

(Editores)
Rodrigo Álvarez García
Almudena Ordóñez Alonso

RECURSOS MINERALES Y
MEDIOAMBIENTE: UNA HERENCIA
QUE GESTIONAR Y UN FUTURO
QUE CONSTRUIR

LIBRO JUBILAR
DEL PROFESOR
JORGE LOREDO



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo

2020

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

HOMENAJES

Rodrigo Álvarez García
Almudena Ordóñez Alonso
(editores)

*Recursos minerales y
medioambiente: una herencia
que gestionar y un futuro
que construir*

LIBRO JUBILAR
DEL PROFESOR
JORGE LOREDO



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo

2020



Reconocimiento-No Comercial-Sin Obra Derivada (by-nc-nd): No se permite un uso comercial de la obra original ni la generación de obras derivadas.



Usted es libre de copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, bajo las condiciones siguientes:



Reconocimiento – Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el licenciador:

Álvarez García, Rodrigo; Ordoñez Alonso, Almudena (editores). (2020). *Recursos minerales y medioambiente: una herencia que gestionar y un futuro que construir. Libro jubilar del profesor Jorge Loredo*. Universidad de Oviedo.

La autoría de cualquier artículo o texto utilizado del libro deberá ser reconocida complementariamente.



No comercial – No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Sin obras derivadas – No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

© 2020 Universidad de Oviedo

© Los autores

Algunos derechos reservados. Esta obra ha sido editada bajo una licencia Reconocimiento-No comercial-Sin Obra Derivada 4.0 Internacional de Creative Commons.

Se requiere autorización expresa de los titulares de los derechos para cualquier uso no expresamente previsto en dicha licencia. La ausencia de dicha autorización puede ser constitutiva de delito y está sujeta a responsabilidad.

Consulte las condiciones de la licencia en: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.es>



Esta Editorial es miembro de la UNE, lo que garantiza la difusión y comercialización de sus publicaciones a nivel nacional e internacional

Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo

Edificio de Servicios - Campus de Humanidades

33011 Oviedo - Asturias

985 10 95 03 / 985 10 59 56

servipub@uniovi.es

www.publicaciones.uniovi.es

ISBN: 978-84-17445-95-9

DL AS 1451-2020



Jorge Loredo Pérez

Índice

PRÓLOGO	13
<i>Santiago García Granda, Rector de la Universidad de Oviedo</i>	

SEMBLANZA PERSONAL

Bosquejo a vuelapluma de Jorge Loredo Pérez, alumno, colega, colaborador y, sobre todo, amigo entrañable	17
<i>J. García-Iglesias.</i>	
Jorge Loredo: un compañero de viaje y un maestro de vida.....	21
<i>N. Roqueñí.</i>	
Casi un cuarto de siglo trabajando con Jorge: una experiencia de vida.	25
<i>A. Ordóñez.</i>	
Jorge Loredo: un gran hombre, un gran científico, un gran maestro y, ante todo, una gran persona.....	29
<i>M. I. Rucandío.</i>	

ARTÍCULOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS

¿Se está gestando una nueva crisis del petróleo?.....	33
<i>I. Álvarez.</i>	
Mineralogía, textura y geoquímica de depósitos minerales y residuos mineros: una herramienta de interés en estudios de contaminación de suelos.....	45
<i>R. Álvarez, J. Álvarez-Quintana y A. Ordóñez</i>	
Drenaje ácido de minas en la Faja Pirítica Ibérica: Geoquímica, tratamiento pasivo y sus residuos en una economía circular	59
<i>C. Ayora, S. Orden, F. Macías y J. M. Nieto</i>	

Mineralogía magnética aplicada al estudio de los yacimientos; repaso sobre el magnetismo de los minerales y ejemplos de aplicación: el metasomatismo ferrífero de la dolomía encajante de las mineralizaciones Zn-Pb-Ba de La Florida e historia de los «gossans» de la Faja Pirítica Ibérica.....	71
<i>L. Barbanson y M. Essalbi</i>	
Nuevo método de cálculo de recursos y reservas minerales para cuerpos minerales de forma tabular – Aplicación al proyecto Carlés	83
<i>C. Castañón, A. Martín-Izard, I. Diego y D. Arias</i>	
Determinación de niveles de fondo y referencia de elementos traza en suelos: un enfoque metodológico avanzado	93
<i>E. Chacón, A. Callaba, P. Fernández-Canteli, F. Barrio-Parra, M. Izquierdo-Díaz y E. de Miguel</i>	
Historia de las aguas minerales y termales	105
<i>M. M. Corral, M. E. Galindo, J. Á. Díaz, C. Ontiveros y J. M. Fernández.</i>	
Mobility of Thallium and other trace elements in mine drainage waters from two carbonate-hosted Lead-Zinc ore deposits in the northeastern Italian Alps	115
<i>S. Covelli, E. Pavoni, N. Barago, F. Floreani, E. Petranich, M. Crosera, G. Adami & D. Lenaz</i>	
Comentarios heterodoxos sobre el cambio climático	129
<i>J. R. Fernández</i>	
The INCHaPA project: methodology for the study of historic quarries associated with the architectural heritage.....	141
<i>J. Fernández, E. Álvarez, J. M. Baltuille & J. Martínez</i>	
Metodologías de fraccionamiento secuencial como herramienta útil para la evaluación de la movilidad de mercurio y arsénico y su impacto en la cuenca minera de Asturias	153
<i>R. Fernández-Martínez, A. Ordóñez, R. Álvarez e I. Rucandio</i>	
Recursos geotérmicos en Asturias	167
<i>C. García de la Noceda</i>	
Análisis de la presencia de mercurio en diferentes compartimentos ambientales del estuario del río Nalón como consecuencia de la minería..	179
<i>E. García-Ordiales, N. Roqueñí, P. Cienfuegos, S. Covelli y L. Sanz-Prada</i>	
Contribución al conocimiento de la geología económica en la cuenca del río Esva.....	193
<i>S. González-Nistal, R. Álvarez y F. Ruíz</i>	

