos nacionales para limitar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El Protocolo de Kioto, que entró en vigor en 2005, tras su ratificación por una cantidad suficiente de estados firmantes, solo afectaba a las economías desarrolladas (OCDE y bloque soviético) y les obligaba a reducir sus emisiones sobre la base de referencia de las estimadas para 1990. Aunque EE.UU. no firmó el acuerdo, el acuerdo de Kioto supuso un primer hito en la lucha contra el cambio climático, pues se reconocía la importancia del problema, el origen del mismo y las responsabilidades globales, pero diferenciadas según la contribución de cada país, a las que daba lugar. Estos mismos principios se mantuvieron en el otro gran tratado de la UNFCC, el conocido como acuerdo de París, fruto de la COP-21 celebrada en 2015 en la capital francesa, con la novedad en este caso de que afectaba no sólo a los países más desarrollados económicamente, sino también a los emergentes que habían aumentado considerablemente sus emisiones en las últimas décadas, singularmente China. En este sentido, el acuerdo de París resulta más realista al incluir a todos los actores del problema, pero al coste de ser mucho más vago que Kioto, pues no se establecen metas específicas para la reducción de emisiones; tan sólo el compromiso de remitir los inventarios anuales de emisiones a la secretaria del UNFCC y de establecer planes voluntarios para su disminución. Los vaivenes políticos posteriores, particularmente en EE.UU., han disminuido considerablemente la aplicación práctica del acuerdo, si bien sigue siendo la referencia para el esfuerzo colectivo de mitigación y adaptación al cambio climático.

TELEDETECCIÓN Y CAMBIO GLOBAL

El papel de la teledetección en la ciencia del cambio global

Cualquier acuerdo internacional en temas ambientales debería construirse sobre el conocimiento científico de esos problemas. En el caso del cambio climático, previo a la firma del UNFCCC en 1992, ya se había creado un grupo de trabajo, el panel de cambio climático (IPCC), donde los especialistas realizaban informes para facilitar a los gobernantes información fidedigna sobre las tendencias y las causas del problema, a partir de las investigaciones publicadas en fuentes confiables. El IPCC está formado por un grupo de científicos elegidos por los gobiernos que forman parte del UNFCCC, y participan, con carácter voluntario, en la elaboración de sus informes técnicos. El más importante es el denominado “informe de evaluación” (*Assessment report*, AR) que se publica cada seis años desde 1990. Pretende mostrar el estado global de la cuestión ofreciendo una magnífica síntesis sobre las causas, la evolución de las tendencias y los efectos actuales y previsibles del CC. Hasta ahora se han publicado 6 informes (1990, 1995, 2001, 2007, 2014 y 2021) y se trabaja actualmente en el 7º. El IPCC se divide en tres grupos de trabajo (Bases físicas, Impactos-adaptación y vulnerabilidad, y Mitigación), cada uno de los cuales elabora uno de los volúmenes que configuran el *Assessment report*, con diferentes especialistas en las muy diversas facetas del problema. Además de los informes de síntesis, el IPCC también publica periódicamente dictámenes específicos, por ejemplo, sobre energías renovables, metodologías de cálculo o construcción de escenarios. Estrictamente hablando el IPCC no realiza investigaciones propias, sino que sintetiza las publicaciones disponibles sobre las distintas temáticas, basándose en la mejor literatura disponible. Cada uno de los informes es revisado por un amplísimo grupo de especialistas, que envían las sugerencias y críticas que consideran oportunas, a resultas de las que se elaboran las síntesis finales.

Resulta obvio que este proceso se fundamenta sobre una base científica muy amplia, basada en observaciones y modelos. Con esta finalidad la Organización Meteorológica Mundial creó el *Global Climate Observing System* (GCOS), orientado a la observación global del estado de los océanos, la tierra y la atmósfera, que coordina redes de observación terrestre, marina y atmosférica, además de la observación satelital (GCOS, 2021). En el desarrollo del marco estratégico de GCOS se establecieron las llamadas *Essential Climate Variables* (ECV), que se definen como aquellas variables físicas, químicas o biológicas que contribuyen de manera crítica a la caracterización del clima de la Tierra (Bojinski *et al.*, 2014). Actualmente se han definido 55 ECV, que a su vez pueden concretarse en distintos parámetros, ahora llamados productos (GCOS, 2025). GCOS publica periódicamente

una relación de los requisitos (mínimo, óptimo y máximo) en términos de resolución espacial y temporal, exactitud e incertidumbre de cada uno de esos productos (GCOS, 2025), renovándose también periódicamente la lista de los productos objetivo de cada ECV. El programa GCOS se organiza en torno a tres paneles temáticos: atmósfera, océano y tierra. De este último, el *Terrestrial Observation Panel for Climate* (TOPC), formo parte desde hace cinco años, coordinando específicamente la variable Fuego, dividida a su vez en tres productos (área quemada, incendios activos y energía radiada por el incendio), y colaborando en la definición de los requisitos para las demás variables terrestres.

Como es lógico, resulta imprescindible contar con instrumentos precisos y fiables para entender mejor la aportación de las distintas variables de interés climático. Los medios para recopilar información de estas variables son muy variados, incluyendo mediciones *in situ* a partir de muestreos de árboles (dendrocronología), depósitos lacustres (sedimento-cronología) o registros de hielo (criocronología), así como medidas tomadas por sensores instalados en tierra (estaciones meteorológicas o hidrológicas, torres de flujo o estaciones de aforo), o a bordo de aviones y satélites.

En este marco la teledetección supone uno de los medios más interesantes de obtener información de ámbito global, puesto que se basa en un sistema de observación que abarca el conjunto del planeta, independiente de las fronteras nacionales, en distintas regiones del espectro y a intervalos de adquisición muy breves. Aunque el término teledetección incluye tanto sensores terrestres como aeroportados y espaciales, en el ámbito del cambio global lo más habitual es referirnos a sistemas satelitales de observación terrestre, que orbitan la Tierra a distintas alturas y con muy variados sensores (Chuvieco, 2020). En consecuencia, la resolución espacial, espectral y temporal de estos sistemas es muy variada. Esto permite observar fenómenos muy dinámicos, como tormentas tropicales, movimiento de corrientes marinas o inundaciones, de forma panorámica y en tiempo casi real. Junto a ello, la observación a distancia que realizan los sistemas de teledetección implica un muestreo no destructivo de la variable de interés, lo que resulta muy importante cuando el parámetro en cuestión se vería alterado por ese muestreo (por ejemplo, la cantidad de clorofila o la humedad de las plantas, que se estiman tradicionalmente tomando muestras de hojas que se procesan en laboratorio). Además, los datos satélites se adquieren a distintas resoluciones espaciales, según el objetivo final de la misión, desde tamaños de píxel por debajo de 1 m (como sería el caso de los satélites Worldview o Pleiades, orientados a teledetección urbana), hasta pocos kilómetros, para

el caso de los satélites meteorológicos de órbita geoestacionaria (como Meteosat o GOES). Finalmente, los datos se adquieren desde plataformas con órbitas estables, en algunos casos de carácter heliosíncrono, desde una misma altura y con los mismos sensores, lo que facilita la comparación de las imágenes en el tiempo y el análisis de tendencias, si bien la consistencia temporal requiere post-procesamientos más o menos sofisticados (Ju *et al.*, 2012; Zhu, 2017), por lo que la caracterización de la incertidumbre en estas series temporales continúa siendo un reto (Popp *et al.*, 2020).

Bases físicas de la teledetección global

Para que pueda abordarse un proceso de teledetección, esto es una detección a distancia, se precisa que exista una interacción entre el sensor y el objeto observado. Esa interacción es un flujo energético que proviene de ese objeto. En concreto, la teledetección estima parámetros de la superficie terrestre, el océano o la atmósfera a partir de captar la radiación electromagnética proveniente de esos medios. Tal radiación puede ser reflejada por la superficie, a partir de la luz solar o de una radiación propia del sensor (en este último caso, se habla de sensores activos, los más comunes son el Lidar y el Radar), pero también puede recogerse la energía que emiten las propias cubiertas, particularmente en el rango del infrarrojo térmico o de las micro-ondas. La figura 1 recoge las principales bandas del espectro en donde se detectan algunas de las variables de mayor interés para el estudio del cambio global.

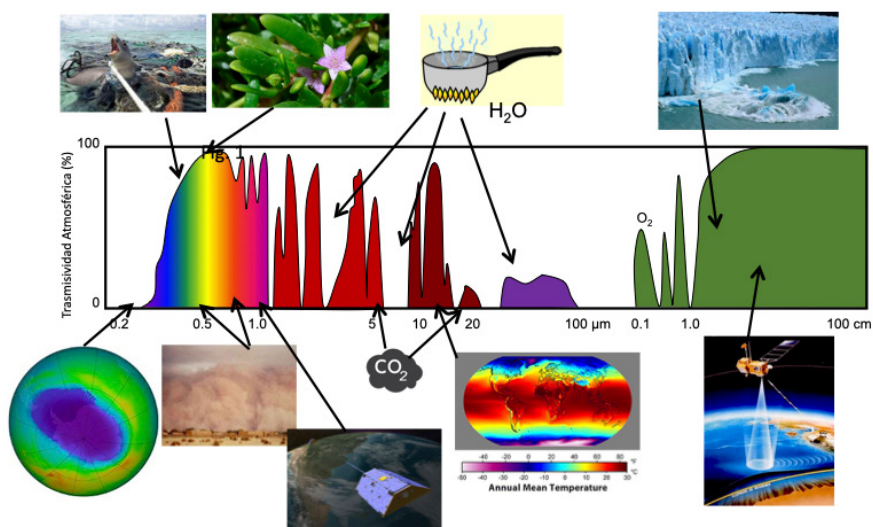


Figura 1: Regiones del espectro donde se detectan las principales variables de interés global.

En las bandas más cortas del espectro, por debajo de $0,4\ \mu\text{m}$, puede estimarse el grosor de la capa de ozono, a partir de la diferente absorción entre dos bandas del ultravioleta, una con alta y otra con baja absorción de este elemento. En el caso de la sonda TOMS (*Total Ozone Mapping Spectrometer*), incluida en la serie de satélites *Nimbus* desde 1978, el sensor recogía la energía reflejada en seis bandas espectrales, entre $0,31$ y $0,38\ \mu\text{m}$, lo que nos ha permitido realizar un seguimiento de la evolución de la capa de ozono desde fines de los años 70, más tarde extendida con otros satélites científicos, como el TOMS-EP estadounidense, el Meteor ruso o el ADEOS japonés. Nuevos sistemas de observación en el ultravioleta, como el Aura o el NOAA-20, han permitido continuar el seguimiento temporal de esta variable, crucial para el clima terrestre (Fahey y Hegglin, 2011).

Continuando hacia mayores longitudes de onda, en el azul se presenta el pico de absorción de la clorofila, en torno a $0,45\ \mu\text{m}$, por lo que esta banda resulta idónea para determinar la concentración de este pigmento en el agua. Puesto que la mayor densidad de clorofila supone mayor absorción de la radiación incidente, la reflectividad del agua en el azul está inversamente correlacionada con la concentración de este pigmento. Esta base física ha permitido usar la teledetección para hacer un seguimiento espacial y temporal de la presencia de fitoplancton y, en consecuencia, de la productividad biológica de los océanos, ya desde los años setenta (satélites *Nimbus* y *Seawifs*), continuada posteriormente por los satélites *Terra* y *Aqua* de NASA, y los europeos *Envisat* y *Sentinel-3* (Tilstone *et al.*, 2021).

En el visible e infrarrojo cercano también podemos determinar el espesor óptico de la atmósfera relacionado con la densidad de aerosoles y la nubosidad, generalmente por contraste con otras bandas del espectro en donde la dispersión atmosférica es muy pequeña (la región del infrarrojo de onda corta, SWIR, por encima de $1,6\ \mu\text{m}$). Además de estos algoritmos basados en observación multibanda, algunos sistemas de teledetección adquirieron imágenes con distintos ángulos casi simultáneamente, lo que permite estimar el espesor óptico de aerosoles (AOD) por la diferente dispersión que se produce entre la observación nadiral y la oblicua (de Leeuw *et al.*, 2013). Este es el fundamento del sensor MISR, a bordo del satélite *Terra* de NASA, o del ATSR y AATSR instalados en los satélites europeos ERS y *Envisat*, respectivamente, y del SLSTR, ahora activo en el *Sentinel-3* (Islam *et al.*, 2017).

El infrarrojo cercano (IRC, entre $0,7$ y $1,2\ \mu\text{m}$) es la banda espectral más idónea para analizar la dinámica global de la vegetación. También

aquí se emplea la observación multiespectral, comparando la reflectividad de las bandas azul o roja con el IRC. En las primeras la absorción de la clorofila es muy intensa y por tanto la reflectividad es muy baja, mientras la clorofila es prácticamente transparente en el IRC, lo que implica que la reflectividad de la vegetación sana sea mucho más alta en esa banda, siempre que las hojas no estén apelmazadas o senescentes. En consecuencia, cuanto mayor sea el contraste entre la reflectividad del infrarrojo y del rojo, la zona observada tendrá una actividad fotosintética mayor. Esta es la base física de los índices de vegetación, que son combinaciones aritméticas de la reflectividad visible-infrarrojo para realzar la señal de la vegetación respecto a otro tipo de coberturas. Los índices de vegetación se han empleado masivamente para analizar variaciones espacio-temporales de las cubiertas vegetales, tanto en el seguimiento de áreas forestales (Anaya *et al.*, 2009) como agrícolas (Haboudane *et al.*, 2002), siendo de gran relevancia para hacer estimación de rendimientos de cultivos (Kogan *et al.*, 2003). También la región del infrarrojo cercano suele seleccionarse para la operación de los sensores activos láser (*Lidar*), sobre todo para medir la estructura vertical de la vegetación (Aragoneses *et al.*, 2024; Riaño *et al.*, 2002). Con un enfoque muy distinto, en el infrarrojo cercano también operan los sensores orientados a medir las variaciones del campo gravitatorio terrestre, generalmente compuestos por dos satélites en tándem que permiten estimar las variaciones de las masas de hielo polares en función de su impacto sobre la atracción gravitatoria y, en consecuencia sobre la velocidad orbital y la separación entre los dos satélites (Shepherd *et al.*, 2020).

El infrarrojo de onda corta (SWIR) entre 1,2 y 2,5 μm es idóneo para detectar el contenido de agua de las cubiertas vegetales, ya que es la región donde aparecen más nítidas las bandas de absorción hídrica (Thomas *et al.*, 1971). Por ello, se ha empleado para estimar el contenido de humedad en la vegetación viva (Yebra *et al.*, 2013), así como el impacto de la sequía y el estrés hídrico en vegetación y cultivos (Canicattì y Vallone, 2024). En combinación con el infrarrojo cercano, el SWIR también es muy interesante para detectar píxeles quemados, como luego comentaré con más detalle.

En el infrarrojo medio (2,5 a 8 μm) pueden detectarse puntos de calor, por ejemplo, correspondientes a incendios y volcanes activos o a plantas de generación de energía o pozos de petróleo. En todos los casos, las anomalías térmicas se detectan por diferencia de emitancia radiativa de esos elementos frente a la señal térmica de las superficies próximas que estarán más frías. El contraste térmico de estos puntos muy calientes con el fondo es mayor en la región del infrarrojo medio que en el térmico, como conse-

cuencia del carácter no lineal de la relación entre temperatura y emitancia, bien definida en la ley de Planck (Kaufman *et al.*, 1990). Diversos algoritmos multicanal permiten detectar incendios activos con una precisión bastante considerable, ofreciéndose incluso como servicio en tiempo muy cercano al momento de la adquisición, como ocurre en el sistema FIRMS de la NASA (Davies *et al.*, 2023).

Asimismo, el infrarrojo medio incluye algunas bandas de absorción del CO₂ y otros gases de efecto invernadero, así como bandas de absorción de vapor de agua. Por esta razón, varios satélites meteorológicos cuentan con canales de observación en esta región del espectro, principalmente en 4,3 μm para el CO₂ (aunque también tiene otras bandas de absorción en 2,06 y 1,61 μm , en donde trabaja el satélite OCO2 de la NASA), y en 6,2 y 7,3 para el vapor de agua, que forman parte de los canales que observa el Meteosat. La banda de 7,2 μm también es útil para detectar la densidad de metano en la atmósfera, y se ha incluido en el Sentinel-5P, misión preparatoria de la ESA para los nuevos satélites meteorológicos europeos de órbita polar (Buchwitz *et al.*, 2018a). El primero de esta nueva generación de satélites, el Metop-SGA1, se lanzó el 13 de agosto de 2025.

En la región del espectro térmico (10 a 12 μm) pueden medirse la temperatura de la tierra y del océano, lo que permite detectar el movimiento de las corrientes marinas, además de estimar indirectamente la evapotranspiración de plantas y cultivos mediante la diferencia entre la temperatura del suelo y del aire (Seguin *et al.*, 1991).

En las microondas ($>0,1$ cm) puede estimarse la extensión y profundidad del hielo marino, así como la humedad del suelo a partir de la radiación pasiva de micro-ondas (Gruber *et al.*, 2019). Por su parte, los sensores activos radar (altímetros) pueden usarse en esta misma región para determinar la altura del nivel del mar (Stammer y Cazenave, 2017), una de las variables más relevantes en lo que se refiere a los impactos negativos previsibles del calentamiento de la tierra.

El principal problema de la teledetección espacial para generar información de las ECV es su corta trayectoria, de apenas 40 años, que dificulta el establecimiento de series temporales suficientemente largas para observar cambios de ciclos en el clima (como es sabido, suelen cifrarse a partir de series de 30 años). Aunque hay algunas imágenes disponibles ya desde la década de los 70 del pasado siglo, los sensores de mayor precisión comenzaron en la primera década de este, con lo que las estimaciones tienen

menor incertidumbre sólo a partir de los últimos 25 años (Lehmann *et al.*, 2020). Esto dificulta la detección de anomalías a largo plazo, por lo que es preciso combinar esta técnica con otras basadas en la observación de campo o los sensores terrestres (Buchwitz *et al.*, 2017).

Misiones de teledetección orientadas al cambio global

De la anterior sección podemos concluir que la observación global, periódica y sistemática que realizan las misiones de teledetección resulta imprescindible para mejorar nuestro conocimiento de la dinámica global, complementando las medidas realizadas por sensores terrestres, inventarios de campo o modelos biofísicos.

Por esta razón, las agencias especiales han impulsado misiones específicas para observar los principales procesos que afectan e impactan al sistema terrestre. Seguramente uno de los más destacados ha sido el programa *Earth Observing System (EOS)*, iniciado por NASA en 1999 con el lanzamiento del satélite Terra, que incluía diversos sensores de observación global, como el MODIS, orientado a variables terrestres; el CERES, dedicado al estudio del balance de radiación terrestre; el MISR, para estimaciones de algunos componentes verticales de la atmósfera, y el MOPITT, diseñado para estimar monóxido de carbono. En el marco del mismo programa se lanzó en 2002 el satélite Aqua, que incorporaba réplicas de algunos sensores disponibles en el Terra (MODIS y CERES), así como otros sensores orientados a variables atmosféricas y marinas, como el AIRS, dedicado a mediciones de la temperatura y la humedad de la atmósfera, el AMSU un radiómetro de micro-ondas para estimar las condiciones de la alta atmósfera; el HSB, otro radiómetro diseñado para medir humedad atmosférica y el AMSR-E, orientado a la estimación de la precipitación, vapor de agua, hielo y nieve, así como vientos superficiales marinos. De los sensores a bordo del programa EOS, sin duda el más empleado para estudios globales es el MODIS, que desde el año 2000 ha facilitado información crucial para generar series temporales consistentes de una buena cantidad de ECVs, con resoluciones entre 250 y 1000 m, y cobertura diaria de todo el planeta (Justice *et al.*, 2002).

Además de estas misiones, NASA ha puesto en órbita otros satélites de gran interés para el estudio del cambio global, como el ICESAT-1 y 2 que incorporaban sistemas láser para estimar con precisión variación de alturas en el terreno, aunque fueron diseñados inicialmente para la medición del volumen de hielo y nieve, también se han empleado para estimar alturas

del dosel vegetal (Lefsky *et al.*, 2005); AURA, dedicado a variables atmosféricas; CLOUDSAT, para el seguimiento del estado y composición de las nubes; las tres misiones OCO (1,2 y 3), dirigidas a estimar la densidad de CO₂ en la atmosfera, y las dos misiones GRACE (en colaboración con Francia) para medir las variaciones de la gravedad terrestre relacionadas con el volumen de hielo y nieve en los casquetes polares y los glaciares, además de subsidencias debidas a cambios en el almacenamiento de agua subterránea (Shepherd *et al.*, 2020). Por su novedad tecnológica y por la participación de científicos españoles en la misión, es interesante también subrayar el satélite SMOS (*Soil Moisture Ocean Salinity*), lanzado por NASA en 2015, dedicado a medir la humedad del suelo y la salinidad en el agua a partir de un radiómetro pasivo de micro-ondas y un Radar (Al-Yaari *et al.*, 2014; Rodríguez-Fernández *et al.*, 2019).

También en el ámbito estadounidense, es destacable la actividad de la agencia NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), la encargada de la distribución de datos meteorológicos y oceanográficos en el país, que lanzó en los años setenta su primera familia de satélites de órbita polar, también denominados NOAA, con un espectro-radiómetro de ámbito global (el AVHRR) que ha permitido obtener imágenes de todo el planeta desde 1981 a una resolución regional (en torno a 1 km² en el nadir), todavía adecuada para la estimación de cambios de larga trayectoria, lo cual resulta clave para el estudio climático (Otón *et al.*, 2021b; Song *et al.*, 2018). A fines de 2017 se inició con el lanzamiento del NOAA-20 la nueva familia de satélites meteorológicos polares de la agencia, que incorporan sensores similares a los del programa EOS, pero en una misión operativa que garantiza su continuidad futura. En concreto, resulta especialmente interesante para dar continuidad a los productos terrestres, marinos y atmosféricos generados con el MODIS, el sensor VIIRS, que cuenta con 26 canales espectrales y una resolución en el nadir entre 375 y 750 m. El sensor se incluyó por vez primera en 2013 en una misión preparatoria, denominada NPP-Suomi, incorporándose ya a una misión operativa con el lanzamiento del NOAA-20, y complementado ahora por el NOAA-21, lanzado en 2022. Junto al sensor VIIRS los nuevos satélites NOAA incorporan diversos instrumentos para la medición de variables climáticas: el ATMS una sonda de micro-ondas para variables atmosféricas, el OMPS para analizar la capa de ozono, y el CrIS una sonda de infrarrojo para medir temperatura y humedad atmosférica. Finalmente, la agencia NOAA también se encarga de gestionar los satélites meteorológicos geoestacionarios, situados a 36,000 km de la Tierra, en una órbita que les permite observar siempre la misma zona, por tanto, a intervalos más frecuentes que los satélites polares. De la serie geoestacionaria

estadounidense, merecen destacarse los GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), con dos plataformas activas, situadas en los meridianos 75° y 137° W, para cubrir el conjunto del país, que adquieren imágenes en el visible, infrarrojo cercano, medio y térmico a una resolución entre 0,5 y 2 km cada 15 minutos.

Finalmente, la aportación estadounidense al estudio del cambio global se complementa con los satélites de resolución media, que cubren a mayor resolución espacial (hasta 30 m), aunque con peor resolución temporal (en torno a 16 días) la superficie terrestre. De entre estas misiones, resulta obligada la referencia a la serie LANDSAT, que ya cuenta con 9 satélites, activos desde 1972, cuando se lanzó la primera plataforma. Los tres primeros LANDSAT tenían cámaras de peor resolución (80 m), frente a las que se incorporaron a partir del LANDSAT-4 lanzado en 1982. El sensor que incorporaba esa misión, denominado THEMATIC MAPPER (con 30 m de pixel y siete canales espectrales), ha estado activo desde ese año hasta el momento actual, extendiéndose su misión con nuevas versiones (el actual se denomina OLI), pero esencialmente con las mismas características, lo que permite realizar un seguimiento de largo recorrido (más de 50 años) de múltiples procesos locales y regionales (Zhu *et al.*, 2019). Una interesante aplicación, en este sentido, es la desarrollada por Google, denominada *Earth Engine* (Gorelick *et al.*, 2017) que pone a disposición pública la serie temporal completa de datos LANDSAT (junto a otros sensores), para que los usuarios puedan ejecutar sus propias rutinas, en lugar de tener que descargar los datos a sus ordenadores locales. Esto ha permitido desarrollar productos regionales y globales a la resolución que proporcionan los datos LANDSAT (Bastarrika *et al.*, 2024; Long *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2019).

