

VNiVERSiDAD D SALAMANCA



JOSÉ-ABEL FLORES VILLAREJO

La memoria del océano

Lección inaugural del Curso Académico 2023-2024

La memoria del océano

Lección inaugural del Curso Académico 2023-2024,
pronunciada por D. José-Abel Flores Villarejo,
Catedrático de Paleontología
de la Universidad de Salamanca,
en el solemne Acto Académico celebrado
el día 25 de septiembre de 2023
presidido por el Sr. Rector Magnífico D. Ricardo Rivero Ortega.

| JOSÉ-ABEL FLORES VILLAREJO |

La memoria del océano



VNiVERSIDAD
D SALAMANCA

SECRETARÍA GENERAL

2023

© 2023 de los textos:
José-Abel Flores Villarejo

© 2023 de esta edición:
Universidad de Salamanca. Secretaría General

Cubierta:

Discoaster pentaradiatus, nanofósil calcáreo oligotrófico
y cálido (izquierda) y *Coccolithus pelagicus*, cocolitóforo eutrófico
y frío (derecha). Mioceno. Pacífico ecuatorial.

ODP Leg 138 (composición gráfica a partir de fotografía
de microscopio electrónico de barrido x10,000).

Edición no venal

Imprime: Gráficas Lope

Hecho en la UE - Made in EU

*A mis padres, a Ana y a Álvaro.
No podría ser de otra manera.*

*A mis maestros, compañeros y antes estudiantes,
por lo aprendido y por lo que aprenderé.*

*A Bach, Biber, von Bingen, Dvorak, Stockhausen, Jarrett,
Schubert, Dylan, Mitchell, Boulez, Coltrane, Messiaen,
Holland, Reich, R. Strauss, Davis, Fauré, Falla, Brahms,
Vitoria, Berg, Debussy, Guerrero, Takemitsu...
por su compañía al microscopio y frente al papel.*

*Vieja y nueva
erosión. Placas, láminas, cornisas,
acantilados y escolleras, ágil
bisel, estría, lucidez de roca
de milenaria permanencia. Aquí
la verdad de la piedra, nunca muda
sino en interna reverberación*

Claudio Rodríguez
Frente al mar

*... y apurar el presente, solo el presente, y ajenos por completo
al caudaloso empuje de la historia inmemorial que todo
lo arrastra hacia el futuro, y que acaso solo perciben
los geólogos, los biólogos y los lectores de Schopenhauer*

Luis Landero
El huerto de Emerson

*¿Qué límite puede fijarse a esta fuerza actuando durante
tiempos larguísimos y escudriñando rigurosamente toda
la constitución, con formación y costumbres de cada ser,
favoreciendo lo bueno y rechazando lo malo?*

Charles Darwin
El origen de las especies

*En definitiva, ¿qué es el tiempo? Si nadie me lo pregunta, lo sé.
Si quisiera explicárselo al que me lo pregunta, no: lo sé.*

Agustín de Hipona
Confesiones

*Una tormenta viene desde lejos
limpia el calor que resta del verano.
Un azul celestial llena la atmósfera
y nosotros nos preparamos para el nuevo espíritu.*

Kabayashi Issa

*But it don't snow here
It stays pretty green
I'm gonna make a lot of money
Then I'm gonna quit this crazy scene*

Joni Mitchell
River

Time is an ocean, but it ends at the shore

Bob Dylan
Oh sister

*... no puedes cambiar el pasado; aunque déjame decirte algo:
Podrías aprender algo de él.*

Lewis Carroll
Alicia a través del espejo

| ÍNDICE |

PRELUDE

Hádico, el rojo

23

ALLEMANDE

*Arcaico. Principios del azul verdoso;
retazos anaranjados. 4000-2500 Ma*

27

COURANTE

Proterozoico. Blanco y azul. 2500 a 600 Ma

39

SARBANDE

*Paleozoico. Verde sobre azul; a veces negro.
542 M a 200 Ma*

51

MENUET

Mesozoico. Ocre en el azul. Espuma. 200 M a 65 Ma

65

GIGUE

*Cenozoico. Azul, muy verde; definitivamente blanco.
65 Ma hasta 0 Ma*

75

INTERMEZZO

95

CON MOTO

Antropoceno. Ayer reciente, hoy y mañana mismo

103

REFERENCIAS

123

INTERNET

129

SI TUVIERAN la posibilidad de reunir frente a ustedes a un par de personalidades históricas relacionadas con la disciplina en la que trabajan, ¿a quiénes llamarían?

Difícil elección, ¿no es cierto?

Como paleontólogo, si en estos momentos tuviera la posibilidad de entablar una conversación con alguna figura histórica, o mejor, asistir a una conversación entre ellas, con dudas, reclamaría la presencia de Agustín de Hipona y Charles Darwin.

El primero supo mostrar la transcendencia del tiempo como dimensión determinante, inmaterial pero decisoria.

«Y no obstante, medimos el tiempo. No el tiempo que aún no existe, ni el que ya no existe, ni el que no se dilata con alguna duración, ni el que no tiene fin. En una palabra, no medimos ni el tiempo futuro, ni el pasado, ni el presente, ni el que está pasando. Y no obstante, podemos medir el tiempo»¹

¹ Confesiones. XI, XXVII.

El segundo acertó a materializarlo, lo hizo palpable en su «El origen de las especies por medio de la selección natural».

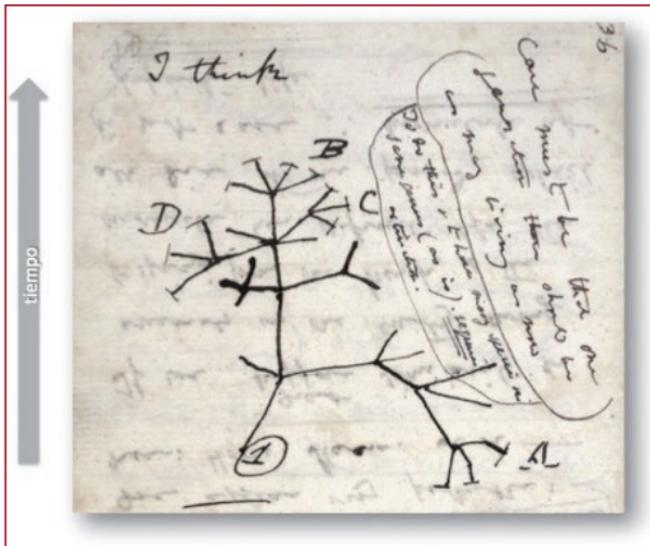
«Finalmente, considerando, no un tiempo determinado, sino todo el tiempo, si mi teoría es cierta, tienen que haber existido innumerables variedades intermedias que enlacen estrechamente todas las especies del mismo grupo; pero el mismo proceso de selección natural tiende constantemente, como tantas veces se ha hecho observar, al exterminio de las formas madres y de los eslabones intermedios. En consecuencia, sólo pueden encontrarse pruebas de su pasada existencia en los restos fósiles, los cuales, como intentaremos demostrar en uno de los capítulos siguientes, están conservados en registros sumamente imperfectos e interrumpidos»

Hablaré del Tiempo, de tiempo material, más allá de consideraciones de la Mecánica clásica, relativista o cuántica. Del transcurrir histórico de nuestro planeta, su agua y, particularmente, de los seres que han habitado sus océanos; también, comedidamente, de los que puedan llegar a habitarlo. No puedo coincidir, aunque aprecio el discurso, con las ideas de Niklas Luhmann, con su sesgo sociológico:

«se pueden construir tiempos específicos para localizar, por ejemplo, las causas en el pasado; los efectos, en el

futuro. Pero todo esto es solo posible en la observación que se realiza solo en un presente actual, y mediante aplicación de procesos de atribución»

más bien porque estoy en condiciones, al menos en el comienzo de esta propuesta, de apartarme de la impronta humana: el pasado existe en tanto y cuanto el recuerdo, efímero como pensamiento, se materializa en forma mineral.



| Figura 1. Manuscrito de Charles Darwin en el que esboza líneas que relacionan diversos grupos orgánicos, considerando la dimensión temporal ineludible |

En el siglo XVIII los patriarcas de la actual Geología, John Playfair y James Hutton, y la aún actual obra de Charles Lyell, *Principles of Geology* (libro de cabecera de Darwin, por cierto) esbozaban ideas parecida sobre entes inanimados, las rocas:

The present is the key of the past

revisado en la actualidad con evidencias como las esbozadas por Jouzely y Masson-Delmotte:

«Ahora se reconoce plenamente que un conocimiento profundo de las condiciones ambientales y climáticas del pasado es una de las claves para una mejor comprensión de los cambios que afectan actualmente a nuestro clima y nuestro medio ambiente, así como para anticipar su evolución en el próximo siglo y más allá»

Ciertamente entrando en consideraciones más *luhmannianas*, aunque esa idea de actualidad se enfrenta a la consideración de otro de los principios de la Geología, el Uniformismo², campo de batalla en la interpretación de

² Principio que considera que las mismas leyes y procesos naturales que operan en las observaciones científicas actuales han operado de igual forma en el pasado.

procesos y su comprensión. Hablaré de miles de años y de miles de millones de años, consciente de que los años del pasado remoto no tuvieron la misma duración que los años recientes. Un contrasentido que nos revelan precisamente los organismos que vivieron en cada una de esas épocas.

Ya frente al papel, tratando de comenzar una lección siempre añorada —¡quién me iba a decir a mi que tendría el privilegio de estar inaugurando el curso de la que ha sido mi universidad, en realidad mi vida, ante mis compañeros y en el Paraninfo por el que tantas personalidades has transitado!— la primera idea que surge es, ¿de dónde viene esta impronta científica de perseguir seres vivos y minerales? Bien pudiera ser casualidad, consciente de que puede darse, aunque en la mayoría de los casos encuentra otra explicación, o queremos encontrar otra explicación, más entrañable, que la justifique sin demasiada controversia.

Hago memoria y dejando atrás mis libros de texto de Ciencias naturales de Primero y Segundo de bachillerato: Animales, plantas y minerales, El cuerpo humano, descubro otro recuerdo: Vida y Color, una colección de 380

cromos en la que se mezclaban plantas, animales y esqueletos, con humanos de diferentes continentes.

El reducido y pretencioso preámbulo del álbum sin autor que lo firme, finaliza con una frase que, seguro, en aquel momento carecía del sentido que hoy encuentro:

«Comprender a la naturaleza, es vivir en mejor armonía con el mundo que nos rodea, y, sobre todo, con nosotros mismos, y es que todo ya está hecho y ordenado por esta madre de toda la sabiduría: LA NATURALEZA»

Una de las pocas colecciones que completé. La recuerdo porque, con el álbum cumplido, con 7 años, mi padre me acompañó una tarde a recibir el regalo por tal proeza: una colección de minerales amontonados en una bolsa de plástico tosco, envueltos en papel poco fino y etiquetas escritas a máquina desnivelada. Galena, cinabrio, pirita –ahora sé que de escásísimo valor–, cuarzo, y un cristal pobre de calcita en el que se intuían planos de exfoliación, de nula transparencia. Este «polimorfo del carbonato de calcio», bien cierto que, en cristales minúsculos, nanométricos, ha sido la estructura que me ha perseguido y la culpable

de encontrarme aquí. El integrante de los fósiles a los que he dedicado casi todo mi tiempo. Cristales que constituyeron esqueletos que fueron generándose en el océano y poblándolo, erigiéndose como parte de su memoria. La memoria de la vida, de los seres vivos; la de nuestro planeta.



Así pues, el paleontólogo dispone de la facultad de tratar, de conversar con los seres que existieron, los fósiles. Pero yo iría más allá: el paleontólogo, como geólogo, dispone de la mejor, de la más eficaz herramienta para viajar en el tiempo, más allá de la historia humana, o, a veces, con ella. En el tiempo transcurrido, si bien, y ya adelante consciente de ser algo provocador, con cierta calidad para anticiparse al futuro.

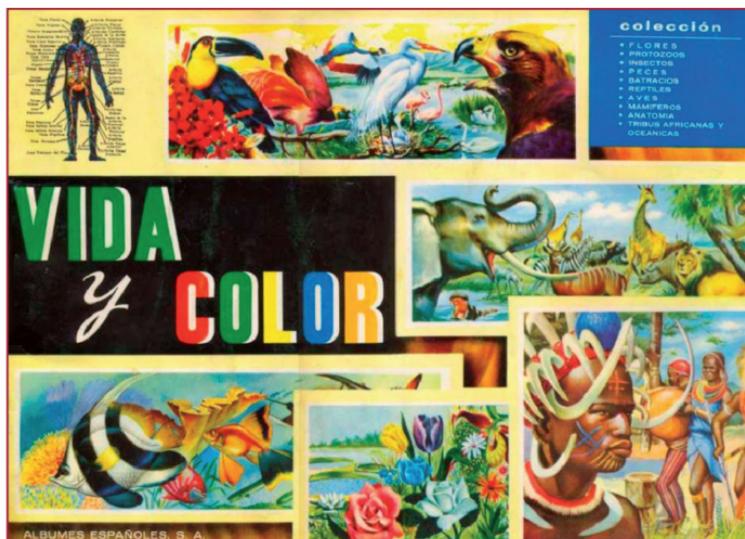
Jose Saramago comentaba en su Cuadernos de Lanzarote:

«Somos la memoria que tenemos y la responsabilidad que asumimos, sin memoria no existimos y sin responsabilidad quizá no merezcamos existir»

¡Verán cuánta razón tenía!

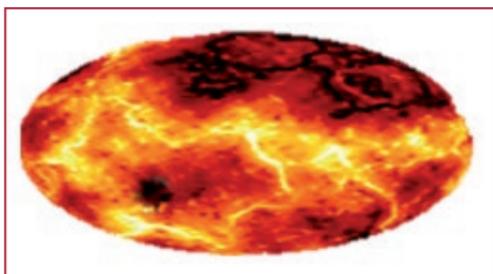
Los fósiles y los sedimentos en que se integran constituyen *memoria*, más allá de la civilización y el recuerdo personal, literario o arqueológico, todos ellos meramente humanos.

No obstante, en esta reconstrucción, como en cualquier narración, me remitiré a hechos destacables, acontecimientos esenciales, mecanismo no muy alejado del humano en tanto y cuanto recuerda, o al menos refiere lo sensible. Se hablará de nacimientos, desapariciones o cambios de semblante recurrentes; de nueva vestimenta del planeta y de sus padecimientos, siguiendo un *tempo* que se acelera y ralentiza, que deja de tener ese carácter periódico. Algo no muy alejado del discurso musical. Un planeta dinámico en tanto y cuando palpita y muda, y con él, el océano que aloja. Un *tempo* que aquí se torna inversamente exponencial. Tiempo y colores. Vida y color.



| Figura 2. Vida y color álbum de cromos.
Editorial Álbumes españoles S.A., 1965 |

| PRELUDE³ |



| Hádico, el rojo

JAMES USSHER DE ARMAGH en 1650, con su *infalible* método basado en *Las escrituras*, dedujo que la edad del universo era de 6008 años, y desentrañando señales apócrifas, que el primer día de la creación comenzó el atardecer anterior al domingo del 23 de octubre del año 4004 a.C. del calendario juliano, cerca del equinoccio de otoño. Su contemporáneo John Lightfoot se opuso a tal cálculo y

³ A modo de divertimento, influido por el ritmo que transcurre, sigo el esquema propuesto por Johann Sebastian Bach en su Suite I para violonchelo solo en Sol mayor, BWV 1007.

certificó que la creación comenzó el atardecer próximo al equinoccio de otoño de 3929 a.C. Isaac Newton negó los cálculos, consideraba esas edades «recientes» y comentó que debería estar en torno a los 6000 años. Un siglo después, el marqués de Buffon calculaba, ante el asombro y las burlas de los académicos, 76.000 años. Charles Lyell, convencido Darwin, calculó estudiando rocas una edad de 240 Ma⁴.

