

Francisco Anguita

Biografía de la Tierra

Historia de un
planeta singular



Biografía de la Tierra

Historia de un
planeta singular

Francisco Anguita

Biografía

de la Tierra

Historia de un planeta singular

Francisco Anguila

Biografía de la Tierra

El montaje del autor

Cuando en el año 2001 la Editorial Aguilar me propuso escribir un libro sobre la historia de nuestro planeta, mi idea inicial fue hacer una versión actualizada y resumida de *Origen e historia de la Tierra*, que había escrito para Editorial Rueda en 1988. Sin embargo, el capítulo de prueba recibió un suspenso. Los editores no querían un manual universitario, sino –recuerdo muy bien sus palabras– un libro *que se pudiese leer en el metro*. Así que nada de recuadros aclaratorios, y muy pocas figuras.

Con la perspectiva de estos diez años, veo que los editores tenían mucha razón. La obligación de escribir un relato continuado dejó la historia a salvo de las roturas que suponen los *boxes*, y la escasez de figuras me obligó a ingeniar para transformar los datos (también los datos gráficos) en palabras. Con las dos cosas ganó mucho el libro, y sobre todo gané yo, porque tuve que reinventar mi forma de escribir, demasiado marcada por la costumbre de hacerlo para estudiantes universitarios. Empecé a redactar más suelto, y descubrí con alivio que escribir así era divertido.

La peripecia comercial de *Biografía de la Tierra* no fue muy airosa. El libro se vendió mucho menos de lo que la editorial había calculado, y al cabo de un tiempo Aguilar me contactó para ofrecirme los ejemplares sobrantes antes de destruirlos. Salvé los que pude, pero me quedó claro que la primera edición sería también la última. El libro se ha seguido difundiendo lentamente, y en estos momentos, cuando ya está definitivamente agotado, existe una cierta demanda. Así que, siguiendo la sugerencia de mi colega Gabriel Castilla, me he puesto a actualizarlo y corregir sus errores, mientras que Gabriel se ha encargado muy desinteresadamente de digitalizarlo.

Aprovecharé para, diez años después, llevar un poco la contraria a los editores de Aguilar, e ilustrar esta revisión con **figuras** adicionales. Añado también las **referencias**, muy abreviadas, de las fuentes de los nuevos datos; supongo que casi nadie las va a usar, pero tampoco estorban demasiado. Y he reservado el color **rojo** para los errores más garrafales.

Al acabar esta revisión, me queda un cierto pánico al ver la cantidad de cosas que ignoraba hace diez años, y la cantidad de ellas que sigo ignorando. Me consuelo

con lo que decía aquel tipo, sin duda inventado, que citaba Juan de Mairena (éste, inventado seguro): uno que no se iba a la cama contento si no había ignorado alguna cosa nueva a lo largo del día. Por otra parte, me he vuelto a maravillar del ingenio de los científicos que reconstruyen el pasado de este planeta, que igual encuentran las huellas de asteroides que cayeron al principio de su historia, que confirman una superglaciación o desentrañan la temperatura precisa de los dinosaurios gigantes.

Pero es de verdad triste que esta maravillosa época científica (algunos la han calificado de prolongación del Renacimiento) se produzca en un tiempo en el que las esperanzas de una sociedad viable se difuminan un poco más cada día.

Madrid, 1 de agosto de 2011

'Indice

Introducción: Un viaje en el tiempo 11

Capítulo I. En el principio... 13	Los cometas gigantes 13
En la pista 18	Nace un satélite 20
Los océanos de fuego..... 25	Años de miles de días..... 26
Arqueólogos de la atmósfera 29	Con termostato incorporado..... 35
Tiempos difíciles 38	La Tierra comienza a escribir su diario
de Vía'e..... 42	Un profeta rechazado 48
Y, sin embargo, se mueven 51	La nueva Tierra 54
Las pruebas a favor de la nueva Tierra..... 59	De vuelta al Arcaico..... 62
A pesar de todo, la vida asoma..... 68	¿En la playa, o en el fondo del mar? 74
Una simple hélice 79	Invasores del espacio 81
Alimentarse de luz 87	