La Agencia Espacial Europea (ESA) ha hecho también un gran esfuerzo para estimar variables de interés global, desarrollando misiones experimentales para complementar la información que generaban otras agencias. Resulta especialmente destacado en este sentido el programa *Climate Change Initiative (CCI)*, activo desde 2010, que ha permitido desarrollar series de datos globales y consistentes sobre distintas ECV. En la primera fase se abordaron 13 variables: aerosoles, nubes, gases de efecto invernadero, ozono, glaciares, hielo continental, cobertura del suelo, fuego, humedad del suelo, color del océano, hielo marino, nivel del mar y temperatura del océano (Hollmann *et al.*, 2013), ampliándose con otras 10 en la segunda fase del programa, activa desde 2017. El programa CCI supone la principal aportación de la ESA al programa GCOS y ha supuesto una enorme producción científica en torno a la generación e integración

de variables climáticas a partir de observaciones de teledetección (<https://climate.esa.int/en/about-us-new/climate-change-initiative/>, último acceso el 29 de agosto de 2025).

En cuanto al segmento espacial, la ESA, en colaboración con la Unión Europea, ha puesto en órbita en la última década varios satélites de observación de la tierra en el marco del programa Copérnico, asociados a determinados servicios de información geográfica (atmósfera, tierra, océano, seguridad, etc.). Uno de ellos está orientado específicamente al cambio climático (*Copernicus Climate Change Service*, C3S). El programa Copérnico incluye el desarrollo y lanzamiento de seis familias de satélites de observación de la tierra, denominados centinelas (*Sentinels*). Hasta ahora se han lanzado 14 satélites de este programa, agrupados en misiones específicas, en ocasiones con dos satélites funcionando simultáneamente: los Sentinel-1A, B y C, equipados con un radar de apertura sintética avanzado; los Sentinel-2A,B y C, alojando cámaras multispectrales de alta resolución; los Sentinel-3A y B, de observación global, incluyendo sensores ópticos y térmicos de resolución media; el Sentinel-5P, orientado a medir la calidad del aire y la concentración de GEI en la atmósfera (ozono, metano, óxidos de nitrógeno, etc.), con el Sentinel-5A como parte del METOP de segunda generación y Sentinel-6, equipado con un altímetro radar para medir las variaciones de la superficie oceánica. Sentinel-4 se ha desarrollado en cooperación con la agencia meteorológica EUMETSAT, y renombrado por ésta como Meteosat de Tercera Generación, MTG.

Estas misiones de la ESA aprovechan la experiencia de los satélites de observación de la Tierra que esta agencia lanzó en las tres décadas anteriores, que se orientaron principalmente a la teledetección activa de micro-on-das, con los satélites ERS-1 y 2 (lanzados en 1991 y 1995), y ENVISAT (2003), todos ellos equipados con un radar de apertura sintética de alta resolución, si bien también disponían de espectro-radiómetros para medir la reflectividad y temperatura a resolución más baja (entre 300 y 1000 m).

Al igual que en EE.UU., la agencia meteorológica europea ha sido bastante activa en el lanzamiento de satélites para el estudio del cambio global, particularmente de variables climáticas. En 1977 EUMETSAT lanzó el primer satélite geoestacionario, denominado Meteosat, que es la contraparte europea de la misión GOES. Desde entonces se han puesto en órbita doce satélites más, agrupados en tres generaciones, que proporcionan información meteorológica crítica para Europa y África. Actualmente, tres satélites están trabajando en paralelo: uno en longitud 0°

(el principal), otro en órbitas cercanas (para respaldo y para mejorar la observación temporal) y el último en 57° Este. La primera generación de satélites Meteosat incorporaba un espectro-radiómetro con tres bandas en el visible, infrarrojo medio y térmico, con una resolución espacial en el Ecuador de 2,5 km para el primero y 5 km para los dos últimos. En 2002, se lanzó el primero de los denominados “Meteosat de segunda generación”, que incluyeron mejoras notables con respecto a los anteriores, con dos instrumentos: el GERB (*Geostationary Earth Radiation Budget*), para medir el balance de radiación terrestre, y el SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager*) que observa la Tierra en 12 canales espectrales cada 15 min, con una resolución espacial de hasta 1 km en la banda VIS y 3 km en los demás canales. El primer satélite de la nueva familia Meteosat, denominada “Meteosat de Tercera Generación” (MTG) se lanzó a finales de 2022. El sensor más interesante es el *Flexible Combined Imager* (FCI), que escanea cada 10 min el disco terrestre visible desde la longitud donde se sitúa, llegando a 2,5 min en las latitudes europeas. El sensor cuenta con 16 bandas espectrales, con una resolución espacial mayor que SEVIRI (de 0,5 a 2 km según los canales). Este sensor avanzado proporciona capacidades adicionales para aplicaciones atmosféricas, marinas y terrestres que antes solo se podían conseguir con satélites polares (Holmlund *et al.*, 2021). Además del FCI, el MTG incluye un sensor dedicado a detectar la actividad de rayos, el *Lightning Imager*, compuesto por cuatro cámaras que monitorizan los relámpagos a una frecuencia muy alta (1000 imágenes/seg).

En cuanto a los satélites polares, EUMETSAT lanzó en 2006 el primer satélite METOP, equipado con un sensor similar al AVHRR, además del IASI (*Infrared Atmospheric Sounding Interferometer*) orientado a medir perfiles de temperatura y humedad atmosférica, y del GOME-2 (*Global Ozone Monitoring Experiment*) que mide concentraciones atmosféricas de ozono y otros gases traza (óxidos de nitrógeno, dióxido de sulfuro, vapor de agua y oxígeno). En 2012 y 2018 se lanzaron el METOP-B y C, respectivamente, que extienden las observaciones del precedente con los mismos sensores. En agosto de 2025 se lanzó el primero de la segunda generación de satélites METOP, que tiene características orbitales similares a los anteriores, pero incorpora nuevos sensores para medir con más precisión los perfiles de temperatura, vapor de agua y gases traza (IASI, AMSU), además de un espectro-radiómetro avanzado (con más canales y mejor resolución que el AVHRR), un sensor multiangular para medir mejor el espesor de aerosoles, y nuevos sensores para medir precipitación y contenido y propiedades del hielo en las nubes.

Otras agencias espaciales también están realizando un importante esfuerzo para mejorar nuestro conocimiento del sistema terrestre. Mención especial merecen los sensores de la agencia japonesa JAXA para el seguimiento del CO₂ y el metano atmosférico (Gosat-1 y 2), y los de las agencias meteorológicas china, india y rusa, que han lanzado satélites geoestacionarios polares complementarios a los que pusieron en órbita las agencias norteamericana y europea. De especial interés es el satélite meteorológico chino Fen-Yun, que ha continuado las misiones de los primeros NOAA, con un sensor equivalente al AVHRR, y el geoestacionario japonés Himawari, que resulta muy interesante, además de sus funciones meteorológicas, para detectar incendios y otros focos de calor (Hall *et al.*, 2023; Hally *et al.*, 2019).

Tendencias presentes y futuras

La gran cantidad de información que generan los satélites de observación de la Tierra está ya permitiendo enriquecer notablemente nuestro conocimiento del planeta. Las tendencias del inmediato futuro apuntan a un fortalecimiento de nuestra capacidad de detectar cada vez más variables y a mayor nivel de resolución espacial y temporal. Entre las tendencias que podemos preluir para las próximas décadas estarían las siguientes:

1. Mayor relación entre observaciones y modelos, el creciente uso de los algoritmos de inteligencia artificial (IA) permite vislumbrar una mayor interacción entre modelos y observaciones. Estas resultan claves para parametrizar y validar los modelos existentes, pero también se avanza en la posibilidad de enriquecer los propios modelos con las capacidades predictivas de la IA, más allá de la base física de los mismos. Esto, junto a la creciente capacidad de cálculo de los ordenadores, hará cada vez más factible construir escenarios climáticos a mayor resolución y con menor incertidumbre (Notz, 2015).
2. Creciente protagonismo de las estimaciones de la incertidumbre. Como es bien sabido, la incertidumbre es un componente básico de cualquier estimación científica, de modo evidente de las estimaciones meteorológicas y climáticas (Hersbach *et al.*, 2020; Roebeling *et al.*, 2025). Si bien en las primeras décadas del uso de la teledetección, el cálculo de la incertidumbre no se consideraba prioritario, en los últimos años se ha puesto un mayor énfasis en que la incertidumbre acompañe a cualquier estimación de una variable climática (Aragoneses *et al.*, 2025; Brennan *et al.*, 2019), lo que permite establecer in-

tervalos de confianza en las estimaciones y asegurar una consistencia entre observaciones independientes de determinados procesos (Popp *et al.*, 2020).

3. Nuevas misiones. Como hemos visto, las agencias especiales están diseñando misiones que refuercen nuestro conocimiento del sistema terrestre y de los cambios globales que está experimentando. Estas misiones siempre tienen un componente de “legado” que les permite enlazar con los sensores precedentes para no perder la continuidad temporal de las estimaciones, pues resulta clave disponer de series suficientemente largas de datos para poder detectar tendencias y anomalías (Hermosilla *et al.*, 2015; Zhu, 2017). También parece relevante subrayar que esas misiones se diseñan en colaboración entre distintas agencias especiales, lo que facilita compartir sinergias en conocimiento y experiencia en investigación espacial. Por ejemplo, es clave la coordinación entre NASA y ESA en lo que se refiere a nuevas misiones científicas, o entre NOAA y EUMETSAT para el diseño de satélites meteorológicos polares y geoestacionarios que tengan características afines para poder complementar las órbitas (GCOS, 2022b). De esa forma se optimizan las inversiones y se pueden extender en el tiempo y en el espacio los algoritmos empleados para estimar las variables objetivo.
4. Datos abiertos. La colaboración internacional se basa en la confianza de que los datos detectados por teledetección se usarán en beneficio de la sociedad en su conjunto, también de la comunidad de naciones. Por esta razón, todas las misiones de teledetección global, a partir del programa MODIS, han facilitado el acceso libre y gratuito a los datos, no solamente a las observaciones brutas, sino también a las variables derivadas (temperatura del suelo, clorofila del agua, cobertura de nieve, áreas quemadas, etc.). Esta política de distribución de datos que inauguró el sensor MODIS y continuó posteriormente el USGS con la puesta en el dominio público de la serie histórica LANDSAT, se ha mantenido en otras agencias, como la ESA, que distribuye gratuitamente todas las imágenes adquiridas por los satélites Sentinel. Sería conveniente que esta política abierta de EE.UU. y Europa se mantenga en el futuro, ante las incertidumbres actuales, y que se extienda a otras agencias espaciales que todavía no garantizan el mismo acceso público y gratuito a los datos de sus misiones espaciales (China, India, Rusia...). Además, para que el acceso sea operativo, los datos deberían estar disponibles en formatos estándar y propiamente documentados (por ejemplo, siguiendo la iniciativa europea Inspire: Bartha y Kocsis, 2011).

PRINCIPALES VARIABLES DE INTERÉS GLOBAL OBSERVABLES POR TELEDETECCIÓN

Metodologías para generar información climática por teledetección

Como hemos visto, a partir de la información que recolectan los distintos satélites de observación de la Tierra podemos generar series temporales que nos permiten analizar tendencias y anomalías de variables críticas para entender el funcionamiento terrestre. Este es el objetivo de varios programas internacionales auspiciados por GCOS y por las distintas agencias espaciales. Ya he mencionado algunas de las misiones más interesantes para esta observación global. Aquí me detendré a comentar las principales metodologías que se emplean para generar variables de interés global, de modo particular las ECV.

De acuerdo a diversos autores, la teledetección permite estimar tres tipos de variables, dependiendo de si se calculan directa o indirectamente a partir de las mediciones que realizan los distintos sensores (Jensen, 2000):

- Variables primarias. Se trata de los parámetros que están asociados directamente con la magnitud física medida por teledetección y, que, por tanto, pueden extraerse directamente de las medidas del sensor. La variable primaria más común en teledetección es la radiancia, cuando se detecta el flujo de radiación que proviene del objeto observado, ya sea en el espectro solar, térmico o las micro-ondas. También puede medirse el tiempo, cuando el sensor almacena el desfase temporal entre el envío y la recepción de un cierto flujo. Este es el caso de los sensores activos de teledetección, como los altímetros Lidar o Radar, que operan en el espectro solar y micro-ondas, respectivamente.
- Variables secundarias. Son aquellos parámetros que se relacionan con las interacciones entre la radiación y el objeto observado, modificando la señal de las variables primarias (la radiancia o el tiempo). Por ejemplo, sabemos que el contenido de agua o clorofila afecta a la radiancia espectral de una superficie vegetal en el espectro solar, absorbiendo la irradiancia entrante en distintas bandas y reduciendo así la reflectividad de esa cubierta en tales bandas (el SWIR para el agua, el visible para la clorofila). Por tanto, la ausencia o disminución de ese parámetro afectará a la radiancia reflejada y permitirá estimar su dinámica a partir de la teledetección multitemporal. Hay muchas otras variables que están estrechamente relacionadas con la forma en que una cobertura refleja o emite energía, como el área de las hojas, la distribución de los ángulos

foliares o la materia seca para las plantas; el contenido mineral, la rugosidad o el contenido de agua para los suelos; o la turbidez, la salinidad y la acidez para el agua. En cuanto a las modificaciones del tiempo de retorno, la variable más relevante es la altura de los objetos, que cambia las distancias objeto-sensor que miden los equipos Lidar o Radar y por tanto les permiten calcular la dimensión vertical de la superficie observada.

- Finalmente, un tercer grupo de variables son aquellas que no afectan directamente a la radiación observada, pero que están relacionadas con las variables secundarias. Para estimar estas variables, se requiere un cierto nivel de abstracción. Por ejemplo, podemos determinar cuándo la planta está estresada a partir de su temperatura, agua o contenido de clorofila, pero el estrés en sí no se mide directamente. De la misma manera, podemos identificar la cobertura del suelo de un área particular por su reflectividad o textura en varias longitudes de onda, pero el tipo de cobertura en sí no se mide directamente a partir de imágenes satelitales.

Cualquier usuario nuevo debe tener en cuenta las ventajas y limitaciones de los datos de observación de la Tierra para desarrollar una aplicación particular. Obviamente, esta técnica no es una panacea para todos los requisitos de información ambiental. Su abanico de aplicaciones crece constantemente gracias a las innovaciones en la resolución de los sensores y en los métodos de procesamiento, hoy reforzadas por la aplicación de las potencialidades de la IA. Actualmente, algunas aplicaciones pueden considerarse bastante maduras, como la determinación de la cobertura del suelo, la agricultura de precisión, la previsión meteorológica, la exploración minera, la detección de incendios, la estimación de la temperatura, el ozono, el color del océano, la nieve o el monitoreo de inundaciones, mientras que otras todavía están en fases experimentales, como el cálculo de biomasa vegetal, los inventarios del volumen de nieve o la predicción de terremotos. Finalmente, hay otros proyectos que todavía pueden considerarse inviables, ya sea por el nivel de precisión requerido (inventarios de ganado o fauna silvestre, estimaciones demográficas) o por una resolución espacial o temporal insuficiente (control del tráfico).

Para el ámbito concreto del cambio global, la teledetección espacial, como hemos indicado, es una fuente de información clave para estimar múltiples variables. Las técnicas para extraer esta información son variadas. Sin entrar ahora en los detalles más técnicos, podemos clasificar los métodos de análisis en cuatro grupos:

1. Clasificación temática

Este análisis implica asignar a cada elemento de la imagen una categoría determinada (cobertura del suelo, tipo de cultivo, área quemada, superficie cubierta de nieve, etc.) mediante interpretación visual o digital. Este enfoque tiene como objetivo etiquetar cada píxel con la clase temática más adecuada. Esta ha sido la aplicación más común de la interpretación de imágenes, como herencia directa de la fotointerpretación clásica. Conceptualmente, este enfoque implica convertir la escala de intervalo original de la imagen en una escala categórica. El análisis visual es adecuado para este objetivo, ya que el intérprete humano puede integrar una amplia variedad de criterios para diferenciar superficies vecinas (Chuvieco, 2020, cap. 5). También se pueden utilizar procedimientos digitales para el mismo objetivo clasificando la imagen en función de diferentes técnicas estadísticas que tienen como objetivo comparar cada elemento de la imagen con un conjunto de patrones de referencia (Blaschke *et al.*, 2014; Bruzzone y Fernández Prieto, 2000; Heydari y Mountrakis, 2019; Tso y Mather, 2001). Para obtener algunas ECVs se han utilizado distintos métodos de clasificación, como es el caso de la cobertura del suelo (Bontemps *et al.*, 2012; Song *et al.*, 2018), la cartografía de área quemada (Chuvieco *et al.*, 2022; Lizundia-Loiola *et al.*, 2022), la detección de glaciares (Leclercq *et al.*, 2014), o de láminas de agua (Carrea *et al.*, 2023).

2. Generación de variables biofísicas

Un segundo objetivo en la interpretación de imágenes de teledetección se orienta a estimar la distribución espacial de una variable biofísica, a partir de la relación directa o indirecta que tenga con la energía detectada por el sensor. En este caso, el objetivo no es obtener categorías, sino convertir valores digitales brutos en una variable biofísica objetivo (temperatura, espesor del hielo, humedad de la vegetación, etc.). Esto permite aprovechar mejor la naturaleza cuantitativa de las mediciones satelitales, ya que dichas mediciones tienen un significado físico: no son simplemente una expresión de las diferentes tonalidades de la imagen, sino más bien una medición cuantitativa de una señal radiométrica. Por ejemplo, adquirir una imagen en el espectro térmico es similar a medir temperaturas de superficie a intervalos regulares, siendo la distancia entre mediciones el tamaño del píxel. Considerada de esta forma, entendemos que con observaciones satelitales puedan obtenerse –incluso con satélites geoestacionarios, de resolución grosera– mediciones de temperatura de superficie con una densidad mucho mayor que la de cualquier red de observación terrestre. Por lo tanto, proporcionan una medición espacialmente más representativa de la

variación térmica del área detectada (y de aquellas variables vinculadas a esa variabilidad). Esto también se aplica a otros parámetros, como la altura del océano, el contenido de clorofila o la turbidez del agua.

Para obtener las variables biofísicas es clave establecer una función que permita convertir las mediciones de satélite al parámetro objetivo. Para ello se emplean modelos empíricos o de base física (Yebera *et al.*, 2008). Cualquier modelo para estimar una variable debe basarse en una relación entre el parámetro que se está estimando y las radiancias medidas por el sensor. Por ejemplo, la proporción de cobertura verde se puede estimar a partir de la reflectividad del rojo e infrarrojo cercano, ya que sabemos que los pigmentos de la vegetación tienen una fuerte absorción en la radiancia en la primera banda, pero no en la segunda. Este comportamiento es bastante único con respecto a otras coberturas terrestres y, por lo tanto, se puede utilizar una combinación de esas dos bandas para estimar la actividad fotosintética o la densidad de la vegetación. Sin embargo, esa estimación cuantitativa requiere modelos que conviertan la reflectividad en el parámetro vegetal de interés, controlando otros factores que también afectan la reflectividad, como las condiciones de iluminación, el índice de área foliar (LAI) o el color del suelo. Estos modelos pueden derivarse empíricamente o pueden basarse en modelos físicos. Los primeros se construyen a partir de *observaciones in situ*, que se toman en el momento en que se adquiere la imagen. Posteriormente, se extraen las observaciones satelitales de las mismas coordenadas donde se tomaron las medidas de campo. Con estos dos conjuntos de valores (terrestre y satelital), se genera un modelo estadístico para relacionarlos. Los métodos más comunes utilizan técnicas de regresión, ya sea a partir de ajustes de mínimos cuadrados (Chuvieco *et al.*, 2004; Koutsias y Karteris, 1998; Morissette *et al.*, 2005; Silva *et al.*, 2004) o de otros enfoques, como la regresión ponderada geográficamente (Martínez *et al.*, 2013), la basada en árboles aleatorios (*Random Forest*, RF) (Belgiu y Drăguț, 2016; Ramo *et al.*, 2018), o en redes neuronales (Baret, 1995; Fang y Liang, 2003). Los modelos empíricos son de base local, sencillos de ajustar y generan resultados de precisión conocida, ya que se comparan directamente con los datos observados y por tanto, podemos calcular los errores de la estimación. Sin embargo, estos modelos son muy dependientes de las medidas locales, que necesitan ser planificadas con antelación para que coincidan con las adquisiciones de los sensores, son costosas y difíciles de generalizar, con un alcance limitado a la zona donde se han tomado las medidas.

Los modelos deductivos tratan de establecer relaciones de base física entre la variable objetivo y las medidas satelitales. Por lo tanto, la utilidad

del modelo se extiende más allá de un solo sitio, de una imagen concreta o de un período de tiempo determinado (Strahler *et al.*, 1986). Los más comunes son los modelos de transferencia radiativa (RTM), que estiman el parámetro objetivo a partir de la absorción y la dispersión de los diferentes componentes que afectan a la reflectividad, la temperatura o la retrodispersión (Asner, 2000; Gao *et al.*, 2003; Jacquemoud, 1990; Verhoef y Bach, 2003). Los RTM se utilizan ampliamente para estimar parámetros de la vegetación, como la clorofila de las hojas (Zarco-Tejada *et al.*, 2004), el contenido de humedad de las plantas (Jurdao *et al.*, 2013; Yebra *et al.*, 2013), el LAI (Koetz, 2005), la severidad de los incendios (Chuvieco *et al.*, 2006; De Santis y Chuvieco, 2007) o la radiación fotosintéticamente activa absorbida por la planta (Shabanov *et al.*, 2003), pero también se emplean para estimar parámetros atmosféricos u oceánicos, como la profundidad óptica de los aerosoles (de Leeuw *et al.*, 2013; Dubovik y King, 2000), el monóxido de carbono (Adams *et al.*, 2019; Zheng *et al.*, 2023), el ozono (Fahey y Hegglin, 2011), el dióxido de carbono (Coopmann *et al.*, 2020) o el color del océano (Tilstone *et al.*, 2021). Estos modelos físico-matemáticos también tienen sus limitaciones. Al construir el modelo se tiende a simplificar relaciones entre los elementos de la cubierta que son altamente complejos, lo que lleva a introducir asunciones que pueden resultar poco realistas. Por ejemplo, en los modelos de reflectividad de las plantas, se asume que el dosel es uniforme en una o dos capas, una distribución isotrópica de hojas, una superficie plana, una reflectividad lambertiana y un cierto fondo de suelo. Por estas razones, los RTM son complejos de calibrar y es necesario contrastarlos con observaciones para descubrir sus debilidades e imprecisiones, haciéndolos más comparables con el mundo real (Combal *et al.*, 2002; Yebra y Chuvieco, 2009). A pesar de estas dificultades, el enfoque basado en RTM es mucho más sólido que el empírico para la estimación de variables globales, pues generar ecuaciones empíricas de territorios muy amplios es poco realista.

También existen muchos enfoques intermedios que involucran tanto modelos teóricos como empíricos, a veces etiquetados como modelos semi-empíricos. Estos suponen un modelado físico previo de la variable estimada, pero con ajustes empíricos realizados mediante regresiones locales. Un ejemplo de esto es el modelo de van Leeuwen *et al.* (1994), quienes utilizaron mediciones de campo locales basadas en una campaña de campo para ajustar y afinar la recuperación de parámetros biofísicos de un modelo RTM. Otros ejemplos involucran el uso de índices de vegetación con una relación teórica ya demostrada con las variables que se están estimando (Danson *et al.*, 1995). Las redes neuronales y las máquinas de vector soporte (SVMs) también pueden considerarse en esta clase mixta de métodos

de recuperación, ya que son esencialmente técnicas de aprendizaje automático inductivo (Yang *et al.*, 2007).

3. Detección de cambios

En este caso, la interpretación está orientada a analizar qué ha cambiado entre dos o más imágenes adquiridas con un cierto intervalo de tiempo. Los satélites observan la Tierra de forma periódica, con una frecuencia que depende del campo de visión del sensor y las características orbitales. Por lo tanto, la teledetección es una herramienta ideal para seguir fenómenos dinámicos, lo que es clave en muchos procesos ambientales (crecimiento urbano, deforestación, desecación de humedales, inundaciones, etc.). A partir de imágenes de teledetección se pueden analizar dos dimensiones del cambio temporal: tendencias estacionales y variaciones de la cobertura terrestre. En el primer caso, el intérprete intenta seguir los cambios fenológicos asociados con la dinámica de la vegetación a lo largo del año (Willis, 2015). Este contraste estacional puede ser muy útil para mejorar la discriminación de ciertas categorías objetivo, al incluir imágenes de diferentes períodos del año en el proceso de clasificación (Latifovic *et al.*, 2004; Lo *et al.*, 1986). Un análisis de separabilidad estacional ayuda a identificar qué estación es más apropiada para discriminar coberturas terrestres particulares (Schriever y Congalton, 1995). El análisis estacional también puede utilizarse para monitorear la regeneración de la vegetación después de una perturbación importante (incendio, tormentas de viento, huracanes, etc.), o como resultado de variaciones climáticas (Alcaraz-Segura *et al.*, 2010; Fraser *et al.*, 2003; Goetz *et al.*, 2005), de cara a seguir tendencias, lo que resulta clave en el análisis de los impactos del cambio climático.