Los resultados de la sonda de la NASA *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*, más conocida por WMAP, a comienzos del siglo XXI fueron revolucionarios. De acuerdo a su estimación la edad del universo es de 13,7 Ga⁵, con un error de 200 Ga. Recientemente, la aplicación de técnicas desarrolladas por el *Planck Consortium* de la *European Space Agency*, han posibilitado acercarla hasta $13,787 \pm 0.020$ Ga, desproporcionado valor comparado con una generación humana, pero que es *solamente* tres veces la edad de la Tierra.

En 1995 Allègre y colaboradores aproximaron la edad de las que se consideran las rocas

⁴ Ma = millones de años.

⁵ Ga = giga años. Miles de millones de años.

más antiguas de la Tierra a los 4.6 Ga. Los números han ido cambiando ligeramente y en la actualidad los gneises de Acasta (Canadá) indican los 4,03 Ga, si bien se han hallado circones en Nuvvuagittuq (Australia) con edades de 4,36 Ga. El estudio de meteoritos recuperados y de muestras lunares confirman que la edad de un planeta próximo a la madurez, recibiendo enormes cantidades de material cósmico, se correspondería con los 4,6 Ga⁶.

La Luna es una buena fuente de información al respecto, dado que no ha sido afectada por tectónica de placas. Aunque se dispone de una limitada cantidad de muestras recuperadas por las misiones *Apollo*, la edad estimada de su material más antiguo es de 4,4-4,5 Ga. Una Luna que se ha formado a partir de la colisión de un cuerpo, *Tea*⁷, del tamaño de Marte, una vez que nuestro planeta ya estaba formado.

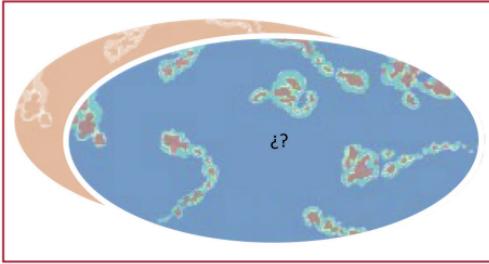
⁶ La datación más precisa, 4,54 Ga, se basa en el análisis radiométrico en sideritos (meteoritos de hierro), específicamente el meteorito Canyon Diablo. Estos datos no están muy alejados de los 4.4 Ga de circones retrabajados hallados en rocas sedimentarias en el cinturón del Arcaico de Australia.

⁷ Theia, Tía o Teia en la mitología griega. Titánide de la que procede la luz.

Desgajado y eyectado hacia el exterior de su órbita, en un lapso relativamente corto, se configura un satélite con materiales propios del manto terrestre y vaporización de lo que debió ser una corteza primigenia (Canup and Asphaug 2001).

Tras la definición del sistema Tierra-Luna, comienza la historia *real*. Tras el impacto de Tea, el eje terrestre se inclina y la que hasta entonces debió ser una órbita circular, se torna elíptica. Este hecho ha sido trascendental, como veremos, en la historia climática reciente del planeta. Un episodio en el que el sistema carecía de agua líquida, con una atmósfera en desarrollo, libre de oxígeno, inhabitable para lo que reconocemos como vida.

Quizás existiese un océano, mares, pero su elemento debió ser magma.



Arcaico. Principios del azul verdoso;
retazos anaranjados
4000-2500 Ma

EN TORNO a los 4 Ga el planeta comienza a *palpitar*. La inercia energética que ha determinado su formación da lugar a que se establezca el primer régimen tectónico, aún distante del que hoy gobierna, combinando rocas volcánicas con las primeras de origen continental. Este hecho es absolutamente crucial y diferenciador de otros astros conocidos. La dinámica del carbono en la Tierra es determinante. Por un lado, sus compuestos en

la atmósfera van a ser los que posibiliten una temperatura medida, ejerciendo un efecto termorregulador, y en su momento, la de inicio de seres vivos, siempre a expensas de la energía recibida por el Sol; por otro lado, la masa sólida debe ser dinámica, permitiendo que el exceso de carbono se retire mediante un proceso de «hundimiento» que participe en el equilibrio del sistema⁸. Un ciclo abortado en algunos astros próximos como Marte o Venus pese a encontrarse en la «Zona Goldilocks», término usado por los astrobiólogos para definir la distancia que marca el umbral crítico para alojar vida.

En el contexto anaranjado y grisáceo que dominaría el paisaje, con temperaturas entre los 0 y 100 °C, se vislumbra un compuesto que en esas condiciones es estable: el agua líquida.

Las rocas de la formación Isua (Groenlandia), combinan secuencias volcánicas con granos y estructuras característicos de la sedimentación en medios acuosos de edad 3,8 Ga, indicios de Vaalbará, el primer *supercontinente*, la primera masa de tierra emergida afectada por un ciclo

⁸ Los tiempos de respuesta de cada sistema son distintos.

hidrológico activo y la consecuente definición de un océano, el Protoocéano, con un ambiente con una protoatmósfera compuesta por dióxido de carbono (CO_2), dióxido de sulfuro (SO_2), monóxido de carbono (CO), sulfuro de hidrógeno (H_2S), hidrógeno gas, nitrógeno, y metano (CH_4). Esos compuestos aparecerían también en el agua, dulce y con un pH en torno a 6, ácido. No se registraría oxígeno libre y en consecuencia tampoco existiría ozono.

Una masa de agua surgida en tres cuartas partes de la desgasificación del planeta que se habría ido incluyendo en el entramado mineral en la época temprana de acreción, y una cuarta parte procedente del exterior por la llegada de meteoritos ricos en agua (Piani, 2020): los condritos carbonosos.

Hoy en día se ha iniciado un debate acerca de «la propiedad» del agua lunar que NASA detectara «inequívocamente» en 2020. ¡Quién iba a decir viendo las imágenes de Neil Armstrong dando su pequeño y trascendente paso, que en aquel aparente desierto, a temperaturas medias que en sus polos se acercan a las mínimas de nuestra Antártida (-90 °C), iba a concentrarse la enorme cantidad de agua que hoy se estima!

Su origen no tiene mayor misterio que el propio origen del agua terrestre.

No es frecuente citar falacias como elemento ejemplar, pero en esta ocasión, para justificar mi discurso, me voy a atrever a negar al ilustre provocador Ramón Gómez de la Serna cuyas máximas se emplean en términos didácticos repetidamente.

El agua no tiene memoria: por eso es tan limpia.

Lo imagino en su abarrotado despacho, más preocupado de la estética que del concepto, escribiendo esta greguería, por fortuna, absolutamente falsa, pues el agua, sobre todo el agua oceánica, aloja en sus resquicios un sinfín de partículas, moléculas y seres que la hacen literalmente *sucia*. En el momento del que estamos hablando, el sistema dispone de los ingredientes para generar o albergar vida: «entes moleculares susceptibles de multiplicarse, aptos para transmitir información y capacidad de variación». Y en ese contexto, los compuestos en los que se implica el carbono, esenciales, habrían de interaccionar con estructuras inorgánicas, de «baja tecnología», como describía Crains-Smith, para iniciar el proceso. Una

interacción orgánico-inorgánica *minúscula* pero determinante. Los filosilicatos como depositarios y transmisores de la información.

En esa situación se habría definido LUCA (*Last Universal Common Ancestor*), ancestro *algo mineral* de todos nosotros, organismos, algo que ya el patriarca Darwin había manifestado:

«(...) *Por lo tanto, debo inferir por analogía que probablemente todos los seres orgánicos que han vivido en esta tierra han descendido de alguna forma primordial, en la que la vida fue inspirada por primera vez*»⁹

(A nuestro otro conversador, el de Hipona, no lo veo capaz de imaginar lapsos más allá de los genealógicos que contempla su obra, de miles de millones de años, aunque con toda seguridad prestaría atención).

Estructuras de imposible preservación en rocas antiguas se combinarían con los minerales que interaccionaran sin dejar rastro. ¡Sin rastro material de LUCA!

⁹ *On the Origin of Species.*

En cualquier caso, es donde realmente comienza la historia de un planeta con océano. Agua líquida, y en torno a los 3,6 Ga, el registro de estructuras que se diferencian del entorno: organismos, vida.

No es mi objetivo discutir acerca del concepto, menos con una audiencia en la que sobran voces autorizadas. Como paleontólogo, geólogo, me quiero centrar en las evidencias, en la señal. Aunque el grado de incertidumbre es significativo y aún no se sabe con certeza cuándo o dónde comenzó la vida en la Tierra, algunos de los primeros escenarios habitables pueden haber sido fumarolas hidrotermales submarinas. Así lo han propuesto Dodd et al. (2017), que describen señales de microorganismos fosilizados de al menos de 3,77 Ga, sin descartar por algunos los 4,28 Ga, de las rocas ferruginosas que aparecen en el cinturón Nuvvuagittuq en Quebec. Esos primeros organismos, células procariotas, Bacteria y Archaea, sin núcleo, podrían captar energía de múltiples formas, serían capaces de desarrollarse en ambientes *infernales* y aprovecharlos. Hoy en día lo hacen en reductos hidrotermales, *hipersalinos*, en los intersticios de las rocas profundas

del océano, en el hielo milenario antártico. En otras ocasiones, desarrollarían alfombras cianobacterianas sucesivas, en las que en un proceso órgano-sedimentario, intercalan cristales de aragonito (CaCO_3) con fango inorgánico, generando formas reconocibles en la actualidad (Lepot et al, 2008).

Ante este panorama, con estos datos que el investigador va arrancando, identificando retazos de roca vieja que trasladan a complejos mapas policromados, quienes me lean tendrán la sensación de que todo se generó al mismo tiempo: atmósfera –cielo–, hidrosfera –océano– y biosfera –vida. Tres de las cuatro geosferas, alojadas en la primigenia litosfera¹⁰, siguiendo un programa interactivo. El polifacético James Lovelock presenta en 1979 la hipótesis Gaia, en la que los organismos cobran un papel determinante en la evolución terrestre. Esto es palmario; de una u otra forma está asumido.

¹⁰ Eduard Suess, introdujo los términos litosfera, hidrosfera y biosfera en 1875 en su obra *Das Antlitz Der Erde* (La faz de la Tierra). Sobre esos términos Vladímir Vernadski en *La biosfera*, propuso un primer modelo combinado de interacción de sistemas en el planeta, para finalizar en su noosfera.

Tampoco es momento de entrar en debates acerca de tiempos de evolución de sistemas complejos y la posible procedencia extraterrestre: panspermia y litopanspermia; Anaxágoras, Arrhenius, Hoyle y Oró¹¹. No pretendo alentar la insurrección, aunque, sinceramente, me siento tentado. ¡Dejémoslo en un proceso de evolución química sin más!

Hasta el momento se considera que la estructura estromatolítica más antigua tendría una edad de en torno a 3,5 Ga (Formación Dresser en Australia). Esta pieza se podía contemplar antes de la última remodelación en el Smithsonian Museum de Washington. Una estructura de apenas 10 cm que, al contemplarla por primera vez, me produjo una sacudida. ¡Tantas veces había visto la foto! ¡Tantas veces la había explicado y ahora la tenía delante! La vida de 3,5 Ga.

Los estromatolitos van a registrarse hasta nuestros días, y los organismos que los

¹¹ Juan Oró (1923-2004) científico español, profesor en la Universidad de Huston y colaborador con la NASA y el proyecto Apollo, referente en trabajos sobre el origen de la vida y defensor de la teoría de la Litopanspermia. Un científico relevante a menudo olvidado.

componen, las cianobacterias, tienen la posibilidad de realizar fotosíntesis oxigénica o anoxygenica. Una vez proliferan en un nicho absolutamente libre como es el océano, comenzaron a emitir oxígeno. Este exceso, primero sufre una combinación geoquímica, oxidando hierro y formando, con *ayuda* de esos mismos organismos, las denominadas capas bandeadas de hierro (Gribaldo y Brochier-Armanet, 2006).

Las cianobacterias fueron capaces de emplear este mecanismo químico, la fotosíntesis:



y las enzimas y orgánulos responsables, los cloroplastos (o algo similar) la tecnología empleada (Cardona et al., 2015).

Mi gran amigo Gabriel Filippelli, profesor en la Universidad de Indiana, explica con esta frase la importancia del evento:

«Es sorprendente considerar que una enzima inventada por las cianobacterias hace 2400 millones de años, cambiaría el color de todo nuestro planeta!»

La química de la Tierra experimentó una alteración radical debido al oxígeno libre de la

atmósfera. La nueva química del oxígeno disolvía rocas, creaba minerales nuevos y permitía la rápida liberación de la energía almacenada en compuestos orgánicos, posibilitando la aparición de nuevos mecanismos metabólicos altamente eficaces.

Entre 2,5 y 1,0 Ga de años, los arrecifes de estromatolitos estaban ampliamente expandidos y produciendo oxígeno de forma masiva, provocando un cambio drástico en la atmósfera, que perdura hasta nuestros días. Dos mil millones de años de dominio de los organismos procariotas, únicos habitantes del único reducto habitable entonces: el océano, cálido y rico en CO₂ y metano¹².

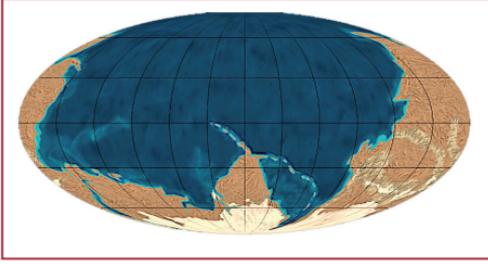
Pero la historia del océano está repleta de paradojas, y una que se reitera, aunque con

¹² El nuevo proceso sigue dependiente de la cantidad de carbono en el sistema y los compuestos derivados que ejercen de termoreguladores. Con un Sol que inicia una fase de mayor emisión de energía, y un incremento de compuestos de carbono que contribuyen a «calentar» el sistema, la presencia de los organismos van a contribuir a modificar el ciclo, atrapando carbono y derivarlo a diferentes reservorios conjuntamente con procesos de meteorización del continente emergido, que transporta carbono al océano. Del fondo oceánico, tras su deriva tectónica, emergerá de nuevo por procesos volcánicos.

diferentes protagonistas va a ser la respuesta antagónica del sistema ante el cambio: el exceso de oxígeno producido por organismos, fue el causante de la primera debacle planetaria: «El gran evento de oxidación» determinó la desaparición de una importante masa de organismos inadaptados a esa situación. Teóricamente podría considerarse una «gran extinción o extinción masiva», pero no aparece en el censo de las *clásicas* que se tratarán. Tras ese evento, la reducción de carbono en la atmósfera determinará otro acontecimiento sorprendente, la mayor glaciación que ha acontecido en nuestro planeta. La reducción de CO₂ implica *frío*. Este hecho tuvo consecuencias determinantes en el reducido ecosistema entonces definido: con la reducción de temperaturas se limita el volumen de agua líquida produciendo un descenso sustancial del nivel del mar.



| Figura 3. Estromatolito del Mioceno de Sorbas (Almería) |



Proterozoico. Blanco y azul
2500 a 600 Ma

PAULATINAMENTE, en un proceso continuado, atmósfera y océano se enriquecen en oxígeno, hasta que, en torno a los 2 Ga, se constituyen con composición próxima a la actual, definiéndose además la capa de ozono. En ese momento se alcanza el volumen de agua similar al que se dispone en la actualidad: 1386 millones de km³. El océano, alimentado

¹³ Figuras esquemáticas de la evolución paleogeográfica de la Tierra.

International Commission on Stratigraphy (ICS). Modificado.

por el material procedente de la meteorización continental y las emisiones hidrotermales alcanza los valores medios de salinidad que hoy tenemos, alrededor de 35 PSU.

Es en el momento en el que en los organismos tiene lugar un ascenso en la complejidad: la aparición de las eucariotas; acaso, la mayor revolución evolutiva acaecida.