Escombreras asociadas a minería de sulfuros: pasivo ambiental y potencial activo económico desde una perspectiva de minería circular	205
<i>J. A. Grande, J. M. Dávila, J. C. Fortes, M. Santisteban, A. M. Sarmiento, F. Córdoba, M. Leiva, M. L. de la Torre, A. Jiménez, J. Díaz-Curiel, B. Biosca, A. T. Luís, N. Durães, E. A. Ferreira da Silva, M. J. Rivera, J. Aroba, B. Carro, J. Borrego y J. A. Morales.</i>	
Mercurio en Almadén – datos recientes (2000-2020) sobre su presencia en el medioambiente y sus implicaciones.....	219
<i>P. L. Higuera, J. M. Esbrí, E. García-Ordiales y J. D. Peco</i>	
Evaluación medioambiental temprana de riesgos a la salud, a la seguridad y al propio medioambiente por proyectos geo-energéticos	245
<i>A. Hurtado y S. Eguilior</i>	
European dimension of the social license to operate in mining.....	257
<i>K. Komnitsas</i>	
El cambio climático, las tecnologías limpias y la minería	265
<i>J. F. Llamas</i>	
Las aguas subterráneas y los acuíferos: su carácter estratégico en escasez y periodos de sequía.....	277
<i>J. Antonio López-Geta</i>	
Comportamiento del agua de mina en instalaciones geotérmicas: Análisis de un caso particular	297
<i>C. Loredó</i>	
Una tecnología para reducir las emisiones: el almacenamiento geológico de CO ₂	309
<i>R. Martínez Orío y P. Fernández-Canteli</i>	
Perspectivas sobre reducción de emisiones de mercurio originadas en la producción de energía	321
<i>M. R. Martínez Tarazona, M. A. López Antón y R. García</i>	
Almacenamiento de energía térmica y eléctrica en minas subterráneas cerradas: situación actual y balances de energía	333
<i>J. Menéndez</i>	
Contribución del yacimiento de Carlés a la mineralogía española	345
<i>M. Mesa</i>	
La descarbonización de las industrias minerales en el Principado de Asturias	357
<i>A. Olay</i>	

Notas sobre liderazgo	367
<i>J. C. Rodríguez-Ovejero</i>	
Viabilidad económica ambiental para la recuperación o reducción del consumo de agua de plantas de procesamiento de oro	377
<i>J. Soto, J. Melendez y P. Cienfuegos</i>	
La explotación minera del karst fósil en la sierra del Aramo: del Calcolítico al siglo xx	391
<i>M. Suárez</i>	

COMENTARIOS HETERODOXOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO

José Ramón Fernández González

Doctor ingeniero de minas

RESUMEN

El cambio climático es un asunto preocupante. Tanto, que los medios de comunicación y también los políticos han conseguido que todo el mundo tenga opinión sobre esta cuestión.

Es indudable que existe el efecto invernadero. Es indudable que la actividad humana es responsable de parte de las emisiones de CO₂ y de la mayor parte de las emisiones de cuatro de los seis gases que favorecen ese efecto. Y también es indudable que el planeta está pasando por un periodo cálido. Sin embargo, el análisis de esta situación objetiva, tal como lo hacen los defensores dogmáticos del calentamiento global, es profundamente sesgado. Acuden siempre a planteamientos catastrofistas y parecen haberse enterado ahora de que el clima de la Tierra cambia.

La presión para que se adopten medidas correctoras es enorme, aunque muchas de las personas que más empujan en esa dirección no basen sus ideas en criterios científicos. Creen en el calentamiento global con la fe de un prosélito, como si fuera una religión, porque su pensamiento está más influenciado por sus ideas políticas que por la ciencia y por la información veraz. Actuar con esos fundamentos tan endebles y frívolos traerá consecuencias perjudiciales porque, con esos mimbres, algunos gobernantes están dispuestos a alterar radicalmente la vida de las personas para corregir algo que quizá no esté en su mano corregir.

En este trabajo se cuestiona la doctrina oficial sobre el cambio climático. Tal y como están las cosas, este simple planteamiento convierte a su contenido y a su autor en sospechosos.

1. INTRODUCCIÓN

El clima de la Tierra empezó a cambiar desde el momento mismo de la formación del planeta como prueba la Geología Histórica. Los especialistas en esa disciplina han estudiado los cambios físicos y químicos de la atmósfera y han descrito con fundamento episodios climáticos muy antiguos y continuados en el tiempo.

Quien necesite pruebas puede acudir a los libros. Resulta ilustrativo releer los comentarios sobre la composición de la atmósfera de William L. Stokes en su clásico *Historia de la Tierra* (1969). Este autor hace pocas concesiones a la poesía y puede resultar anticuado, duro o aburrido para un lector profano. En ese caso sería preferible leer, entre otros, al profesor Francisco Anguita. Su actualísima, chispeante y acertada *Biografía de la Tierra. Historia de un planeta singular* (2002), de acceso libre en la red, o su más académica *Origen e Historia de la Tierra* (1988) permitirán a cualquier lector comprender que el cambio climático global es una continua evidencia geológica.