7

El *volkswagm* de la biosfera , y otros modelos 90

Capítulo II. La edad adulta..... 95

La atmósfera petrificada 95

Estrategias para un planeta distinto 97

Un irresistible magnetismo 99

El oro que cayó del cielo 101

Mitología y geología: la extraña

conexión 105

Los muchos *pulsos de Jo Tierra* 111

Rodinia..... 117

El

Grao Frío 121 **Un poco de ciencia teórica 130**

Planetas como peonzas 133 La T ierra Blanca 135 El árbol, o más bien arbusto, de la vida 138 El registro de la vida proterozoica: de los

biomarcadores a las colinas de Ediacara 142 La biosfera en el *Proterowico* y la discutida marcha hacia el progreso.. 147 El fin de una larga eternidad 151

Capítulo III. La Tierra moderna 153 El *big bang* de la vida 153 El baile de los continentes 159 Las crisis de la vida 165 **La evolución se toma vacaciones 172 Muerte de un antiguo océano..... 175** La disputada herencia de Rodinia 178 En el Gran Pantano 182 **El continente de un detective aficionado 187**

8
Í:~;j)[C F

El tiempo de los desiertos..... 19 1 La esposa de Océanos y el Dr. Strangelove 193 La madre de todas las extinciones 196 Pangea no aguanta más 20 1

Capítulo IV. El pasado reciente 207 Paz en la tierra, guerra en el mar. 207 Fin de la tregua en Pangea 210 ¿Eran tan terribles los dinosaurios? 2 13 Los secretos de un éxito 2 17 La segunda conquista del aire 220 El árbol del pan en Groenlandia 226 Inundación 235 iCatástro fe' 238 Las huellas 24 1 Una de detectives 249 Después de la revolución 256 La venganza de los mamíferos 258 N acen las grandes montañas 260 La Tierra se congela 266 Niágara en el M edi terráneo 274 La conquista del Este 282 Humanos 287 Viajes 289 Los motores de la evolución homínido 295 Marte en el Oeste 297 El Dryas Reciente y la Pequeña Edad de I licio:

mensajes del pasado cercano 300

Capítulo V. Un presente global.. 307 A bordo de un
mundo inquieto 307 La huella del hombre 3 15 Los
límites de la Tierra 322

BIOGRAFÍA DE LA TIERRA

VI. El futuro	329
El enigma del clima	329
Quando los mundos chocan.....	334
Los extraños continentes.....	337
El futuro de la Tierra	339
<i>Biográficos de algunos de los investigadores</i>	
.....	343
<i>Biografía</i>	349

BIOGRAFÍA DE LA T
IUU

**Capítulo VI.
El futuro 329**

El enigma del
clima 329

Cuando los
mundos

chocan..... 334 **Los extraños continentes** 337 El fin
de la Tierra 339

Apuntes biográficos de algunos de los investigadores citados 343

Bibliografía 349 10

!";TRI DUCCIÓN

Un viaje en el tiempo

Vivimos sobre un viejo planeta, y ésta es su historia. No

es una historia hecha a la medida del hombre, un invitado de última hora que, incluso cuando rastrea sus propios orígenes, se limita a arañar la superficie del pasado. El planeta ha vivido largo tiempo - miles de millones de años- sin nosotros, y seguirá viviendo sin nosotros cuando el hombre ya no exista. Los científicos de la Tierra buscan pistas como detectives del pasado y diagnostican dolencias como médicos del futuro. Armados con herramientas de alta tecnología, pero sobre todo con la altísima tecnología de un cerebro super desarrollado por la evolución -El famoso sentido común- , han logrado increíbles reconstrucciones de hechos que literalmente se pierden en la noche de los tiempos -Cuando el Sol apenas alumbraba-; y se atreven, aun admitiendo sus limitaciones, a predecir el porvenir del planeta.