Mediante un proceso de simbiosis, diferentes organismos procariotas se organizarían para constituir una célula compleja. El mecanismo, la eucariogénesis, tiene distintas explicaciones con idéntico resultado: Un ancestro común, LECA (*Last Eukaryotic Common Ancestor*), final de un proceso en el que la simbiosis aludida habría dado lugar a un primigenio FECA (*First Eukaryotic Common Ancestor*), con algo parecido a lo que hoy son nuestras mitocondrias.

En torno a los 1,6 Ga se registran formas que se denominan acritarcos, con una cubierta resistente, similar a la esporopolenina. Un cajón de sastre en el que los micropaleontólogos incluimos formas, seguramente planctónicas, dispersas en el Protoocéano en toda su extensión.

Me detengo aquí en un recuerdo.

Siendo «becario» visitó el Departamento de Microbiología una investigadora, nos dijeron a los paleontólogos avezados y en formación, que estaba interesada en unas estructuras fósiles, *stromatoliths*. Se acercó a la Facultad de Ciencias curiosa sobre estas estructuras cianobacterianas Lynn Margulis (que recientemente había cambiado el apellido de su anterior esposo, Carl Sagan), y que aparecía en alguna de las publicaciones de Lovelock y su Gaia.

Yo tenía mi ejemplar de «Los cinco Reinos: Moneras, Protoctistas, Hongos, Plantas y Animales», pero no me atreví a preguntar nada. Habló solo ella, aunque dejó que le comentara que conocía matas bacterianas en las cercanías de Tamames, paleozoicas, y otras mejor definidas en Santa Pola, Níjar y Sorbas del Neógeno. Demasiado moderno para ella. Traté de hablar algo sobre la *endobiosis seriada*, pero no hubo suerte, tenía prisa y, no me cabe duda, asuntos más importantes que hablar con un becario. Con las prisas y los nervios, se me olvidó que me firmase el ejemplar traducido que aún conservo. Fue toda mi frustrada interacción con la famosísima microbióloga.

Y a partir de ahí, por un proceso simbiótico de eucariotas, incontestable selección natural, se daría la multicelularidad que crearían colonias o entes de similar naturaleza (Libby y Ratcliff, 2014). La primera diferenciación celular evidente se da alrededor de 1,2 Ga, y la protagonista es una alga roja, *Bangiomorpha pubescens*, cuya estructura mineral posibilitó la preservación de una serie de celdillas. Este salto morfológico, difuso igualmente en lo que serían metazoos, mesozoos o esponjas, se manifiesta igualmente en el registro sedimentológico y biogeoquímico, diluyendo información. El lapso comprendido entre 1,8 y 0,8 se ha dado en llamar el «Periodo aburrido» debido a la aparente uniformidad referida. A la vista de los acontecimientos descritos, incluyendo glaciación y extinción masiva, parece que el término no es el más adecuado. Podríamos jugar a definir una palabra referente, ya que, desde mi modesto conocimiento, creo que no existe oficialmente, aunque intuyo que se va a complicar la pronunciación: FPOA (*First Pluricelular Organism Ancestor*); o nos lanzamos a alterar la norma gramatical y establecemos FOPA. ¡Decidan!

Todo esto ocurría en un planeta en el que se fueron definiendo distintos continentes: Ur, Kenorland, Nena, Atlántica, Columbia, en los que el modelo tectónico que hoy en día posee la Tierra, la tectónica de placas, encontraba definición, desplazándose, hundiéndose, arrugando terrenos y fondos marinos, siempre rodeados por aquel *superocéano*, a estas alturas de la historia, que yo sepa, a la espera de encontrar nombre, pese al afán del científico por pasar a la posteridad ideando nombres, a veces mitológicos y grandilocuentes, a veces de lo más prosaico.

A partir de esa edad, con organismos complejos ocupando el océano, una masa de tierra se erige en lo que sería la mitad sur del planeta: Rodinia. En realidad, se trataba de una serie de grandes islas próximas, en medio de Mirovia, un superocéano en el que los fósiles informan de temperaturas superiores a la media actual, sobre todo, en su etapa final (Neoproterozoico). Animales y plantas, como el caso de *Proterocladus antiquus* que se interpreta como un alga filamentosa bentónica, una clorofita sifonocladal, lo que sugiere que esos organismos adquirieron tamaño macroscópico, multicelularidad y

diferenciación celular hace mil millones de años (Tang et al. 2020). Sorprendentemente, y aunque se trata sin lugar a duda de uno de los ancestros de las plantas que nos rodean, estas no van a colonizar el continente hasta el Ordovícico (ca. 450 Ma)¹⁴.

Aquellas plantas marinas bentónicas, enraizadas, tuvieron que desarrollarse en fondos someros ya que precisarían de luz para llevar a cabo sus funciones metabólicas. Al mismo tiempo, la Micropaleontología nos revela el desarrollo de nuevas especies de acritarcos, corpúsculos de decenas o centenas de micrómetros que flotarían libremente en el océano, proveyendo de verde su superficie. El feudo del núcleo (Tudge, 2000).

Otra revolución acontece en torno a los 600 Ma en el *superocéano* Panafricano (que en realidad no deja de ser el devenir de Mirovia) alrededor e Pannotia, justamente tras varios episodios blancos, gélidos, de la historia del planeta.

¹⁴ Este hallazgo rompe con la idea de que las plantas continentales se generaron en el continente y posteriormente colonizaron el océano. El hecho, además, determinaría un segundo escalón en la concentración de oxígeno atmosférico libre.

Sepultados en limos mareales, surgen una serie de estructuras fósiles, en realidad impresiones, cuya morfología no puede ser explicada más que por su origen orgánico. Animal, planta, hongo. *Charnia*, un cuerpo decimétrico foliforme, morfológicamente planta, microestructuralmente animal. ¿Plumas de mar - Pennatulacea? Demasiado complejos para la época. A esas formas, las acompañan otras igualmente *estrambóticas*; moldes, unas veces interpretadas como gusanos, otras medusas, otras como algo que no tiene analogía con nada actual.

Este concepto, permítaseme divagar, precisa romper una vez más el principio del actualismo de nuestros maestros. No solo el ambiente y el marco cosmológico han de asumirse distintos, sino que del mismo modo que hemos de imaginar LUCAs y LECAs, es razonable pensar que esos metazoos no necesariamente han de corresponderse con las categorías taxonómicas conocidas. Sin embargo, la lógica «evolutiva» me arroja a pensar en un ser constituido por células (Eukarya) adheridas en una estructura globular, sin que en principio se definieran las funciones propias de lo que más adelante

identificaremos como tejido; mucho menos órganos o sistemas.

En cualquier caso, los organismos, ante el ascenso de niveles de oxígeno reaccionan y respiran:



El registro sedimentario a partir de este momento es más regular, aunque la impronta telúrica mantiene su potencial transformador y modifica estructuras y minerales. Diversos grados de metamorfismo difuminan el registro paleontológico.

Sin embargo, la fortuna, unida a la proliferación de seres de cierto tamaño —ya decimétrico en casos—, hace que su presencia se materialice en huellas, impresiones, *sombras*, de entes que, en frecuentes ocasiones, difícilmente encuentran similitud con formas actuales.

En 1868 un agrimensor aficionado a los fósiles, Alexander Murray, descubre en Terranova *Aspidella terranovica*, aunque su interpretación como resto orgánico fue discutida y descartada por los académicos de la época. Cualquier resto susceptible de reconocerse como metazoo

servía para asignar una edad Cámbrico, como muy antigua. ¿Cómo reconocer entonces vida pluricelular antes de esa fecha? Uno de los casos destacable fue el de Georg Gürich, que en 1933 descubre restos de identidad confusa en Namibia.

La evidencia, la solución al enigma, si se quiere, se revela una vez el geólogo Reg Sprigg, en 1946, *deslajando* areniscas en las colinas de Ediacara, en el desierto australiano, halla una asociación de restos que inequívocamente se reconocen como de *animales*. Se trata de la fauna *ediacariense*, en la que se quiso, y aún hoy se quiere ver, medusas, pólipos, anélidos o esponjas. Seres que se arrastraban, esperaban pacientemente a que las corrientes les llevaran el material para su subsistencia, excavaban el fondo o nadaban en un entorno de batimetría baja y rangos mareales amplios.

En los 60, otros restos recuperados en Escocia, Norteamérica y Sudáfrica van completando el catálogo, identificando variedades en las asociaciones de animales, de entes blandos. Martin Glaessner, otro de los patriarcas de la Paleontología moderna, se encargará de ordenarlos y ubicarlos en la secuencia temporal.

Coinciden los especialistas en el carácter invertebrado de los organismos, obviamente, sin que además se llegue a definir lo que va a ser el elemento que posibilitará el registro regular histórico: el esqueleto. Concha y hueso. La presencia de estos elementos descubre una eficaz herramienta que a su vez favorecerá el desarrollo evolutivo a los organismos.

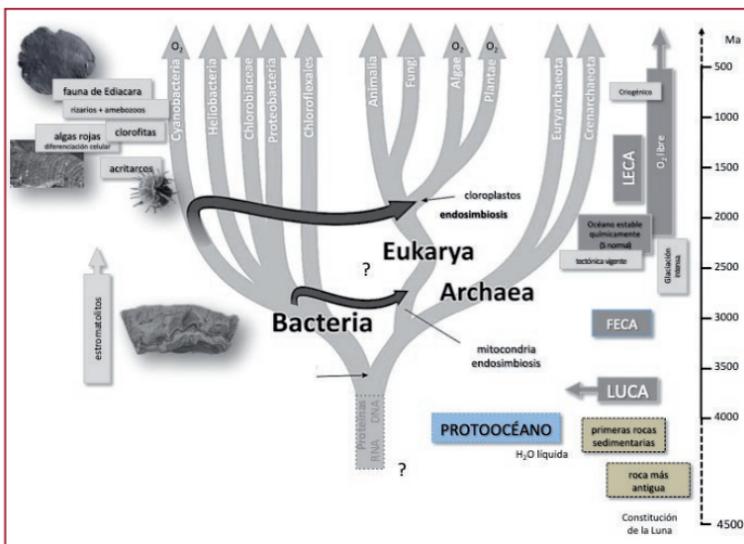
Glaessner debió pasar, me imagino, noches pensando sobre el asunto, pues su obsesión, su meta, fue resolver el dilema de la aparición del esqueleto. No lo soluciona, pero no deja de plantear su escatológica idea de proveniencia de los propios excrementos reutilizados como dispositivo protector y de anclaje de elementos blandos.

La enigmática fauna se mezcla con otras estructuras diminutas, microfósiles cuyo hallazgo tuvo gran repercusión mediática (Grazhdan-kin, 2004), se han interpretado como embriones, pero existe una intensa discusión al respecto, sin que se haya alcanzado un consenso, si bien parece que en realidad se trataría de algún protozoo (Huldtgren, 2011).

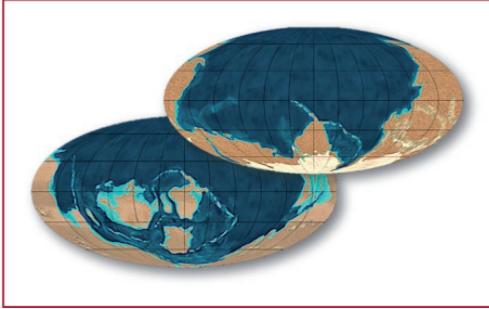
¿Plantas, animales? ¿Algas, protozoos, hongos? No nos vamos a poner de acuerdo, tén-ganlo por seguro¹⁵.

Esta fauna surge en episodios en los que el océano Mirovia y Panafricano gobiernan un planeta en el que Rodinia y Pannotia ofrecen sus costas. Continente vacío de vida, plataformas anegadas y océano abierto con organismos en diversificación. Episodios de glaciación casi completa del planeta, el que denominamos Criogénico, alternando con lapsos de decenas de millones de años con temperaturas incluso superiores a las de hoy en día en los trópicos; la situación idónea para la proliferación y transformación de organismos pluricelulares. Un océano rico, verde y una concentración de CO₂ atmosférica que podría haber alcanzado las 10.000 ppm.

¹⁵ La especulación, o la reinterpretación e interpretación de nuevos hallazgos supone, no voy a hablar de prestigio, pero sí de la posibilidad de que la idea se publique, que tenga cierta trascendencia, aunque en muchos casos, en la mayoría, quedarán en el registro bibliográfico diluida, en extinción, como aconteció con esta fauna que tiene representantes hasta aproximadamente los 600 Ma.



| Figura 4. Esquema de la evolución de los sistemas en el Precámbrico Shevela (2011) + Brocks et al. (2022), modificados + aportaciones personales |



Paleozoico. Verde sobre azul; a veces negro
542 M a 200 Ma

PANGEA Y PANTALASSA, el gran continente, el gran océano que serviría para denominar la obra póstuma de Miles Davis con ese nombre. No me queda claro que él fuera creador del título, pero ahí está.

El hecho palpable es que, en ese océano enriquecido en oxígeno, se produce una eclosión a expensas de una fauna ediacariense que compete con los nuevos poseedores de esqueleto. Han tenido problemas con los organismos de

los que se alimentaban (¿matas bacterianas?) o sufrido las extremas condiciones frías que se produjeron. Se conoce como la Gran explosión cámbrica.

El registro certifica que de los filos de metazoos que hoy conocemos, al menos 11 se definen en el Paleozoico incipiente. Es entonces cuando el océano, particularmente sus costas, están rebosantes de arqueociatos (no conocidos en registros recientes), poríferos arrecifales (siempre junto a estromatolitos), braquiópodos, conodontos (estructuras dentarias de cordados), equinodermos, moluscos, ostrácodos (artrópodos con valvas) o trilobites (Conway, 1993). Estos organismos junto con los omnipresentes acritarcos, foraminíferos bentónicos, otros restos micropaleontológicos y las sempiternas matas y agregados bacterianos, completaban el mapa orgánico del océano bullente de vida.

Teniendo en cuenta que en este momento habría transcurrido nueve décimas partes de la historia de la Tierra, podría considerarse que la mayoría de grupos orgánicos estarían asentados.

El supercontinente se va desgajando, Gondwana, el mayor, inicia un desplazamiento al

sur; las unidades menores, las grandes islas Laurasia, Siberia y Báltica, se mueven perezosamente hacia el norte. En la Pantalassa los mares como Thetys, anticipan lo que van a ser las cuencas que hoy conocemos. Los compuestos con carbono fluyen, los transforman los organismos, emergen en volcanes y se hunden conchas y partículas inorgánicas en las fosas oceánicas.

El esqueleto de algunos organismos se ha hecho tan patente, se han extendido tanto y con tal éxito que llegan a definir unidades rocosas: arqueociatos, estromatóporas y esponjas (todos parientes), a las que se asocian algas que igualmente han mineralizado sus talos. En las bajas profundidades la mayor parte de las longitudes de onda visibles penetran y abundan plantas entre las que anidan, o se esconden, animales identificables: los carbonatos y los fosfatos que procesan constituyen sus partes blandas y el paleontólogo ha aprendido a reconstruirlas.