Quienes hoy se sorprenden de que el clima cambie deberían saber que tal hecho ha sido constante y consustancial con la existencia del planeta.

2. LOS MEDIOS DE COMUNICACIÓN

Existe unanimidad en todos los medios de comunicación: el planeta se calienta y la culpa es de la actividad humana.

Como el calentamiento global parece una verdad absoluta, debería ser fácil de defender. Sin embargo, se fuerzan y se manipulan las noticias, mostrando falta manifiesta de seriedad periodística en gran parte de los artículos dedicados a este tema. Para desmontar esos argumentos basta leer con algo de espíritu crítico y profundizar un poco en lo que dicen.

Entre las aficciones potenciales al medioambiente causadas por el calentamiento global, los medios de comunicación sienten especial predilección por el aumento de la aridez. El diario *El Mundo*, de Madrid, publicó en su suplemento *Magazine* del domingo 18 de febrero de 2007, un artículo titulado «Así será el mundo» firmado por Paco Rego. Auguraba todo tipo de catástrofes para los años venideros. Una de ellas era el aumento de la aridez, que traería consigo la pérdida del 52% del suelo fértil español en el año 2050. Al lado de un montaje fotográfico del centro de Madrid cubierto de arena del desierto, decía textualmente que «la pérdida de suelo fértil en España equivale a más de 300 millones de euros por año». La falta de rigor es evidente. Sin entrar todavía a rebatir la cuestión de fondo, esa cifra de 300 millones de euros es disparatadamente baja. El sector agrario español supuso en 2018 el 2,8% del PIB del país. En valores absolutos ese sector contribuyó al PIB nacional con más de 36600 millones de euros. La pérdida del 52% de la superficie cultivable debería ocasionar pérdidas de, aproximadamente, el 52% en la aportación agrícola al PIB. Esas pérdidas serían de 17500 millones de euros anuales y no de 300 millones como inexplicablemente defiende Paco Rego, que suele estar bien documentado.

La cuestión de fondo, el aumento de la aridez, puede rebatirse con idéntico rigor. El periódico asturiano *La Nueva España* publicó el día 8 de septiembre de 2019 un artículo titulado «España, a las puertas del desierto», de Luis Mario Arce, periodista de reconocida trayectoria, buen divulgador especializado en naturaleza y medioambiente. Entrevistaba en ese artículo a un ingeniero agrónomo experto en suelos y Arce glosaba sus comentarios de la siguiente manera: «En España, la mayoría del territorio es de clima semiárido o subhúmedo seco, con precipitaciones de 300 o 400 mm, que no son condiciones de desierto, pero la degradación del suelo afecta a la estabilidad, a

la productividad y a las funciones ecológicas. *El calentamiento del clima ha venido a empeorar las cosas, a potenciar esos procesos*».

Esta tesis choca contra un hecho objetivo: el crecimiento continuo de la superficie forestal en el territorio español durante los últimos veintiséis años. La sección de periodismo ambiental de la Agencia EFE publicó el 1 de diciembre de 2016 la noticia siguiente: «La superficie forestal de España ha aumentado durante los últimos 25 años a un ritmo de 180000 hectáreas (ha) por año –el equivalente a otros tantos campos de fútbol– y en la actualidad ocupa el 54% de la superficie nacional, según un informe presentado hoy en el Congreso de los Diputados». Se referían a un informe presentado por la organización Juntos por los Bosques que agrupa a entidades públicas y privadas interesadas en defender la riqueza que proporciona el monte. Esas 180 000 hectáreas de crecimiento neto anual de la superficie forestal son aproximadamente diez veces la superficie de los términos municipales de Oviedo o de Gijón. Además, la información de EFE puede ser contrastada en el Banco Mundial. Los datos de esta institución indican que la superficie forestal en España ha aumentado un 33,6% entre 1990 y 2016.

A la vista de todos estos números, resulta lógico concluir que el contenido del artículo de Luis Mario Arce es poco realista. La superficie de bosque no aumenta en territorios de aridez creciente o con riesgo de desertización. En esos sitios pasa exactamente todo lo contrario.

Otro de los temas favoritos de los medios de comunicación son los icebergs de gran tamaño desprendidos del casquete polar sur o la supuesta y acelerada pérdida de hielo en la Antártida. Tienen verdadera pasión por este tipo de noticia y la repiten sin cesar. Sin embargo, la información sobre el verdadero comportamiento del hielo antártico no se transmite a los lectores salvo en rarísimas ocasiones. El diario *La Nueva España*, ya citado, hizo una de esas escasas excepciones el 24 de diciembre de 2016 y publicó la noticia siguiente, firmada por Mónica G. Salas: «La península Antártica se enfría, revela un estudio con participación asturiana. La investigación detecta más hielo en la región del continente y refuta la tesis de que el cambio climático implica un calentamiento continuo». El artículo hacía referencia a los resultados del trabajo de un equipo internacional de investigación en el que participaba el geógrafo Jesús Ruiz, de la Universidad de Oviedo.