Este relato tiene por tanto la estructura de un viaje al pasado, con una tímida incursión final en el futuro. Pero este viaje no sería realista si no incluyese las peripecias de los historiadores. El libro será por ello un entretendido de las búsquedas, peleas, éxitos y fracasos de los científicos que investigan la Tierra junto con los

hechos, a veces prosaicos y maravillosos muchas otras, que han descubierto. En este viaje usaremos —con moderación: es una promesa— la vieja añagaza de tomar al lector por un viajero en el tiempo. El tiempo de la Tierra.

hechos, a veces prosaicos y maravillosos muchas otras, que han descubierto. En este viaje usaremos - con moderación: es una promesa- la vieja añagaza de tomar al lector por un viajero en el tiempo . El tiempo de la Tierra.

CAPÍTULO I

En el principio...

Cuanto 1

S GIGANTES

En el

Los COMETAS GIGANTES

«Quizá no es un disco protoplanetario, sino posplanetario», dice Alfred Vidal, del Instituto Astrofísico de París. «¿Qué significa esc?». «Que ya hay planetas formados alrededor de la estrella». Debemos viajar largo tiempo hacia el sur para ver esa estrella. Es una luz insignificante, vecina de la bellísima Canopus y también cercana a la Cruz del Sur. Un atlas astronómico nos dirá que la superficie de la estrella Beta de la constelación del Pintor goza de una cálida temperatura, 10.000 °C, y que la luz que surge de ella tarda 53 años en alcanzarnos. Pero ese pequeño punto luminoso es además el escenario de una historia fabulosa, que ha sido reconstruida por los astrónomos que se dedican a detectar planetas lejanos. Hace unos cien millones de años, la gravedad contrajo las moléculas de gas y las motas de hielo, roca y metal de una fría nube interestelar. Sus choques elevaron la temperatura hasta que la nube se volvió incandescente: un millón de años más tarde, su centro era un furioso torbellino de rayos ultravioleta y vientos estelares huracanados que fueron limpiando los residuos de la nube. No todos: algunas de las briznas de gas, roca y metal se habían

II

810GLU !A P E L A T ;U11A

fundido en cuerpos mayores, que el viento de la estrella **ya no podía arrastrar.**

Ahora, millones de años después, estos cuerpos se han convertido en planetas, que atraen a los cuerpos menores y los lanzan sobre los otros como un honda sus proyectiles. Beta Pictoris sigue viviendo tiempos revueltos: grandes masas de hielo y roca son proyectadas desde la periferia del sistema hacia su congestionado centro. Las colisiones generan nuevas nubes de residuos, que el viento de la estrella sigue barriendo...

«Vemos grandes masas de gas que caen por centes y a gran velocidad hacia la estrella. Esto no tiene lógica: el viento estelar debería impulsarlas hacia el exterior. Creemos que este gas proviene del núcleo de grandes cometas que están bombardeando el interior del sistema. Y sólo los planetas gigantes pueden atraer cometas a esta velocidad».

Buscamos las huellas de nuestro pasado en la luz que nos llega de un mundo lejano. No podemos hacerlo de **otra manera: nadie puede ser testigo de su propio nacimiento, pero esperamos aprender viendo otros partos planetarios. Beta Pictoris nos ha contado la historia que queríamos oír: una historia que, para la Tierra, empezó** hace algo más de 4.500 millones de años. En la Vía Láctea, nuestra galaxia, hay una población importante de estrellas de esta edad: un acontecimiento desconocido provocó en ese momento el nacimiento sincronizado de miríadas de estrellas. Nuestro Sol, hijo de este alumbra miento múltiple, fue sin embargo, en otro sentido, hijo único, cuando lo normal es que las estrellas pertenezcan a grupos dobles o triples. Esto depende de la velocidad de giro de la nube: igual que una batidora a toda velocidad tiende a salpicar salsa. una nube protoestelar que gire

rápidamente tiende a fragmentarse en varios centros de nucleación, cada uno de los cuales dará lugar a una estrella. El panorama de nuestros cielos, que podrían estar ocupados por varios soles (quizá impidiendo la noche) dependió, en último término, de una simple propiedad física de la nube primigenia.