En el entorno de Salamanca reconocemos *biohermos* y estructuras cianobacterianas de esa edad, sobre las que se superponen pizarras que se depositaron en medios profundos, con restos de plancton o de animales flotantes, graptolitos,

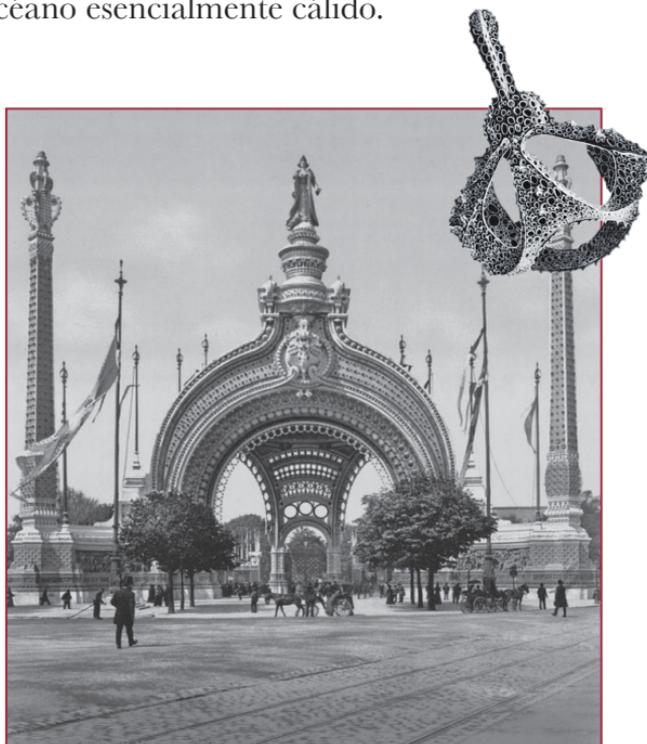
o arenas repletas de pistas de desplazamiento de trilobites. En este caso la secuencia alcanza hasta los 400 Ma.

El plancton se va diversificando y es entonces cuando surgen los radiolarios, protozoos con cubierta silíceica. Con la aparición de esta estructura mineral la morfología de los esqueletos de los microfósiles sufre una transformación determinante.

El arquitecto Rene Binet fue el creador de la entrada a la Exposición Universal de París en 1900; una estructura barroca, plena de filigrana, curvas y prominencias perforadas inspiradas en una obra muy popular en los ambientes de las Ciencias naturales, *Kunstformen der Natur* (Obras de arte de la Naturaleza, 1899-1904) de Ernst Haeckel¹⁶, defensor a ultranza de las ideas de Darwin. El pórtico reproducía el esqueleto del radiolario *Clathrocanium reginae*.

¹⁶ Ernst Haeckel mantuvo que todos los organismos (animales, plantas y seres unicelulares) procedían de una sola forma ancestral. Sus estudios acerca de la biología marina, realizados en colaboración con Müller, le condujeron a comparar la simetría de los cristales con la de los animales más simples y a postular un origen inorgánico para los mismos, anticipando la propuesta de Crains-Smith.

Además de estos seres, en el Paleozoico se registran otros entes extraños: los quitinozoos, de imposible adscripción taxonómica. Otro elemento más del plancton dominante de un océano esencialmente cálido.



| Figura 5. Entrada a la Exposición Universal de París en 1900, inspirada en *Kunstformen der Natur* (Obras de arte de la Naturaleza, 1899-1904) de Ernst Haeckel, reproduciendo la especie de radiolario *Clathrocanium reginae* |

Una de las singularidades de la Paleontología es la capacidad de trabajar con elementos de ascendencia y detalles biológicos desconocidos: los arqueociatos, los quitinozoos, los graptolitos, que pese al desconocimiento se convierten en herramientas para la reconstrucción. La comparación con las características sedimentológicas, mineralógicas y geoquímicas, dotan a esos seres de información indirecta sobre la salinidad, la temperatura, la dinámica del océano, su relación con los vientos o la batimetría. Evidencias modeladas sobre lo desconocido que se asumen como testadas. Un juego que requiere una iniciación propia a las ciencias de la Vida y la Tierra, para no entrar en situaciones absurdas.

Heráclito observa las características de las piedras que constituyen las pirámides egipcias y formula, sin mucho análisis, su conclusión. Según refiere Plinio «el Viejo», aquel presocrático quiso ver en los granos que proliferaban en los bloques de areniscas las lentejas petrificadas con que se alimentaba a los esclavos que las construyeron. Hoy sabemos que se trata de macroforaminíferos: protozoos cuyos parientes ya se distribuían por los fondos del océano Paleozoico.

No sé si inspirado en este hecho, mi colega José Longoria, de la Universidad Internacional de Florida, destacado especialista en foraminíferos, me contaba que en una ocasión cocinaron una sopa con una buena cantidad de estos protozoos vivos que a veces pueden tener buen tamaño. Su conclusión fue que no es lo más recomendable para un restaurante que lo quiera incluir en un menú, pese a su sofisticación. Al menos, me dijo, nadie sufrió problemas gástricos.

Pero si hay algo que caracterice al océano son sus peces, grupo que debería ocupar en aquella época la cúspide de la cadena trófica. Los agnatos: mixinos, lampreas y algún ser nadador con placas pero sin mandíbula, serían los primeros cordados que se cimbreaban en las profundidades iluminadas de entonces. Se alimentarían de lo verde y de lo pequeño planctónico. De ellos, más adelante tiburones, partirían el resto de vertebrados. Le acompañan moluscos que nadan a su lado: cefalópodos con concha, depredadores, que seguramente buscarían peces, braquiópodos y a los primeros bivalvos para subsistir.

Las condiciones ambientales globales como estamos viendo son dependientes y están

definidas por las características de las geosferas. Buena parte del Paleozoico poseería concentraciones atmosféricas de CO₂ de entre 7000 a 2000 ppm, muy por encima de las aproximadamente 400 ppm que tenemos hoy en día. La actividad volcánica, la dinámica de los continentes (de forma destacada las orogenias), sin olvidar la impronta vegetal, serían las responsables. Precisamente alguna de estas modificaciones va a ser la causante de cambios tajantes en el espectro orgánico.

Al final del Ordovícico, cuando se estaban depositando algunas de las pizarras de nuestra sierra (ca. 440 Ma), los paleontólogos revelan lo que se ha dado en llamar la *Primera extinción masiva*.

La diversidad y el número de taxones de los organismos que he referido se reduce un 60-70%. La explicación más plausible, aunque en debate –constante en la investigación de estos periodos–, alude a una fase en la que el desarrollo de plantas, esencialmente oceánicas, pero ya con un componente continental no desdeñable, absorben altas proporciones de CO₂, reduciendo el efecto invernadero que este gas produce, y el consecuente enfriamiento, resultando una

glaciación. Ello requeriría un sumidero efectivo que permitiese la rápida retirada de carbono del sistema, dirigiéndolo hacia la litosfera, un reservorio con mayor tiempo de residencia y en el que se puedan producir transformaciones sustanciales. Un buen número de formas vivas se adaptaría a esa situación, pero en el momento que se recuperan las temperaturas es cuando la capacidad de respuestas selectiva no fue tan eficaz y se ven diezmadas.

Poco después, una vez se ha producido la paulatina recuperación de la diversidad oceánica, regresando a su peculiaridad verdeazulada, hacia los 365 Ma (Devónico-Carbonífero), los característicos organismos marinos vuelven a retroceder en lo que respecta a abundancia y diversidad. Algunos grupos de corales que habían encontrado un hábitat idóneo, así como las praderas estromatolíticas, desaparecen y con ellos buena parte de la flora y fauna asociadas: el 75%.

En la Pangea y sus islas unas plantas, las hepáticas, simples y con verdor intenso, colonizan las zonas húmedas del continente. Las primeras invasoras, las exploradoras y fase inicial de un ecosistema que posteriormente será

sumamente prolífico y complejo; la base de una cadena que no tardaría mucho en complicarse. En ese proceso, esos organismos desarrollan raíces, dan lugar a los primeros suelos que liberan al océano una cantidad de nutrientes hasta el momento desconocida, sumándose al proceso de meteorización, lo que provoca una desmesurada producción primaria de los organismos autótrofos que han colonizado toda la zona fótica y el consiguiente consumo de oxígeno, asfixiando a un número sustancial de formas.

No obstante, no es la única idea al respecto. No se descarta que ello fuera acompañado de un descenso térmico, siguiendo un proceso glacial similar al antes expuesto. Esa concentración de agua continental determinaría una caída importante del nivel del mar, lo que implicaría asimismo una reducción de la superficie disponible para algunas especies. Sin embargo, la selección natural sigue en juego, y es el momento en que algunos peces se atreven a colonizar el continente, dando lugar a los primeros anfibios, que poco después darían lugar a los reptiles, acomodados y menos dependientes del medio acuoso: todo un logro. Aunque, quizás añorantes de las profundidades, algunos

de esos reptiles regresarán al paisaje oceánico. Hoy en día, tortugas, serpientes, algunas iguanas y cocodrilos continúan en aguas saladas; entonces les acompañaron sauropterigios gigantes.

La situación de drástica reducción en la concentración del CO_2 atmosférico tras un episodio de florecimiento vegetal se volverá a repetir en el Carbonífero-Pérmico (ca. 300 Ma), acentuando los procesos glaciales, pero sin determinar en este caso extinciones, aunque sí cambios sustanciales en la flora continental. El océano entonces llega a valores de temperatura no muy distintos a los actuales, con plancton diversificado y costas pobladas por arrecifes algales y coralinos, si bien con formas desconocidas en la actualidad, tanto de corales como de moluscos o animales musgo: los comunes y discretos briozoos.

La oscuridad debió extenderse en el planeta hacia los 250 Ma. Entonces al océano habría que imaginarlo sin color: un inmenso cementerio en el que trilobites, corales, peces primitivos, numerosos organismos del plancton y bentos microscópicos, desaparecieron: entre el 90 y 95%. La causa de esta situación fue provocada

por un enriquecimiento de CO_2 atmosférico, no tan extremo como alguno de los episodios mencionados, que alcanzaría las 4000 ppm de manera rapidísima. La procedencia del gas no fue otra que el interior de la Tierra como consecuencia de un incremento de la actividad volcánica relacionada con ajustes en el manto. Pero el proceso se complicó: la proliferación de bacterias que se aprovecharon de ese exceso de CO_2 promovió la generación de metano. La capacidad de producir efecto invernadero de este gas es 25 veces superior a la del CO_2 . Consecuentemente, el planeta se calienta sumándose un efecto de lluvia ácida que, por un lado, produce una elevada acidificación oceánica, dificultando el desarrollo y estabilidad de los esqueletos de los organismos, a la que se suma un ambiente general tóxico.

La emisión volcánica es incuestionable. Sin embargo, existen evidencias que apuntan a que el episodio devastador coincidió con el impacto de un asteroide de varios km de diámetro. Ese impacto pudo ser detonante e incluso generador de esa inestabilidad tectónica, además de actuar como liberador de hidratos de gas (metano) que se alojaban solidificados en el océano. Hoy en

día la concentración de este compuesto estable a alta presión y/o bajas temperaturas en las cuencas oceánicas es altísima.

Sea cual fuere el origen, único o la combinación de procesos, el panorama terrestre en aquel momento debió ser desolador. El continente ya había sido colonizado por anfibios y un número importante de reptiles. Solo un número limitado de estos seres fue capaz de sobrevivir (Sahney y Benton, 2008).

La historia se repetía 50 Ma después, al final el Triásico en torno a los 200 Ma, ya en el Mesozoico. Correteaban por Gondwana, que insinuaba la cicatriz que separará Laurasia, arcosaurios, grandes anfibios, insectos y algo que se acercaría a un mamífero. En la Pantalassa cefalópodos gigantes y peces óseos recorrían arrecifes de algas calcáreas y corales. Planeaban en el cielo y pescaban los pterosaurios.

Aquí, sin querer ser provocador, vamos a obviar los límites oficiales establecidos por la Comisión Internacional de Estratigrafía y considerar el Mesozoico, la Era Secundaria que se nos presentaba en el colegio, en tiempos más recientes.

¡Que me perdonen los inflexibles!



Mesozoico. Ocre en el azul. Espuma.
200 M a 65 Ma

UN SURCO VOLCÁNICO cruza la Pangea de sur a norte, separando Gondwana y Laurasia, generando una incipiente cuenca que en unas decenas de millones de años va a definir el Atlántico. El continente se plaga de gimnospermas y helechos, mostrándose discretamente las plantas con flores y sus colores. Y entre esos bosques o en las llanuras más húmedas, los dinosaurios debieron ser avistados con frecuencia. No así los mamíferos,

que, aunque presentes, se escondían entre las raíces de los vegetales, si bien gradualmente van siendo más frecuentes. Los reptiles comienzan a tener plumas y terminarán siendo aves.

El océano ha cambiado ostensiblemente. Durante ese periodo se alcanza la situación de máxima *oceanidad* acaecida, con alturas del nivel de las aguas de hasta 200 m por encima del actual.

El plancton calcáreo y silíceo se multiplica, y con él los organismos de la sucesión trófica. Las mareas blancas y rojas intermitentes, cocolitóforos, diatomeas y dinoflagelados, comienzan a ser frecuentes. Los corales modernos, junto con las algas coralinas y la corte de animales y plantas asociadas a las estructuras arrecifales, dibujarían el paisaje costero: la temperatura media del océano lo posibilita. Esas costas se revisten de colores más intensos y variados que el continente: esponjas, briozoos, corales, moluscos, erizos y estrellas de mar, peces, proporcionan toda la gama imaginable.

Casi 150 millones de años de tranquilidad en el planeta con temperaturas globales medias en torno a los 22 °C y una atmósfera con concentraciones de CO₂ entre los 2000 y 1000 ppm.

Pero como vemos, la historia de la Tierra viene marcada por acontecimientos catastróficos. Eventos súbitos o procesos alargados en el tiempo que finalizan con modificaciones sustanciales.

El acontecimiento que tuvo lugar hace 65 Ma, conocido como K/Pg (Cretácico-Paleógeno) determinó la extinción del 75 % de la vida del planeta y coincidió con un entorno paleogeográfico y de evolución de la biosfera, atmósfera y océano que bien podría servir como marcadora del inicio de la historia geológica moderna. Así lo pienso yo.

La extinción de los populares dinosaurios, o al menos una buena parte de ellos, junto con organismos del plancton, moluscos o corales, entre otros, y el despegue de organismos hasta el momento poco representados, unido a marcas sedimentológicas, geoquímicas y geofísicas, indican que tuvo lugar un suceso de gran entidad.

Luis Alvarez y Walter Alvarez, padre con premio Nobel a cuestas e hijo con la responsabilidad de acercarse a los méritos paternos, proponen que un cuerpo extraterrestre impactó. Los datos hoy disponibles confirman esa entonces

hipótesis, que, aunque reiterada en la historia de nuestro planeta, constituye la evidencia más contrastada, incuestionable, de un evento de esas características (Alvarez et al., 1980).

Con las costas americana y europea aún cercanas, separadas por una cordillera submarina que añade basalto y las separa, un cuerpo de varios km procedentes del cinturón de asteroides surca la atmósfera a una velocidad de 20 km/s e impacta con 45° en el golfo de México. Produce un cráter en Chicxulub de casi 200 km de diámetro. Los cálculos estimados hablan de en torno a los 100 teratones. Para quienes tenemos problemas en asumir ciertas entidades, varios miles de millones de veces la energía de las bombas de Hiroshima y Nagasaki (Hiroshima: 15 kilotones Nagasaki: 21 kilotones, aproximadamente).

El impacto del meteorito, con vientos de 10.000 km/h, produjo la movilización del fondo y agua oceánicas que se eyectaron a la atmósfera. Partículas de metales rarísimos en la Tierra como el iridio se esparcieron y se mezclaron con los sedimentos. Consecuentemente, una nube impenetrable por la luz, persistente, determinaría una especie de invierno nuclear

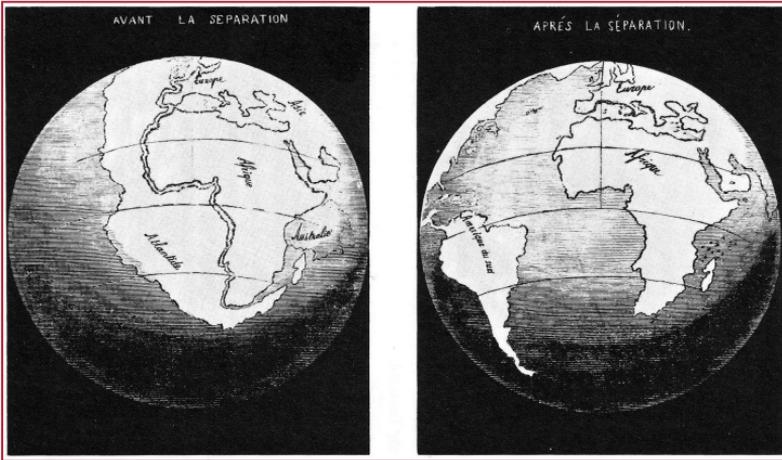
que se combinaría con el propio cataclismo. Cianobacterias y el resto de abundantes productores primarios desaparecerán, y con ellos, la cola trófica dependiente. Un acontecimiento que asoló continente y océano en distintas fases. La lluvia ácida y acidificación oceánica resultante complican el desarrollo a los innumerables organismos con esqueleto. Una devastación que el geólogo puede comprobar deslumbrado en el campo.