Desgraciadamente, la noticia pasó sin pena ni gloria porque en medios científicos solventes el crecimiento del hielo antártico es conocido desde bastantes años antes de la publicación de ese estudio y porque, en esto del clima, los creadores de opinión llevan años instalados en el catastrofismo. Están otra vez al nivel científico que había a principios del siglo XIX. El Actualismo no vende periódicos ni abre telediarios. Es más comercial la erupción de un volcán en las antípodas que el lento y maravilloso suceder de las estaciones. Además ¿Quién es el valiente que se atreve a llevar la contraria a la gran masa de partidarios de que el hielo antártico se está fundiendo?

Los medios de comunicación han tomado para sí mismos el papel de árbitros de la verdad. Responden airadamente a las críticas o hacen mutis por el foro cuando las cosas no son como aseguran. Por eso deben considerarse en lo que valen. Recuérdese el «efecto 2000», aquella invención milenarista y cara anunciada a bombo y platillo por tierra, mar y aire, que se deshizo, como el azúcar en el agua, a los pocos segundos de empezar el año. Fue una

estafa para quien creyó en ella y actuó en consecuencia. Iba a caerse el mundo y, tras el fiasco, ningún medio de comunicación se ocupó más del asunto a partir de las cero horas del uno de enero de 2000.

3. LOS POLÍTICOS

La inmensa mayoría de los políticos de todo el mundo admitieron sin pestañear la versión radical del cambio climático y la adoptaron enseguida para uso y provecho personal. Como salvar los polos es progresista, el *marketing* ya estaba hecho. Bastaba subirse a la ola informativa y multiplicar anuncios e iniciativas de eficacia dudosa para ganar el voto de quienes piensan así.

Llegan a ser peligrosos. El peligro procede de los temerarios que han convertido esa doctrina en dogma y, utilizando este asunto como pretexto, quieren hacer ingeniería social y forzar cambios tecnológicos profundos y precipitados en tiempo record. Esas actuaciones pueden convertir las desgracias meteorológicas que auguran los catastrofistas en poco más que turbonadas de verano, comparadas con la concreta y destructora tormenta perfecta que algunos parecen estar preparando.

Además, en España, da la sensación de que ese hipotético problema mundial debe resolverse en cabeza de carrera, hablando en términos ciclistas, y se suceden anuncios irresponsables, amparados en las intenciones visionarias de algunos dirigentes. Por eso el gasoil tiene los días contados, se liquida la minería del carbón, se cierran las centrales térmicas de carbón mientras se abren en Alemania, van a prohibirse los coches no eléctricos, no se prorrogan los derechos mineros para seguir extrayendo petróleo en La Lora y muchas otras cosas más que afectan a la economía y a la vida de las personas.

Hace años, el prestigioso oculista Barraquer dijo en una entrevista en televisión que él no operaba con la última técnica, que operaba con la penúltima. Los dirigentes políticos deberían ser, al menos, igual de precavidos cuando tocan las cosas que pueden dañar gravemente a los ciudadanos.

4. LOS CIENTÍFICOS

En el mundo científico hay una mayoría de defensores de la visión radical del cambio climático. Existen también muchas voces discrepantes de esa doctrina oficial pero hacen poco ruido. Probablemente la razón última de la ausencia de controversia sea que, en este asunto, se machaca al discrepante. Y es que algunas opiniones de defensores a ultranza del calentamiento global trascienden a lo meramente científico. Gentes que solo discrepan de ellos en el funcionamiento del planeta son acusados virulentamente de negociacionistas, con el sentido negativo que acompaña al término. Incluso se atreven a adjudicarles determinadas maneras de pensar en asuntos completamente ajenos a la geología y a las demás ciencias aplicadas. Las ideas, todas las ideas y las científicas entre ellas, deben defenderse con argumentos y no con la descalificación personal de quien no piensa igual.

En medio de este hábitat hostil, hay que agradecer la valentía de quienes contradicen el dogma y se atreven a decir que la Antártida se enfría, como el geógrafo Jesús Ruiz, ya citado, y sus compañeros de investigación. Tienen razón.

En lo relativo a la presencia de los científicos en los medios de comunicación, la ciencia ha cambiado para mal. En este sentido, es lamentable la prisa de algunos investigadores por generar noticias de impacto. Pasó hace ya tiempo con un experimento del CERN sobre la medida de la velocidad de los neutrinos. Sus responsables tenían tanta gana de hacerse célebres que divulgaron resultados precipitadamente, sin considerar que una diferencia de tiempo de unas pocas cienmillonésimas de segundo bien podría deberse a falta de precisión suficiente en sus complejíssimos equipos de medida. Con el cambio climático pasa algo parecido. A los científicos les va el asunto. Además, hay mucho dinero en juego. Por eso se exagera tanto y se desautoriza al heterodoxo, no sea que el pastel se acabe anticipadamente.

5. LOS INTERESES ECONÓMICOS

Tras el cambio climático existen grandes intereses económicos. Las compañías eléctricas ven al alcance de la mano la posibilidad de mejorar sustancialmente su facturación y su margen comercial y están apostando por llevar a la opinión pública la necesidad de acabar con los combustibles fósiles. Es tan claro el negocio que algunas compañías petrolíferas ya han tomado participaciones importantes en el accionariado de las eléctricas, anticipándose a algo que entienden va a suceder a medio plazo.

En este campo, la interacción entre las empresas y los políticos es más intensa que nunca. Por eso sientan en los consejos de administración a exministros y a personajes legos en cuestiones energéticas, a los que les suponen capacidad de influencia política.

Los medios de comunicación, que son negocios y que, por tanto, tienen como fin último ganar dinero, están actuando como propagandistas en este proceso. Es posible que esa sea la razón de su unanimidad en la defensa monolítica del dogma climático.