El segundo enfoque temporal tiene como objetivo detectar cambios en la cobertura terrestre, causados ya sea por eventos catastróficos de corta duración (inundaciones, terremotos, erupciones volcánicas, deslizamientos, etc.) o por fenómenos de más largo recorrido (expansión urbana, erosión del suelo, desertificación, etc.). Las imágenes adquiridas en dos períodos de referencia (antes y después del evento repentino o separados por un lapso de tiempo fijo) se comparan visual o digitalmente (Gopal y Woodcock, 1996; Lucas *et al.*, 1993; Sader y Winne, 1992; Zhan *et al.*, 2002). Lo más común es que las imágenes para el análisis de detección de cambios se adquieran en condiciones de observación similares (cercanas en el mismo año o en la misma estación de diferentes años) para evitar identificar como cambios de cobertura aquellas transformaciones causadas por diferentes condiciones fenológicas.

La detección de cambios se puede realizar sobre imágenes clasificadas o sobre parámetros biofísicos, empleando técnicas muy variadas (Chuvieco, 2020, cap. 7.3). Previo a estas técnicas es preciso asegurarse que las imágenes estén muy bien coregradas, para evitar detectar como cambios lo que en realidad serían desplazamientos entre píxeles, y que están calibradas a parámetros biofísicos (reflectividad, temperatura, altura...), pues de otra manera la comparación entre datos brutos sería inconsistente. Una vez ajustadas geométrica y radiométricamente, pueden aplicarse métodos de comparación muy variados, incluyendo técnicas de intervalo (restas, cocientes, regresión, componentes principales, etc.) y técnicas basadas en clasificación, que permiten establecer una matriz de cambios entre dos o más fechas (Pontius *et al.*, 2004). Entre las técnicas de variación continua, resulta interesante citar la metodología denominada Landtrend (Kennedy *et al.*, 2010), que permite clasificar trayectorias de cambio a partir de imágenes de media y alta resolución, analizando distintos patrones de perturbación (Viana-Soto *et al.*, 2020; White *et al.*, 2017).

4. Patrones espaciales

Finalmente, las imágenes satelitales también pueden considerarse como una representación del mosaico del paisaje. Desde este punto de vista, la imagen puede usarse para medir propiedades espaciales de objetos dentro del área observada: tamaño, conectividad, forma, etc. (Frohn, 1998). En las últimas décadas, varios estudios han enfatizado la importancia de considerar los impactos de los patrones espaciales en procesos ambientales críticos, como la distribución y alteración de especies, tendencias de regeneración y ciclos de sucesión (Farina, 1998; Forman y Godron, 1986; Haines-Young *et al.*, 1993). Las imágenes de satélite proporcionan información crítica para este enfoque de ecología del paisaje, ya que facilitan una medida cuantitativa del patrón espacial de las cubiertas terrestres (Hoffer, 1994; Wilkie y Finn, 1996). Los temas de aplicación pueden ser muy diversos, incluyendo la idoneidad del hábitat para distintas especies (Congalton *et al.*, 1993; Longmire y Stow, 2001), la propagación espacial de ciertas alteraciones, como las causadas por incendios o plagas (Hargrove *et al.*, 2000; Muchoki, 1988; Sample, 1994), las relaciones entre el patrón del paisaje y las enfermedades transmitidas por vectores biológicos (Hay *et al.*, 2000), y los estudios de biodiversidad (DeFries, 2013; Hansen *et al.*, 2001; Rocchini *et al.*, 2016)). Además, otros estudios se han centrado en analizar las estructuras espaciales a diferentes escalas espaciales y sus relaciones con la resolución espacial (Quattrochi y Goodchild, 1997; Woodcock y Strahler, 1987).

Variables climáticas observadas por teledetección

Las distintas metodologías de teledetección revisadas en la anterior sección permiten obtener información global de gran interés, complementando la que generan los sensores terrestres o los modelos climáticos. Complementar esos modelos con observaciones resulta clave para mejorar su parametrización y obtener estimaciones de mayor confianza. Como hemos visto, esta es la principal motivación del énfasis que las distintas agencias espaciales están poniendo en generar series largas y consistentes de ECVs a partir de teledetección. En ese ámbito se sitúa el programa CCI de la ESA, que desde 2010 promueve la generación de distintas ECVs (actualmente 23) a partir de datos de teledetección (Fig. 2). Aunque el programa tiene un contenido científico e investigador, algunas de esas variables ya se han trasladado a una cadena de producción operativa en el marco del servicio Copernico de cambio climático (<https://climate.copernicus.eu/> último acceso agosto de 2025).

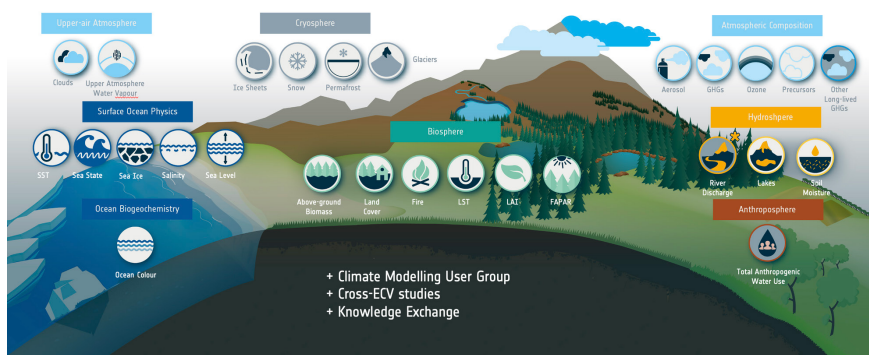


Figura 2: Lista de ECVs actualmente incluidas en el programa ESA CCI. (<https://climate.esa.int/en/about-us-new/climate-change-initiative/Climate-Change-Initiative/>, último acceso Marzo 2025).

A modo de ejemplo del tipo de información que puede generarse por teledetección, he seleccionado tres variables, como representativas de los tres ámbitos temáticos en los que trabaja el programa CCI: atmósfera, océano y tierra.

En el primer apartado he seleccionado la variable de gases de efecto invernadero (GEI), por su importancia para entender la evolución del sistema climático. Esta variable aborda la estimación de la densidad de dióxido de carbono y metano en la atmósfera. Las primeras estimaciones de CO_2 y CH_4 se realizaron partir de los sensores SCIAMACHY, instalado en el

satélite europeo ENVISAT, y del TANSO-GOSAT japonés, y más recientemente a partir del europeo Sentinel-5P y de las misiones OCO2 y 3 de la NASA. El modelo físico-matemático para estimar las concentraciones de los GEI parte de la información multispectral adquirida por los sensores citados, que incluye bandas de absorción de los gases objetivo, así como de información atmosférica estimada por modelos climáticos para reducir la incertidumbre de la estimación. Se resuelve el RTM, considerando tanto la contribución de los gases de interés (los GEI, pero también el vapor de agua y el oxígeno), como de los aerosoles, que tienen una importancia destacada en las mismas bandas espectrales. Una vez planteada la simulación de las condiciones previsibles, la estimación se hace minimizando las diferencias entre las radiancias observadas y las simuladas. La Fig. 3 muestra la evolución temporal de los resultados, para los dos hemisferios y la media global.

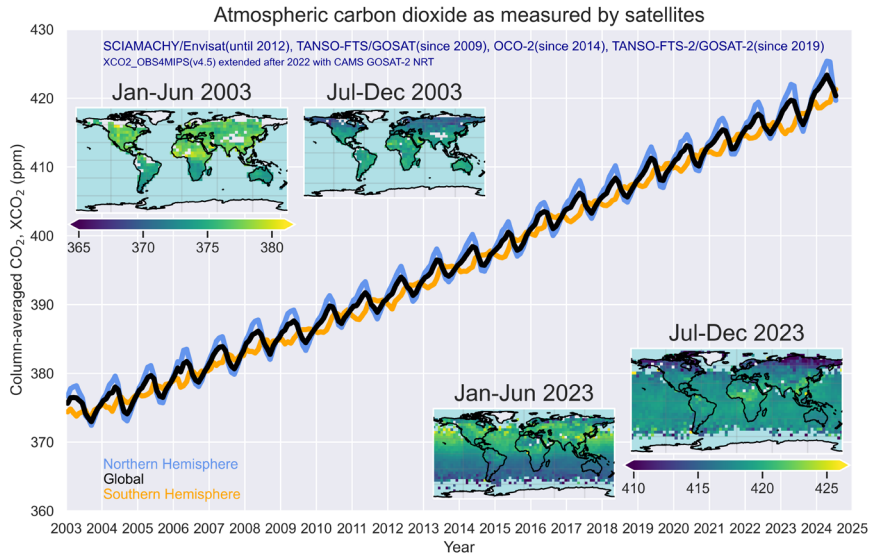


Figura 3: Variaciones de la concentración de CO₂ en la atmósfera a partir de datos de teledetección (Cortesía de Michael Buchwitz, University of Bremen, ver también Buchwitz, 2024)

En cuanto a las variables oceánicas, un buen ejemplo del interés de la teledetección para la observación global es el seguimiento de las variaciones en la altura del nivel del mar, que se realiza a partir de altímetros Radar. Si bien la mayor parte de los sistemas Radar que se emplean en teledetección adquieren las imágenes de modo oblicuo (reciben la señal retrodispersada desde el suelo), en el caso de los altímetros que observan la superficie del agua se realiza una observación nadiral, ya que la retrodispersión del agua

es prácticamente especular. Calculando con mucha precisión la posición del satélite, se puede estimar la altura del oleaje por la diferencia de tiempo entre la radiancia emitida y retrodispersada, lo que permite monitorear las corrientes marinas y el relieve oceánico, pero también la variación del nivel medio del agua en una serie temporal (Stammer y Cazenave, 2017). Esta información es muy útil para predecir las oscilaciones climáticas globales, como las derivadas del fenómeno conocido como *El Niño Southern Oscillation* (ENSO), que implica un aumento en la temperatura y la altura del océano en la costa del Pacífico sudamericano y una disminución paralela en el sudeste asiático. Las tendencias promedio hacia el aumento del nivel del mar como resultado del derretimiento de la capa de hielo y los glaciares también están bien documentadas a partir de altímetros Radar, particularmente gracias a las misiones Topex-Poseidon y Jason 1 a 3 (Ablain *et al.*, 2015). Análisis recientes estiman que entre 1993 y 2024 el nivel del mar ha aumentado 3,4 mm/año (Fig. 4), pero existen importantes diferencias regionales dentro de esta tendencia (Legeais *et al.*, 2018).

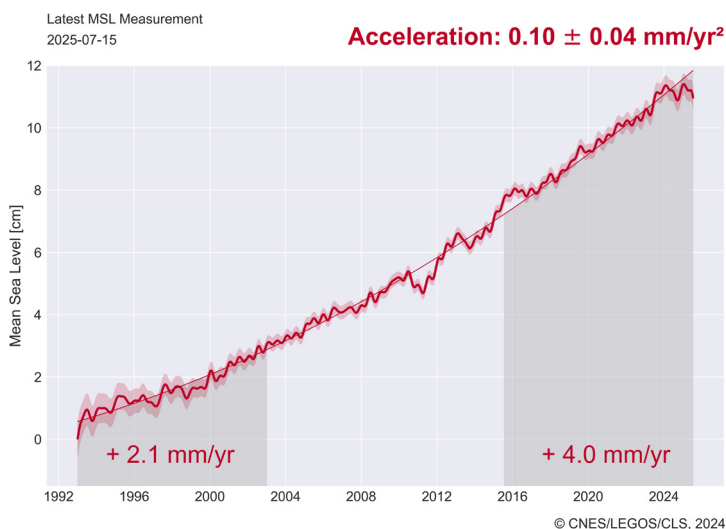


Figura 4: Tendencias en la altura media del océano <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/ocean-indicators-products/mean-sea-level.html>, ultimo acceso en septiembre de 2025.

Finalmente, como ejemplo de variable terrestre he seleccionado la de Fuego, pues yo mismo coordino esta ECV para el programa ESA-CCI, así como para GCOS y el *Copernicus Climate Change Service*. Si bien los incendios forestales no siempre tienen efectos negativos, puesto que son un componente de la evolución de los ecosistemas terrestres (Moreno, 2024), suelen considerarse como un riesgo natural que tiene consecuen-

cias sociales y ambientales a menudo catastróficas, particularmente cuando se alteran los regímenes tradicionales de ocurrencia del fuego. Entre los efectos perversos de los incendios sobre las personas estaría la incidencia directa, que implica la pérdida de vidas humanas y la quema de viviendas, y la indirecta, asociada a los efectos de las emisiones sobre la calidad del aire y la salud humana en áreas a veces muy alejadas del origen del fuego, como ocurrió recientemente con los grandes incendios de Canadá (Jain *et al.*, 2024). A escala global los incendios afectan al balance de carbono almacenado en la biomasa terrestre, contribuyendo significativamente a las emisiones de GEI (Ramo *et al.*, 2021; Zheng *et al.*, 2023): se estima que los incendios forestales superaron en las últimas décadas las emisiones anuales de CO₂ derivadas de la quema de combustibles fósiles de Japón, el sexto mayor emisor de dióxido de carbono del mundo (You, 2023).

Estudios reciente basados en teledetección estiman que la superficie quemada global está en torno a 4 Mkm² (Jones *et al.*, 2024; Lizundia-Loiola *et al.*, 2022), pero ese cálculo es probablemente muy conservador, ya que está basado en imágenes de baja resolución (MODIS, principalmente) que se ha comprobado que infraestiman considerablemente las quemadas en zonas tropicales (Chuvieco *et al.*, 2022; Ramo *et al.*, 2021), por lo que más bien deberíamos situar la superficie quemada global en el entorno de los 7 Mkm² (Chen *et al.*, 2023).

Si bien existe una creciente evidencia de que las áreas quemadas están disminuyendo globalmente (Andela *et al.*, 2017), principalmente como resultado de los cambios en el uso del suelo en África, el continente donde más se quema, también existe un claro consenso en que los incendios de extrema gravedad ocurren con mayor frecuencia debido a condiciones climáticas anómalas (Bowman *et al.*, 2017; Cunningham *et al.*, 2024; Duane *et al.*, 2021). Algunos ejemplos de estas anomalías son los recientes incendios de los Ángeles (2025), en donde se quemaron casi 10.000 viviendas; los ocurridos en el SE de Australia en 2019-20, donde ardieron casi 8 Mha, siete veces por encima de la media de los anteriores 20 años (Bowman *et al.*, 2020), o los observados en Canadá en 2023, que afectaron a 18,5 Mha, más del doble de la superficie que en el anterior año record, 1994 (Jain *et al.*, 2024). También en 2023 Grecia sufrió el incendio más grande registrado en el último siglo en Europa (más de 90,000 ha), mientras en Hawái ocurrió el quinto incendio más mortífero en la historia de Estados Unidos, cobrándose más de 100 vidas y destruyendo más de 2.200 viviendas, y en Viña del Mar, Chile, a principios de febrero de 2024, se produjo el incendio con mayor incidencia humana, con 131 víctimas y más de 2.200 viviendas destruidas. El verano de 2025 ha sido particularmente severo en España y

Portugal: sólo en quince días de agosto se ha quemado más superficie que la suma de todo el territorio afectado en cinco años precedentes (excluyendo 2022, que también tuvo una alta ocurrencia).

El empleo de la teledetección en el análisis del riesgo y los efectos del fuego está bastante generalizado (Chuvienco, 2024). Las variables más comúnmente estimadas por esta técnica son la humedad del combustible (Yebra *et al.*, 2013), la cantidad y estructura vertical del mismo (Aragoneses *et al.*, 2024; Aragoneses *et al.*, 2025; Pettinari *et al.*, 2014), la detección de focos activos y la energía liberada por los mismos (Giglio *et al.*, 2016), la cartografía del área quemada (Chuvienco *et al.*, 2019), la severidad post-incendio (Quintano *et al.*, 2018) y la regeneración de áreas quemadas (Viana-Soto *et al.*, 2022). De estos parámetros, la ECV denominada *Fire Disturbance* incluye tres productos: área quemada, incendios activos y energía radiada (GCOS, 2022a, sec. 9.4). El programa ESA-CCI se ha centrado en generar productos del primer parámetro (área quemada) a escala global y con la mayor longitud temporal posible. Después de varios años de desarrollo, se han puesto a disposición pública tres versiones de productos globales de área quemada: el FireCCI51, generado a partir de datos MODIS a 250m y puntos de calor a 1 km (Lizundia-Loiola *et al.*, 2020), disponible entre 2001 y 2022, el FireCCILT11, generado a partir de imágenes NOAA-AVHRR de baja resolución (5 km), sobre un algoritmo de aprendizaje máquina (Otón *et al.*, 2021a) y disponible para la serie 1981 a 2018, y el FireCCIS311, generado desde imágenes Sentinel-3 SYN a 300 m y puntos de calor VIIRS a 375 m, y disponible para la serie 2019 a la actualidad (Lizundia-Loiola *et al.*, 2022). Estos tres productos se facilitan a través del repositorio de datos del programa CCI (*Open Data Portal*), así como del servicio de cambio climático de Copérnico (*Climate Data Store*: DOI: 10.24381/cds.f333cf85). Un ejemplo de este tipo de productos aparece en la Fig. 5, correspondiente al área global quemada en 2019 en celdas de 0.25 grados.

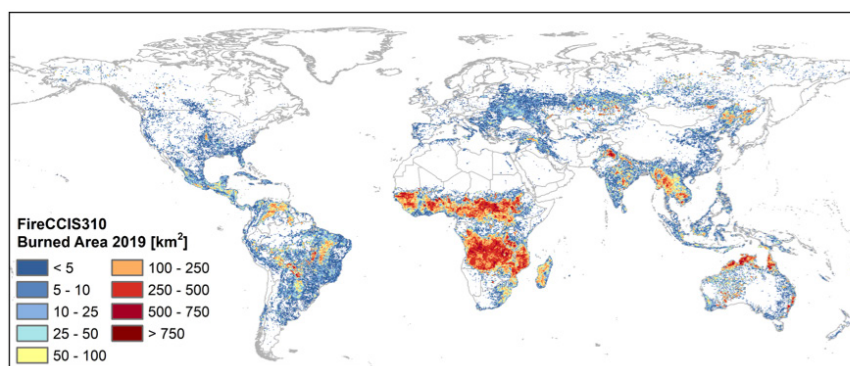


Figura 5: Área quemada global según el producto FireCCIS311 (Lizundia-Loiola *et al.*, 2022).

Otras variables de interés global

Junto a las variables específicamente orientadas al estudio del cambio climático, la teledetección también brinda información de gran interés para muchas otras de interés global. La observación sistemática y periódica que realizan los satélites de observación de la tierra permite detectar también efectos de cambios locales o regionales, que en última instancia contribuyen asimismo a las perturbaciones que afectan al equilibrio del planeta.

Entre ellas estaría la conversión del bosque en nuevas zonas agrícolas y ganaderas. Si bien este proceso se está revirtiendo en muchos países industrializados, en donde la tendencia dominante es el abandono de áreas agrícolas, en muchos otros, principalmente del entorno tropical, todavía lo más común es la conversión de zonas forestales en pastos o cultivos (Fig. 6). Esa deforestación tiene impactos muy variados, tanto en la biodiversidad local, como en los balances de carbono y en los climas regionales, al alterar el albedo terrestre y la evapotranspiración. Generalmente los suelos deforestados reflejan más energía que los bosques y retienen menos agua.



Figura 6: Secuencia temporal de imágenes Landsat sobre un sector del estado de Amazonas (Brasil), recogiendo la intensa deforestación que ha experimentado el área en 34 años. En la escena de 2010 aparece una zona forestal recientemente quemada en el sector oriental de la imagen.

Otros ejemplos de cambios de gran calado ambiental que pueden analizarse mediante teledetección serían la desecación de humedales (Birkett, 1998), el crecimiento urbano (Kumar, 2024), la apertura de nuevas extracciones mineras (LaJeunesse Connette *et al.*, 2016), los vertidos incontrolados de petróleo (Tysiāc *et al.*, 2022), la eutrofización de lagos (Carrea *et al.*, 2023) o la variación de los glaciares (Leclercq *et al.*, 2014).

SÍNTESIS: ¿QUÉ SABEMOS Y QUÉ HACEMOS?

Situación y tendencias

A partir de la información proporcionada por la teledetección y otras fuentes de información geográfica, incluyendo trabajos de campo, sensores terrestres, oceánicos y aéreos, y con la creciente precisión de los modelos climáticos, tenemos un conocimiento cada vez más detallado de la gran complejidad del sistema terrestre, lo que nos permite estimar tendencias y plantear medidas para evitar que esas trayectorias pudieran llegar a ser catastróficas.

En función de los informes más recientes del IPCC y de las agencias meteorológicas más prestigiosas, podemos esbozar un breve resumen de las tendencias más significativas en lo que se refiere a la determinación de los efectos del cambio climático que ya estamos observando:

- 1. Temperatura.** Los cinco años más calientes desde 1880 hasta la fecha han ocurrido en los últimos ocho años (2016 a 2024), y los últimos 10 años han sido los más calurosos del registro instrumental. En el último informe sobre el estado del clima del *Copernicus Climate Change Service*, se estima que la anomalía térmica sobre el periodo pre-industrial (1850-1900) ha alcanzado en 2024 el valor de 1,6° C, una décima por encima de lo que el IPCC recomienda como umbral superior de calentamiento global “tolerable”, y a pocas décimas del umbral que se acordó en el tratado de París. El calentamiento es 0,72° C superior al del periodo 1991-2010. Las olas de calor están siendo cada vez más frecuentes, observándose valores excepcionales en los últimos años. El caso de Canadá y el NW de EE.UU. fue especialmente llamativo en el verano de 2021 con valores de temperatura media más de 15 grados superiores a la media de los 7 años anteriores (Fig. 7).

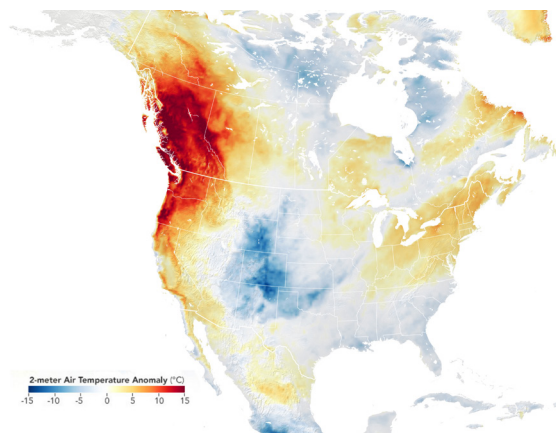


Figura 7: Anomalía térmica a fines de junio de 2021 en Norteamérica. La imagen está producida por un modelo climático y contrastado con observaciones de temperatura con varias ciudades en el W de Canadá y USA alcanzando el máximo histórico hasta ese día. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/148506/exceptional-heat-hits-pacific-northwest>, último acceso en septiembre de 2025).

Lógicamente las estimaciones de tendencias temporales corrigen los efectos de isla térmica urbana. Además, se observan trayectorias similares en la temperatura del agua del mar, no afectada por este fenómeno. La tendencia al calentamiento es compatible con la existencia de eventos extremos, incluso olas de frío inusitadas, puesto que, al haber más energía en el sistema, tiende a rebasar sus límites previos (von Schuckmann *et al.*, 2020).

2. **Hielo.** Se ha observado una pérdida de casi 4 Mkm² de hielo marino estival en el Ártico entre 1980 y 2024 (-11,7% por década), con menores pérdidas en hielo invernal (-2,4%/década). Estas observaciones se basan en datos de sensores de micro-ondas pasivas (Fig. 8). Similar fenómeno se observa en el hielo continental, en Groenlandia, con mediciones tomadas con altímetro Lidar y con gravimetría. Se calcula una pérdida de unos 234 km³ de agua por año (Fig. 9) (Barletta *et al.*, 2013). Aunque en la Antártida el efecto es menos evidente, también se observan pérdidas muy relevantes en el sector occidental, el más masivo (Shepherd *et al.*, 2020). En cuanto a los glaciares, la mayor parte de los observados presenta un notable retroceso, tanto en el hemisferio sur como en el norte, con una pérdida de masa global de unos 20 m en relación a su estado en 1992 (WGMS, 2025).

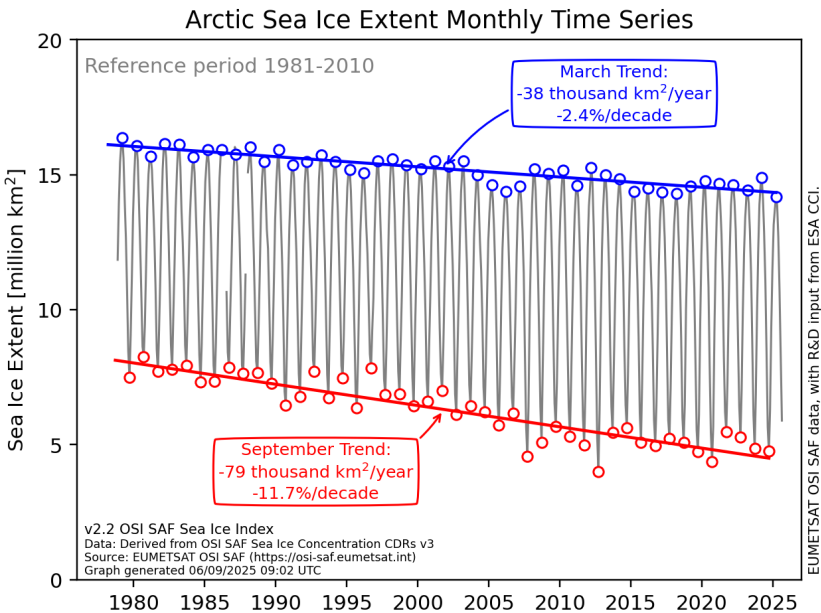


Figura 8: Variación de la superficie de hielo marino ártico en los últimos cuarenta años: <https://osisaf-hl.met.no/v2p2-sea-ice-index>, último acceso en septiembre de 2025.