Pero éste es sólo el marco general: en cuanto al Sol mismo, tenemos pruebas de que el nacimiento de nuestro mundo fue desencadenado por una defunción cercana. Una estrella anónima explotó en una bola de fuego colossal, y la onda expansiva de esta supernova viajó por el espacio, comprimiendo y contaminando las nebulosas cercanas. Hemos encontrado las cenizas de esta cortina de fuego escondidas en el interior de algunos meteoritos: las reconocemos porque sus especies químicas (isótopos) no se parecen al resto de los materiales del sistema.

Por ejemplo, casi la mitad del meteorito de Allende, caído en México en 1969, está formada por minerales hidratados y compuestos de carbono. Si el asteroide del que procede este meteorito hubiese sido calentado tras su formación (mediante choques, por ejemplo), no habría retenido agua: esto prueba su carácter primitivo. El meteorito contiene fragmentos en los que abundan los isótopos producidos en la explosión de supernovas.

Los científicos planetarios creen que los acontecimientos que se desencadenaron tras esta contracción forzosa se parecieron a los que adivinamos en Beta Pictoris: el centro de la nube, donde la densidad de partículas era máxima, se convirtió en la estrella que tantos pueblos antiguos divinizaron. En los espacios próximos, a altas temperaturas, sólo pudieron estabilizarse las rocas

BIOGRAFÍA DE LA TIERRA

Más lejos, los gases generaron planetas gigantes, los arrabales, los restos de la nube expulsados por el viento solar constituyeron un enorme cementerio de cientos de miles de millones de cometas. En la actualidad, tras 4.570 millones de años de evolución, parece tranquilo en esta parte del Cosmos; pero las lunas terrestres llevan consigo las cicatrices de los revueltos parecidos a los que se desarrollaron en el entorno a Beta Pictoris. Las manchas oscuras en la Luna son una muestra tan claramente en el plenilunio causadas por un bombardeo de asteroides y cometas, como las cicatrices impulsadas por Júpiter; Mercurio y Marte tienen similares heridas de guerra; por pura lógica debían haber sido el lugar donde esconderse—, los científicos piensan que en Marte y la Tierra las ostentaban también, pero su actividad interna ha cubierto estos cráteres

BIOGRAFÍA DE LA TIERRA

vecinos. Más lejos, los gases generaron planetas gigantes; y en los arrabales, los restos de la nube expulsados por el viento solar

En 1999, en la ciudad de Turín, un grupo de especialistas en impactos asteroidales creó una clasificación de los posibles peligros que podían llegar del cielo. Las consecuencias de un impacto de un asteroide de unos 100 metros de diámetro serían catastróficas para la zona afectada, pero no para el planeta entero. Un asteroide de unos 100 metros de diámetro podría destruir una ciudad o una zona agrícola, pero no el planeta entero. Un asteroide de unos 100 metros de diámetro podría destruir una ciudad o una zona agrícola, pero no el planeta entero.

constituyeron un enorme cementerio helado de cientos de miles de millones de cometas. En la actualidad, tras 4.570 millones de años de evolución, todo parece tranquilo en esta parte del Cosmos; pero los planetas terrestres llevan consigo las cicatrices de tiempos revueltos parecidos a los que se desarrollan ahora en torno a Beta Pictoris. Las manchas oscuras que la Luna muestra tan claramente en el plenilunio fueron causadas por un bombardeo de asteroides y cometas, quizá impulsados por Júpiter; Mercurio y Marte presentan similares heridas de guerra; por pura lógica - no había dónde esconderse -, los científicos piensan que Venus y la Tierra las ostentaban también, pero su continuada actividad interna ha cubierto estos cráteres gigantes.

En 1999, en la ciudad de Turín, un grupo de especialistas en impactos asteroidales creó una clasificación de los desastres que podían llegar del cielo. Las consecuencias iban desde el aniquilamiento de una ciudad a la desaparición de la biosfera. Las probabilidades de colisión, como era de esperar, decrecen con el tamaño del proyectil: podemos respirar tranquilos durante los próximos millones de años. Pero, analizado en perspectiva, lo que esto significa es que el proceso que comenzó con la explosión de aquella anónima supernova no ha concluido aún. **El** Sistema Solar sigue sin estar libre de intrusos, y algunos de ellos, inevitablemente, nos visitarán en el futuro.