Hablando de dinero, probablemente nadie se haya ocupado de valorar los costes ocultos y las afecciones ambientales globales de este proceso alocado de transición energética. Tampoco hay información suficiente sobre la necesidad de regulación en un mercado de energía eléctrica que contará con clientes aún más cautivos que en la actualidad. Cuando llegue el momento, la situación será mala para el consumidor y generará tensiones.

6. LA FORMACIÓN DE UNA OPINIÓN PROPIA. LO QUE DICE LA CIENCIA

La abundancia de noticias sobre el calentamiento global da lugar a que la mayor parte de la gente tenga opinión. Sin embargo, salvo en personas bien informadas y con formación científica o técnica, esa opinión no es realmente de cada individuo: es de otros. Cada persona la adopta después de leer la prensa, de escuchar la radio o de ver la televisión y, con esos prescriptores, la convierte en propia de manera involuntariamente acrítica.

Por eso, con el sesgo que caracteriza a las noticias sobre el tema, la mayor parte de la población cree: (a) que es anómalo que el clima de la Tierra cambie (b) que el planeta se calienta debido a la emisión de gases de efecto invernadero procedentes de la actividad humana (c) que la Antártida se está

descongelando (d) que es necesario adoptar medidas drásticas para corregir esa situación porque, de lo contrario, las consecuencias serían dramáticas.

Adquirir una opinión verdaderamente propia requiere examinar lo que dice la ciencia, sin intermediarios ni demagogia. Ello puede hacerse acudiendo directamente a las fuentes primarias de investigación científica.

El mejor lugar donde buscar información es el NATIONAL SNOW AND ICE DATA CENTER (NSIDC), de la Universidad de Colorado en Boulder. Es un centro investigador de referencia mundial en casquetes polares. Trabaja en colaboración con la NASA y con otras agencias federales del Gobierno de Estados Unidos. Estudia el hielo en los polos y en los océanos Ártico y Antártico y mide diariamente su superficie a partir de datos obtenidos desde satélite mediante procedimientos normalizados y precisos. Los resultados de sus trabajos se exponen en su página web (nsidc.org/data/seaice_index) y están al alcance de todo el mundo. Los gráficos y los valores numéricos que siguen están tomados de esa página web.

6.1. El comportamiento del hielo en el Ártico

Existe una clara pérdida de hielo. En el periodo comprendido entre los años 1979 y 2019 la superficie de la banquisa ártica se redujo a un ritmo medio de 82400 km² por año. La pérdida no se produjo de manera uniforme. Aumentó mucho entre los años 1999 y 2012, con un ratio medio de pérdida de 203000 km² por año. El mínimo histórico se alcanzó el 17 de septiembre de 2012. Ese día el hielo ocupaba solamente 3,39 millones de km² (Fig. 1).

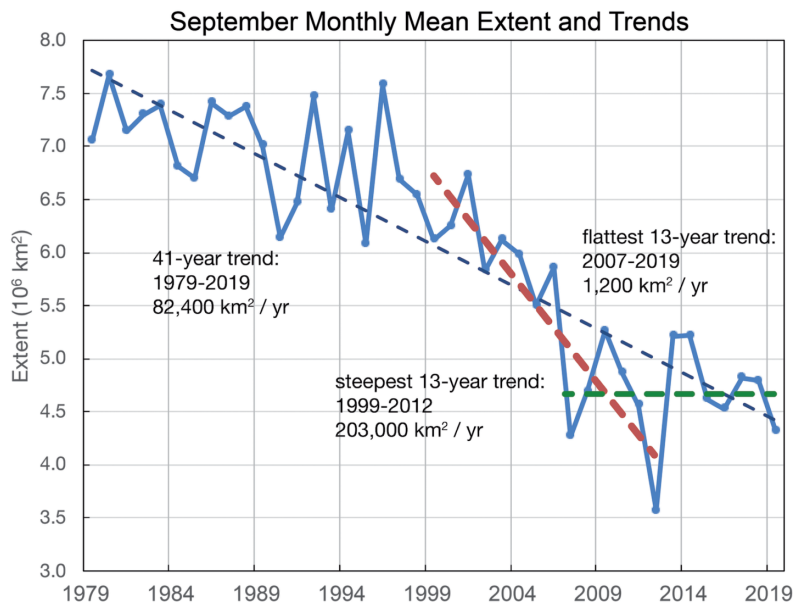


Fig. 1. Superficie de hielo en septiembre entre los años 1979 y 2019 en el Océano Glaciar Ártico (Meier, 2020)