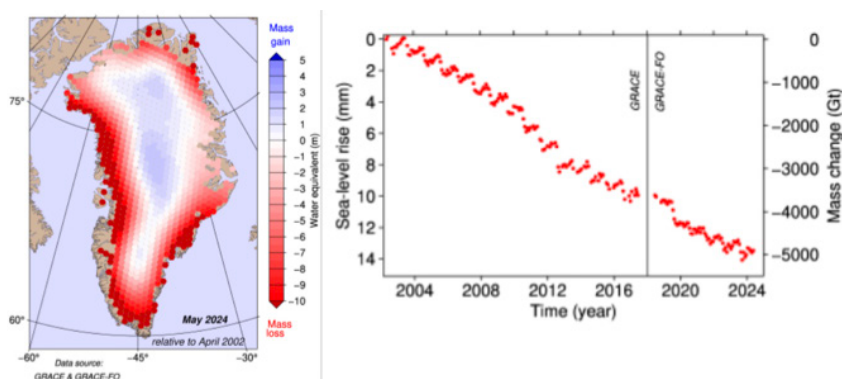


Figura 9: Variaciones de hielo en Groenlandia medido a partir de gravimetría, comparando con el año 2002: <http://polarportal.dk/en/greenland/mass-and-height-change/>, último acceso marzo de 2025.

3. **Océano.** La pérdida de hielo continental y la expansión térmica del agua explica las tendencias de aumento en el nivel del agua marina, que se vienen observando en las últimas décadas con altímetros Radar, como hemos comentado previamente. Se observa un aumento de unos 3,42 mm/año durante los últimos 20 años (Fig. 4), con una clara tendencia a acelerar el proceso en la última década (Cazenave y Cozannet, 2014).
4. **Atmósfera.** Se evidencia un claro incremento de la concentración de los gases de efecto invernadero. Por ejemplo, el CO_2 ha pasado de una densidad atmosférica de apenas 320 partes por millón (ppm) a inicios de 1960, a algo más de 420 ppm actualmente. Estas tendencias vienen midiéndose desde hace 60 años a partir de torres de flujo y, en periodos más recientes, se complementan mediante teledetección (Buchwitz *et al.*, 2018b). Por su parte, sabemos también que la radiación solar se mantiene bastante estable (con los periodos cíclicos de unos 11 años), puesto que no hay variación relevante en los ciclos orbitales del planeta, mientras la actividad volcánica —que pueda calentar, pero también enfriar el clima terrestre— no experimenta una actividad anómala en las últimas décadas. Estos factores naturales, que fueron la causa principal de los cambios climáticos que afectaron a la Tierra en el último millón de años, no tenemos evidencia de que estén variando ahora de modo significativo. Es bien sabido que el aumento en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera se debe principalmente a la actividad humana, con una pequeña contribución de los volcanes (Hards, 2005). Del total de las emisiones, se estima que el 90% proceden de la quema de combustibles fósiles y

producción de cemento y el resto proviene del cambio de cobertura del suelo (degradación y quema de bosques que se convierten a cultivos) (Friedlingstein *et al.*, 2024).

5. Impactos. En cuanto a los impactos previsibles de este calentamiento, la incertidumbre científica es mayor que en los fenómenos ya observados, puesto que entra en juego la complejidad de los modelos climáticos y los escenarios de emisiones que puedan producirse. No obstante, conviene recordar que los modelos climáticos desarrollados por los centros meteorológicos más prestigiosos del mundo (Hadley Center - UK; Météo France; Max Planck Institute, Alemania, NOAA USA, etc.) muestran bastante convergencia en algunos parámetros (temperatura) siendo más inciertos en otros (como la precipitación o el viento). A partir de estos modelos se estiman las consecuencias previsibles para distintos escenarios, considerando generalmente la mezcla de múltiples modelos, de cara a analizar si esos riesgos son más o menos probables (serían más cuando la mayor parte de los modelos estimen las mismas condiciones).

A partir de esas simulaciones, y por encima de que algunos lugares pueden verse beneficiados por el calentamiento (por ejemplo, temperaturas más benignas en climas fríos, que puedan permitirles introducir nuevos cultivos), la velocidad y la magnitud de los cambios estimados apuntan a consecuencias muy negativas para el conjunto del planeta si se mantienen las actuales tasas de emisión. Entre los efectos sobre los que existe bastante consenso científico están el aumento del nivel del agua del mar (que podría alcanzar entre 45 y 80 cm para fines de siglo), con sus impactos sobre la gran cantidad de población costera del planeta y la frecuencia de inundaciones; las olas de calor (que afectarían a la población más vulnerable, impactando en la ocurrencia de incendios forestales extremos y en el rendimiento de las cosechas); la pérdida de glaciares (afectando sobre todo a los países con menos capacidad de embalsar agua), la frecuencia e intensidad de tormentas extremas (provocando inundaciones súbitas), y los cambios en los vectores de transmisión de algunas enfermedades.

La teledetección nos proporciona también en esta fase información valiosa, sobre todo en lo referente al contraste de los modelos climáticos con las observaciones (Lauer *et al.*, 2017), así como la rápida evaluación de efectos en situaciones de catástrofe natural (Kavvada *et al.*, 2020).

En cuanto a los factores del cambio climático, son muy numerosos los modelos que ponen el mayor énfasis en las causas humanas frente a las naturales, que han sido las protagonistas en el resto de los numerosos cambios climáticos que han afectado al planeta (IPCC, 2007; IPCC, 2021). Sobre la atribución de las causas, la mayor parte de los científicos tienen un alto grado de convergencia sobre el papel protagonista del factor humano (Cook *et al.*, 2016). Como es bien sabido, ha habido numerosos cambios climáticos en la historia geológica del planeta, e incluso en los últimos milenios (Comellas, 2011). Conocemos también diversos factores naturales que explican esas variaciones (ciclos orbitales de la Tierra, movimiento de placas, vulcanismo, manchas solares, etc.). Sin embargo, lo que observamos ahora tiene un ritmo de cambio sin precedentes, y no parece explicarse por los factores naturales que conocemos, lo que permite señalar a la acción humana como protagonista. Conviene recordar que los grandes centros de predicción meteorológica y todas las academias de las ciencias avalan la hipótesis del cambio climático de origen humano. Ya en 2010, cuando era bastante menor la evidencia que ahora tenemos sobre esta cuestión, el *National Research Council*, que aglutina a la Academia de las Ciencias y la Academia de Ingeniería de EE.UU., publicó un informe sobre la relevancia del cambio climático en términos muy nítidos. En concreto, la primera conclusión del informe señalaba que: “El cambio climático está ocurriendo, es causado principalmente por actividades humanas y supone un riesgo significativo –que en muchos casos ya se está observando– a un amplio rango de sistemas naturales y humanos” (National Research Council, 2010, p. 27). Diez años más tarde, un estudio de síntesis auspiciado por la Royal Society británica y la Academia de Ciencias de USA, llega a una conclusión similar: “Este documento explica que existen mecanismos físicos bien conocidos por los que los cambios en las cantidades de gases de efecto invernadero provocan cambios climáticos. Analiza las pruebas de que las concentraciones de estos gases en la atmósfera han aumentado y siguen aumentando rápidamente, que se está produciendo un cambio climático y que la mayor parte del cambio reciente se debe casi con toda seguridad a las emisiones de gases de efecto invernadero causadas por las actividades humanas” (The Royal Society y National Academy of Sciences, 2020, p. 23).

La variedad y cantidad de datos recogidos por muy distintas disciplinas que apuntan en la misma dirección hace que las evidencias sean suficientes para tomar decisiones que nos comprometan de modo eficaz. Sin embargo, ni siquiera el acuerdo de París, casi en su décimo aniversario, ha conseguido movilizar esas voluntades, e incluso algunos países, grandes emisores, parece que han avanzado en la dirección contraria al consenso internacional.

Respuestas (o más bien falta de)

Pese a que las tendencias que acabo de repasar son ampliamente conocidas y los efectos del calentamiento global cada vez más evidentes, sigue habiendo una rémora a plantear medidas más eficaces para reducir las emisiones de GEI. En el panorama global, el último informe del programa *Global Carbon Project* (Friedlingstein *et al.*, 2024) sigue evidenciando que las tendencias al aumento de las emisiones no han cambiado sustancialmente, manteniendo una dirección ascendente, que supera en los últimos años la barrera de las 40 Gt de CO₂. La causa principal de esas emisiones es la quema de combustibles fósiles, mientras las emisiones relacionadas con el cambio en la cobertura del suelo (deforestación y reforestación, principalmente) se mantienen bastante estables (Fig. 10). Los últimos datos del *Global Carbon Project* estiman que la emisión anual de CO₂ procedente de la quema de combustibles fósiles supone actualmente 37.4 Gt con una tendencia ascendente, acelerada desde inicios de siglo, que solo la crisis financiera de 2010 y los encierros del COVID en 2020 pudieron reducir, aunque de forma no muy significativa, para recuperarse posteriormente. Entre los cuatro principales emisores del mundo (China, EE.UU., India y la UE) se acumula aproximadamente el 66% de todo el CO₂ emitido a la atmósfera.

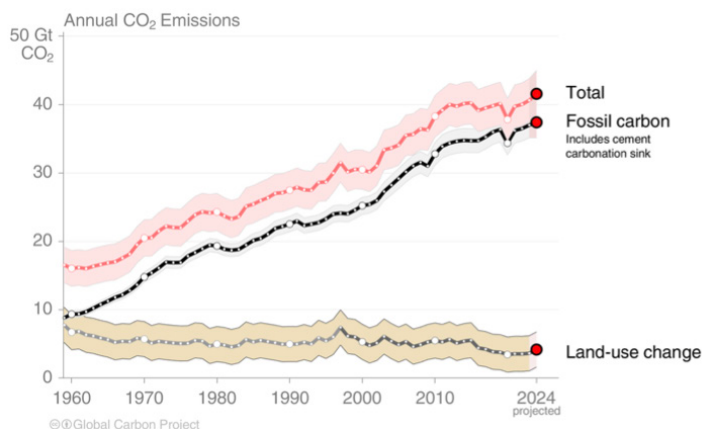


Figura 10: Estimación de las emisiones de CO₂ procedentes de la quema de combustibles fósiles y de los cambios en la cobertura del suelo (Friedlingstein *et al.*, 2024).

La conclusión más obvia al comparar este gráfico con las tendencias climáticas antes analizadas es que la sociedad internacional sigue sin tomar verdadera conciencia de los problemas ligados al cambio climático, y por tanto no adopta las medidas necesarias para mitigarlo. Si el principal factor del calentamiento es el aumento de la densidad de GEI en la atmósfera, la mitigación pasa por a) reducir las emisiones y b) extraer el CO₂ ya emitido. Ninguna de las dos estrategias está siendo fructífera, ya que la densidad de CO₂ en la atmósfera sigue subiendo, como hemos visto en la Fig. 3, superando ya las 420 ppm. En cuanto al aumento de la concentración de Metano (con mayor poder de forzamiento radiativo que el dióxido de carbono), las tendencias son similares, pasando de 1,74 a más de 1,9 ppm. Estas tendencias nos sitúan cerca del horizonte de emisiones más pesimista de los establecidos por el 5º informe de síntesis en 2014, y por tanto el que nos conduciría a efectos sobre el conjunto del sistema terrestre más preocupantes, con un aumento de la temperatura global al final de siglo entre 3 y 5 °C.

Ante esta contradicción entre lo que sabemos y lo que hacemos, deberíamos de interrogarnos sobre las raíces de esta aparente desconexión entre ciencia y comportamiento humano. Sabemos lo suficiente para adoptar medidas más contundentes, pero no hacemos lo debido para ponerlas en práctica. Las posibles explicaciones de esta incoherencia son muy variadas, y pueden deslindarse en dos ámbitos diferenciados, por un lado, el social y por otro el personal. Siendo ambos necesarios, la dimensión social implica una percepción colectiva sobre la necesidad de tomar medidas drásticas en un determinado problema, relacionado con la urgencia y la importancia del asunto. Así se hizo frente a la epidemia del COVID o frente a otras catástrofes naturales. En este caso, la acción es mucho más tímida pues está en juego el motor de la economía mundial, y en consecuencia hay enormes intereses de muy diverso tipo. En su momento fuimos capaces de sustituir los gases CFC que deterioraban la capa de ozono por otros, siguiendo la evidencia científica que relacionaba ambos fenómenos y el acuerdo de Montreal (1987) que subrayó jurídicamente el compromiso internacional sobre esta cuestión. En el caso del cambio climático, esto no ha sido posible hasta ahora: las diversas reuniones anuales del UNFCCC han dado más lugar a ruido mediático que a decisiones firmes, y ni siquiera el acuerdo de París puede considerarse eficaz, ya que su aplicación práctica ha sido hasta ahora muy discreta (Hegglin *et al.*, 2022).

Una de las barreras que los especialistas han señalado para explicar esta rémora a tomar medidas más eficaces para reducir las emisiones es la percepción social de que la comunidad científica no se pone de acuerdo sobre el problema (Lewandowsky *et al.*, 2019). Ciertamente, pese a que el

consenso científico sobre la existencia y las causas del cambio climático es muy amplio (Cook *et al.*, 2013; Cook *et al.*, 2016), todavía sigue presente en la opinión pública la idea de que se trata de un tema en el que los especialistas mantienen discrepancias en lo fundamental. Por ejemplo, en una encuesta del Instituto Elcano realizada en 2019 se indicaba que un 40% de los entrevistados consideraba que no había acuerdo científico sobre esta cuestión, aunque la mayor parte (97%) coincidían en que existía el problema y que era principalmente de origen humano (Lázaro Touza *et al.*, 2019). Por esta razón, resulta conveniente expandir todas aquellas actividades de transferencia, que faciliten a la opinión pública una visión atinada sobre las causas y posibles repercusiones de esta cuestión, sin duda el principal problema ambiental al que nos enfrentamos actualmente.

En lo que se refiere al terreno personal, la falta de acciones eficaces para reducir las emisiones hace referencia a otros factores más de tipo psicológico y motivacional. La resistencia al cambio, la falta de motivación (ecoindiferencia), la sensación de que ya hacemos lo suficiente (ecosuficiencia), de que no es posible hacer más (ecoansiedad) o de que nuestras acciones tienen poca relevancia ante un problema que nos excede (ecoirrelevancia), explican en buena medida este patrón. No hemos de olvidar que la mayor parte de las emisiones de GEI de un país están ligadas al consumo de sus habitantes, superando el 70 % en varios estudios publicados en países europeos (Chuvieco *et al.*, 2021; Hertwich y Peters, 2009), por lo que los cambios personales, además de ser fermento de los sociales, suponen también una parte significativa de las emisiones globales.

En este punto retorno a mi reflexión inicial en este discurso, introduciendo ahora algunas ideas en la línea de mejorar la conexión entre ciencia y comportamiento humano en esta cuestión ambiental tan relevante.

¿CÓMO CAMBIAR? CONEXIÓN ENTRE CIENCIA Y MOTIVACIONES PERSONALES Y SOCIALES

El papel de la ciencia para cambiar conductas

Ante un problema de dimensiones globales es fácil tomar actitudes displicentes, derivar responsabilidades en otros, o apuntar a estructuras externas que escapan a nuestra decisión. Pero no hemos de olvidar que las actitudes sociales son siempre una suma de las actitudes personales. No estoy concluyendo que toda la responsabilidad de mitigar el CC recaiga sobre los individuos; también es preciso hacer cambios estructurales en la sociedad que sigue “mirando a otro lado”, sin comprometerse eficazmente con un problema que puede ser catastrófico para nuestros descendientes. No se trata de culpabilizar a nadie, sino más bien de animar a todos los miembros de la sociedad civil a que tomemos decisiones eficaces que cambien nuestro modo de vida, a veces con gestos sencillos, adaptándolos a nuestras propias circunstancias personales. Como bien rezaba el lema de una campaña de Caritas que vi hace algunos años: “Vive sencillamente para que otros, sencillamente, puedan vivir”.

En múltiples ocasiones se ha debatido sobre la supuesta objetividad de la ciencia a la hora de analizar los problemas ambientales y sociales (Artigas, 2017). Ciertamente, la ciencia experimental debe separar nítidamente entre observaciones e interpretaciones de la realidad, pero a la vez tiene la responsabilidad de informar certeramente sobre las causas y las consecuencias previsibles de un determinado fenómeno. Esta será una primera consecuencia ética ante el problema del cambio climático, el deber de mostrar el mejor conocimiento disponible, sin caer en simplicidades o catastrofismos, pero también sin rebajar la gravedad del problema.

Puede ser útil ilustrar la relevancia de mantener la máxima honestidad posible en presentar los avances científicos de este problema ambiental con el ejemplo de otra cuestión de gran impacto social que también tiene una base científica: el tabaquismo. Durante los años sesenta y setenta se comenzaron a evidenciar los impactos negativos para la salud del hábito de fumar. Los estudios científicos fueron haciéndose más concluyentes, hasta convertirse actualmente en una evidencia incontestable. En un reciente informe compilado por el departamento de salud y servicios humanos de EE.UU., se incluyen cifras verdaderamente demoledoras sobre el impacto que el tabaquismo (al que este informe denomina, sin ambages, epidemia) ha producido en los últimos cincuenta años en ese país: 20 millones de muertes prematuras, con costes estimados (laborales y sanitarios) de 300.000 millones de dólares. Este informe, tras describir las enfermedades

a las que está directamente ligado el tabaco, indica en un párrafo, que me parece especialmente contundente, que “...la epidemia del tabaco fue iniciada y se ha mantenido mediante estrategias agresivas de la industria del tabaco, que deliberadamente ha confundido al público sobre los riesgos de fumar cigarrillos” (US Department of Health Human Services, 2014, p. 7).

No parece necesario citar aquí el paralelismo con posturas similares por parte de corporaciones ligadas a los combustibles fósiles, que en algunos casos han mostrado una imagen pública contraria a lo que sus mismos científicos estaban obteniendo sobre la gravedad de los problemas y su responsabilidad en los mismos (Supran *et al.*, 2023). Al tratarse de un problema global que afecta al motor económico de nuestro actual concepto de desarrollo, considero que muestra con evidencia mayor que en otros temas, la importancia de subrayar la dimensión ética de los dilemas ambientales (Burgui y Chuvieco, 2017), lo que a su vez también supone considerar los impactos de todo tipo que cada solución a un determinado fenómeno implica, los agentes afectados por la misma y los valores que promueve o enturbia. Sobre esto reflexiono ahora.

Base ética de los problemas ambientales

Una de las características más sorprendentes de los seres humanos es nuestra capacidad de elegir libremente, esto es de seleccionar entre varias alternativas aquella que consideramos más adecuada, en función de nuestras preferencias o valores. Decidir libremente no implica decidir sin limitaciones. Todos estamos condicionados por distintos factores, tanto internos (nuestra inteligencia, educación, percepción o coherencia vital), como externos (la información que recibimos, las normas sociales, los hábitos, ...), y todos ellos influyen –a veces de forma tan intensa que percibimos una acción como necesaria– en las decisiones que tomamos cotidianamente.

Entre los criterios que usamos para guiar nuestro comportamiento, uno de los más importantes sin duda es el juicio ético, que podemos resumir en el adagio clásico: ‘haz el bien y evita el mal’, aunque constatamos con frecuencia que no es el criterio único, y muchas veces ni siquiera el más relevante, en las decisiones que finalmente adoptamos. En el momento de realizar acciones cotidianas, como consumir un determinado objeto u otro (o ninguno), todos experimentamos –con mayor o menor frecuencia– que hay otras razones más determinantes que el juicio moral. Por ejemplo, compramos un determinado calzado porque nos resulta más elegante o cómodo o barato o, simplemente, porque está de moda, independientemente

de las implicaciones éticas de ese producto. Pero si pensamos las cosas con detalle, en el fondo es claro que –como han recordado varios autores– “consumir es una opción moral” (Galí, 2014): nos adherimos –aun sin reconocerlo explícitamente– a las condiciones con las que ese producto se ha generado, ya sea en relación con aspectos sociales (por ejemplo, si se ha fabricado con mano de obra infantil), ya al bienestar animal (en granjas intensivas o con ganadería extensiva), o ya a su impacto ambiental (cultivos de proximidad o proveniente de lugares remotos). En resumen, cuando tomamos decisiones libres estamos poniendo en práctica –de una forma u otra– nuestra escala de valores, priorizando las opciones que se nos ofrecen en función de lo que consideramos más importante para nuestras vidas.

Abordar un juicio moral requiere contar con guías de referencia contra las que podamos contrastar las distintas alternativas. Consideramos algo bueno o malo, aceptable o rechazable, porque encaja o no con unos valores que consideramos referencia de nuestro comportamiento ético. Las convicciones que dan sustento a nuestras decisiones éticas pueden tener distintos orígenes, no necesariamente excluyentes. Por un lado, la legislación vigente: consideramos bueno o malo aquello que permite o prohíbe la ley, respectivamente. Este planteamiento se ha dado en llamar positivismo jurídico, y supone un respeto intrínseco a la ley por asumirse que el legislador legítimo tiene un cierto sustento moral, aunque ya hemos experimentado, en diversos momentos y países, leyes injustas emanadas de parlamentos democráticos. Por esta razón, parece razonable que el sustento ético se ancle en convicciones más profundas, ya sean filosóficas o religiosas. Las primeras se apoyan en una determinada concepción de lo que es el ser humano, de lo que le hace mejor, personal y socialmente. Este sería el caso de las éticas orientadas a la búsqueda de la virtud, no sólo individual sino cívica, o de éticas metafísicas u ontológicas (Marcos y Alonso, 2020), que no son excluyentes de otros criterios morales basados en una determinada tradición religiosa. Los principios éticos en este caso se recogen en las distintas escrituras sagradas (Biblia, Corán, Atharveda, etc.), interpretadas por los respectivos líderes religiosos para adecuarlas a las situaciones concretas que se viven en un momento determinado.

La conservación ambiental no puede basarse exclusivamente en aspectos técnicos o científicos –con ser éstos muy relevantes– sino que debe abarcar asimismo las implicaciones éticas de las distintas alternativas que plantea cualquier dilema. En ese marco nació la ética ambiental como una rama aplicada de la filosofía moral, que considera los aspectos morales que afectan a nuestra relación con la naturaleza (Attfield, 2014; Ballesteros,

1995; Chuvieco y Martín, 2025; Curry, 2011; Lorentzen, 2001). ¿Qué es lo propio, lo diferenciador de la ética ambiental, respecto a otras ramas de la ética? En mi opinión, principalmente en considerar las dimensiones éticas que se derivan de nuestra actuación en el territorio.

Hace casi 80 años, en 1949, Aldo Leopold, uno de los principales pioneros de la conservación ambiental, afirmaba que “Ningún cambio ético importante se llevó a cabo sin un cambio interno en nuestros intereses intelectuales, lealtades, afectos y convicciones” (Leopold, 2000, p. 141). Cambiar el punto de vista hasta encontrar motivaciones que permitan alterar comportamientos implica un ejercicio profundo de reflexión; no es algo cosmético, externo, sino que tiene implicaciones en nuestros valores más profundos, lo que supone un cambio de bastante calado. De ahí que me parezca muy afortunada la expresión “conversión ecológica”, que proponía el papa Francisco (2015, nn. 216-21), en su encíclica dedicada al cuidado ambiental, recogiendo una expresión ya propuesta por Juan Pablo II (2001).

Varios autores han subrayado la importancia de esta conversión ecológica para transformar inercias y conseguir un compromiso realmente eficaz en la solución de los problemas ambientales (Ormerod y Vanin, 2016; Rincón Andrade, 2018). Entre otras muchas fuentes de inspiración, recordar los principios éticos que sustentan la importancia moral de actuar en la mitigación, puede ayudarnos a enriquecer el alcance y la continuidad de esos compromisos.

Dimensiones éticas del cambio climático

Como hemos visto, el CC es uno de los principales retos ambientales a los que se enfrenta la sociedad actual, con causas e implicaciones que afectan a múltiples ciencias, tanto biofísicas como humanas. Reconociendo el valor que las primeras aportan al conocimiento del origen y consecuencias del problema, no cabe duda de que es preciso basar también nuestras decisiones sobre los aspectos éticos que conlleva, pues se trata no solo de revisar nuestra base energética, sino también nuestro concepto de desarrollo y la relación última que mantenemos con la naturaleza.