En la primavera de 1991 el Instituto de Estratigrafía y la Agencia del Petróleo de Cuba me invitaban junto al profesor Marcos Lamolda, entonces en la Universidad del País Vaco, a llevar a cabo una campaña de estudio para localizar el límite K/Pg en la isla recurriendo a técnicas micropaleontológicas. En casi dos meses recorrimos y muestreamos la isla de norte a sur, de este a oeste. *Mis* nanofósiles calcáreos observados en un laboratorio improvisado en La Habana, fueron capaces de identificar secuencias *pre-impacto*, en las que la diversidad y abundancia de esos seres microscópicos aparecían a millones; sobre ellas, secuencias que asumí como *post-impacto*, paupérrima en *mis* organismos, con una limitadísima diversidad:

apenas tres especies poblaban aquel rincón del océano tras la hecatombe.

Y entre un punto y otro, cientos de metros en la vertical de material revuelto. Rocas mezcladas con fósiles dispersos que ocupaban colinas repletas de palmeras reales. Ese material no era otro que el resto de la movilización de rocas aledañas al fondo, lo que en su momento se desplazó del cráter como consecuencia de la ola que se produjo. Un *megatsunami* que ni los mismísimos creadores de Hollywood serían capaces de imaginar.

Tuve problemas en explicárselo a los colegas petroleros y a sus asesores rusos, siempre presentes. De hecho, creo que no quedaron muy convencidos. En realidad, sospecho que tampoco les interesaba mucho esa ciencia cuya relación económica no encontraban. Alguno de aquellos técnicos cuestionaba, de manera irreverente y sin argumentos, la teoría de la tectónica de placas, mencionando guasón los infantiles, pero premonitorios, esquemas de Snider-Pellegrini (1858). Los aceites, el petróleo, estaban en otro punto.



| Figura 6. Dibujo de Antonio Snider-Pellegrini de *La Création et ses mystères dévoilés*, insinuando la correspondencia entre continentes, inspirador de la hipótesis de la Deriva continental de Alfred Wegener (1929) |

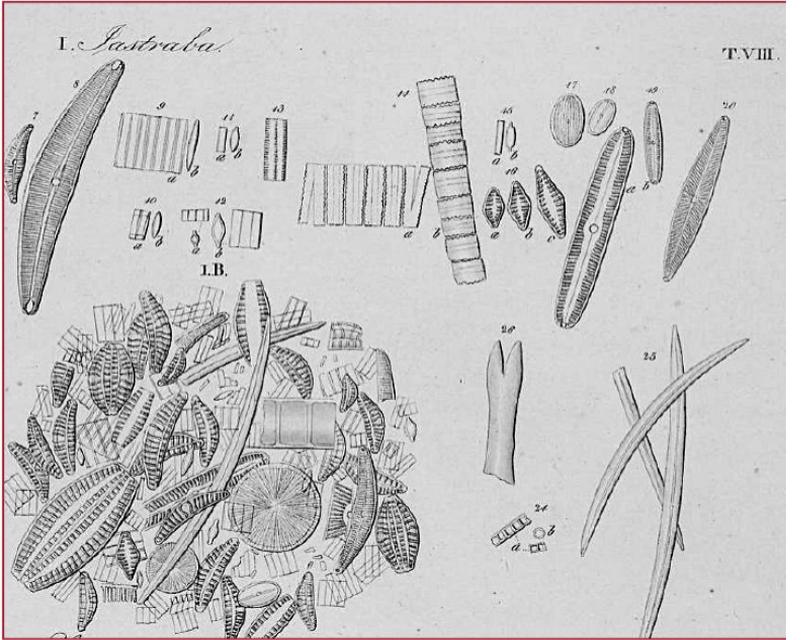
Algunos colegas mantienen que el evento del K/Pg pudo ser debido a un episodio de emisiones volcánicas extraordinario, justificado por la gran acumulación de rocas de esas características de esa edad en Deccan (India). Un incremento del CO_2 y de polvo a escala planetaria generarían una situación similar a la que propugnaban los Alvarez.

Quizás la combinación de acontecimientos extraterrestres, volcánicos y paleogeográficos

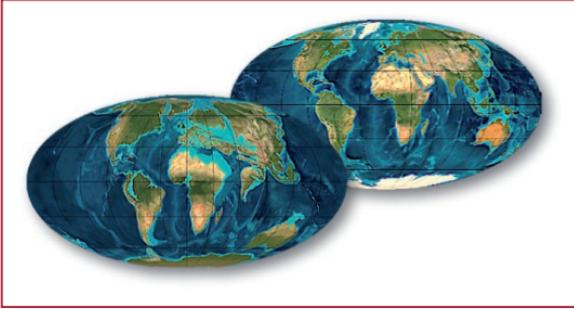
que modificasen, por ejemplo, el nivel del mar, sea la forma más inteligente de abordar el episodio. El propio impacto pudo desencadenar otros procesos que se sumaron (Archibald y Fastovsky, 2004).

En el océano desaparecen los grandes saurios, pero dejan espacio para que los mamíferos se interesen por ese inmenso espacio: los cetáceos, las grandes ballenas, los mayores seres que han poblado el planeta, se expanden. Un grupo de dinosaurios optimizan su pelaje añadiendo plumas, y la mayor parte se especializa en el vuelo o en la natación (¡los pingüinos aún no se registran!), acompañando a murciélagos en tierra. Cae ligeramente la temperatura, se reduce la cantidad de CO₂, comienza el Cenozoico, el Terciario.

Que recuerde, en la obra de Darwin no se mencionan meteoritos, con toda seguridad porque Lyell tampoco lo hacía en la suya, convencido de que todo cambio tiene su explicación en las propias entrañas del planeta, con sus propias fuerzas.



| Figura 7. Diatomeas. Figura de Mikrogeologie de Christian Gottfried Ehrenberg (1854), precursor de la Micropaleontología |



Cenozoico. Azul, muy verde;
definitivamente blanco.
65 Ma hasta 0 Ma

EL Terciario se inicia con un océano Pacífico inmenso y dos cuencas, una en plena formación: el Atlántico, y otra que se generará por partición: el Indico.

En este momento puedo decir que entro en mi zona de confort, en la discusión de los lapsos a los que he dedicado mi investigación. Intentaré ser imparcial y centrarme en lo general, aunque ustedes mismos como eruditos en sus

temas, serán conscientes de la ardua tarea que supone.

Debería decir que es uno de los episodios más interesantes de la historia del planeta, pero no lo voy a hacer. Seguramente nuestro colega *Philos*, sí se atrevería: tenía el carácter fuerte. De esta forma se dirigiría a don Carlos, me temo que no muy cariñosamente su «no me atrevo a decir amigo» FitzRoy, el comandante del *Beagle*, en alguna de esas veladas en el reducido miserable camarote que compartían, fumando.

En torno a los 56 Ma, en los que se conoce como PET (Transición Paleoceno-Eoceno), el planeta posee concentraciones de CO_2 de en torno a las 3000 ppm; el metano por su parte alcanza valores más de 10 veces por encima de los actuales. El desencadenamiento de emisiones volcánicas insólitas es responsable. La situación se mantendría de forma intermitente, pero en términos generales el CO_2 inicia un descenso progresivo, hasta casi los 200 ppm en momentos relativamente recientes. En relación con la temperatura media, el inicio del Cenozoico alcanzaría valores de 12 °C por encima de las medias anuales de hoy (en torno a los 15 °C), constituyéndose como referente en

el contexto de cambio climático antrópico del presente.

El continente y el océano poseen una flora y fauna similares a la actual, en términos generales. Las tallas y la fisonomía de las aves, los mamíferos, los insectos, los reptiles, por citar algunos, cambian, pero pese a casos de gigantismo o enanismo, no nos resultarían extraños. El océano está plagado de bacterias y de algas microscópicas con esqueletos calcáreos y silíceos. Peces, calamares, cetáceos y ya menos reptiles, nadan en sus aguas. Las costas, alcanzan una temperatura media tan alta, que se pueblan de algas coralinas en los que se desarrollan corales, esponjas, briozoos, moluscos y equinodermos. La vida en su máximo esplendor.

El conocimiento del Cenozoico, y hasta cierto punto el Cretácico superior, tiene una deuda con una serie de iniciativas aún vigentes: los programas de perforación oceánica.

La disponibilidad de plataformas de investigación que trabajan en el océano, con una tecnología que posibilitó la recuperación de material sedimentario en todas las cuencas, supuso un ascenso cualitativo y cuantitativo en las Ciencias de la Tierra.

La Unión Soviética lanza en 1957 el *Sputnik*, y en occidente, con la vorágine de espías que conllevaba la guerra fría, existía el rumor de que otro de los pasos para adelantarse científica y tecnológicamente, era alcanzar las profundidades del océano, más allá del fondo.

El programa MOHOLE en el año 1961 plantea una idea, me atrevo a decir, *más que ambiciosa*, más bien quimérica: llegar a la discontinuidad de Mohorovičić, aquella que separa el manto y la corteza terrestres. Bien cierto que en el punto que se estimaba más cercano, en la corteza oceánica. Un fiasco completo: El *Cuss I*, una embarcación preparada para tal fin, pensando sondear varios km de roca (y recuperarla), extrajo 183 m¹⁷. No obstante, sienta las bases y dispara el interés por conocer qué se oculta en el océano: ciencia, recursos y celebridad.

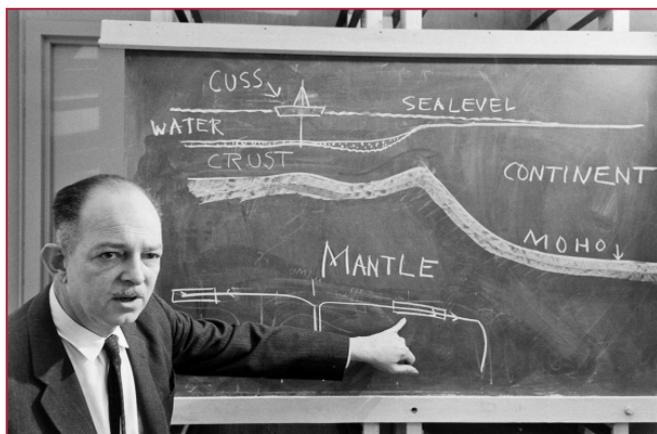
Desguazado el *Cuss I* lo sustituye el *Glomar Challenger*, protagonista de lo que será el emblemático *Deep Sea Drilling Program* (DSDP), originalmente gestionado por los Estados

¹⁷ Lejos de las recuperaciones medias de la actualidad, en torno a los 7 km de sedimento por expedición.

Unidos de América, al que, por cuestiones prácticas y económicas, no tardarían en incorporarse otros países occidentales.

El *Challenger* sería sustituido en los 80 por el *Joides Resolution*, insignia del primeramente denominado *Ocean Drilling Program* (ODP), después *International Ocean Drilling Program* y hoy en día *Integrated Ocean Discovery Program* (IODP). En el programa se han realizado hasta la fecha cientos de perforaciones y se han recuperado miles de km de roca en todas las longitudes y latitudes.

Cuando menciono esta embarcación próxima a desaparecer, una mezcla de pesadumbre y nostalgia me invaden; al fin y al cabo, ha sido, sumando meses, año y medio de mi vida en sus camarotes y laboratorios.



| Figura 8. Harry Hammond Hess explicando el proyecto MOHOLE en 1961 en la Universidad de Princeton. Fritz Goro/The LIFE Picture Collection via Getty Images (IODP). <https://iodp.tamu.edu> |

Las primeras expediciones demostraron fehacientemente que las orillas del Atlántico se *separaban*; esto es, la idea de Alfred Wegener de planeta en movimiento.

Aunque es obligatoria la referencia a paradigmas de la Geología, en esta ocasión voy a centrarme en alguno de los episodios menos conocidos, pero sin lugar a duda, trascendentes para explicar el contexto presente. Por otra

parte, se trata de algún ejemplo en el que me he implicado más directamente.

El hielo del Sur, Antártida (*ανταρκτικός - antartikós*), desde donde no podemos ver constelaciones de «osas», ni la Mayor ni la Menor, tiene historia relativamente vieja. En torno a los 35 Ma el hoy continente Antártico, Australia y el subcontinente Indio se han separado definitivamente de Gondwana e iniciado un desplazamiento errático. Una masa continental considerable que con antelación ha ocupado latitudes bajas y medias a tenor de los fósiles que aparecen en sus sedimentos, pasa a ocupar la región más austral del planeta, con restricciones en la llegada en la energía, pero, sobre todo, aislada definitivamente de América, dejando un corredor que conecta los 3 océanos. Los microfósiles recuperados por el *Foides* en diferentes regiones del océano Austral certifican que en ese momento se produjo una reordenación en el contexto oceánico. Plac-ton y bentos microscópicos se encuentran en cantidades ingentes en las muestras que se han estudiado.

Se generan aguas densas que van a llevar *frío* a latitudes bajas, y sobre todo, la definición

de la Corriente Circumpolar Antártica, una estructura de megaescala que da lugar al aislamiento térmico definitivo del continente antártico que adquiere una capa de hielo que desde entonces no ha descendido de los 4 km de espesor en su sector central. Un «polo» frío, cómplice con el océano que crea un gradiente latitudinal con repercusiones en el contexto global. Con la Antártida aislada y blanca se ordena la circulación oceánica superficial y profunda. Los microorganismos que en aquel momento vivían flotando y los que habitaban los fondos profundos y abisales, dan muestra de ello. Al mismo tiempo, las señales que los geofísicos obtienen con sus estudios sísmicos ponen de manifiesto la generación de cicatrices erosivas consecuentes con los sistemas tractivos que crean esas corrientes densas.

Tiempo aparentemente lejano, pero como vamos viendo un suspiro para la historia del planeta. Han sido varias las expediciones en las que el *Foides* ha navegado por las aguas antárticas. No muchas, convengamos: la singladura por esas latitudes es siempre complicada y las tormentas o la variabilidad en la extensión del mar helado la hace peligrosa. Estados de la

mar arbolada, montañosa y enorme, por encima de los 15 m de altura de ola son habituales.

Participando en dos de ellas, en los sectores Atlántico e Indopacífico del océano austral, los equipos que hemos trabajado con el material recuperado hemos podido fijar con mayor precisión el establecimiento definitivo de la masa de agua circumpolar. En este caso, aunque apoyados en microfósiles calcáreos y silíceos para generar los modelos de edad, los calendarios, la técnica empleada se circunscribe al análisis químico de isótopos de neodimio en dientes de peces fósiles. Esa señal ha permitido caracterizar el evento de generación del mar Austral y las características oceanográficas de las masas de agua que se generaron entonces y datarlo en 32 Ma, algo más temprano de lo que se pensaba, no mucho.

Entonces, la fisiografía planetaria no era muy diferente a la actual; globalmente más cálida, con concentraciones de CO₂ variables. Los organismos marinos prosperan de forma regular en este lapso sin que se registren extinciones destacables. Son relevantes los calcificadores como los cocolitóforos, los foraminíferos planctónicos, los moluscos y los equinodermos

que prosperaron coincidiendo con un aumento episódico del pH asociado con la reducción de CO_2 atmosférico.