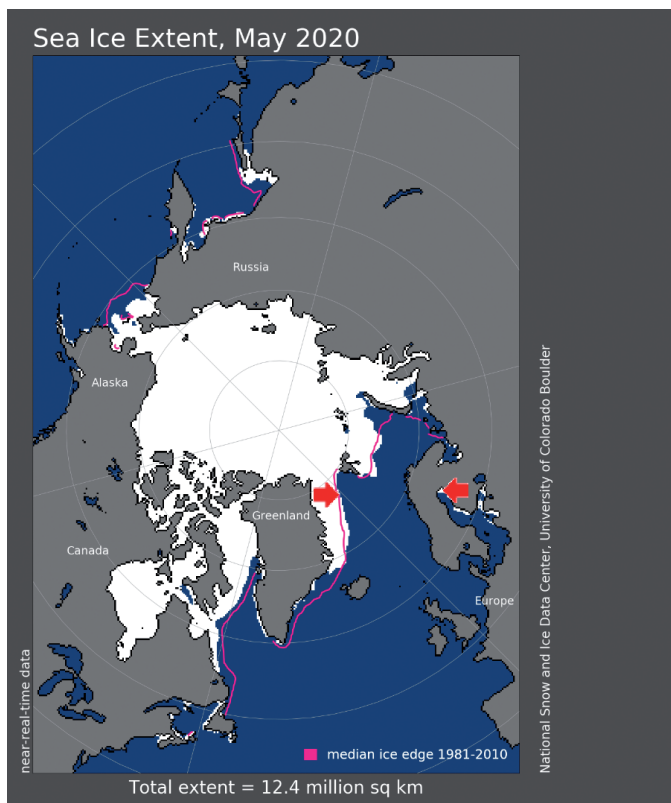


Fig. 2. Superficie de hielo en mayo de 2020. Anomalía en los mares de Barents y Pechora (NSIDC, 2020)

A partir de ese momento se modifica la pendiente negativa de la curva, recuperándose relativamente la superficie de hielo. El 17 de septiembre de 2019 la banquisa medía 4,17 millones de km². Ese valor representa un aumento del 23,0% y la recuperación de 0,77 millones de km² de hielo en relación con los valores de la misma fecha de 2012, en un periodo de siete años.

En los mares de Barents y Pechora, al oeste y al suroeste del archipiélago ruso de Nueva Zembla se observa un déficit de hielo que suele repetirse año tras año. Las zonas se han marcado en la Fig. 2 con dos flechas de color rojo. En ellas el hielo o no se forma, o tarda en formarse, o bien, si se forma, se funde muy pronto.

6.2. El comportamiento del hielo en la Antártida

A diferencia de lo que sucede en el Océano Glaciar Ártico, la superficie de hielo antártica crece desde hace más de cuarenta años. La tendencia es alcista tanto en invierno como en verano. En la Fig. 3 puede verse el creci-

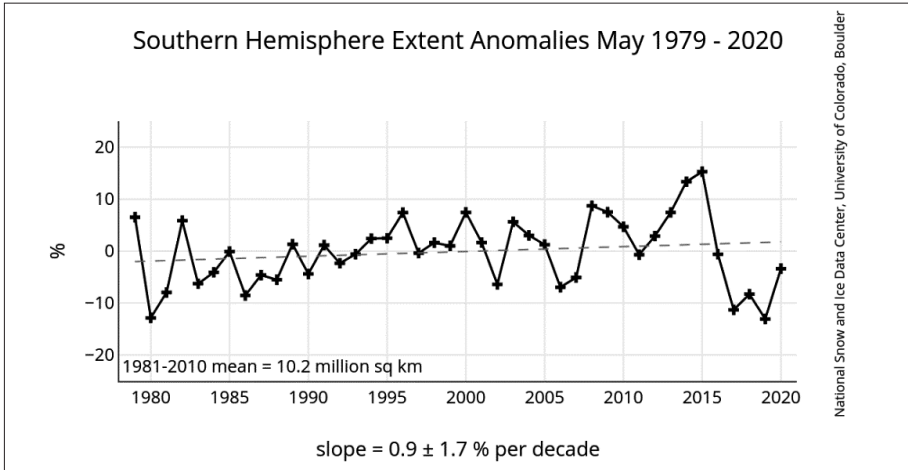


Fig. 3. Variación de la extensión del hielo en la Antártida en mayo de 2020 (NSIDC, 2020)

miento del hielo en el mes de mayo entre los años 1979 y 2020. Su ratio de crecimiento es del 0,9% por década (unos 18000 km² por año).

Además, el 21 de septiembre de 2014 la superficie de hielo alcanzó un máximo histórico de 20,15 millones de km², superior en 1,57 millones de km² al valor máximo medio (18,58 millones de km²) registrado en esa fecha. Supone un aumento del 8,45% respecto a este último valor.

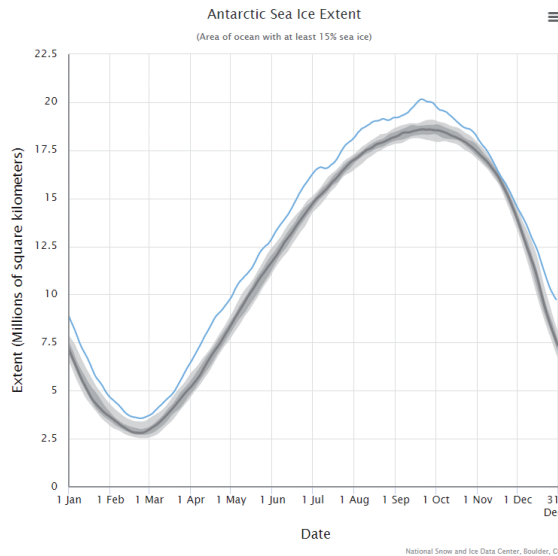


Fig. 4. Máximo histórico de la superficie de hielo en la Antártida, en el invierno austral de 2014 (20,15 millones de km²) (NSIDC, 2020)

Tras una caída importante en 2017 la superficie de hielo ha vuelto a recuperarse y el 11 de junio de 2020 se encuentra ya solo ligeramente por debajo de la media según se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 1. Variación del hielo en la Antártida el 11 de junio de 2020; Valores medios de 2017 y 2020 (NSIDC, 2020)

FECHA	Superficie (millones de km ²)	Diferencia (millones de km ²)	Diferencia (%)
Media 11 de junio	12,81	-	-
11/06/2017	11,88	-0,93	-7,26
11/06/2020	12,60	-0,21	-1,63

6.3. Comentarios al comportamiento del hielo en los polos

Revisado en los dos apartados anteriores el comportamiento del hielo en los polos, resultan lógicas las conclusiones siguientes:

1.- El polo norte pierde hielo al menos desde hace 40 años. El ritmo de pérdida ha variado a lo largo de los años. Fue máximo entre 1999 y 2012, con un ratio medio de 203000 km² por año. Entre 2012 y 2020 la pérdida media parece haberse reducido significativamente hasta alcanzar un ratio de 1200 km² por año.