Entre los principios básicos del actuar ético en cuestiones de medio ambiente está el recurso a la prudencia, entendida como el juicio sobre los impactos que tendrán las distintas acciones que se plantean como posibles, evitando aquellos que pueden tener consecuencias graves, aunque la pro-

babilidad de que ocurran sea relativamente baja. Este principio se incluyó explícitamente en la carta de la Tierra de Naciones Unidas: “Aquellas actividades que probablemente impliquen un riesgo para la naturaleza serán precedidas de una verificación exhaustiva; sus proponentes deben asegurar que los beneficios esperables superan con creces al daño potencial que pueden generar, y cuando esos efectos no sean completamente entendidos, esas actividades no deberían llevarse a cabo” (*World Charter for Nature*, Resolution 37/7, 1982, 11.b). Su aplicación específica al cambio climático se incorporó al UNFCCC, que indica expresamente que los estados que forman parte del acuerdo “deberían tomar medidas de precaución para prevenir, prevenir o reducir al mínimo las causas del cambio climático y mitigar sus efectos adversos. Cuando haya amenaza de daño grave o irreversible, no debería utilizarse la falta de total certidumbre científica como razón para posponer tales medidas, tomando en cuenta que las políticas y medidas para hacer frente al cambio climático deberían ser eficaces en función de los costos a fin de asegurar beneficios mundiales al menor costo posible” (UNFCCC, art. 3.3).

Ya he comentado la gravedad de los impactos previsibles del CC, tanto en lo que se refiere a las personas, como al equilibrio de los ecosistemas. En los últimos informes del IPCC (*5° y 6° Assessment Report*) se ha desarrollado en extenso el concepto de riesgo ante los efectos del CC, incluyendo los tres aspectos comunes a cualquier riesgo natural: la probabilidad de que ocurra (hazard), la exposición previsible y la vulnerabilidad (daño potencial). El catálogo de efectos potencialmente negativos es muy amplio, lo que espolea a encontrar soluciones que permitan evitar que esos daños puedan llegar a producirse (mitigación, mediante la reducción de emisiones o la captación de GEI) o que tenga peores consecuencias (adaptación, mediante la reducción de la vulnerabilidad ante esos efectos). Los riesgos previsibles de mayor relevancia serían la pérdida de habitabilidad en algunas islas, el aumento de eventos climáticos extremos: olas de calor, sequías, inundaciones, la inseguridad alimentaria: variaciones en la productividad agrícola y los recursos pesqueros, el deterioro de la biodiversidad, y la pérdida o retroceso de glaciares con su consiguiente impacto sobre el acceso a recursos hídricos, sobre todo en los países más pobres. En esta misma línea, un informe especial realizado por la revista *Lancet* en 2015 sobre los impactos del CC en la salud humana, concluía: “Los efectos del cambio climático se están sintiendo ya actualmente, y las proyecciones futuras representan un riesgo inaceptablemente alto y potencialmente catastrófico para la salud humana” (Watts *et al.*, 2015, summary).

El clima de cada región está intrínsecamente unido al de otras regiones, a veces muy distantes. El sistema terrestre no se entiende compartimentado, de ahí la complejidad de los modelos climáticos: se requiere considerar el conjunto del planeta, y las múltiples variables que influyen en el comportamiento de la atmósfera. En este sentido podemos considerar al clima terrestre, en su conjunto, como un bien común, recuperando esta noción clásica en la ética occidental, que permite justificar decisiones que puedan contradecir los intereses particulares por un fin más alto. Evitar cambios potencialmente catastróficos del clima es ciertamente un bien común, en el que deberíamos estar implicados todos los habitantes de este planeta. Si cada estado se orienta a defender sus propios intereses, primando el bien particular sobre el común, será muy difícil salir del actual estado. Como también apuntó el papa Francisco: “Las negociaciones internacionales no pueden avanzar significativamente por las posiciones de los países que privilegian sus intereses nacionales sobre el bien común global” (2015, n. 165).

Que las responsabilidades sean comunes no quiere decir que sean iguales, como también indica expresamente el UNFCCC (art. 3.1), pues no todos han causado el problema con la misma intensidad (Velayos, 2008). El principio de justicia se aplica aquí considerando no sólo el papel que cada país tiene en el balance actual de emisiones de GEI, sino también la relación de esas emisiones con su nivel de desarrollo, así como su trayectoria histórica en esas emisiones (Fig. 11), puesto que el CO₂ almacenado actualmente en la atmósfera no solo es fruto de la actividad actual: puede haberse emiti-

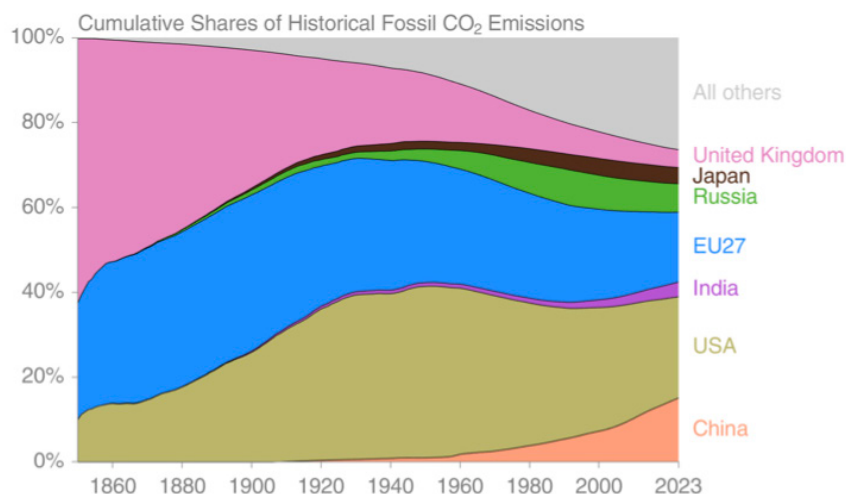


Figura 11: Emisiones históricas de los países con mayor emisión de CO₂ (tomado de Global Carbon Project: (Friedlingstein et al., 2024).

do hace varias décadas. En consecuencia, cualquier decisión que se tome sobre la reducción de emisiones tiene que considerar esa diferenciación como una elemental aplicación de la justicia ambiental. ¿Cómo distribuir, por ejemplo, los costes de la mitigación o de la adaptación al CC? ¿Según el nivel de riqueza de cada país, según su peso en las emisiones acumuladas, según su población?

Por ejemplo, si consideramos las emisiones actuales brutas, los principales emisores son China (casi una tercera parte de las globales), EE.UU. (12%), Unión Europea y la India (cada uno el 5%), Rusia (3%) y Japón (2%), pero las emisiones *per capita* son muy variadas entre ellos: muy superior en EE.UU. (14,9 tCO₂/hab) y Rusia (12,1 tCO₂/hab), siendo intermedias en Japón (8.6 tCO₂/hab), China (8 tCO₂/hab), y Unión Europea (6,3 tCO₂/hab), y mucho más bajas en la India (1,9 tCO₂/hab).

Otro componente de la justicia ambiental es la capacidad que tengan los países para hacer frente a las inversiones que requiere la reducción de emisiones. En este sentido, el nivel de riqueza de cada país debería tenerse en cuenta en la distribución de cuotas. Aunque en estos países con mayor emisión absoluta la eficiencia de las emisiones ha mejorado (contabilizada como la emisión por unidad de PIB creado), todavía el crecimiento económico está muy ligado al consumo de combustibles fósiles, por lo que es razonable esperar que los países más pobres aumenten sus emisiones en los próximos años si siguen en el camino del desarrollo. Entre ellos, especial atención merecerán los países emergentes, como Brasil, Indonesia, Sudáfrica o Nigeria, además de China y la India. Ciertamente pueden argumentar que tienen el mismo derecho que nosotros a tener un determinado bienestar vital, pero si no lo consiguen con otro modelo energético será imposible contener los límites de emisiones que permitan garantizar un aumento de temperatura por debajo de los 2°.

Finalmente, otro elemento de justicia ambiental en el caso del CC es el referido a las emisiones acumuladas, al menos en el periodo histórico en el que se considera el CO₂ residente en la atmósfera (que varía mucho según los especialistas, entre 5 y 300 años, dependiendo de cómo consideren los flujos de absorción y emisión naturales). En cualquier caso, considerando las emisiones históricas desde el inicio de la revolución industrial, los países que más han contribuido a la actual densidad de CO₂ en la atmósfera son EE.UU. (23%), Europa (16%), China (13%), Rusia (6%) y Reino Unido (4%), luego parece razonable que sean ellos los que más contribuyeran a los esfuerzos internacionales de reducción de emisiones.

En resumen, la distribución justa de responsabilidades carga sobre los grandes emisores, actuales y acumulados, la carga de compensar los efectos negativos del CC sobre los países más vulnerables, además de facilitar su transición hacia energías de baja emisión y el acceso a otros mecanismos de desarrollo limpio. Considerando que las responsabilidades son globales, pero diferenciadas entre países, un reparto financiero justo de los costes de la mitigación y adaptación al CC debería poner mayor carga sobre aquellos estados: 1) más desarrollados, 2) con mayores emisiones per cápita, y 3) que más han contribuido a la acumulación actual de GEI. En cualquier caso, el reconocimiento de que el problema es común y deber ser resuelto de modo común es fundamental para que se lleguen a conseguir esos compromisos de reducción de emisiones.

En cuanto a la consideración de las generaciones futuras conviene recordar que es un principio ético de gran calado en aquellos problemas ambientales cuyos efectos se dejarán sentir también a muy largo plazo, como es el caso que nos ocupa, pero también que resulta complejo abordarlo, puesto que no es sencillo atribuir responsabilidad moral hacia personas que todavía no existen. El derecho no nos facilita herramientas nítidas para asignar garantías jurídicas a las generaciones venideras. De hecho, ni siquiera nos ofrece protección para los seres humanos que ya han sido engendrados y aún no han nacido, menos aún parece posible hacerlo para los que nacerán dentro de varios años o de varias décadas. Y, sin embargo, la responsabilidad ética sobre el legado que vamos a dejar a nuestros descendientes está presente en la mayor parte de las personas: ¿qué planeta espera a nuestros hijos o nietos? ¿en qué estado de conservación, con qué recursos?

Este es precisamente el principal argumento ético que están utilizando los jóvenes que se manifiestan a favor de adoptar medidas más contundentes contra el CC. Los que ahora —en nuestra madurez— disfrutamos de un nivel de bienestar ligado al consumo de recursos y energía, estamos afectando —quizá degradando permanentemente— con nuestras decisiones el mundo de esos jóvenes, el que vendrá en unos años. Parece éticamente inaceptable sustentar nuestro bienestar sobre el uso de recursos que deteriorarán el bienestar de nuestros descendientes, si bien podemos considerar que ellos heredarán parte de nuestro progreso, como nosotros lo hicimos de nuestros padres. El equilibrio entre impacto y beneficio debería formar parte también de la justicia, en este caso no espacial (sociedades ricas y pobres) sino generacional (ciudadanos de ahora y de después).

Evaluar los costes de mitigar el CC resulta muy complejo. El muy citado informe coordinado por Nicholas Stern (2007), estimaba que los impactos económicos del CC podrían suponer anualmente entre un 5 y un 20% del PIB mundial, mientras que el coste de mitigación supondría alrededor de un 1% (con los datos actuales, unos 970.000 millones de dólares). Ciertamente, se trata de una cantidad inmensa, muy por encima de las contribuciones que se acordaron en el acuerdo de París para mecanismos de transferencia hacia sistemas de baja emisión (apenas 100.000 millones de dólares), que a su vez es una pequeña fracción de las pérdidas mundiales causadas por los cierres a los que dio lugar la COVID: el Banco Mundial estima que se perdió en torno al 3% del PIB mundial, por tanto tres veces más alta de lo que hubiera supuesto una mitigación más ambiciosa del CC.

En un artículo basado en modelos climáticos y en proyecciones económicas, Burke et al. (2015) evaluaban las variaciones futuras del PIB en cada país, en función del impacto previsible del CC en su estructura económica. En el conjunto del planeta, estimaban que se perdería en torno a un 23% del PIB para 2100 –considerando las condiciones actuales de emisión– respecto a un escenario donde no existiera el CC. Los impactos, como cabría esperar, son más altos en los países más pobres, que perderían entre un 50 y un 75% de su PIB (respecto a no existir CC), frente a una pérdida de 5-10% en los países más ricos. Ciertamente, el balance económico aconseja aumentar la inversión en la transición energética para evitar las pérdidas globales futuras, sin tener en cuenta que serán las economías más vulnerables las que sufrirán más directamente los impactos negativos, provocando por tanto efectos sociales que pueden ser muy severos.

Motivaciones para el cuidado ambiental

Como hemos visto, la ciencia juega un papel crítico en la comprensión de los problemas ambientales, así como en el seguimiento y en la proyección de sus tendencias. Pero las evidencias científicas no son suficientes para cambiar conductas. Se precisa ligar el conocimiento científico con los valores más profundos de las personas, para que el cambio en los estilos de vida sea realmente significativo. La ciencia es fundamental para entender las causas y las consecuencias del CC, sus efectos previsibles y las medidas sociales y técnicas que pueden mitigar el problema, pero la ciencia sola no va a cambiar comportamientos. Necesitamos anclar los cambios más profundos sobre las convicciones más profundas (Clayton y Myers, 2015). Es interesante anotar aquí el impacto mediático de Greta Thunberg y los distintos movimientos juveniles en torno al CC. Todos ellos asumen

las conclusiones de la ciencia actual, pero los principales argumentos que sustentan su denuncia no son científicos, sino más bien éticos: apelan a la justicia ambiental e intergeneracional, y son precisamente las generaciones más jóvenes las que lideran estos movimientos.

La información sobre cambio climático es ciertamente muy abundante, afectando a medios de comunicación muy variados, tanto tradicionales (TV, radio, prensa) como más recientes (X, Facebook, YouTube, etc.). Esto explica que en las encuestas de opinión se sitúe entre las principales preocupaciones de los entrevistados, también en España, reconociéndose en general la gravedad del problema (Lázaro Touza *et al.*, 2019, p. 3). Sin embargo, también se evidencia que, en éste como en otros problemas ambientales, hay una cierta disfunción entre lo que se piensa y lo que se hace, entre la preocupación por el problema y las medidas concretas que se realizan (Pérez-Díaz y Rodríguez, 2017).

Especialmente en el campo de la sicología ambiental, esta aparente incoherencia se ha relacionado con distintos factores, que pueden resumirse en tres: no saber, no poder, no querer. No saber no implica ignorancia sobre lo que es y supone el CC, sino más bien sobre el mejor modo de actuar. No poder lleva consigo la percepción de que ya se hace todo lo que se puede o de que nuestra acción no tendrá repercusiones reales en la solución del problema. No querer supone simplemente que no se está dispuesto a afrontar los cambios de comportamiento necesarios. En los tres casos, es preciso conectar mejor el problema con las convicciones más profundas, las que mueven más a las personas.

Una visión economicista o utilitarista de la naturaleza, aún con la apariencia del buen propósito de su conservación, no va a solucionar la crisis ambiental y social: solo pondrá parches y extenderá los problemas porque mantendrá las actitudes de fondo. Como sabiamente ha escrito el papa Francisco, la solución a los problemas actuales no puede restringirse a medidas urgentes y parciales. Es algo más profundo: “Debería ser una mirada distinta, un pensamiento, una política, un programa educativo, un estilo de vida y una espiritualidad que conformen una resistencia ante el avance del paradigma tecnocrático” (Papa Francisco, 2015, n. 194). En suma, se precisa un cambio profundo para revertir las tendencias que están detrás del concepto actual de desarrollo, reorientándolo hacia un progreso que sea compatible con las demandas de la población más vulnerable y garantice la conservación de la naturaleza. Esta misma idea aparecía en uno de los pioneros del movimiento conservacionista, Aldo Leopold, cuando indicaba

que la crisis ambiental solo puede revertirse con un hondo cambio en nuestro esquema de los valores, que nos llevara a "...dejar de pensar que el uso adecuado de la tierra es sólo un problema económico", mientras reclamaba que examináramos "...cada cuestión en términos de lo que es correcto desde el punto de vista ético y estético, además de lo que conviene económicamente". En suma, estaba indicando que solo podremos tomarnos realmente en serio los problemas ambientales cuando cambiemos nuestro concepto de naturaleza, dejando de "...considerarla una mercancía que nos pertenece. Cuando pensemos en la tierra como en una comunidad a la que pertenecemos, podremos empezar a usarla con amor y respeto" (Leopold, 2000, original de 1949).

En ese sentido necesitamos conectar los problemas ambientales, también el cambio global, con los valores más profundos de las personas. Hay sobradas razones para conservar la naturaleza: económicas, sanitarias, filosóficas o religiosas. En su magnífico discurso de entrada en la Academia, el profesor Ángel Ramos reflexionaba en extenso sobre la diversidad e importancia de estas razones (Ramos, 1993). La relevancia que se dé a cada una de ellas afectará de alguna forma a la manera que tenemos de enfocar la solución a esos problemas. Si se priman los motivos económicos, la conservación se convierte en mejor gestión de los recursos disponibles, mientras que, si se prioriza mitigar el impacto de nuestras acciones sobre otras personas o sobre las generaciones futuras, el nivel de compromiso será mayor. Todavía más hondo será el empeño de quien ligue la conservación de la naturaleza con sus valores y creencias más íntimas, quien sepa conectar el cuidado del ambiente con los resortes últimos que mueven su vida. incluyendo sus convicciones éticas y religiosas, que, según distintos especialistas, son los principales factores del cambio en el comportamiento (Clayton y Myers, 2015; Schultz *et al.*, 2000; Steg y de Groot, 2019).

En esta línea, me gustaría subrayar las interacciones entre ciencia y religión, la primera orientada al conocimiento de los problemas ambientales, y la segunda como base de inspiración y promoción del cambio de comportamiento personal. Además, las distintas tradiciones religiosas llevan consigo una cierta visión cosmológica, que da sentido a nuestra presencia en el mundo, a nuestras relaciones con Dios, con los demás seres humanos y con el entorno. Si una determinada interpretación religiosa subraya un carácter de dominio absoluto del ser humano sobre las demás criaturas, estaríamos dando un cierto marchamo religioso a una actitud depredadora, como criticó Lynn White en su famoso artículo sobre las raíces históricas de la crisis ambiental (White, 1967), mientras si subraya nuestra res-

ponsabilidad con Dios por el cuidado de quienes comparten con nosotros este hogar común, la ética del cuidado será protagonista. Por otro lado, las tradiciones religiosas tienen un papel muy relevante en la educación, pieza clave de la transformación de los valores, y sirven como fuente de inspiración y como referente moral. Nuestra tradición cristiana incluye un acercamiento a la naturaleza basada en el asombro ante la bondad y belleza de la Creación (Schaefer, 2009), aunque esa actitud también es propia de otras religiones (Gosling, 2001). Como consecuencia, muchos parajes de gran belleza natural se han conservado precisamente por ser lugares de oración y peregrinación (Mallarach *et al.*, 2014). Finalmente, las religiones también promueven modelos de vida que subrayan la importancia del ser sobre el tener, promoviendo la búsqueda de la felicidad a través de valores metamateriales, frente al afán acumulador que acaba generando tensiones y, en último término, infelicidad (Roy, 2015). Por estas razones, una colaboración más estrecha entre la ciencia y la religión en el cuidado del planeta llevará consigo fortalezas para las dos formas de acercarnos a la realidad. Este fue el objetivo de un seminario que tuve ocasión de organizar hace unos años, donde se dieron cita científicos ambientales y líderes religiosos de trece países y ocho confesiones religiosas para estudiar vías concretas que facilitaran ese fortalecimiento mutuo. De la declaración conjunta firmada al final del evento se hizo eco la revista *Nature* (Chuvieco *et al.*, 2016).

ALGUNAS SUGERENCIAS DE ACCIÓN

Conectar conocimiento, convicciones y emociones.

Como hemos visto, el motor del cambio personal es la conexión entre conocimiento y convicciones éticas y morales, pero no hemos de olvidar que esas convicciones se fortalecen cuando se conectan con nuestras emociones, con el sentido del asombro y la admiración, que está ligado a descubrir la belleza de los entornos naturales y a empatizar anímicamente con esos entornos. Entre estas emociones, sin duda una de las más profundas es la atracción por la belleza. Todos tenemos experiencia de que aquellos eventos que han transformado nuestra vida lo han hecho porque nos conmovieron profundamente. Seguramente esas situaciones tan singulares han estado de alguna forma ligadas a la percepción de la belleza. Me refiero a una percepción honda, una impresión de asombro, de sobrecogimiento, ligado a ese rincón de nuestra alma que todavía pervive frente al rutinario acontecer de lo cotidiano. Creo que lo expresaba muy bien Charles Foucauld, un ermitaño del siglo XX desde su pequeño enclave en el desierto de Argelia: “Es un hermoso lugar para adorar al Creador. Tengo la ventaja de tener muchas almas a mi alrededor y de estar solo en mi cumbre... Esta dulzura de la soledad la he experimentado en todas las edades, desde los veinte años, cada vez que he podido disfrutar de ella. Aun sin ser cristiano, amaba la soledad frente a la hermosa naturaleza, con algunos libros; con mayor motivo debo apreciarla cuando el mundo invisible y tan dulce hace que, en la soledad, uno no se sienta nunca solo. El alma no está hecha para el ruido, sino para el recogimiento, y la vida debe ser una preparación para el cielo, no sólo mediante las obras meritorias sino también por la paz y el recogimiento en Dios. Pero el ser humano se ha lanzado en discusiones infinitas: la poca felicidad que encuentra en el ruido bastaría para demostrar cuán lejos se aparta de su vocación” (citado por (Vázquez Boreau, 2019).

Estas experiencias pueden considerarse inmediatas, en el sentido de que no están ligadas a un razonamiento o un descubrimiento buscado. Se dan muchas veces de manera fortuita, imprevista. Son inmediatas porque no están mediadas por una predisposición, ocurren sin aviso previo: “La Belleza no se razona, se ve”. Hasta tal punto es así que no siempre el conocimiento precede a la experiencia de la belleza; ni hace falta “entender” lo admirado (Chuvieco, 2023).

Pero en la sociedad del pragmatismo, la prisa y el ruido tecnológico no permiten reconocer la belleza que nos rodea. En su visión futurista y profundamente pesimista, Aldous Huxley, ya predijo en “Un mundo feliz” que la contemplación de la belleza era el principal obstáculo para implantar

una economía *eficiente*: “Las flores y los paisajes tienen un grave defecto: son gratuitos. El amor a la naturaleza no alimenta las fábricas. Se decidió abolirlo a toda costa, principalmente entre las clases más bajas”.

Ciertamente, con mucha frecuencia se intenta alentar al cambio ciudadano a través de mensajes más o menos catastrofistas, que ponen el énfasis en el miedo al colapso. Pero la mayor parte de las personas se paralizan ante el miedo, sobre todo cuando la solución no es inmediata y no depende únicamente de ellos, cuando los problemas son tan grandes que las acciones personales parecen inútiles. El miedo puede paralizar, mientras que la empatía nos mueve y nos conmueve, el deseo de conseguir algo mejor, el amor hacia quien está afectado. Creo que los seres humanos tendemos a implicarnos más en la resolución de los problemas cuando nos mueve el lado positivo de los mismos, más que el temor a sus consecuencias negativas. Lo resumía bien un lema de una campaña de concienciación ambiental realizada por la WWF: *Love, not lost*, lo que mueve a las personas es el amor, no la pérdida, el afán por mantener algo que se considera atractivo, más que el temor a perderlo. Obviamente son dos caras de la misma moneda, pero cómo se presenten los mensajes y cómo se perciban son elementos clave para cambiar comportamientos.

Impactos climáticos de nuestro consumo

Si el principal factor del cambio climático actual es la emisión de gases de efecto invernadero, la clave de la mitigación pasa por reducir esas emisiones, si es posible manteniendo nuestro nivel de vida o al menos lo más sustancial del mismo. Para que esos cambios de comportamiento sean viables es preciso, por un lado, estar motivado, y por otro estar informado. De poco serviría realizar esfuerzos ímprobos para restringir un determinado sector de nuestro consumo, si el impacto concreto de esa reducción fuera poco significativo. Por esta razón, una forma de abordar científicamente ese cambio de hábitos sería analizar en cada caso el impacto en términos de emisiones de las distintas alternativas que hubiéramos planteado. Aquí conviene recordar el concepto de huella de carbono (HC), que mide las emisiones que generan todos los procesos que requiere la producción de un determinado bien, en todo su ciclo de vida (Burgui-Burgui y Chuvieco, 2020; Smetschka *et al.*, 2019). Este concepto hace referencia a considerar los impactos de una determinada actividad o producto a lo largo de las distintas fases de elaboración del mismo. En este sentido, suelen distinguirse dos alcances: 1) el denominado “de la cuna a la puerta” (*cradle to gate* o *business to business*, B2B), que incluye las emisiones ligadas a la producción, transporte y almacenamiento del producto hasta su adquisición por

el consumidor o por otra empresa, y 2) el alcance “de la cuna a la tumba” (*cradle-to-grave* o *business to consumer B2C*), que abarca también los procesos ligados a la fase de uso y su eventual reutilización o reciclado (que puedan compensar en parte las emisiones previas).