El océano mantiene abundante flora procaríota y plancton calcáreo, con cierta reducción en formas planctónicas de pared orgánica como dinoflagelados. Las diatomeas y los silicoflagelados, microalgas con esqueleto de sílice y los radiolarios muestran un destacado florecimiento. Este hecho coincide con un determinante cambio en el continente: la aparición de pastizales, en particular el desarrollo de unas microestructuras silíceas de protección en las gramíneas denominadas fitolitos. Estas minúsculas partículas, fáciles de dispersar por el viento tras periodos de sequía o incendios, fueron —citándolo de manera anecdótica— las responsables que grupos como los caballos modificasen sus sistemas de masticación y digestivo, pero sobre todo, la definición de un nuevo medio de extracción/concentración de silíceo en el continente que alcanzaría finalmente el océano. El proceso acontece al tiempo que la formación del Himalaya, el consiguiente incremento de material vertido al océano por meteorización y el inicio de la dinámica de monzones

en esa región. Todo parece conjugarse para el cambio, o, quizás, todo forma parte del mismo proceso de cambio.

Otros acontecimientos destacables, como la definición de la cuenca del Amazonas en torno a los 9 Ma, o la definitiva elevación de las grandes cordilleras en las últimas fases de la orogenia Alpina, han sido determinantes para que el sistema oceánico y su dinámica fuera adquiriendo las características actuales, particularmente la definición de procesos como los aludidos monzones en Asia o El Niño en América. En ambos casos se produce una reorganización de las fuentes de nutrientes, esenciales para los productores primarios.

El denominado técnicamente ENSO (*El Niño Southern Ocean Oscillation*) es un proceso atmosférico-oceánico que se desarrolla en el Pacífico ecuatorial oriental, consistente en alternancias de calentamiento (fase El Niño) y enfriamiento (fase La Niña) de las masas de agua superficiales. Las iguanas marinas tan queridas por el abuelo Darwin son esquiladas durante El Niño, afectadas por la reducción de su alimento fundamental, algas, y eclosionan durante La Niña.

Paleoniños y Paleoniñas persistentes en el tiempo, o la generación de la gran barrera hiposalina una vez se constituye la cuenca amazónica, en el Atlántico en ese periodo, han sido descubiertos tras el estudio de los microorganismos que habitaron sus aguas.

Para entonces las costas tropicales se revisten de estructuras arrecifales en las que corales, algas coralinas y una ingente cantidad de flora y fauna asociada da lugar a verdaderos oasis de vida. Tiburones y cetáceos surcan las aguas del océano. Los pingüinos se multiplicaron.

De cualquier modo, la situación oceánica no acaba de ser la que hoy gobierna el océano. A esta altura de la historia falta hielo en el sistema. El hielo del Norte, el Ártico (*ἄρκτος* - *arktós*) en la región desde la que se puede contemplar las constelaciones Osa Mayor y Menor, está ausente.

Van a tener que pasar más de 30 Ma para que el Norte disponga de hielo abundante. Ello acontece en torno a los 3 Ma y es la tectónica una vez más, la dinámica del fondo oceánico y su manifestación en masas emergidas, la responsable. Hasta ese momento las cuencas Atlántica y Pacífica están comunicadas por lo que hoy en día

es el istmo de Panamá. Su elevación determina que las células de mesoescala en ambas cuencas se reorganicen y con ello la circulación global. En el caso concreto del Atlántico, la intensificación del giro subtropical del norte y la definición de un gradiente *termohalino* consecuente con el incremento de la evaporación en latitudes bajas de las masas de agua superficiales y la llegada a las altas latitudes de masas de agua densas que se enfrían drásticamente, genera un sector al que no acceden de forma regular las masas de agua cálidas lo que produce un enfriamiento intenso al norte. Se produce una compartimentación térmica que da lugar a una masa de agua profunda que se hunde rápida y eficazmente, recorriendo lentamente los fondos oceánicos hasta la misma Antártida, cuya corriente circundante ejerce de distribuidora.

De esta manera, en torno al 75 % de las masas de agua de todo el planeta se producen por este mecanismo y ocupan con ligeras variaciones en su temperatura y salinidad prácticamente todo el océano. Solo en el entorno antártico se generará una masa más densa, más fría.

A partir de este momento el océano adquiere su fisonomía actual. En el océano

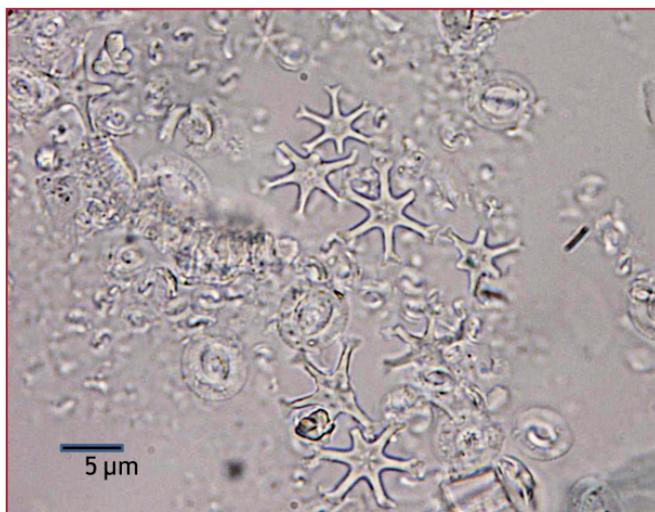
queda definido el que en los 70 Wallace Smith «Woody» Broecker denominara *Great Ocean Conveyor Belt*, un bucle que conecta superficial y en profundidad el océano, tratando de equilibrar un sistema, afortunadamente, imposible de equilibrar.



| Figura 9. Cinta transportadora oceánica.
Circulación termohalina presente.
El *Great Ocean Conveyor Belt* |

En este momento es cuando el océano alcanza las temperaturas medias más bajas y la atmósfera registra valores mínimos de concentración de CO_2 . Con anterioridad, como

he mencionado, se produjeron episodios fríos críticos, pero siempre en un contexto de temperaturas medias altas y de larguísima duración. Este descenso es progresivo en los últimos 3 Ma. En esta franja temporal la situación orbital no es idéntica a la actual y diferentes reajustes dan lugar a acontecimientos que interfieren en esa tendencia. Esa escala está gobernada por la variabilidad de parámetros relacionados con la órbita terrestre. Milutin Milankovitch escribe en 1941, *Kanon der Erd- bestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitpro- blem*, donde mostraría que la excentricidad, oblicuidad y precesión varían en el tiempo y su relación y geometría determinan la llegada diferencial de energía, explicando, en términos generales, la dinámica glacial-interglacial. John Imbrie y colaboradores en los 80 demostrarían su presencia en el registro de secuencias sedimentarias en el océano, fijando un nuevo paradigma geológico. El clima tiene una impronta orbital, definida por aquella modificación en la inclinación del eje terrestre y en la excentricidad de la órbita terrestre tras el impacto de Tea, además de otros factores ligados a la actividad solar y a la propia dinámica del océano.



| Figura 9. Asociación nanoplanctónica del Plioceno del Atlántico meridional (margen Ibérico). Site 1586, IODP 397. Microfotografía de microscopio petrográfico (*nícoles paralelos*) |

En el último medio millón de años el planeta ha manifestado un proceso periódico, alternante de enfriamiento y calentamiento, lo que se ha dado en llamar las *glaciaciones*. Episodios en los que la cubierta de hielo continental en el hemisferio norte alcanza espesores de más de 2 km. Los episodios glaciales se alternan con otros en los que ese hielo se concentra en los polos, como el que nos encontramos en la actualidad, desde hace 10.000 años, el Holoceno, un interglacial.

Con variaciones térmicas sutiles, el Holoceno es una época relativamente estable. Diferencias en la emisión solar, procesos de ajuste en el transporte energético oceánico o episodios volcánicos efímeros, dan lugar a algunas fluctuaciones. Si bien existen algunas ligerísimas diferencias en los valores absolutos (en torno a ± 1 °C), el estudio mediante diferentes técnicas indican que, en el hemisferio norte los años más cálidos se registraron entre 889 y 1113 y los más fríos, inmersos en la denominada Pequeña edad del hielo entre 1576 y 1701 (Ljungqvist. 2010). La colonización de Groenlandia y asentamientos en Norte América de la saga vikinga de Eric Thorvaldsson «el Rojo», en contraposición con episodios en los que los ríos europeos permanecían helados largos periodos y el frío invernal inusual, con descenso en la producción agrícola a finales del siglo XVI y episodios de malestar y revuelta sociales generalizados. El párroco de Stendal, un pueblo a orillas del Elba, deja escrito en 1595 una carta apocalíptica, convencido de la cercanía del fin del mundo:

«La luz del Sol no es constante, ni el invierno ni el verano son estables. Los frutos de la tierra no maduran

como antaño. La fertilidad del mundo disminuye; los campos están agotados; los precios de los alimentos suben y se extiende el hambre».

La Pequeña edad del hielo se relaciona con un periodo de baja actividad solar, el denominado *mínimo* de Maunder. No obstante, no puede descartarse que esta situación fuese a su vez agudizada por procesos volcánicos.

La importancia del volcanismo a gran escala, relacionada con acontecimientos tectónicos relevantes, se ha expuesto anteriormente. Al nivel de escala humana al que hemos llegado, parece oportuno citar algunos acontecimientos que explican variaciones importantes, si bien fugaces.

El 19 de febrero de 1600 el Huaynaputina, en Perú, un volcán andino con un cono discreto, expulsó cerca de 19,2 km³ de material piroclástico velando la luz solar durante semanas. Cronistas de la época refieren que, en ese tiempo, en el hemisferio norte,

«los objetos no llegaban a formar sombra»

Este acontecimiento coincide con el inicio de la Gran hambruna rusa (1601-1603). Una

drástica reducción de las cosechas dio lugar a que fallecieron más de 2 millones de personas.

Un par de siglos después, al inicio del siglo XIX en varios meses las temperaturas descienden 3-4 °C por debajo de las medias, afectando cultivos y el consiguiente acceso a alimentos de un amplio sector de la población europea y norteamericana, sufriendo una de las hambrunas más notables de las que se tiene constancia. Ello coincide con la erupción en 1815 en Indonesia del Tambora que oscureció una vez más el cielo. Su cúspide se vio reducida en 1300 m. Aún hoy está activo.

Mary Shelley escribe, presentándoselo previamente a George Byron y a John Polidori, románticos *malditos*, con seguridad afectada por esa situación anormal, desoladora, Frankenstein o el moderno Prometeo (1816). ¿Clima y literatura? ¿Volcanes espeluznantes y seres imaginarios aviesos? William Ospina en su obra *El año del verano que nunca llegó* explica la situación generada en Europa un año en el que el norte no conoció verano. Bram Stoker y Drácula, mitificada por el cine y obras menores actuales, mantendrán hasta nuestros días la impronta gótica, nacida del Tambora.

Otros acontecimientos históricos se han explicado por acción directa o indirecta del clima más allá de la actividad volcánica, al menos como detonante. Con las hambrunas o falta de agua vendría la revuelta, y con la revuelta el cambio de régimen: algo recurrente. La caída del Imperio egipcio (2200 a.C.), con sequías repetidas que afectaron a las Fuentes del Nilo (¿alteración del sistema monzonal africano?) o el colapso Maya (siglos VIII y IX), con un excepcional y continuado episodio de El Niño.

No cabe duda de que la progresiva ocupación de las sociedades introduce un nuevo componente que otros organismos no han desarrollado. Esa influencia es creciente.

Desde su aparición en África hace 200.000 años, con una eficaz colonización de la totalidad de los continentes habitables hasta prácticamente comienzos del Holoceno, en la Tierra hemos vivido en torno a 110.000 millones de personas. A fecha de hoy, según la ONU somos 8.118 millones.

OTRO PERSONAJE al que me habría gustado invitar, aunque podría complicar el discurso, es Alexander von Humboldt, por su trascendencia, y en cierta medida reivindicando la ciencia de nuestro país, ya que las expediciones que organizó tuvieron el apoyo, mejor, contaron con los permisos de la Corona española (sic). Inefables Carlos IV y Manuel Godoy.

«Voy a recoger plantas y fósiles, y realizar observaciones astronómicas con el mejor de los instrumentos. Sin embargo, este no es el propósito principal de mi viaje. Trataré de averiguar cómo las fuerzas de la naturaleza actúan unas sobre otras, y de qué manera el entorno geográfico ejerce su influencia sobre los animales y las plantas. En resumen, debo aprender acerca de la armonía en la naturaleza»¹⁹.

En aquel tiempo, aún con nacionalidad española, aunque implicado en el imparable proceso de independencia de Nueva Granada

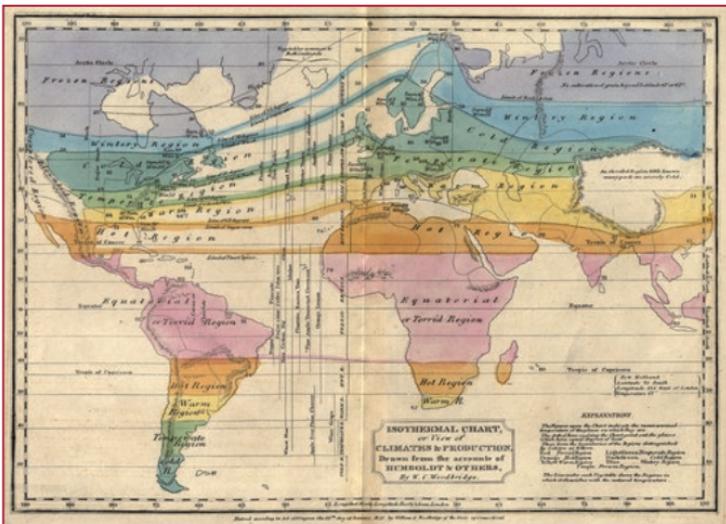
¹⁸ Aquí finaliza, llegando al presente, el símil bachiano. Se inicia el despegue de la norma.

¹⁹ Carta a Karl Freiesleben (Junio de 1799) Helmut de Terra, Humboldt: The Life and Times of Alexander von Humboldt 1769-1859 (1955).

Francisco José de Caldas, naturalista destacado, fue acompañante de Humboldt. Se le atribuyen trabajos relevantes que han sido *ninguneados*, cuando no olvidados. Acusado de traición solicitó clemencia al entonces todopoderoso Pablo Murillo, quien al despachar la sentencia de muerte cuentan que añadió:

«España no necesita de sabios»

¡Otra personalidad con obra a rescatar!



| Figura 10. Mapa oceánico en el que se marcan las isotermas y su correlación con zonas climáticas continentales. Humboldt (1823) |

La Ciencia en su más amplio sentido, incorporando todas sus ramas y encrucijadas, persigue el *conocimiento*, razón suficiente para justificarla. Y esta ciencia a la que me estoy refiriendo, constituida por un sinnúmero de disciplinas que convergen y se mezclan, es el claro ejemplo de resultados que enriquecen nuestro patrimonio intelectual, arañando resquicios de una historia que enrevesadamente se desentraña.

Pero seamos cautos, siempre van a escucharse voces cercanas que, más o menos airadamente, cuestionen el ¿para qué? ¿Dónde entrever esa capacidad predictiva a que se refieren las definiciones al uso?

Lejos de ser el objetivo, la cuestión se revuelve y pese a que el silencio al respecto habría sido suficiente, en el caso de la Paleooceanografía su propio discurso la hace proclive al enunciado de un nuevo principio de la Geología, o más bien la extensión del que propusieran Hutton y Palyfair en su momento.

En el pasado está, o puede estar, la clave del futuro.

Por coherencia, el término que intuitivamente se propondría este nuevo principio sería «Futurismo», lamentablemente ya acuñado.