2.- El polo sur gana hielo al menos desde hace 40 años con un crecimiento medio de unos 18000 km² por año. En el invierno austral de 2014 (17 de septiembre) se registró un máximo histórico en el crecimiento de la superficie de hielo.

3.- El calentamiento no es, por tanto, global. Se produce en el polo norte y no en el polo sur, que se está enfriando. Esta circunstancia podría indicar la existencia de causas locales que justifiquen la reducción de la extensión de la banquisa ártica.

4.- Existe una anomalía en la formación de hielo al oeste y suroeste del archipiélago ruso de Nueva Zembla. Tras el final de la Segunda Guerra Mundial, la Unión Soviética llevó a cabo en ese lugar numerosos ensayos nucleares en los que se liberó cerca de 16000 veces la energía liberada por la bomba atómica detonada en Hiroshima el 6 de agosto de 1945.

6.4. Algunas precisiones históricas

Los medios de comunicación suelen dar información frecuente sobre enormes icebergs separados de la Antártida. Aunque son hechos que llaman la atención, debe tenerse presente que en la actualidad se dispone de medios de observación únicos en la historia de la Humanidad. Probablemente fenómenos como los descritos podrían haberse observado en épocas anteriores si se hubiera dispuesto de satélites o de aviones que volaran sobre el polo sur.

En este mismo sentido, resultan alarmistas las informaciones sobre la apertura al tráfico marítimo de los Pasos del Noreste y del Noroeste como consecuencia del cambio climático. Esas noticias suelen repetirse todos los años,

cada primavera. Para esquivar el sensacionalismo periodístico y centrarse en la verdad es necesario hacer las precisiones siguientes:

1.- El Paso del Noreste fue atravesado por primera vez en 1878 por el barco sueco *Vega* al mando del explorador finlandés Nordenskiöld. Quince años después, el paso fue cruzado otra vez por la expedición de Nansen a bordo del barco noruego Fram. Este barco navegó de oeste a este y, tras doblar el cabo Cheliuskin que es el sitio más septentrional de Eurasia, alcanzó las islas de Nueva Siberia. La intención de Nansen era dejarse arrastrar por la corriente transpolar que estaban estudiando y su fin último era alcanzar el polo norte. Resulta lógico pensar que, durante esos años, el paso del noreste estaba abierto al paso de barcos de vela, como los citados, que iban también equipados con pequeños motores auxiliares.

2.- El Paso del Noroeste fue atravesado por Roald Amundsen a bordo del barco de vela noruego *Gjøa* entre los años 1903 y 1905. No dispuso de cartografía suficiente, lo que le obligó a explorar por tierra para saber cuál de los múltiples estrechos debía elegir de entre los posibles. Su barco tenía 21 metros de eslora y disponía de un motor auxiliar de muy poca potencia. Nuevamente parece razonable pensar que entre 1903 y 1905 el paso estaba abierto al paso de barcos de vela como el de Amundsen.

6.5. Modelos matemáticos

La elaboración de modelos matemáticos es la única herramienta válida para prever fenómenos como el cambio climático. Sin embargo el uso de esta técnica presenta limitaciones que es necesario tener en cuenta para dar a los resultados el valor real que tienen.

La *primera dificultad* que se presenta es la imposibilidad de calibrar el modelo. Para saber si un modelo funciona bien, es decir, para saber si representa fielmente al fenómeno que modeliza, es necesario comparar las previsiones con los resultados. Hablando de cambio climático eso es extremadamente difícil porque la validez de los cálculos hechos hoy solo va a poder comprobarse dentro de muchos años.

Este comentario remite a un problema antiguo. La Ecole Polytechnique de París, fundada por Napoleón en 1794, desarrolló métodos matemáticos de cálculo de puentes y pusieron las bases para el cálculo matemático de estructuras, de tanta importancia en la ingeniería actual. Esos métodos tardaron cincuenta años en ser aceptados por los ingenieros ingleses y norteamericanos, de formación experimental, porque los primeros calculistas «estaban con demasiada frecuencia tan cegados por la elegancia de sus métodos que descuidaban la exactitud de sus hipótesis de partida, por lo que daban una respuesta exacta a un planteamiento equivocado» (Gordon, 2004).