Como las emisiones pueden deberse a distintos GEI, para tener una escala común de emisiones que se han producido en el ciclo de vida que se esté considerando, la HC suele expresarse en masa (gramos, kilogramos, toneladas...) de CO₂ equivalente (CO₂e) por unidad de producto. El CO₂e es una medida utilizada para estandarizar todas las emisiones acumuladas en la vida del producto o actividad en una escala común, en concreto en unidades de masa equivalente de CO₂, el GEI más abundante (dejando a un lado el vapor de agua), y que se usa como referencia. La equivalencia entre los distintos GEI involucrados y el CO₂ se realiza a través del denominado “Potencial de Calentamiento Global” (PCG), conocido a veces como forzamiento radiativo, de cada GEI en relación al CO₂. En pocas palabras, el PCG indica la capacidad de un determinado gas de aumentar el efecto invernadero comparada con la del CO₂, considerando un plazo de tiempo determinado (generalmente 100 años). Por ejemplo, según el IPCC, el metano tiene 28 veces más PCG que el dióxido de carbono, mientras que este valor es 265 veces mayor para el óxido nitroso (Myhre *et al.*, 2014).

Los valores promedio de la HC se calculan sobre estudios científicos que han hecho el análisis del ciclo de vida en distintos países. A partir de ellos, por ejemplo, podemos indicar que la HC de los alimentos varía grandemente, desde los cereales (0,5 kg de CO₂e para 1 kg de pan) o las hortalizas y legumbres (menos de 1 kg de CO₂e por cada kg de producto), hasta las carnes (pollo: 3,9 kg; ternera 27,1 kg; cordero 26,2 kg). Para emisiones ligadas al transporte, pueden expresarse como emisiones de CO₂e por km recorrido, mientras que para las ligadas al uso del suelo pueden indicarse en emisiones por superficie (p.ej. CO₂e emitidos por km² deforestado).

La responsabilidad climática de los ciudadanos debería considerar este tipo de información, tanto en su consumo personal, como en las actividades en las que se ve implicado, de cara a reducir la HC personal. Ciertamente, la preocupación ambiental no la explica completamente, pero en una población adecuadamente informada, resulta un predictor muy relevante (Bruderer Enzler y Diekmann, 2019). Algunos ejemplos del distinto impacto climático del consumo personal pueden ilustrar cómo pequeños cambios en el estilo de vida pueden tener un efecto considerable en las emisiones acumuladas (Chuvieco y Martín, 2023):

- Un automóvil pequeño consume unos 5,5 l a los 100 km; uno grande hasta 10 l para la misma distancia (datos del IDAE: <https://coches.idae.es/> último acceso marzo 2025). Las emisiones de CO₂ de un coche de tamaño medio están en torno a 180 g/km (pueden llegar a 400 g/km para los de gran cilindrada). Un coche híbrido puede reducirlas a menos de 100 g/km (datos del IDAE: <https://coches.idae.es/> último acceso Marzo 2025). Por tanto, la misma distancia recorrida supondrá casi el doble de emisiones para un vehículo normal y cuatro para uno de gran cilindrada que para uno híbrido, con el mismo nivel de confort. Uno eléctrico resulta una opción mucho más adecuada bajo esta óptica (emisiones directas: 0 g/km; indirectas, dependerá de la fuente con la que se genera la electricidad y de cómo se haya fabricado, principalmente las baterías de alto voltaje). En el ciclo de vida del coche, un eléctrico de tamaño medio que se cargue con energía renovable permitirá ahorrar hasta un 75% de las emisiones de un coche de gasolina del mismo tamaño (<https://huellaco2.org> último acceso marzo de 2025).
- Es obvio que nuestra alimentación impacta en el consumo que hagamos de agua y de emisiones: un mayor consumo de vegetales frente a productos cárnicos implica una reducción drástica de la huella hídrica y de carbono, ya que, por ejemplo, la cantidad de agua necesaria para consumir 1 kg de vacuno es 15 veces superior a la necesaria para el mismo peso de fruta u hortalizas. Esto no quiere decir que todos tengamos que ser veganos, pero ciertamente reducir el consumo de carnes (sobre todo procedentes de ganado estabulado) nos ayudará a reducir la huella ambiental de la comida, además de mejorar nuestra salud (Clark *et al.*, 2019).
- Utilizar electrodomésticos de bajo consumo supone un ahorro considerable en la factura eléctrica y una reducción de la energía que empleamos cotidianamente. Una bombilla incandescente (ahora retiradas del mercado) consumía entre 60 y 100 W para un nivel de luminosidad equivalente a una de 3 W basada en la tecnología LED, con una duración en horas promedio útiles casi 50 veces superior a una incandescente. En suma, estamos ahorrando entre 20 y 30 veces el consumo energético de la iluminación simplemente cambiando la tecnología. Lo mismo cabe decir de los electrodomésticos de uso más común. Un frigorífico de clase A+++ consume un promedio de 150 kWh anualmente, mientras uno de clase C de similar potencia consume unos 600 kWh en el mismo período. En definitiva, cuesta

cuatro veces más caro en términos de consumo energético, junto a lo que implique en términos de emisiones según la fuente que origine la electricidad.

- Un viaje en tren de alta velocidad desde Madrid a Valencia o Barcelona supone 4 veces menos emisiones de GEI que si lo hacemos en avión, además de resultar mucho más cómodo para el pasajero, al transportarnos hasta el centro de la ciudad, y tener un precio similar (dependiendo de las horas y compañías, naturalmente).

Cambios personales y sociales: el papel de los científicos

Con mucha frecuencia se identifica como principales responsables del CC a las empresas, particularmente las grandes corporaciones internacionales, y más específicamente las compañías petroleras (Lázaro Touza *et al.*, 2019). No será yo quien las exonere de esa culpa, pero creo que el análisis de responsabilidades no es tan sencillo. Por un lado, resulta bastante obvio que las empresas fabrican para quienes adquieren productos. Ciertamente las corporaciones promueven el consumo, intentan crear necesidades que no existen mediante hábiles estrategias de marketing, pero deberíamos también reconocer que los consumidores, todos nosotros –también los jóvenes que pueden mostrarse más críticos con la escasa ambición de las políticas de mitigación del CC– somos responsables de una forma u otra del problema (Moser y Kleinhückelkotten, 2018).

No se trata de descargar ahora la conciencia de las grandes corporaciones, sino de subrayar que está en nuestra mano hacer algo al respecto, que también somos parte del problema si no somos parte de la solución. No pretendo que volvamos al Paleolítico y dejar de consumir o usar energía. Se trata más bien de replantear los modelos actuales de consumo –o, mejor dicho, de consumismo–, donde se identifica la felicidad con la posesión. Además de implicar una acumulación innecesaria de bienes y con frecuencia un estrés vital por conseguirlos, esa tendencia supone también el uso de una ingente cantidad de recursos y energía para satisfacer una demanda tantas veces superflua, que no tiene justificación ética. El CC afecta a muchas dimensiones de nuestro modelo social, no solo a la base energética, sino también al propio concepto de desarrollo, y es responsabilidad tanto de instituciones públicas y empresas, como de todos los ciudadanos, tomar decisiones que cambien el modelo productivo, pues todos vamos a experimentar las consecuencias de las medidas que impliquen una mitigación más ambiciosa. Se trata de replantear nuestro modelo social y económi-

co, pero también de introducir cambios en las conductas personales, pues estoy bastante convencido de que los cambios sociales son consecuencia de la acumulación de cambios personales, particularmente de las personas muy motivadas.

En este sentido, me gustaría terminar este discurso reflexionando sobre la responsabilidad cívica que tenemos como científicos ambientales. Somos investigadores con conocimiento de los problemas ambientales, y creo que nuestra mejor contribución a su solución pasa por hacer buena ciencia, generando series temporales consistentes de datos precisos y exactos, con una adecuada estimación de sus incertidumbres asociadas. Pero también pienso que es parte de nuestra misión, por un lado, ser más activos en la divulgación del mejor conocimiento científico sobre las cuestiones ambientales que estudiamos y, por otro, mostrar actitudes personales coherentes con nuestra visión de los problemas. Considero que no basta con informar de las tendencias y sus riesgos asociados, sino que también nos corresponde, como expertos en la cuestión, involucrarnos más para revertirlas. Un comportamiento tibio o indiferente de quienes cabría esperar una postura más firme, precisamente por conocer la gravedad del problema, tiene un efecto demoledor en la opinión pública. Volviendo al ejemplo del tabaco, para muchas personas los riesgos sanitarios de fumar se minimizaban por la experiencia de que había médicos que lo hacían. En el ciudadano medio, el impacto de la opinión y del comportamiento de los expertos siempre es mayor que el de los indocumentados. En suma, creo que nuestra actitud y nuestro tenor de vida debería reflejar de alguna forma la relevancia del problema y, por tanto, nuestra actuación personal como científicos ambientales también debería evidenciar los valores y prioridades que proponemos a la sociedad. Esto afecta a múltiples ámbitos, desde nuestra forma de transportarnos a nuestro consumo, al tipo de energía que consumimos o el modo de alimentarnos (van Valkengoed y Steg, 2019).

Una de las barreras psicológicas más recurrentes para la acción ambiental es la percepción de que nuestras acciones son irrelevantes para resolver las dificultades. Esto es particularmente cierto cuando se trata de problemas globales, como el cambio climático, en los que una actitud de “ecofatalismo”, puede impedir nuevas acciones. Hablando objetivamente, nuestro comportamiento tiene poca repercusión en la solución de las emisiones globales, pero también es cierto que las tendencias mundiales son la suma de los valores personales. Más importante aún es el hecho de que las preocupaciones personales deberían traducirse en prácticas cotidianas. Está en juego mucho, y aunque nuestra contribución personal sea muy pequeña,

me parece muy relevante que vaya en la misma línea que marca nuestro mejor conocimiento científico de los problemas. En éste como en otros muchos temas, la coherencia personal es importante. Creo que vale la pena recordar aquí un sencillo relato escrito por el autor francés Jean Giono en 1953, que tituló “El hombre que plantaba árboles”, una historia muy breve pero muy hermosa de un personaje ficticio, Elzéard Bouffier, que con su acción individual, sencilla pero constante a lo largo de muchos años que cubren buena parte de su vida, consiguió transformar un ecosistema árido en uno exuberante. Me parece una bonita metáfora de la relevancia de las acciones personales, que son las únicas –al fin y al cabo– que dependen de nuestra propia voluntad. Eso ya llevará consigo impactos significativos, en cada uno de nosotros adaptado a nuestras circunstancias. La conversión personal será luego amplificada sobre el entorno en el cada uno tenemos una influencia natural, particularmente relevante entre quienes nos movemos en el campo docente o en la formación de jóvenes investigadores, y sin duda también en nuestro papel como académicos de la institución científica de referencia en nuestro país. Me parece que esto sólo es posible cuando exista un compromiso personal que permita extender a nuestros propios valores y hábitos las actitudes que necesitamos para cambiar la situación actual, ambientalmente insostenible.

CONCLUSIONES

He pretendido en estas páginas ligar una de las tecnologías de mayor impacto en nuestro conocimiento científico de los problemas ambientales, en este caso de los cambios globales que están ocurriendo en el planeta como consecuencia principalmente de la acción humana, con la dimensión ética y moral de esos problemas. Si la causa del conflicto es sobre todo el comportamiento humano, parece razonable que también busquemos soluciones que tengan en el factor humano su principal anclaje. El conocimiento científico que nos proporciona la observación de la tierra que realizan los satélites de teledetección es fundamental para conocer las tendencias y entender mejor los factores que las causan. Pero la ciencia informa, no transforma. Necesitamos conectarla con valores humanos que permitan fundamentar el cambio personal y social que la urgencia y gravedad de los problemas requiere.

Ese enfoque holístico conduce a ligar la ciencia con otros campos del saber, y quizá puede ayudar también a la Academia de Ciencias a que refuerce sus lazos con otras Academias (Historia, Ciencias Morales, Medicina...), en su diagnóstico de los problemas ambientales y en las soluciones que, como especialistas, brindamos al resto de la sociedad. Todos los saberes tienen espacio en aportar sugerencias y visiones que nos lleven a adoptar estilos de vida más amables con el ambiente, con las demás personas y criaturas que comparten con nosotros este maravilloso planeta.

En este sentido, me permito citar a uno de nuestros más eminentes escritores del siglo XX, Miguel Delibes Setien, quien indicó en su discurso de entrada en la Academia de la Lengua, en 1975, dedicado a expresar su preocupación por la degradación de la naturaleza, que “el primer paso para cambiar la actual tendencia del desarrollo, y, en consecuencia, de preservar la integridad del Hombre y de la Naturaleza, radica en ensanchar la conciencia moral universal” (Delibes Setien, 1975, p. 58). Esa “conciencia moral universal” se acaba concretando en decisiones personales, que la manifiesten también en nuestros hábitos cotidianos. Los científicos somos ciudadanos antes que especialistas, con las mismas tendencias y debilidades que nuestros semejantes, pero con un bagaje de conocimiento que hemos recibido de nuestros maestros, colegas de laboratorio y estudiantes, que alienta también nuestra responsabilidad. Responsabilidad que asimismo supone contribuir a mejorar la sociedad que ha contribuido a financiar nuestro esfuerzo personal. A ella también le debemos actuar como escaparates de las soluciones, incluyendo sus impactos en nuestra vida cotidiana, que estimamos imprescindibles para que la crisis climática no se convierta en tragedia.

Revertir procesos de gran calado no está en la mano del ciudadano común, tampoco de los científicos. No obstante, parece imprescindible que tomemos decisiones más comprometidas en nuestra actividad cotidiana, reflejando en la práctica nuestro conocimiento del problema. La primera imagen que se tomó de nuestro planeta desde el espacio exterior, en 1968 durante la misión del Apollo-8 (Fig. 12), cambió nuestra percepción de la Tierra, mostrándola como nuestra casa común, aislada en el inmenso universo, frágil, pero llena de vida. Esa imagen, junto a las múltiples que nos ofrecen ahora los satélites de teledetección nos servirá de estímulo para cuidar este planeta que hemos recibido como un don, trasvasándolo a las generaciones futuras en su integridad, reparando los daños ya causados y velando para que mantenga su estabilidad y belleza.

Muchas gracias.



Figura 12: Primera fotografía de nuestro planeta tomada desde otro cuerpo planetario. Fue adquirida en diciembre de 1968 por la tripulación del Apolo 8. (Fuente: Archivo fotográfico de la NASA: <https://www.nasa.gov/mission/apollo-8/>)

REFERENCIAS

- Ablain, M., A. Cazenave, et al. (2015): Improved sea level record over the satellite altimetry era (1993–2010) from the Climate Change Initiative project. *Ocean Science*, 11: 67-82.
- Adams, C., C. A. McLinden, et al. (2019): Satellite-derived emissions of carbon monoxide, ammonia, and nitrogen dioxide from the 2016 Horse River wildfire in the Fort McMurray area. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19: 2577-2599.
- Al-Yaari, A., J.-P. Wigneron, et al. (2014): Global-scale comparison of passive (SMOS) and active (ASCAT) satellite based microwave soil moisture retrievals with soil moisture simulations (MERRA-Land). *Remote Sensing of Environment*, 152: 614-626.
- Alcaraz-Segura, D., E. Chuvieco, H. E. Epstein, E. S. Kasischke y A. Trishchenko (2010): Debating the greening vs. browning of the North American boreal forest: differences between satellite datasets. *Global Change Biology*, 16: 760-770.
- Anaya, J. A., E. Chuvieco y A. Palacios-Orueta (2009): Aboveground biomass assessment in Colombia: A remote sensing approach. *Forest Ecology and Management*, 257: 1237-1246.
- Andela, N., D. C. Morton, et al. (2017): A human-driven decline in global burned area. *Science*, 356: 1356-1362.
- Aragoneses, E., M. García, P. Ruiz-Benito y E. Chuvieco (2024): Mapping forest canopy fuel parameters at European scale using spaceborne LiDAR and satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 303: 114005.
- Aragoneses, E., M. García, H. Tang y E. Chuvieco (2025): A multi-sensor approach allows confident mapping of forest canopy fuel load and canopy bulk density to assess wildfire risk at the European scale. *Remote Sensing of Environment*, 318: 114578.
- Artigas, M. (2017): *Filosofía de la Ciencia*, Pamplona EUNSA.
- Asner, G. P. (2000): Contributions of Multi-view Angle Remote Sensing to land-surface and biogeochemical research. *Remote Sensing Reviews*, 18: 137-162.

Attfield, R. (2014): *Environmental Ethics: An Overview for the Twenty-First Century*, Cambridge, UK, Polity.

Ballesteros, J. (1995): *Ecologismo Personalista. Cuidar la naturaleza, cuidar al hombre*, Madrid, Tecnos.

Baret, F. (1995): Use of spectral reflectance variation to retrieve canopy biophysical characteristics, en *Advances in Environmental Remote Sensing* (editado por F. M. Danson y S. E. Plummer). Chichester, John Wiley & Sons: 33-51.

Barletta, V. R., L. S. Sørensen y R. Forsberg (2013): Scatter of mass changes estimates at basin scale for Greenland and Antarctica. *The Cryosphere*, 7: 1411-1432.

Bartha, G. y S. Kocsis (2011): Standardization of geographic data: The european inspire directive. *European Journal of Geography*, 2: 79-89.

Bastarrika, A., A. Rodriguez-Montellano, et al. (2024): An automatic procedure for mapping burned areas globally using Sentinel-2 and VIIRS/MODIS active fires in Google Earth Engine. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 218: 232-245.

Belgiu, M. y L. Drăguț (2016): Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114: 24-31.

Birkett, C. M. (1998): Contribution of the TOPEX NASA radar altimeter to the global monitoring of large rivers and wetlands. *Water Resources Research*, 34: 1223-1239.

Blaschke, T., G. J. Hay, et al. (2014): Geographic Object-Based Image Analysis – Towards a new paradigm. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87: 180-191.

Bojinski, S., M. Verstraete, T. C. Peterson, C. Richter, A. Simmons y M. Zemp (2014): The concept of essential climate variables in support of climate research, applications, and policy. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95: 1431-1443.

Bontemps, S., M. Herold, et al. (2012): Revisiting land cover observation

to address the needs of the climate modeling community. *Biogeosciences*, 9: 2145-2157.

Bowman, D. M., G. Williamson, et al. (2020): Wildfires: Australia needs a national monitoring agency. *Nature*, 584: 188-191.

Bowman, D. M., G. J. Williamson, J. T. Abatzoglou, C. A. Kolden, M. A. Cochrane y A. M. Smith (2017): Human exposure and sensitivity to globally extreme wildfire events. *Nature Ecology & Evolution*, 1: 0058.

Brennan, J., J. L. Gomez-Dans, M. Disney y P. Lewis (2019): Theoretical uncertainties for global satellite-derived burned area estimates. *Biogeosciences*, 16: 3147-3164.

Bruderer Enzler, H. y A. Diekmann (2019): All talk and no action? An analysis of environmental concern, income and greenhouse gas emissions in Switzerland. *Energy Research & Social Science*, 51: 12-19.

Bruzzone, L. y D. Fernández Prieto (2000): A Combined Supervised and Unsupervised Approach to Classification of Multitemporal Remote Sensing Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*: 162-164.

Buchwitz, M. (2024): Product User Guide and Specification (PUGS) – Main document for Greenhouse Gas (GHG: CO₂ & CH₄) data set CDR7 (01.2003-12.2022), Copernicus Climate Change Service (C3S).

Buchwitz, M., S. Lavender y E. Chuvieco (2017): Special issue on earth observation of essential climate variables. *Remote Sensing of Environment*, 203: 1.

Buchwitz, M., M. Reuter, et al. (2018a): Copernicus Climate Change Service (C3S) Global Satellite Observations of Atmospheric Carbon Dioxide and Methane. *Advances in Astronautics Science and Technology*, 1: 57-60.

Buchwitz, M., M. Reuter, et al. (2018b): Computation and analysis of atmospheric carbon dioxide annual mean growth rates from satellite observations during 2003–2016. *Atmos. Chem. Phys.*, 18: 17355-17370.

Burgui-Burgui, M. y E. Chuvieco (2020): Beyond Carbon Footprint Calculators. New Approaches for Linking Consumer Behaviour and Climate Action. *Sustainability*, 12: 6529.

Burgui, M. y E. Chuvieco (2017): *Dimensiones éticas en los dilemas ambientales: estudio de casos*, Madrid, Ediciones Internacionales Universitarias. 2ª edición, Editorial Universidad de Alcalá, 2022.

Burke, M., S. M. Hsiang y E. Miguel (2015): Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature*, 527: 235-239.

Canicatti, M. y M. Vallone (2024): Drones in vegetable crops: A systematic literature review. *Smart Agricultural Technology*, 7: 100396.

Carrea, L., J.-F. Crétau, et al. (2023): Satellite-derived multivariate world-wide lake physical variable timeseries for climate studies. *Scientific data*, 10: 30.

Cazenave, A. y G. L. Cozannet (2014): Sea level rise and its coastal impacts. *Earth's Future*, 2: 15-34.

Chen, Y., J. Hall, et al. (2023): Multi-decadal trends and variability in burned area from the 5th version of the Global Fire Emissions Database (GFED5). *Earth System Science Data Discussions*, 15: 5227–5259.

Chuvieco, E. (2020): *Fundamentals of Satellite Remote Sensing: An Environmental Approach*. 3rd Ed., Boca Raton (FL), CRC Press.

Chuvieco, E. (2022): Observación de la tierra y cambio climático: ¿qué sabemos y cómo respondemos? *Real Academia de Ciencias*, 111: 69-76.

Chuvieco, E. (2023): La belleza en la Laudato si': fundamento de la conversión ecológica, en *La belleza, camino de comunión* (editado por D. Jara Flores). Avila, CiTES, Universidad de la Mística 71-105.

Chuvieco, E. (2024): Satellite Observation of Biomass Burning, en *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences* (editado por, Elsevier.

Chuvieco, E., M. Burgui-Burgui, A. Orellano, G. Otón y P. Ruíz-Benito (2021): Links between Climate Change Knowledge, Perception and Action: Impacts on Personal Carbon Footprint. *Sustainability*, 13: 8088.

Chuvieco, E., D. Cocero, D. Riaño, M. P. Martín, J. Martínez-Vega, J. de la Riva y F. Pérez (2004): Combining NDVI and Surface Temperature for the

estimation of live fuel moisture content in forest fire danger rating. *Remote Sensing of Environment*, 92: 322–331.

Chuvieco, E. y M. A. Martín (2023): *Cuidar la Tierra: Razones para conservar la Naturaleza*, Madrid, 2d Ed, Digital Reasons.

Chuvieco, E. y M. A. Martín (2025): *Introduction to Environmental Ethics. Caring for the Earth*, Boca Raton, CRC Press.

Chuvieco, E., F. Mouillot, et al. (2019): Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation. *Remote Sensing of Environment*, 225: 45-64.

Chuvieco, E., D. Riaño, F. M. Danson y M. P. Martín (2006): Use of a radiative transfer model to simulate the post-fire spectral response to burn severity. *Journal of Geophysical Research - Biosciences*, 111: doi:10.1029/2005JG000143.

Chuvieco, E., E. Roteta, et al. (2022): Building a small fire database for Sub-Saharan Africa from Sentinel-2 high-resolution images. *Science of the Total Environment*, Volume 845, 157139.

Chuvieco, E., M. Sánchez-Sorondo y J. Settele (2016): Religion and science: boost sustainability. *Nature*, 538: 459-459.

Clark, M. A., M. Springmann, J. Hill y D. Tilman (2019): Multiple health and environmental impacts of foods. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116: 23357-23362.

Clayton, S. y G. Myers (2015): *Conservation psychology: Understanding and promoting human care for nature*, Chichester, John Wiley & Sons.

Combal, B., F. Baret, et al. (2002): Retrieval of canopy biophysical variables from bidirectional reflectance using prior information to solve the ill-posed inverse problem. *Remote Sensing of Environment*, 84: 1-15.

Comellas, J. L. (2011): *Historia de los cambios climáticos*, Madrid, Rialp.

Congalton, R. G., J. M. Stenback y R. H. Barret (1993): Mapping deer habitat suitability using remote sensing and Geographic Information Systems. *Geocarto International*, 8: 23-33.

Cook, J., D. Nuccitelli, et al. (2013): Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature. *Environmental research letters*, 8: 024024.

Cook, J., N. Oreskes, et al. (2016): Consensus on consensus: a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming. *Environmental Research Letters*, 11: 048002.

Coopmann, O., V. Guidard, N. Fourrié y B. Josse (2020): Use of variable ozone in a radiative transfer model for the global Météo-France 4D-Var system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146: 3729-3746.

Cunningham, C. X., G. J. Williamson y D. M. J. S. Bowman (2024): Increasing frequency and intensity of the most extreme wildfires on Earth. *Nature Ecology & Evolution*, 8: 1420–1425.

Curry, P. (2011): *Ecological Ethics: an introduction*, Cambridge (UK), Polity Press.