El 20 de febrero de 1909 Filippo Marinetti, un extravagante y provocador escritor, publicaba el *Manifeste du Futurisme*, obra y doctrina seguidas por un no despreciable número de artistas e intelectuales europeos y americanos hasta bien entrado el siglo XX, en donde, y vean aquí las contradicciones (¿o coincidencias?) que nos puede deparar la historia, se hacía un claro alegato, yo diría que culto, a la máquina y sus productos, al triunfo de la tecnología sobre la naturaleza. Una vez se lee el *Manifeste*, si Marinetti y su grupo de amigos viviese, como incuestionables provocadores y detractores del sistema establecido, no me extrañaría que los documentos que escribiesen expresasen justamente ideas contrarias, y sus pinturas reprodujesen —como su habilidad artística diera a entender— la grandiosidad del cada día más escaso bosque, en lugar de motocicletas y chimeneas humeantes. El fondo sonoro sería los compases de sinfonías que interpretase la naturaleza o del ya imposible silencio, en vez del traqueteo de una locomotora, como en el movimiento sinfónico Pacific 231 (1923) de Arthur Honegger. Simplemente por ir contra el sistema y las evidencias.



| Figura 11. Mario Guido Dal Moro. Motociclista (1927) |

Adelantando acontecimientos, en un contexto en el que parámetros físico-químicos, entorno biológico, fisiográfico y paisajístico están observando notables y rápidos cambios, la disponibilidad de referentes que permitan realizar una comparación directa, o bien alimentar modelos, es perentoria. El conocimiento de los procesos y su evolución, integrando la variabilidad y su explicación, es decisivo para la predicción.

Los *hipertémicos* del Eoceno (ca. 56 Ma), el *óptimo climático* del Plioceno (ca. 3 Ma), el *último* interglacial (ca. 125 ka), o la evolución del Holoceno y las condiciones de los últimos siglos son casos para comparar o evaluar en detalle.

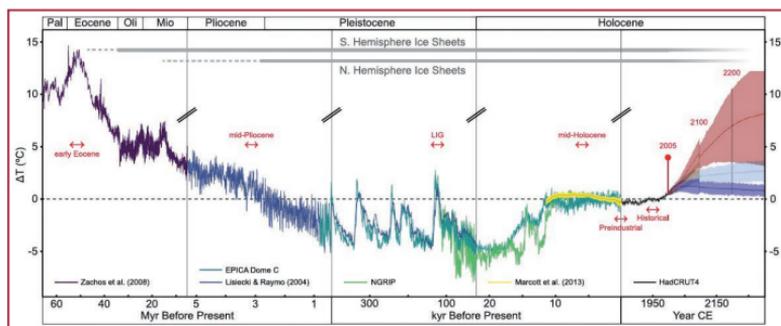
Escenarios en regímenes de emisión de carbono antrópico similares a los del presente (e.g. *Representative Concentration Pathway* 8.5, RCP8.5, IPCC²⁰), se acercarían a un clima similar a los del Plioceno medio a partir del 2030. A comienzos del siglo XXII, el escenario sería similar al del Eoceno, equivalente a revertir millones de años de enfriamiento progresivo en unas pocas generaciones humanas:

«Tanto la aparición de climas geológicamente nuevos como la rápida reversión a climas similares al Eoceno pueden estar fuera del rango de la capacidad de adaptación evolutiva»

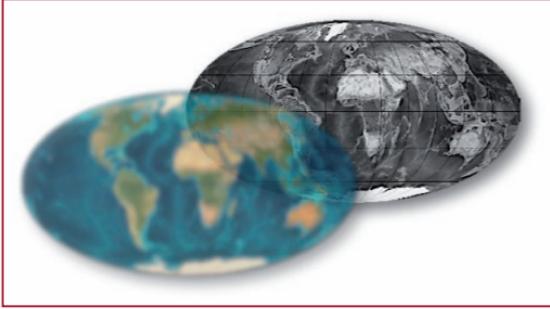
(Burke et al 2018).

²⁰ Intergovernmental Panel on Climate Change.

Este es un punto crucial que únicamente quienes conocen las peculiaridades y ritmos de la evolución, paleontólogos y paleoclimatólogos, son capaces de comprender, y consecuentemente, de explicar racional y rigurosamente.



| Figura 12. Variabilidad de la temperatura en los últimos 60 Ma y su proyección con diferentes escenarios propuestos por el IPCC. Burke et al. (2018) |



Antropoceno.

Ayer reciente, hoy y mañana mismo

DON CARLOS no acertó con sus ideas acerca del origen de los humanos. ¡Demasiada presión mediática y académica! No hablaremos de otros apremios devotos. Agustín de Hipona ni se lo planteó.

Hoy en día disponemos de nueva información. Excavaciones en África y áreas lindantes hacen pensar que, pese a que los 200.000 años de nuestro origen son considerablemente precisos, no se descarta un nuevo descubrimiento,

un nuevo yacimiento, un nuevo resto que lo desplace. Esta es la eterna carrera del paleontólogo de humanos. Y en esa carrera en la que lo humano ha tomado protagonismo, entra en discusión la relevancia de lo humano como determinante: sesudos defensores de la Geología deshumanizada (entiéndase, que se desentienden de la señal antrópica), los menos, frente a colegas que consideran el organismo *persona* determinante, mayoría.

La *obviedad* no merece muchos comentarios: el planeta sometido por las sociedades ha sufrido y sufre de manera progresiva al propio incremento de la población una sustancial modificación y el océano se encuentra inmerso en ella.

La visión *antropocéntrica* dominante llevó en el siglo XVIII a que Georges Louis Leclerc, marqués de Buffon, considerara en su obra *Les époques de la Nature* que la séptima etapa de la Historia de la Tierra la caracterizaba el desarrollo de los humanos. George Perkins Marsh, cuyo libro *Man and Nature* de 1864, revisado y publicado en 1874 con el título *The Earth as Modified by Human Action*, contaba una historia sobre la relación de nuestra especie con

el mundo natural, insinuando una influencia determinante de la civilización. Otros insignes geólogos de mediados del siglo XIX como Thomas Jenkyn, Antonio Stoppani o Samuel Haughton, al tiempo que se establecían alguno de los principios de su ciencia, mencionaban un ‘Antropozoico’ como lapso en el que la humanidad se imbricaba en los procesos geológicos e incluso los podía condicionar.

En el siglo XX, surgirían términos como Antroceno, Homogenoceno o Myxoceno, que finalmente no gozarían de la consideración de la comunidad científica. Ganó la partida Antropoceno, término propuesto por Paul J. Crutzen y Eugene F. Stoermer: pura selección natural.

Noam Chomsky declaraba en algún momento:

«Si alguna especie extraterrestre estuviera elaborando una historia del Homo sapiens, bien podría dividir el calendario en dos eras: AAN (antes de las armas nucleares) y EAN (la era de las armas nucleares). Esta última era, por supuesto, se abrió el 6 de agosto de 1945, el primer día de la cuenta atrás de lo que puede ser el ignominioso final de esta especie extraña, que logró la inteligencia para descubrir los medios eficaces con que destrizarse a sí misma».

El concepto y entidad de destrucción, el ritmo, forma parte del juego evolutivo y a menudo es empleado como argumento para explicar el cambio.

«Así, la cosa más elevada que somos capaces de concebir, o sea la producción de los animales superiores, resulta directamente de la guerra de la naturaleza, del hambre y de la muerte».

Decía Drawin en las conclusiones de El origen de las especies.

La historia del planeta es la de la de eventos catastróficos que se suceden en esa dimensión inconmensurable que es el tiempo; se recupera y se transforma.

En el presente, asumido el efecto social, quizás lo único que cabría discutir, salvo obcecación sobre argumentos recurrentes y tergiversados, es si el planeta ha definido una geosfera menor, una «subgeosfera» que ya algunos se han adelantado a definir como Antroposfera o Tecnosfera.

Evidentemente su entidad no es comparable con las primordiales, litosfera, hidrosfera, atmósfera y biosfera, pero sin duda sí lo es su transcendencia a nivel humano.

En cualquier caso, conviene matizar que el término Antropoceno es una unidad cronoestratigráfica, aunque la adjetivación del término es de uso común (inadecuado e impreciso), y en ese sentido, dota a la Geología y a la comunidad de científicos de la tierra de un protagonismo inusual. Se trata de un «piso» que ocupa la parte terminal del Holoceno, sobre el hoy formalizado como Megalayense.

Su límite está en debate. La *Subcommission on Quaternary Stratigraphy* a través del *Working Group on Anthropocene* (AWG), liderados por Will Steffen y Jan Zalasiewicz defienden la base de esa unidad a mediados de los años 50, en concreto el 16 de julio de 1945, día en el que tuvo lugar el ensayo nuclear de Alamogordo, en Nuevo México, cuya huella química puede ser detectada con los dispositivos apropiados en distintas secuencias y archivos sedimentarios (Steffen et al., 2015).

Otro grupo propone emplazar la base en el apogeo de la Segunda revolución industrial, a finales del siglo XIX o incluso antes, coincidiendo con el inicio de actividades humanas como la agricultura o las cacerías masivas. Y hay quienes se oponen a la definición de una nueva

unidad «contemporánea», sin más argumentos que restar importancia en la historia geológica a los humanos (Ruddiman et al., 2018).

Como paleontólogo, a la vista de la historia de los organismos, soy consciente de que la importancia cualitativa de nuestra especie es limitadísima, pero al tiempo hemos ocupado la práctica totalidad del planeta y lo modelamos para ajustarlo a nuestras necesidades y caprichos. Del proceso se derivan una serie de situaciones que dan lugar a la modificación del sistema. Asumida la necesidad de la correcta gestión de recursos que asegure la sostenibilidad, es incuestionable la transformación. Conceptos como perdurabilidad de la señal que defina un lapso, propios de la Geología, son en este momento discutibles, pero no lo es el hecho de la interferencia. Finalmente, se trata de una cuestión de adecuación de las escalas y de la resolución potencial de análisis de las series temporales.

Un ejemplo palmario es el Megalayense, el hasta ahora techo del Holoceno cuyo límite inferior está definido en 4200 BP. Entre 4071 y 3888 años BP la información geoquímica y palinológica indica una reducción de las lluvias

en el continente de entre el 20 y el 30 %, consecuente con una alteración en la dinámica monzonal del Indopacífico que afectó a todo el hemisferio norte, dando lugar a migraciones masivas y modificación sustancial de algunas culturas.

El Antropoceno opera de forma inversa: la marca humana modifica el entorno. Esta es la idea que la comunidad científica debe asumir, incluyendo la aceptación del *Principio del Actualismo* ampliado en los términos que hemos comentado.

La información del último medio millón de años, con los sistemas estabilizados, con un Holoceno con variaciones «relativamente» leves (aunque tras los ejemplos enunciados esto puede parecer algo ambiguo), ha permitido conocer los procesos que determinan los cambios y los cambios en sí, obviamente pendiente de mejorar esa información conforme se cuente con nuevos datos y nuevas técnicas.

Para el océano disponemos de un archivo en el que es fácil seguir las tendencias de la temperatura, la salinidad, la productividad de las aguas superficiales, la oxigenación de las profundas, en diferentes latitudes y cuencas. A ello hay que sumar la posibilidad de obtener

información de otras fuentes en entornos continentales como los espeleotemas (estalagmitas), anillos de árboles, sedimentos lacustres y, de forma destacada, los testigos de hielo de Groenlandia y la Antártida. Todas estas técnicas hacen posible entrar en la «alta resolución». Y es justamente ese conocimiento el que, combinando registro geológico e histórico con el instrumental desplegado y los análisis de diferente naturaleza, en particular, en las últimas décadas, el que ha mostrado la interferencia antrópica en las diferentes geosferas.

Los últimos 50 años han presenciado sin lugar a duda la transformación más veloz de la relación humana con el mundo natural en la historia de la humanidad... La magnitud, la escala espacial y el ritmo del cambio inducido por el ser humano no tienen precedentes en la historia de la humanidad y tal vez tampoco en la historia de la Tierra; el sistema Tierra está operando ahora en un «estado no análogo»

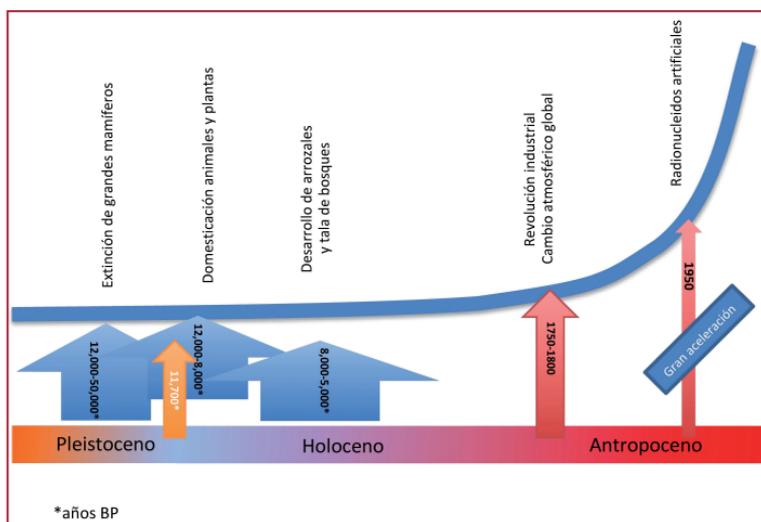
IGBP (International
Geosphere-Biosphere Programme)

Procesos que se han observado en el pasado y que han sido respuesta de otros de diferente naturaleza, materializando el cambio en lapsos

largos, se ven hoy replicados con otro origen, rompiendo ritmos y generando una situación compleja que afecta directamente a la sociedad y a su *status quo*.

Decía Masaoka Shiki:

*Noche infinita.
¡Pienso en cómo será en 10.000 años!*



| Figura 13. Cronología de eventos en los que el humano moderno está implicado. Flores (2023) |

Pero estábamos hablando del océano.

Sentada la línea de base de parámetros físico-químicos, caracterizadas provincias y asociaciones en las costas, en el plancton y en el bentos, así como sabiendo las características atmosféricas del último siglo y medio, remontémonos a la Segunda revolución industrial para no alargar el debate, a lo que se está dando a conocer como periodo *preindustrial*.

Los trabajos desarrollados por especialistas de muy diversos campos permiten definir tendencias de los factores que la Paleoceanografía ha conseguido desentrañar. La dinámica orbital y de emisión solar es predecible, y consecuentemente su implicación climática. Menos lo es la interacción del sistema océano-atmósfera y entre las geosferas, si bien día a día se dispone de mayor información. Por ello ha sido posible definir la proyección teórica, incluso los valores de ciertos parámetros oceánicos y atmosféricos.

La sorpresa surge cuando el registro instrumental combinado con otros históricos se aparta ostensiblemente de lo modelado, de lo *esperable*.

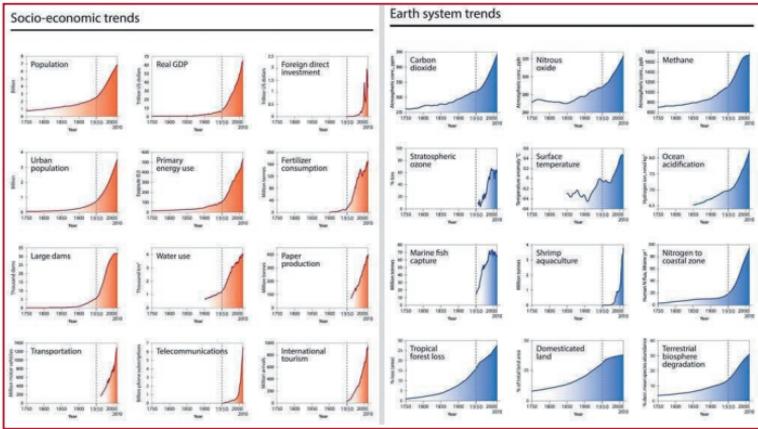
Desde la época preindustrial, con inusitada celeridad a partir de la mitad del siglo XX, el océano ha registrado una serie de cambios desajustados con el sistema, con respuestas más rápidas de lo que los modelos geológicos marcan.