La *segunda dificultad* es la consecución de una parametrización adecuada de los factores terrestres intervinientes. Piénsese que una parte importante de los agentes del cambio climático son naturales y que las mediciones de parámetros físicos y químicos que hay que realizar para obtener valores que necesariamente deben intervenir en el modelo, son difíciles de llevar a cabo de manera fiable. No son mediciones de laboratorio. Por ejemplo las relativas a parámetros derivados de la geodinámica interna del planeta. Deben

ser globales y simultáneas y ello genera una dificultad extrema ¿Cómo medir las emisiones de CO₂, CH₄ y vapor de agua de origen natural en todo el mundo? ¿Cómo se hace eso, por ejemplo, en el Teide o en la totalidad de las islas Canarias? ¿Cómo se miden las variaciones en los contenidos atmosféricos de esos tres gases en periodos de mucha actividad volcánica planetaria? ¿Cómo se sabe que las muestras son representativas? Las plantas compiten entre ellas por la luz y por el CO₂ con su enorme diversidad de hojas. Si hay más CO₂ disponible en el aire también hay posibilidad de que las especies crezcan más, igual que pasa en los invernaderos donde se enriquece la atmósfera con ese gas o como sucedía en el Carbonífero con helechos de cincuenta metros de altura ¿Cómo se incorpora al modelo la mayor posibilidad de fijación de CO₂ por las plantas y su potencial de crecimiento? Finalmente, ¿Cómo se modeliza el efecto albedo?

La *tercera dificultad* procede de la previsión de la actividad solar. El sol tiene ciclos de once años pero las manchas solares, indicadoras de actividad, no se ajustan bien a esos ciclos. El paso del Pleistoceno al Holoceno, hace 11 700 años, es el paso de un periodo glacial a un periodo templado. ¿Qué sucedió? ¿Cómo fue el deshielo? ¿Por qué se templó la Tierra? ¿Qué parte del contenido de CO₂ en la atmósfera procede del calentamiento natural del planeta en esa transición? ¿El aumento de CO₂ es causa o es consecuencia del calentamiento global? La evolución de las manchas solares en los últimos años, hacen del presente un tiempo excepcionalmente bueno para estudiar la teoría de Maunder sobre los enfriamientos y calentamientos terrestres. Si fuera cierta, a la vista de la actual evolución del sol, el planeta iría camino de una glaciación y no de calentarse más.

6.6. Actualismo

Como se ha comentado al principio de este escrito, es indudable que la actividad humana es responsable de parte de las emisiones de CO₂ y de la mayor parte de las emisiones de cuatro de los seis gases que favorecen ese efecto. No cabe ninguna duda de que tras la Revolución Industrial se han devuelto a la atmósfera millones de toneladas de CO₂ que fueron captadas y fijadas por organismos vivos pretéritos durante millones y millones de años. Sin restar ni un ápice de importancia a esa situación cierta, el cambio del clima debería afrontarse con mayor amplitud de miras. Se sugiere que desde el Actualismo.

Déjense a un lado, por un momento, los datos sobre la extensión del hielo en los polos y admítase, contra la evidencia, que la totalidad del planeta se está calentando. ¿Por qué ha de ser el hombre el único causante? ¿No estarán concurriendo las mismas causas que lo hicieron en el pasado? Profundizar aquí y entrar a discutir sobre las cuestiones planteadas anteriormente excedería la extensión requerida para este artículo y superaría con creces lo que se pretende con él, pero es necesario señalar que la causa de este problema no puede investigarse estableciéndola de antemano, como está sucediendo. Eso no es hacer ciencia. Antes de que pueda llegarse a una conclusión rigurosa sobre si el planeta se calienta o se enfría y sobre las causas reales de estos procesos, serán necesarios más años de observación y trabajo. Hasta entonces no deberíamos perder de vista, como decía Lyell, que los

fenómenos geológicos se producen en el presente de una manera parecida a como se produjeron en el pasado. Si no percibimos sus efectos, se debe a que los cambios son tan lentos y nuestra vida tan corta, en términos geológicos, que nos resulta difícil apreciarlos. En este contexto, hay que recordar, por último y una vez más, que el cambio climático ha sido constante desde la formación de la Tierra. Lo que resultaría verdaderamente anómalo sería que el clima no cambiase. Por eso a lo largo de la historia geológica se sucedieron periodos fríos y cálidos que no pudieron ser causados por el hombre. Con perdón.

7. CONCLUSIONES

1.- El clima de la Tierra cambia. El planeta ha pasado por periodos fríos extremos y cálidos extremos, sin intervención humana.

2.- La Antártida se está enfriando. El Ártico se está calentando.

3.- Las medidas a adoptar para frenar la emisión de gases de efecto invernadero deberían ser razonables ante las dudas que suscita la fiabilidad de las previsiones climáticas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anguita, F., 1988. *Origen e Historia de la Tierra*. Editorial Rueda, Madrid, 525 p.
- Anguita, F., 2002. *Biografía de la Tierra: Historia de un Planeta Singular*. Editorial Aguilar, Madrid, 300 p.
- Gordon, J. E., 2004. *Estructuras o por qué las cosas no se caen*. Calamar Ediciones, Madrid, 396 p.
- Lyell, Ch., 1860. *Principles of Geology*. D. Appleton & Co., Nueva York.
- Meier, W., 2020. *September monthly mean trends for 1979-2019, showing overall trend and trends for the most recent 13 years, and the steepest 13 years in the 41-year record*. National Snow & Ice data Center (NSIDC). Disponible online: <http://nsidc.org/arcticseaicenews/category/analysis/>
- National Snow & Ice data Center (NSIDC), 2020. *Sea Ice Index*; Arctic- and Antarctic-wide changes in sea ice. Disponible online: https://nsidc.org/data/seaice_index/
- Stokes, W. L., 1969. *Historia de la Tierra*. Aguilar Ediciones, Madrid, 575 p.