Danson, F. M., S. E. Plummer y S. A. Briggs (1995): Remote Sensing and the information extraction problem, en *Advances in Environmental Remote Sensing* (editado por F. M. Danson y S. E. Plummer). Chichester, John Wiley & Sons: 171-177.

Davies, D., J. Hewson, V. Tanpipat, B. Quayle, O. Olsina, A. Radov y G. Ederer (2023): Global to Local: NASA's Fire Information for Resource Management System (FIRMS) Supporting Integrated Fire Management, *8th International Wildland Fire Conference*, Porto, Portugal.

de Leeuw, G., T. Holzer-Popp, et al. (2013): Evaluation of seven European aerosol optical depth retrieval algorithms for climate analysis. *Remote Sensing of Environment*, 162: 295-315.

De Santis, A. y E. Chuvieco (2007): Burn severity estimation from remotely sensed data: performance of simulation versus empirical models. *Remote Sensing of Environment*, 108: 422-435.

DeFries, R. (2013): Remote Sensing and Image Processing, en *Encyclopedia of Biodiversity (Second Edition)* (editado por S. A. Levin). Waltham, Academic Press: 389-399.

Delibes Setien, M. (1975): *El sentido del progreso en mi obra*, Madrid, Real Academia Española.

Duane, A., M. Castellnou y L. Brotons (2021): Towards a comprehensive look at global drivers of novel extreme wildfire events. *Climatic Change*, 165: 43.

Dubovik, O. y M. D. King (2000): A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements. *Journal of Geophysical Research*, 105: 20673-20696.

Fahey, D. W. y M. I. Hegglin (Ed.) Eds.) (2011): *Twenty questions and answers about the ozone layer: 2010 update*, Scientific assessment of ozone depletion, Geneva, World Meteorological Organization, Switzerland.

Fang, H. y S. Liang (2003): Retrieving Leaf Area Index With a Neural Network Method: Simulation and Validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41: 2052-2062.

Farina, A. (1998): *Principles and methods in landscape ecology*, Cambridge, UK, Chapman & Hall Ltd,.

Forman, R. T. T. y M. Godron (1986): *Landscape Ecology*, New York, John Wiley and Sons.

Fraser, R. H., R. Fernandes y R. Latifovic (2003): Multi-temporal Mapping of Burned Forest over Canada Using Satellite-based Change Metrics. *Geocarto International*, 18: 37 - 47

Friedlingstein, P., M. O'Sullivan, et al. (2024): Global Carbon Budget 2024. *Earth Systems Science Data*, 2024: 1-133.

Frohn, R. C. (1998): Remote Sensing for Landscape Ecology. New Metric Indicators for Monitoring, Modeling and Assessment of Ecosystems, Boca Raton, Lewis Publishers.

Galí, J. M. (2014): Consumicidio: Ensayo sobre el consumo (in) sostenible, Barcelona, OmniaBooks.

Gao, F., C. B. Schaaf, A. H. Strahler, Y. Jin y X. Li (2003): Detecting vegetation structure using a kernel-based BRDF model. *Remote Sensing of Environment*, 86: 198-205.

GCOS (2021): *The Status of the Global Climate Observing*, Geneva, Switzerland, GCOS-240. World Meteorological Organization.

GCOS (2022a): *The 2022 GCOS ECVs Requirements*, Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization.

GCOS (2022b): *The 2022 GCOS Implementation Plan*, Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization.

GCOS (2025): *The 2022 GCOS ECVs Requirements. Updated 2025*, Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization, GCOS-245.

Giglio, L., W. Schroeder y C. O. Justice (2016): The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. *Remote Sensing of Environment*, 178: 31-41.

Goetz, S., A. Bunn, G. Fiske y R. A. Houghton (2005): Satellite-observed photosynthetic trends across boreal North America associated with climate and fire disturbance. *Proc. National Acad Sciences*, 102: 13521-13525.

Gopal, S. y C. Woodcock (1996): Remote sensing of forest change using artificial neural networks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34: 398-404.

Gorelick, N., M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau y R. Moore (2017): Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202: 18-27.

Gosling, D. L. (2001): *Religion and Ecology in India and Southeast Asia*, London, Routledge.

Gruber, A., T. Scanlon, R. van der Schalie, W. Wagner y W. Dorigo (2019): Evolution of the ESA CCI Soil Moisture climate data records and their underlying merging methodology. *Earth Systems Science Data*, 11: 717-739.

Haboudane, D., J. R. Miller, N. Tremblay, P. J. Zarco-Tejada y L. Dextraze (2002): Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 81: 416– 426.

Haines-Young, R., D. R. Green y S. H. Cousins (Ed.) Eds.) (1993): *Landscape Ecology and Geographic Information Systems*, London, Taylor and Francis.

Hall, J., W. Schroeder, et al. (2023): Geostationary active fire products validation: GOES-17 ABI, GOES-16 ABI, and Himawari AHI. *International Journal of Remote Sensing*, 44: 3174-3193.

Hally, B., L. Wallace, K. Reinke, S. Jones y A. Skidmore (2019): Advances in active fire detection using a multi-temporal method for next-generation geostationary satellite data. *International Journal of Digital Earth*, 12: 1030-1045.

Hansen, M. J., S. E. Franklin, C. G. Woudsma y M. Peterson (2001): Caribou habitat mapping and fragmentation analysis using Landsat MSS, TM, and GIS data in the North Columbia Mountains, British Columbia, Canada. *Remote Sensing of Environment*, 77: 50-65.

Hards, V. (2005): *Volcanic contributions to the global carbon cycle*, Nottingham, UK, British Geological Survey.

Hargrove, W. W., R. H. Gardner, M. G. Turner, W. H. Romme y D. G. Despain (2000): Simulating fire patterns in heterogeneous landscapes. *Ecological Modelling*, 135: 243-263.

Hay, S. I., S. E. Randolph y J. R. David (2000): *Remote sensing and geographical information systems in epidemiology*, New York, Academic Press.

Hegglin, M. I., A. Bastos, et al. (2022): Space-based Earth observation in support of the UNFCCC Paris Agreement. *Frontiers in Environmental Science*, 10: 10.3389/fenvs.2022.941490.

Hermosilla, T., M. A. Wulder, J. C. White, N. C. Coops y G. W. Hobart (2015): Regional detection, characterization, and attribution of annual forest change from 1984 to 2012 using Landsat-derived time-series metrics. *Remote Sensing of Environment*, 170: 121-132.

Hersbach, H., B. Bell, et al. (2020): The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, n/a: 10.1002/qj.3803.

Hertwich, E. G. y G. P. Peters (2009): Carbon footprint of nations: A global, trade-linked analysis. *Environmental science & technology*, 43: 6414-6420.

Heydari, S. S. y G. Mountrakis (2019): Meta-analysis of deep neural networks in remote sensing: A comparative study of mono-temporal classification to support vector machines. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 152: 192-210.

Hoffer, R. M. (1994): Challenges in developing and applying remote sensing to ecosystem management, en *Remote Sensing and GIS in Ecosystem Management* (editado por V. A. Sample). Washington D.C., Island Press: 25-40.

Hollmann, R., C. J. Merchant, et al. (2013): The ESA Climate Change Initiative: satellite data records for essential climate variables. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94: 1541-1552.

Holmlund, K., J. Grandell, et al. (2021): Meteosat Third Generation (MTG): Continuation and Innovation of Observations from Geostationary Orbit. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102: E990-E1015.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Ed.) (2007): *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment*, Cambridge, Cambridge University Press.

IPCC (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, UK and New York, NY, USA, Cambridge University Press.

Islam, T., Y. Hu, A. A. Kokhanovsky y J. Wang (2017): *Remote Sensing of Aerosols, Clouds, and Precipitation*, Amsterdam, Elsevier.

Jacquemoud, S. (1990): PROSPECT: a model to leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, 34: 74-91.

Jain, P., Q. E. Barber, et al. (2024): Drivers and Impacts of the Record-Breaking 2023 Wildfire Season in Canada. *Nature Communications*, 15: 6764.

Jensen, J. R. (2000): Remote Sensing of the Environment. An Earth Resource Perspective, Upper Saddle River N.J., Prentice-Hall.

Jones, M. W., D. I. Kelley, et al. (2024): State of Wildfires 2023-24. *Earth Systems Science Data*, 16: 3601–3685.

Ju, J., D. P. Roy, E. Vermote, J. Masek y V. Kovalskyy (2012): Continental-scale validation of MODIS-based and LEDAPS Landsat ETM+ atmospheric correction methods. *Remote Sensing of Environment*, 122: 175-184.

Juan Pablo II (2001): *Audiencia General, 17 de enero*, Vaticano, http://w2.vatican.va/content/john-paul-ii/es/audiences/2001/documents/hf_jp-ii_aud_20010117.html.

Jurdao, S., M. Yebra, J. P. Guerschman y E. Chuvieco (2013): Regional estimation of woodland moisture content by inverting Radiative Transfer Models. *Remote Sensing of Environment* 132: 59-70.

Justice, C. O., J. R. G. Townshend, et al. (2002): An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*, 83: 3-15.

Kaufman, Y. J., C. J. Tucker y I. Y. Fung (1990): Remote Sensing of biomass burning in the tropics. *Journal of Geophysical Research*, 95: 9927-9939.

Kavvada, A., G. Metternicht, et al. (2020): Towards delivering on the sustainable development goals using earth observations. *Remote Sensing of Environment*, 247: 111930.

Kennedy, R. E., Z. Yang y W. B. Cohen (2010): Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr – Temporal segmentation algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 114: 2897-2910.

Koetz, B., Baret, F., Poilvé, H., Hill, J. (2005): Use of coupled canopy structure dynamic and radiative transfer models to estimate biophysical canopy characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 95: 115-124.

Kogan, F., A. Gitelson, E. Zakarin, L. Spivak y L. Lebed (2003): AVHRR-Based spectral vegetation index por quantitative assessment of vegetation state and productivity: calibration and validation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69: 899-906.

Koutsias, N. y M. Karteris (1998): Logistic regression modelling of multitemporal Thematic Mapper data for burned area mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 19: 3499-3514.

Kumar, A. (Ed.) (2024): *Earth Observation in Urban Monitoring : Techniques and Challenges*, Earth Observation Series, Amsterdam, Netherlands, Elsevier Ltd.

LaJeunesse Connette, K. J., G. Connette, et al. (2016): Assessment of mining extent and expansion in Myanmar based on freely-available satellite imagery. *Remote sensing*, 8: 912.

Latifovic, R., Z. L. Zhu, J. Cihlar, C. Giri y I. Olthof (2004): Land cover mapping of north and central America - Global Land Cover 2000. *Remote Sensing of Environment*, 89: 116-127.

Lauer, A., V. Eyring, et al. (2017): Benchmarking CMIP5 models with a subset of ESA CCI Phase 2 data using the ESMValTool. *Remote Sensing of Environment*, 203: 9-39.

Lázaro Touza, L., C. González Enríquez y G. Escribano Francés (2019): *Los españoles ante el cambio climático*, Madrid, Real Instituto Elcano.

Leclercq, P. W., J. Oerlemans, H. J. Basagic, I. Bushueva, A. Cook y R. Le Bris (2014): A data set of worldwide glacier length fluctuations. *The Cryosphere*, 8: 659-672.

Lefsky, M. A., D. J. Harding, et al. (2005): Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat. *Geophysical Research Letters*, 32: L22S02.

Legeais, J.-F., M. Ablain, et al. (2018): An improved and homogeneous altimeter sea level record from the ESA Climate Change Initiative. *Earth System Science Data*, 10: 281-301.

Lehmann, A., J. Masò, S. Nativi y G. Giuliani (2020): Towards integrated essential variables for sustainability. *International Journal of Digital Earth*, 13: 158-165.

Leopold, A. (2000): *Una Ética de la Tierra*. Edición de Jorge Riechmann, Madrid, Los libros de la Catarata.

Lewandowsky, S., J. Cook, N. Fay y G. E. Gignac (2019): Science by social media: Attitudes towards climate change are mediated by perceived social consensus. *Memory & Cognition*, 47: 1445-1456.

Lizundia-Loiola, J., M. Franquesa, A. Khairoun y E. Chuvieco (2022): Global burned area mapping from Sentinel-3 Synergy and VIIRS active fires. *Remote Sensing of Environment*, 282: 113298.

Lizundia-Loiola, J., G. Otón, R. Ramo y E. Chuvieco (2020): A spatio-temporal active-fire clustering approach for global burned area mapping at 250 m from MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 236: 111493.

Lo, T. H. C., F. L. Scarpace y T. M. Lillesand (1986): Use of multitemporal spectral profiles in agricultural land-cover classification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52: 535-544.

Long, T., Z. Zhang, et al. (2019): 30 m Resolution Global Annual Burned Area Mapping Based on Landsat Images and Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 11: 489.

Longmire, P. y D. Stow (2001): Use of Very High Spatial Resolution Remotely Sensed Imagery for Assessing Land-Cover Changes in Shrub Habitat Preserves of Southern California. *Geocarto International*, 16: 47-57.

Lorentzen, L. A. (2001): *Ética Ambiental*, Puebla, Universidad Iberoamericana Puebla.

Lucas, R. M., M. Honzak, G. M. Foody, P. J. Curran y C. Corves (1993): Characterizing tropical secondary forests using multi-temporal Landsat sensor imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 14: 3016-3067.

Mallarach, J. M., J. Corcó y T. Papayannis (2014): Christian monastic communities living in harmony with the environment: an overview of positive trends and best practices. *Studia monastica*, 56: 353-391.

Marcos, A. y C. J. Alonso (2020): *Un paseo por la ética actual*, Madrid, Digital Reasons.

Martínez, J., E. Chuvieco y N. Koutsias (2013): Modelling long-term fire occurrence factors in Spain by accounting for local variations with

geographically weighted regression. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(2): 311-327.

Moreno, J. M. (2024): *El fuego en el sistema tierra* Madrid, Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España.

Morisette, J. T., L. Giglio, I. Csiszar y C. O. Justice (2005): Validation of the MODIS active fire product over Southern Africa with ASTER data. *International Journal of Remote Sensing*, 26: 4239-4264.

Moser, S. y S. Kleinhüchelkotten (2018): Good Intentions, but Low Impacts: Diverging Importance of Motivational and Socioeconomic Determinants Explaining Pro-Environmental Behavior, Energy Use, and Carbon Footprint. *Environment and Behavior*, 50: 626-656.

Muchoki, C. H. K. (1988): Remotely sensed relationships between wooded patch habitats and agricultural landscape type: a basis for ecological planning, en *Landscape ecology and management* (editado por M. R. Moss). Montreal, Polyscience Publications: 85-95.

Myhre, G., D. Shindell y J. Pongratz (2014): Anthropogenic and natural radiative forcing, en *Climate change 2013 : the physical science basis; Working Group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (editado por T. Stocker). Cambridge, Cambridge University Press: 659-740

National Research Council (2010): *Advancing the Science of Climate Change*, Washington, D.C., The National Academy Press.

Notz, D. (2015): How well must climate models agree with observations? *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373: 20140164.

Ormerod, N. y C. Vanin (2016): Ecological Conversion: What Does it Mean? *Theological Studies*, 77: 328-352.

Otón, G., J. Lizundia-Loiola, M. L. Pettinari y E. Chuvieco (2021a): Development of a consistent global long-term burned area product (1982–2018) based on AVHRR-LTDR data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 103: 102473.

Otón, G., J. M. C. Pereira, J. M. N. Silva y E. Chuvieco (2021b): Analysis of Trends in the FireCCI Global Long Term Burned Area Product (1982–2018). *Fire*, 4: 74.

Papa Francisco (2015): *Carta Encíclica Laudato si' sobre el cuidado de la casa común*, Vaticano.

Pérez-Díaz, V. y J. C. Rodríguez (2017): *Ecobarómetro Fundación Endesa. Cultura ecológica y educación*, Madrid, Endesa Fundación.

Pettinari, M. L., R. D. Ottmar, S. J. Prichard, A. G. Andreu y E. Chuvieco (2014): Development and mapping of fuel characteristics and associated fire potentials for South America. *International Journal of Wildland Fire*, 23: 643-654.

Pontius, J., Robert G., E. Shusas y M. McEachern (2004): Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 101: 251-268.

Popp, T., M. I. Hegglin, et al. (2020): Consistency of Satellite Climate Data Records for Earth System Monitoring. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101: E1948-E1971.

Quattrochi, D. A. y M. F. Goodchild (Ed.) Eds.) (1997): *Scale in Remote Sensing and GIS*, Boca Raton, CRC Press, Inc.

Quintano, C., A. Fernandez-Manso y O. Fernandez-Manso (2018): Combination of Landsat and Sentinel-2 MSI data for initial assessing of burn severity. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64: 221-225.

Ramo, R., M. García, D. Rodríguez y E. Chuvieco (2018): A data mining approach for global burned area mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73: 39-51.

Ramo, R., E. Roteta, I. Bistinas, D. van Wees, A. Bastarrika, E. Chuvieco y G. R. van der Werf (2021): African burned area and fire carbon emissions are strongly impacted by small fires undetected by coarse resolution satellite data. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118: e2011160118.

Ramos, A. (1993): *¿Por qué la conservación de la Naturaleza?*, Madrid, Fundación Conde del Valle de Salazar.

Riaño, D., E. Meier, B. Allgöwer y E. Chuvieco (2002): Generation of vegetation height, vegetation cover and crown bulk density from airborne laser scanning data, *IV International Conference on Forest Fire Research. 2002 Wildland Fire Safety Summit*, Luso, Coimbra, Portugal, Millpress: 8.

Rincón Andrade, M. (2018): Hacia una comprensión de la conversión ecológica. *Franciscanum. Revista de las Ciencias del Espíritu*, 60: 311-337.

Rocchini, D., D. S. Boyd, et al. (2016): Satellite remote sensing to monitor species diversity: potential and pitfalls. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2: 25-36.

Rodríguez-Fernández, N., P. de Rosnay, C. Albergel, P. Richaume, F. Aires, C. Prigent y Y. Kerr (2019): SMOS Neural Network Soil Moisture Data Assimilation in a Land Surface Model and Atmospheric Impact. *Remote Sensing*, 11: 1334.

Roebeling, R., S. Bojinski, P. Poli, V. John y J. Schulz (2025): On the determination of GCOS ECV product requirements for climate applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 106: E868-E893.

Roy, M. (2015): Laudato si, Cáritas y la ecología integral, en *Lado seas, mi Señor. Comentario a la encíclica Laudato si' del papa Francisco* (editado por F. Chica y C. Granados). Madrid, BAC: 145.

Sader, S. A. y J. C. Winne (1992): RGB-NDVI colour composites for visualizing forest change dynamics. *International Journal of Remote Sensing*, 13: 3055-3067.

Sample, V. A. (Ed.) (1994): *Remote Sensing and GIS in Ecosystem management*, Washington, D.C., The Island Press.

Schaefer, J. (2009): Theological foundations for environmental ethics: Reconstructing patristic and medieval concepts, Washington, D.C., Georgetown University Press.

Schriever, J. R. y R. G. Congalton (1995): Evaluating seasonal variability as an aid to cover-type mapping from Landsat Thematic Mapper data in the Northeast. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61: 321-327.

Schultz, P. W., L. Zelezny y N. J. Dalrymple (2000): A multinational perspective on the relation between Judeo-Christian religious beliefs and attitudes of environmental concern. *Environment and Behavior*, 32: 576-591.

Seguin, B. L., J. P. Lagouarde y M. Savane (1991): The assessment of regional water conditions from meteorological satellite thermal infrared data. *Remote Sensing of Environment*, 35: 141-148.

Shabanov, N. V., Y. Wang, et al. (2003): Effect of foliage spatial heterogeneity in the MODIS LAI and FPAR algorithm over broadleaf forests. *Remote Sensing of Environment*, 85: 410-423.

Shepherd, A., E. Ivins, et al. (2020): Mass balance of the Greenland Ice Sheet from 1992 to 2018. *Nature*, 579: 233-239.

Silva, J. M. N., J. F. C. L. Cadima, J. M. C. Pereira y J. M. Gregoire (2004): Assessing the feasibility of a global model for multi-temporal burned area mapping using SPOT-VEGETATION data. *International Journal of Remote Sensing*, 25: 4889-4913.

Smetschka, B., D. Wiedenhofer, C. Egger, E. Haselsteiner, D. Moran y V. Gaube (2019): Time Matters: The Carbon Footprint of Everyday Activities in Austria. *Ecological Economics*, 164: 106357.

Song, X.-P., M. C. Hansen, S. V. Stehman, P. V. Potapov, A. Tyukavina, E. F. Vermote y J. R. Townshend (2018): Global land change from 1982 to 2016. *Nature*, 560: 639-643.

Stammer, D. y A. Cazenave (2017): *Satellite altimetry over oceans and land surfaces*, Boca Raton, CRC Press.

Steg, L. y J. I. de Groot (Ed.) Eds.) (2019): *Environmental Psychology: An Introduction*, 2nd. edition, Hooboken, NJ., John Wiley & Sons Ltd.

Stern, N. (2007): Stern Review on The Economics of Climate Change. Executive Summary, London, M Treasury.

Strahler, A. H., C. E. Woodcock y J. A. Smith (1986): On the nature of models in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 20: 121-140.

Sun, Z., R. Xu, W. Du, L. Wang y D. Lu (2019): High-Resolution Urban Land Mapping in China from Sentinel 1A/2 Imagery Based on Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 11: 752.

Supran, G., S. Rahmstorf y N. Oreskes (2023): Assessing ExxonMobil's global warming projections. *Science*, 379: eabk0063.

The Royal Society y National Academy of Sciences (2020): *Climate change: evidence and causes. Update*, Washington, D.C., National Academies Press.

Thomas, J. R., L. N. Namken, G. F. Oerther y R. G. Brown (1971): Estimating leaf water content by reflectance measurements. *Agronomy Journal*, 63: 845-847.

Tilstone, G. H., S. Pardo, et al. (2021): Performance of Ocean Colour Chlorophyll a algorithms for Sentinel-3 OLCI, MODIS-Aqua and Suomi-VIIRS in open-ocean waters of the Atlantic. *Remote Sensing of Environment*, 260: 112444.

Tso, B. y P. Mather (2001): *Classification Methods for Remote Sensed Data*, London, Taylor and Francis.

Tysic, P., T. Strelets y W. Tuszyńska (2022): The application of satellite image analysis in oil spill detection. *Applied Sciences*, 12: 4016.

US Department of Health Human Services (2014): *The health consequences of smoking—50 years of progress: a report of the Surgeon General*, Atlanta, GA, US Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Center for Chronic Disease Prevention and Health Promotion, Office on Smoking and Health.

van Leeuwen, W. J. D., A. R. Huete, J. Duncan y J. Franklin (1994): Radiative transfer in shrub savanna sites in Niger: preliminary results from HAPEX-Sahel. 3. Optical dynamics and vegetation index sensitivity to biomass and plant cover. *Agricultural and Forest Meteorology*, 69: 267-288.

van Valkengoed, A. M. y L. Steg (2019): Meta-analyses of factors motivating climate change adaptation behaviour. *Nature Climate Change*, 9: 158-163.

Vázquez Boreau, J. L. (2019): *El camino de conversión de Charles de Foucauld*, Madrid, Digital Reasons.

Velayos, C. (2008): *Ética y cambio climático*, Bilbao, Desclee de Brouwer.

Verhoef, W. y H. Bach (2003): Simulation of hyperspectral and directional radiance images using coupled biophysical and atmospheric radiative transfer models. *Remote Sensing of Environment*, 87: 23-41.

Viana-Soto, A., I. Aguado, J. Salas y M. García (2020): Identifying post-fire recovery trajectories and driving factors using landsat time series in fire-prone Mediterranean pine forests. *Remote Sensing*, 12: 1499.

Viana-Soto, A., M. García, I. Aguado y J. Salas (2022): Assessing post-fire forest structure recovery by combining LiDAR data and Landsat time series in Mediterranean pine forests. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 108: 102754.

von Schuckmann, K., L. Cheng, et al. (2020): Heat stored in the Earth system: where does the energy go? *Earth Syst. Sci. Data*, 12: 2013-2041.

Watts, N., W. N. Adger, et al. (2015): Health and climate change: policy responses to protect public health. *The lancet*, 386: 1861-1914.

WGMS (2025): Fluctuations of Glaciers (FoG) Database. World Glacier Monitoring Service (WGMS), Zurich.

White, J. C., M. A. Wulder, T. Hermosilla, N. C. Coops y G. W. Hobart (2017): A nationwide annual characterization of 25 years of forest disturbance and recovery for Canada using Landsat time series. *Remote Sensing of Environment*, 194: 303-321.

White, L. T. (1967): The Historical Roots of Our Ecological Crisis. *Science*, 155: 1203-1207.

Wilkie, D. S. y J. T. Finn (1996): *Remote Sensing Imagery for Natural Resources Monitoring*, New York, Columbia University Press.

Willis, K. S. (2015): Remote sensing change detection for ecological monitoring in United States protected areas. *Biological Conservation*, 182: 233-242.