En términos generales:

- La temperatura media de la superficie de los océanos está, en valores medios anuales, del orden de 1 °C por encima de lo esperado.
- El nivel medio del mar está sufriendo elevaciones del orden de una decena de cm en las últimas décadas.
- La masa de hielo continental de las regiones Ártica y Antártica se ha reducido exponencialmente.
- El pH medio ha caído en torno a 0,2 puntos. Especies con esqueleto o elementos calcáreos están modificando su estructura, desplazándose o limitando considerablemente su área de colonización: peces, moluscos, equinodermos.

- La extensión de los arrecifes coralinos se ha reducido del orden del 60 %, con amplias áreas «blanqueadas», en las que los pólipos han abandonado su esqueleto calcáreo.
- El color del océano ha cambiado *reverdeciéndose* como consecuencia de una modificación de los ecosistemas planctónicos.
- La estacionalidad del mar helado del Ártico se ha intensificado dando lugar a episodios de extremo deshielo durante los veranos septentrionales.
- Se observa una inestabilidad progresiva en los márgenes continentales subpolares ricos en hidratos de gas.

Estas son algunas de las señales inequívocas de interferencia sobre el sistema.



| Figura 14. Tendencias socioeconómicas vs. tendencias del sistema terrestre en los dos últimos siglos. Steffen, et al, 2015 |

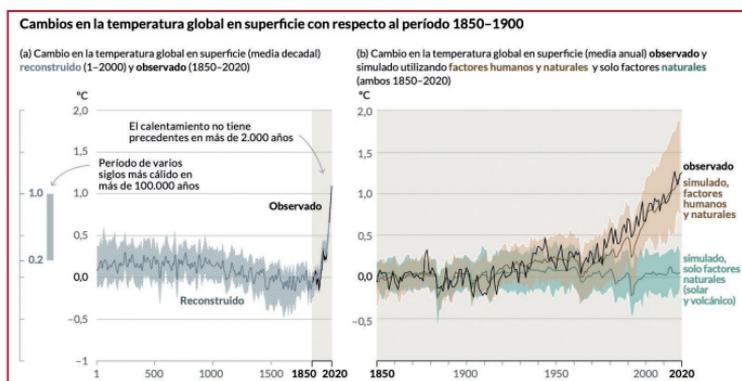
La dinámica observada sigue una trayectoria idéntica a los indicadores de actividad humana que merecieron que a partir de los años 50 definiesen la «Gran aceleración»²¹, algo igualmente indiscutible.

Uno de los elementos determinantes en esta evolución del sistema es la concentración de compuestos de carbono en la atmósfera y el océano.

²¹ Por analogía con la obra titulada *La gran transformación*, de Karl Polanyi, en 2005 se acuñó la expresión «la gran aceleración».

Svante August Arrhenius, reputado químico que en 1903 recibiera el premio Nobel de Química por sus investigaciones sobre las propiedades conductoras de las disoluciones electrolíticas, discutidas y vilipendiadas por insig-nes «sabios» de la época, fue el primero que defendió la relación entre la concentración de CO_2 atmosférico y la temperatura, llegando a determinar que la temperatura media superficial de la tierra es de $15\text{ }^\circ\text{C}$ debido a la capacidad de absorción de la radiación infrarroja del CO_2 y del vapor de agua. Arrhenius junto con Thomas Chamberlin defendieron que las actividades humanas podrían provocar el aumento de la temperatura mediante la adición de CO_2 a la atmósfera. No obstante, esta idea no se recuperó hasta los años 50, una vez se fueron conociendo las propiedades de la molécula y la relación que existía entre atmósfera y océano, en particular su capacidad de absorción. En los 80, apoyándose en datos paleoclimáticos y en registros instrumentales, se observó la relación existente entre temperatura y concentración de CO_2 y otros gases de efecto invernadero (metano, óxido nítrico...), todos ellos directamente relacionados con actividades antrópicas.

La tecnología, alimentada con datos instrumentales e históricos, hace posible generar modelos que nos acercan a las situaciones de escenarios climáticos globales y/o regionales, en función de las situaciones de emisión, proyectando un *futuro*. Es obvio que las situaciones paleogeográfica, orogénica y orbital no son las mismas, pero ofrecen una visión que no debería de apartarse del modelo.



| Figura 15. Escenarios reconstruidos sobre datos paleoclimáticos comparado con el instrumental (IPCC, 2022) |

Nuestros registros hablan de concentraciones de CO₂ preindustriales de 285 ppm, similar a las de los últimos óptimos interglaciales,

mientras que la concentración de referencia de Mauna Loa, centro de referencia para las medidas de estos compuestos, a fecha de julio de 2023 nos habla de 422,14 ppm. El caso del metano es similar, 730 ppb por las 1922 ppb que se observan hoy en día.

Hemos visto que para encontrar situaciones históricas con esos valores hay que retrotraerse al Plioceno, hace 3 Ma, en los que la temperatura media fue superior entre 2 y 3 °C y el nivel medio del mar 25 m por encima (Robinson et al., 2008; Dwyer et al., 2009).

La sociedad está inmersa en un proceso de Cambio global que afecta a distintas instancias y que, incluso, ha llegado a afectar la composición y la dinámica de las geosferas, lo que ha determinado un cambio climático.

Las evidencias lo hacen incuestionable. Es imposible rebatir la definición de un Antropoceno, el tiempo en el que los humanos hemos llegado a producir esa modificación.

Bien es cierto que a escala planetaria, a escala geológica, los humanos quizás seamos un *accidente*, pero su impronta va a tener manifestación en el registro sedimentario sin lugar a

duda, y lo que es más trascendental para los que nos desarrollamos entre sus geosferas, se va a modificar sustancialmente el ambiente y las condiciones en que vivimos.

Lecturas algo inocentes como la Máquina del Tiempo de H.G. Wells, con el añadido «*an invention*», nos hablan de nuevas especies humanas en el año 802.701: los simples y pequeños Eloi frente a perversos y horribles Morloks, nuevas especies descendientes de nuestra saga. La versión cinematográfica de 1960 de George Pal se estrenó en nuestro país como *El tiempo en sus manos*, que en cierta medida resume lo que he defendido.

Pero no parece oportuno hablar de selección natural ahora, querido don Carlos, quizás sí de apremio, respetado Agustín, en un momento en que algunos de los procesos que sabemos la han gobernado, están también interferidos por nuestra especie, ya que la evolución nos está negada.



| Figura 16. Cartel de la adaptación cinematográfica de la novela de H.G. Wells de La máquina del tiempo, dirigida por George Pal (1960) |

Como paleontólogo estoy en condiciones de decir que con seguridad desapareceremos de la faz del planeta antes o después, tal como lo han venido haciendo las especies que lo han habitado. Somos *planeta*, lo ocupamos y lo cambiamos por lo que acaso sea el momento de abordar el problema *metafísico* con cierta humildad. No pretendo dar soluciones, sino, como científico, mostrar datos, interpretarlos y proponer un modelo. Generar conocimiento que permita acercar causas y efectos.

Convendría dejar entre renglones la soberbia, la arrogancia de nuestra especie.

Esa pequeñez que constituimos en la historia larga de un planeta viejo requiere un gesto de humildad. Giuseppe de Lampedusa en su perspicaz y genial *El Gatopardo* nos habla a su manera de ello; o así lo quiero entender yo.

Todo esto no tendría que durar, pero durará siempre. El siempre de los hombres, naturalmente, un siglo, dos siglos... Y luego será distinto (...)

Nosotros fuimos los gatopardos, los leones.

Quienes nos sustituyan serán chacalitos y hienas, y todos, gatopardos, chacales y ovejas, continuaremos creyéndonos la sal de la tierra.

| REFERENCIAS |

- Agustín de Hipona. San Agustín. Las confesiones AKAL, 352 pp.
- Allègre, C.L. et al 1995. The age of the Earth *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Volume 59, Issue 8, p. 1445-1456.
- Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F. & Michel, H. V. (1980). Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science* 208, 1095-1108.
- Archibald, J. D. y Fastovsky, D. E. (2004). Dinosaur extinction. In *The Dinosauria*. Second Edition (eds D. B. Weishampel, P. Dodson and H. Osmólska), pp. 672-684. University of California Press, Berkeley.
- Arrhenius, S., 1896. On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground, *Philosophical Magazine*, 41, 237-276.
- Burchfield, Joe D., 1998. *The Age of the Earth and the Invention of Geological Time*» Geological Society, London, Special Publications, 143/1, 137-143.
- Buffon, G.L. 1778. *Les époques de la nature 1778* (Classiques de l'histoire des sciences). Editions Paléo (2000). <https://wellcomecollection.org/works/nshxdt8e>
- Burke, K.D., Williamsb, I.W., Chandler, M.A., Haywood A.M., Lunt, D.J., and Otto-Bliesner, B.L. 2018. Pliocene and Eocene provide best analogs for near-future climates. *PNAS* | December 26, 2018 | vol. 115 | no. 52 www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1809600115

- Canup, R. M. y Asphaug, E. 2001. Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation. *Nature* 412 412. p. 708-712.
- Conway Morris, S. 1993. Ediacaran-like fossils in Cambrian Burgess Shale-type faunas of North America. *Palaeontology* 36 (0031-0239): 593-635.
- Cairns-Smith, A.G. 1985. *Seven Clues To The Origin of Life*. Cambridge University Press. http://creationwiki.org/Clay_theory
- Crutzen P. y Stoermer E. 2000. The Anthropocene. *Global Change Newsletter* 41: 17. Edgeworth et al. (2015).
- Darwin, C. 1859. *On the Origin of Species: By Means of Natural Selection or The Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. Penguin Classics. 576 pp.
- Dodd, Matthew S.; Papineau, Dominic; Grenne, Tor; Slack, John F.; Rittner, Martin; Pirajno, Franco; O'Neil, Jonathan; Little, Crispin T. S. 2017. Evidence for early life in Earth's oldest hydrothermal vent precipitates. *Nature* 543 (7643): 60-64. ISSN 0028-0836. doi:10.1038/nature21377
- Dwyer, G. S.; Chandler, M. A. 2009. «Mid-Pliocene sea level and continental ice volume based on coupled benthic Mg/Ca palaeotemperatures and oxygen isotopes. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 367:157-168.
- Ehrenberg, C.G., 1854. *Mikrogeologie*. <https://www.biodiversitylibrary.org/item/207209#page/5/mode/1up>

- Filippelli, G.M. 2022. *Climate Change and Life The Complex Co-evolution of Climate and Life on Earth, and Beyond*. Elsevier, 275 pp.
- Flores, J.A. 2023. *Antes, todavía y mañana. Conven-gamos: ¿Antropoceno? Ensamblajes. Paisaje contemporáneo y práctica patrimonial*. de la o Cabrera y Arqués Soler (Eds). 372-383.
- Haeckel, Ernst. *Kunstformen der Natur (Obras de arte de la Naturaleza, 1899-1904)*. <https://www.biodiversitylibrary.org/item/182319#page/7/mode/1up>
- Imbrie, J., Hays, J. D., Martinson, D. G., McIntyre, A., Mix, A. C., Morley, J.J., Shackleton, N.J., 1984. The orbital theory of Pleistocene climate: Support from a revised chronology of the marine delta 18 O record. In: *Milankovitch and climate: Understanding the response to astronomical forcing (Vol. 1, p. 269)*.
- IPCC (2021). *Resumen para responsables de políticas*. En: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leit-zell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu y B. Zhou (editores)]. Cambridge University Press.
- IPCC (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adap-tation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O.

- Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)). Cambridge University Press. Cambridge University Press.
- Jouzel, J. and Masson-Delmotte, V. 2010. Paleoclimates: what do we learn from deep ice cores? *Climate Change*. doi.org/10.1002/wcc.72
- Kolbert, E., 2011. Enter the Anthropocene Age of Man», *National Geographic*, 219/3, 60-85.
- Niklas, L., 1996. Introducción a la teoría de sistemas. *Anthropos*. p. 219. ISBN 8476584903. OCLC 36329206.
- Libby, E. y Ratcliff, W.C., 2014. Ratcheting the evolution of multicellularity. *Science*, 346, I6208, 426-427 DOI: 10.1126/science.1262053
- Ljungqvist, F.C 2010. A New Reconstruction of Temperature Variability in the Extra-Tropical Northern Hemisphere during the Last Two Millennia. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 92.3 (2010): 339-351.
- Lovelock, J. E., 1985. *Gaia, una nueva visión de la vida sobre la Tierra*. Ediciones Orbis.
- Lyell, C., 1830. *Principles of Geology*. Londres, John Murray.
- Mash, G.P. *Man and nature, physical geography as modified by human action*. New York, Charles Scribner. https://archive.org/details/bub_gb_4tKNdhQYyp-gC

- Ospina, W. 2015. El año del verano que nunca llegó. Random House, 305 pp.
- Piani, Laurette (2020). «Earth's water may have been inherited from material similar to enstatite chondrite meteorites». *Science* 369 (6507): 11101113.. doi:10.1126/science.aba1948.
- Polanyi, K., 1944. *The Great Transformation*. Beacon Press, Boston, Massachusetts, 315 p. http://inctpped.ie.ufrj.br/spiderweb/pdf_4/Great_Transformation.pdf
- Revkin, A. C., 1992. *Global Warming: Understanding the Forecast* (Nueva York: Abbeville Press, Incorporated), 180 pp.
- Robinson, M.; Dowsett, H. J.; Chandler, M. A. 2008. Pliocene role in assessing future climate impacts. *Eos*. 89 (49): 501-502.
- Ruddimann, W.F, 2018. Three flaws in defining a formal 'Anthropocene'. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. Volume: 42 (4): 451-461.
- Saramago, J. 2010. *Diarios de Lanzarote*. Alfaguara. 704 pp.
- Snider-Pellegrin, A. 1858. *La Création et ses mystères dévoilés* https://books.google.es/books?id=UZdKmF3iEdUC&pg=PA314-IA3&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Steffen, W. et al., 2004. *Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure* *Global Change: The IGBP Series*; Springer-Verlag.

- Steffen W, Broadgate W, Deutsch L, et al. (2015) The trajectory of the Anthropocene: The great acceleration. *The Anthropocene Review* 2: 81-98.
- Terra, H. de. 1955. *Humboldt: The Life and Times of Alexander von Humboldt 1769-1859*. Octagon Books, 1979 - 386 pp.
- Shevela, D., (2011). Adventures with cyanobacteria: a personal perspective. *Frontiers in Plant Science*. 2. 1-17. [10.3389/fpls.2011.00028](https://doi.org/10.3389/fpls.2011.00028).
- Tang, Q., Pang, K., Yuan, X. et al. 2020. A one-billion-year-old multicellular chlorophyte. *Nat Ecol Evol* 4, 543-549. doi.org/10.1038/s41559-020-1122-9
- Tudge, C. 2020. *La variedad de la vida*. Crítica 696 pp.
- Vernadski, V., 1997. *La biosfera*. Fundación Argentina-Visor.
- Wegener, A. 1929. Wegener, Alfred (1929). *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane* https://de.wikipedia.org/wiki/Die_Entstehung_der_Kontinente_und_Ozeane

| INTERNET |

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)

<https://www.ipcc.ch>

Plank Consortium. ESA's Planck Project Scientist

<https://sci.esa.int/web/planck/-/60499-from-an-almost-perfect-universe-to-the-best-of-both-worlds>

<http://pla.esac.esa.int/pla/#home>

International Ocean Discovery Program

<https://iodp.tamu.edu>

International Geosphere-Biosphere Programme

<https://iodp.tamu.edu>

<https://www.visualcapitalist.com/cp/road-map-of-the-world/>



Se acabó de imprimir esta Lección Inaugural,
con motivo de la inauguración del curso
2023-2024 en la ciudad de Salamanca,
el día 21 de septiembre de 2023,
festividad de San Mateo.





**Lección inaugural
del Curso Académico 2023-2024**

**SECRETARÍA GENERAL
2023**

VNiVERSIDAD D SALAMANCA