Woodcock, C. E. y A. H. Strahler (1987): The factor of scale in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 21: 311-332.

Yang, F., K. Ichii, et al. (2007): Developing a continental-scale measure of gross primary production by combining MODIS and AmeriFlux data through Support Vector Machine approach. *Remote Sensing of Environment*, 110: 109-122.

Yebra, M. y E. Chuvieco (2009): Linking ecological information and radiative transfer models to estimate fuel moisture content in the Mediterranean region of Spain: Solving the ill-posed inverse problem. *Remote Sensing of Environment* 113: 2403-11.

Yebra, M., E. Chuvieco y D. Riaño (2008): Estimation of live Fuel Moisture Content from MODIS images for fire risk assessment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148: 523-536.

Yebra, M., P. Dennison, et al. (2013): A global review of remote sensing of live fuel moisture content for fire danger assessment: moving towards operational products *Remote Sensing of Environment* 136: 455-468.

You, X. (2023): Surge in extreme forest fires fuels global emissions. *Nature*: doi: <https://doi.org/10.1038/d41586-023-04033-y>.

Zarco-Tejada, P., J. R. Miller, et al. (2004): Needle chlorophyll content estimation through model inversion using hyperspectral data from boreal conifer forest canopies. *Remote Sensing of Environment*, 89: 189– 199.

Zhan, X., R. A. Sohlberg, et al. (2002): Detection of land cover changes using MODIS 250 m data. *Remote Sensing of Environment*, 83: 336-350.

Zheng, B., P. Ciais, et al. (2023): Record-high CO₂ emissions from boreal fires in 2021. *Science*, 379: 912-917.

Zhu, Z. (2017): Change detection using Landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 130: 370-384.

Zhu, Z., M. A. Wulder, et al. (2019): Benefits of the free and open Landsat data policy. *Remote Sensing of Environment*, 224: 382-385.

**CONTESTACIÓN
DEL
EXCMO. SR. D. JOSÉ MANUEL MORENO RODRÍGUEZ**

La toma de posesión de los académicos numerarios de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España es un acto de celebración, pues con él reconocemos a alguien que ha destacado en su campo científico a lo largo de una dilatada carrera profesional. Por eso, es un honor haber recibido el encargo de nuestra Presidenta de contestar al discurso de entrada del nuevo académico numerario, que ya lo era correspondiente, y glosar sus logros y cualidades. El Profesor Chuvieco lleva toda su vida profesional mirando al mundo desde los satélites que orbitan la Tierra a miles de kilómetros de distancia. Por eso, no sorprende que su discurso se haya centrado en el cambio global, lo que celebro. Permítanme que les traslade algunas reflexiones sobre su interesante discurso.

Uno de los principales causantes del cambio climático es el CO₂, cuya medida no es sencilla. En 1958, Charles D. Keeling comenzó a medirlo en el observatorio de Mauna Loa, Hawaii, EE.UU. Sus medidas, que aún continúan, han terminado siendo referencia mundial. En su primer trabajo, en 1976 (Keeling et al., 1976), mostraba cómo el CO₂ estaba aumentando. La primera medida fue de 313 ppm en volumen, la actual es de 429 ppm. Para encontrar tales niveles debemos remontarnos 2,5 Ma (The Cenozoic CO₂ PIP Consortium et al., 2023). Estas concentraciones tan elevadas cambian la fotosíntesis de las plantas (Bazzaz, 1990). Además, disminuyen el pH de los océanos, lo que afecta a los organismos que precisan carbonato cálcico para formar sus estructuras (Kroeker et al., 2010). Hoy, gracias a la teledetección, como nos ha mostrado el Prof. Chuvieco, podemos medir continua y globalmente estos dos cambios.

En 1896, Svante Arrhenius, premio nobel de química, hizo cálculos aproximados de cómo podría cambiar la temperatura de la Tierra si se seguía quemando carbón y expulsando CO₂ a la atmósfera. Por tanto, la ciencia del siglo XIX conocía ya el papel de los gases de efecto invernadero sobre el clima. En 1967, el premio nobel de física Syukuro Manabe y Richard T. Wetherald usaron un modelo físico del clima para calcular el efecto de duplicar la concentración de CO₂ sobre el clima, concluyendo que la Tierra se calentaría 2 °C (Manabe y Wetherald, 1967). La percepción mundial de este fenómeno sufrió una sacudida cuando se conoció la reconstrucción de la atmósfera pasada a partir de las burbujas de aire atrapadas en los hielos

de la Antártida. El CO₂ y la temperatura habían variado conjuntamente, ciclo glaciario tras ciclo glaciario (Barnola et al., 1987; Petit et al., 1999). De repente, teníamos ante nuestros ojos la demostración palpable de que lo que los modelos climáticos preveían había estado ocurriendo en la Tierra. La temperatura media superficial del planeta hoy es 1,55 °C superior a la de época preindustrial (1850-1900) (WMO, 2025). Esto significa que el cambio climático experimentado está impactando sobre todos los ecosistemas y sobre nosotros mismos (IPCC, 2018).

Calentar el agua de los océanos hace que se expandan, a lo que se suma el derretimiento de los glaciares asentados en tierra para aumentar el nivel del mar. Con ello, la faz de nuestras costas está cambiando (Cazenave y Cozannet, 2014). El aumento de la temperatura del agua disminuye la solubilidad del oxígeno, lo que unido a la eutrofización de las zonas costeras causa anoxia, promoviendo la muerte masiva de los organismos marinos (Levin, 2018).

La emisión de gases clorofluorocarbonados (CFC) ha reducido la capa de ozono de la estratosfera, lo que deja pasar la radiación ultravioleta y amenaza la vida, además de tener consecuencias para el cambio climático (Son et al., 2009). Afortunadamente, aquí sí ha habido un acuerdo, plasmado en el Protocolo de Montreal, de 1988, que está revirtiendo este efecto (Stone et al., 2021).

Además, hay cambios regionales que por su significación y magnitud terminan teniendo repercusiones globales. Entre ellos destaca la transformación de la cubierta terrestre, particularmente por la deforestación, singularmente de los bosques tropicales. La pérdida de hábitats amenaza la biodiversidad de la Tierra (Jantz et al., 2015). Buena parte del agua no fluye libremente al mar, sino que la retenemos en presas, modificando los caudales de los ríos, su funcionamiento (Rolls et al., 2012) y los tiempos de su llegada al mar, lo que modifica la salinidad, el pH y el contenido en nutrientes de los ecosistemas estuarinos y costeros (Gillanders y Kingsford, 2002). De otro lado, explotamos las poblaciones animales, particularmente las marinas, más allá de lo que permite su capacidad de regeneración. La extracción de los elementos superiores de las cadenas tróficas tiene efectos en cascada sobre las otras poblaciones, alterando así el ecosistema marino (Lotze y Worm, 2009).

El ingente trasiego mundial de mercancías y personas está promoviendo invasiones de especies exóticas en todo el mundo, lo que amenaza la

persistencia de muchas especies autóctonas (Gurevitch y Padilla, 2004), incluida la nuestra por las pandemias. El uso abusivo de fertilizantes está eutrofizando los ecosistemas terrestres y acuáticos. La acuicultura hace lo propio en las zonas de cultivo marino. Esto altera la composición y el funcionamiento de los ecosistemas, al favorecer a las especies de crecimiento rápido, que desplazan a otras menos competitivas (Smith y Schindler, 2009). La agricultura, además, usa pesticidas que afectan a los componentes de la cadena trófica de los ecosistemas terrestres o acuáticos, donde inexorablemente terminan (Chagnon et al., 2015).

Finalmente, la contaminación atmosférica en las ciudades interacciona con la radiación solar para producir ozono en la troposfera, un gas muy oxidante que afecta a las cosechas y seres vivos (Ainsworth et al., 2012). Los aerosoles procedentes de la contaminación reflejan la luz, lo que puede alterar la productividad primaria de los ecosistemas (Cohan et al., 2002). La contaminación lumínica prevalece en amplias zonas del mundo, y está afectando a numerosas especies (Linares Arroyo et al., 2024).

Como vemos, la transformación del planeta es inmensa. A veces, productos tan aparentemente inocuos, como los mencionados CFC, terminan siendo muy lesivos, aunque podría haber sido peor. La industria dudó sobre usar cloro o bromo para sintetizarlos, pues su efecto era parecido. Afortunadamente se decidió por cloro, porque de haber usado bromo su efecto hubiese sido catastrófico, ya que es 100 veces más potente en destruir el ozono (Crutzen, 1996). Hoy estamos inmersos en una crisis por el uso masivo de algo tan, supuestamente, inocuo como el plástico, cuyas dimensiones apenas vislumbramos (Law, 2017).

Nuestra actividad ha transformado el funcionamiento del sistema Tierra. El punto de inflexión se produjo tras la Segunda Guerra Mundial, con lo que se ha denominado “la gran aceleración”: el aumento, en muchos casos exponencial, de los impulsores del cambio global. Entre 1950 y la actualidad, la población humana ha pasado de 2.000 a 8.000 millones; el producto interior bruto se ha multiplicado por doce; los turistas internacionales han aumentado de 25 millones a 1.400 millones. Para mover la economía global se necesitan ingentes cantidades de combustibles fósiles, además de minerales y otros recursos naturales. El transporte de mercancías alcanza cifras astronómicas (Steffen et al., 2015).

Todos estos cambios llevaron a P. Crutzen, premio nobel de química, y a Eugene Stoermer a proponer que estamos en una nueva era planetaria, el

Antropoceno (Crutzen y Stoermer, 2000). Su idea era mostrar que el sistema Tierra funciona de manera diferente a como lo había estado haciendo hasta ahora, al estar dominado por una de sus especies: *Homo sapiens*. Aunque la propuesta fue rechazada por la Comisión Internacional de Estratigrafía el año pasado, el concepto sigue siendo útil para referirnos a esta realidad (Zalasiewicz et al., 2024) y, puesto que el cambio dista mucho de detenerse, podemos decir: ¡Larga vida al Antropoceno!

El cambio climático y los otros cambios globales que estamos experimentando son el mayor desafío al que se enfrenta la humanidad. Aunque hace más de un siglo sabíamos que cambiar la composición atmosférica podría afectar al clima de la Tierra, todavía seguimos haciéndolo. La razón es que algunos partidos políticos y grupos de presión han cuestionado *ad nauseam* que las evidencias fuesen suficientes para concluir que los humanos somos los responsables del calentamiento planetario. Más aún, algunas grandes empresas, con las petroleras a la cabeza, como ExxonMobil, han invertido ingentes cantidades de dinero en comprar voluntades políticas y científicas para sembrar dudas sobre ello (Oreskes y Conway, 2011). Y lo hicieron a pesar de que sus propios científicos habían realizado estudios rigurosos en la década de 1970 y concluido lo que los demás, como ha quedado al descubierto al desclasificar sus archivos (Supran et al., 2023). Aun así, en un acto de cinismo corporativo insoportable, sus líderes negaron una y otra vez, incluso ante el Congreso de los EE.UU., que hubiese evidencias de que quemar petróleo terminaría afectando al clima de la Tierra. Como colofón a este negacionismo, el Presidente de EE.UU., en su reciente declaración ante la Asamblea de las Naciones Unidas ha dicho que el cambio climático es un timo.

Aunque la ciencia no dude, es difícil avanzar una agenda política basada en tener evidencias irrefutables, y no en el principio precautorio. Las conclusiones de los distintos informes del IPCC lo reflejan bien. El segundo informe (1995) concluyó: “El balance de evidencias sugiere que hay una influencia humana discernible sobre el clima global”. El tercer informe (2001) subió el nivel de confianza y acotó el calentamiento, diciendo: “La mayor parte del calentamiento observado durante los últimos 50 años es probable que haya sido debido al aumento de la concentración de gases de efecto invernadero”. El cuarto informe (2007) fue un poco más lejos, diciendo: “La mayor parte del aumento global de la temperatura media desde mediados del siglo XX es muy probable que sea debido al aumento observado en las concentraciones de los gases de efecto invernadero”. El quinto informe (2013) empezó a despejar las dudas: “La evidencia de la

influencia humana sobre el sistema climático es clara... Es virtualmente cierto que la variabilidad interna por sí misma no puede ser responsable del calentamiento observado desde 1951”. El sexto informe (2021) ha cerrado el tema: “Es inequívoco que la influencia humana ha calentado la atmósfera, los océanos y la tierra”. Hemos necesitado un cuarto de siglo de informes rigurosos para concluir que, inequívocamente, somos nosotros quienes causamos el calentamiento global. Arrhenius tenía razón.

Como el académico plantea, precisamos una mayor participación de la comunidad científica para convencer a la ciudadanía de lo que sabemos, para que esta, mediante su voto, elija gobiernos que adopten las medidas políticas necesarias para detener el cambio climático. Para ser más efectivos en esta labor debemos hablar no tanto desde nuestra experiencia, sino basándonos en informes sólidos, rigurosos y transparentes. De esta manera no es la persona quien transmite su conocimiento, que también, sino que nos convertimos en voceros de la comunidad científica experta en la materia, para poder superar nuestros intereses y posicionamientos ideológicos y políticos. Esto es algo que instituciones como esta Real Academia de las Ciencias pueden y deben hacer.

El Profesor Chuvieco sugiere que nos aproximemos a esta tarea desde una perspectiva ética. Para una discusión a fondo del tema necesitamos a las ciencias sociales, lo que se sale de nuestro campo. En todo caso, la ética está en la base de la negociación sobre cambio climático y en los informes del IPCC. El artículo 2 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático establece que “el objetivo último de la Convención [...] es lograr [...] la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas sobre el sistema climático”. Esto requiere dos cosas: primero, evaluar cómo son esas interferencias y sus consecuencias, lo que corresponde hacer a las ciencias naturales y sociales, y, segundo, determinar qué es peligroso, lo que conlleva un juicio de valor que entra de lleno en el ámbito de la ética y otras disciplinas (Kolstad et al., 2014).

Hace unos meses se ha producido un hecho importante. El Tribunal Internacional de Justicia de las Naciones Unidas ha establecido que “ Los Estados tienen la obligación, en virtud del derecho internacional de los derechos humanos, de respetar y garantizar el disfrute efectivo de los derechos humanos adoptando las medidas necesarias para proteger el sistema climático y otras partes del medio ambiente” (ICJ, 2025). Como el cambio climático afecta al medio ambiente y el disfrute de este es un derecho

humano, los estados han de garantizarlo mediante las acciones políticas pertinentes. No es, por tanto, que esté bien que se haga por razones éticas, sino porque existen normas jurídicas que obligan a hacerlo.

Sin embargo, convencer a la ciudadanía no es sencillo. En el contexto político actual, la aceptación de la verdad científica está entorpecida por la polarización que los medios de comunicación y, particularmente, las redes sociales causan en la sociedad. Por ello, aceptar el cambio climático no está tan relacionado con la formación y el nivel educativo, sino con la afinidad política (Stiglitz, 2025). Además, las personas tenemos aversión a la información y no siempre queremos conocer toda la verdad. Y lo hacemos para proteger nuestras convicciones, para evitar una acción indeseable o para reducir las emociones negativas (Sweeny et al., 2010). Sin ir más lejos, ¿quién es capaz de seguir viendo el telediario mientras cena cuando te muestran a los niños de Gaza reventados por las bombas o muertos de hambre por la guerra de venganza del gobierno genocida del Estado de Israel? Todos tenemos nuestras razones para no querer más información que la justa.

Para finalizar, celebremos la incorporación del nuevo académico conociendo quién es. Emilio Chuvieco Salinero nació en 1960, en una familia de bajos ingresos. Como los ingresos no condicionan el cariño, de esto último hubo abundancia. En el bachillerato se sintió atraído por la historia del arte, por lo que se matriculó en la Facultad de Geografía e Historia de la Universidad Complutense. No obstante, pronto se sintió llamado por la geografía. Tras acabar la carrera recibió una beca del Instituto de Geografía del CSIC en 1982, donde empezó a usar imágenes satelitarias para cartografiar la cobertura del suelo.

Al terminar la tesis, fue contratado como profesor colaborador en la Universidad de Alcalá, donde ha permanecido siempre. En 1987 obtuvo una beca Fulbright para trabajar en la Universidad de Berkeley (California, EE.UU.), donde comenzó a aplicar la teledetección a los incendios forestales. Al regresar, en 1988, consiguió una plaza de profesor titular y montó su equipo de investigación que se ha dedicado a aplicar la teledetección y los SIG a problemas ambientales, muy en particular a los incendios forestales.

Ha sido investigador visitante en las Universidades de Berkeley, Cambridge, Oxford, Santa Barbara, Maryland y el Centro Canadiense de Teledetección. Ha dirigido 45 tesis doctorales y es autor de 34 libros y 433 artículos científicos. Tiene un índice h de 92 según Google Scholar.

El Prof. Chuvieco ha seguido muy de cerca el desarrollo de su campo, explorando las opciones de cada nuevo satélite que se lanzaba al espacio, para aplicarlas a diferentes aspectos de los incendios forestales. El primero es la cartografía de zonas quemadas, a escala regional, nacional o mundial. El segundo es conocer su severidad, asunto que también ha explorado en múltiples ocasiones y contextos. Un tercer elemento es el riesgo de incendio, que depende de diferentes variables, como el tipo de vegetación, el contenido en humedad de las plantas, la estructura de la vegetación, el tipo de combustible, etc., campos que ha explorado extensamente.

Además del fuego le han interesado otros asuntos ambientales, como la deforestación, la desertificación, la vulnerabilidad sísmica o la calidad de las aguas. También ha estudiado las religiones, adquiriendo formación específica y dirigiendo tesis doctorales sobre la materia.

Fue presidente de la Asociación Española de Teledetección y del grupo de Tecnologías de la información Geográfica de la Asociación de Geógrafos Españoles. Fue coeditor de la revista *Remote Sensing of Environment*, la primera en su campo. Desde 2010, es líder científico de proyecto de la Agencia Espacial Europea.

Ha recibido los premios de investigación del Consejo Social de la Universidad de Alcalá (2000), de investigación sobre incendios forestales “El batefuegos de oro” (2004), de excelencia en la dirección de tesis doctorales (2016), de excelencia investigadora y la medalla de honor de la Universidad de Alcalá (2021). En 2022 fue galardonado con el Premio Jaume I a la Protección del Medio Ambiente.

Querido Emilio, muchas gracias por tu buen hacer y compromiso con un campo científico al que has contribuido como pocos. Tus intereses ambientales y perspectiva nos serán muy útiles en esta Real Academia de Ciencias en un momento tan convulso para la ciencia, en general, y para los temas de cambio climático y global, en particular.

¡Bienvenido!

BIBLIOGRAFÍA

Ainsworth, E.A., Yendrek, C.R., Sitch, S., Collins, W.J. y Emberson, L.D., 2012. The Effects of Tropospheric Ozone on Net Primary Productivity and Implications for Climate Change. *Annual Review of Plant Biology*, 63: 637-661.

Barnola, J.M., Raynaud, D., Korotkevich, Y.S. y Lorius, C., 1987. Vostok ice core provides 160,000-year record of atmospheric CO₂. *Nature*, 329(6138): 408-414.

Bazzaz, F.A., 1990. The response of natural ecosystems to the rising global CO₂ levels. *Annual Review of Ecology and Systematics*: 167-196.

Cazenave, A. y Cozannet, G.L., 2014. Sea level rise and its coastal impacts. *Earth's Future*, 2(2): 15-34.

Chagnon, M., Kreutzweiser, D., Mitchell, E.A.D., Morrissey, C.A., Noome, D.A. y Van der Sluijs, J.P., 2015. Risks of large-scale use of systemic insecticides to ecosystem functioning and services. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(1): 119-134.

Cohan, D.S., Xu, J., Greenwald, R., Bergin, M.H. y Chameides, W.L., 2002. Impact of atmospheric aerosol light scattering and absorption on terrestrial net primary productivity. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(4): 37-1-37-12.

Crutzen, P.J., 1996. My Life with O₃, NO_x, and Other YZO_x Compounds (Nobel Lecture). *Angewandte Chemie International Edition in English*, 35(16): 1758-1777.

Crutzen, P.J. y Stoermer, E.F., 2000. The Anthropocene. *IGBP Global Change Newsletter* (41): 14-17.

Gillanders, B.M. y Kingsford, M.J., 2002. Impact of changes in flow of freshwater on estuarine and open coastal habitats and the associated organisms. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review*, 40: 233-309.

Gurevitch, J. y Padilla, D.K., 2004. Are invasive species a major cause of extinctions? *Trends in Ecology & Evolution*, 19(9): 470-474.

ICJ, 2025. Obligations of States in respect of Climate Change, International Court of Justice, 2025/187, The Hague.

IPCC, 2018. Summary for Policymakers. En: V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.O. Pörtner et al. (Eds.), *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

Jantz, S.M., Barker, B., Brooks, T.M., Chini, L.P., Huang, Q., Moore, R.M., Noel, J. y Hurtt, G.C., 2015. Future habitat loss and extinctions driven by land-use change in biodiversity hotspots under four scenarios of climate-change mitigation. *Conservation Biology*, 29(4): 1122-1131.

Keeling, C.D., Bacastow, R.B., Bainbridge, A.E., Ekdahl Jr, C.A., Guenther, P.R., Waterman, L.S. y Chin, J.F., 1976. Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa observatory, Hawaii. *Tellus*, 28(6): 538-551.

Kolstad, C., Urama, K., Broome, J., Bruvoll, A., Cariño Olvera, M., Fullerton, D., Gollier, C., Hanemann, W.H., Hassan, R., Jotzo, F., Khan, M.R., Meyer, L. y Mundaca, K., 2014. Social, Economic and Ethical Concepts and Methods. En: O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona et al. (Eds.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Kroeker, K.J., Kordas, R.L., Crim, R.N. y Singh, G.G., 2010. Meta-analysis reveals negative yet variable effects of ocean acidification on marine organisms. *Ecology Letters*, 13(11): 1419-1434.

Law, K.L., 2017. Plastics in the Marine Environment. *Annual Review of Marine Science*, 9: 205-229.

Levin, L.A., 2018. Manifestation, Drivers, and Emergence of Open Ocean Deoxygenation. *Annual Review of Marine Science*, 10: 229-260.

Linares Arroyo, H., Abascal, A., Degen, T., Aubé, M., Espey, B.R., Gyuk, G., Hölker, F., Jechow, A., Kuffer, M., Sánchez de Miguel, A., Simoneau, A., Walczak, K. y Kyba, C.C.M., 2024. Monitoring, trends and impacts of light pollution. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5(6): 417-430.

Lotze, H.K. y Worm, B., 2009. Historical baselines for large marine animals. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(5): 254-262.

Manabe, S. y Wetherald, R.T., 1967. Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *Journal of Atmospheric Sciences*, 24(3): 241-259.

Oreskes, N. y Conway, E.M., 2011. *Merchants of doubt: How a handful of scientists obscured the truth on issues from tobacco smoke to global warming*. Bloomsbury Publishing, USA.

Petit, J.R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N.I., Barnola, J.M., Basile, I., Bender, M., Chappellaz, J., Davis, M., Delaygue, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V.M., Legrand, M., Lipenkov, V.Y., Lorius, C., Pépin, L., Ritz, C., Saltzman, E. y Stievenard, M., 1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399(6735): 429-436.

Rolls, R.J., Leigh, C. y Sheldon, F., 2012. Mechanistic effects of low-flow hydrology on riverine ecosystems: ecological principles and consequences of alteration. *Freshwater Science*, 31(4): 1163-1186.

Smith, V.H. y Schindler, D.W., 2009. Eutrophication science: where do we go from here? *Trends in Ecology & Evolution*, 24(4): 201-207.

Son, S.-W., Tandon, N.F., Polvani, L.M. y Waugh, D.W., 2009. Ozone hole and Southern Hemisphere climate change. *Geophysical Research Letters*, 36(15).

Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O. y Ludwig, C., 2015. The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review*, 2(1): 81-98.

Stiglitz, J.E., 2025. *Camino de Libertad. La Economía y la Buena Sociedad*. Taurus, España.

Stone, K.A., Solomon, S., Kinnison, D.E. y Mills, M.J., 2021. On Recent Large Antarctic Ozone Holes and Ozone Recovery Metrics. *Geophysical Research Letters*, 48(22): e2021GL095232.

Supran, G., Rahmstorf, S. y Oreskes, N., 2023. Assessing ExxonMobil's global warming projections. *Science*, 379(6628): eabk0063.

Sweeny, K., Melnyk, D., Miller, W. y Shepperd, J.A., 2010. Information Avoidance: Who, What, When, and Why. *Review of General Psychology*, 14(4): 340-353.

The Cenozoic CO₂ PIP Consortium, Hönlisch, B., Royer, D.L., Breecker, D.O., Polissar, P.J., Bowen, G.J. et al., 2023. Toward a Cenozoic history of atmospheric CO₂. *Science*, 382(6675): eadi5177.

WMO, 2025. WMO confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.

Zalasiewicz, J., Adeney Thomas, J., Waters, C.N., Turner, S. y Head, M.J., 2024. The meaning of the Anthropocene: why it matters even without a formal geological definition. *Nature*, 632(8027): 980-984.