Otras estrellas nos cuentan otras historias: por ejemplo, la número 55 de la constelación de Cáncer oscila como si un planeta casi tan masivo como Júpiter

girase en torno a ella. Pero lo hace a una distancia mucho menor que la que separa a Mercurio del Sol. ¿Por qué en este sistema los planetas gigantes no se formaron lejos de la estrella, como sucedió en el Sistema Solar? ¿O se formaron lejos y emigraron después hacia la estrella? ¿Por qué no lo han hecho Júpiter y sus compañeros? ¿Lo harán en el futuro? ¿Cuál sería entonces la suerte de la Tierra? No tenemos respuestas - Sí con jeturas - para ninguna de estas preguntas. A medida que hemos ido detectando sistemas planetarios, nuevas teorías han ido revelándose como toscas aproxi

maciones a la verdad: frente a algunas confirmaciones nos hemos llevado grandes sorpresas. Hasta ahora, la mayor de ellas ha sido encontrar planetas que no giran en torno a ninguna estrella.

¿Expulsados de sus órbitas, o solitarios desde su nacimiento? Nuestros más queridos esquemas se rompen: algunos llaman ciencia a estos sobresaltos, normales, por otra parte, para un conjunto de ideas que se habían propuesto a partir de los datos de un solo caso. ¿Qué enfermedad podría diagnosticarse a partir de los síntomas de un único paciente? El siglo XXI será testigo del nacimiento de teorías generales sobre la formación de planetas. Al lado de ellas, quizá nuestras ideas actuales parezcan a los científicos del futuro tan ingenuas como hoy nos parecen las de los naturalistas medievales sobre el magnetismo o los terremotos.

Pero de esta maraña de preguntas ha surgido imprevista una idea revolucionaria: al menos una de cada veinte estrellas tipo Sol tiene planetas en derredor. Después de siglos de especulaciones, *Humansapiens* ha encontrado otros posibles hogares para su hipotética compañera cósmica.

17

EN LA PISTA

En sus inicios, el Sistema Solar debió de ser un gran espectáculo: una vez que el viento del Sol despejó las nubes de gas, billones de partículas sólidas, que los científicos han llamado planetesimales, giraban caóticamente en torno a la estrella. Como en las pistas de *karts*, los adelantamientos no siempre se producían de forma ordenada, y las colisiones eran frecuentes; también lo era que los accidentados quedasen enganchados, soldados por el mismo calor desprendido en el choque. Así, durante millones de años, este proceso de canibalismo dio lugar a unos pocos cuerpos de cientos de kilómetros de diámetro, los embriones de los futuros planetas. Al final, en la zona interior de la antigua nube sólo quedaron unos pocos rivales que se disputaron los embriones planetarios restantes.

¿Por qué hay en torno al Sol cuatro planetas menos, en vez de dos, o de ocho? Sencillamente porque en la zona interior del sistema sólo había espacio para que cuatro embriones

planetarios creciesen sin destruirse. Pero el resultado final iba a depender esencialmente de la excentricidad de las órbitas de los últimos competidores, es decir, de su tendencia a invadir las «calles» de los otros. Una nebulosa con algo de gas residual hubiese sido una pista más peligrosa, porque los embriones planetarios pueden utilizar el gas para aumentar su excentricidad (es como si se apoyaran en el gas para cambiar de velocidad), y al hacerlo así, probablemente se hubiesen destruido hasta dejar en pista un solo vencedor. Es curioso pensar que, si tenemos objetivos accesibles para nuestros primeros viajes espaciales tripulados (Marte, por ejemplo), ello se debe en último término

18

EN EL PRINCIPIO...

a que el viento solar hizo un buen trabajo, preparando cuidadosamente la pista para la escena final del nacimiento de los planetas terrestres.

El guión de esta obra es imaginativo, pero no podemos asegurar que sea cierto. Se trata de una suma de suposiciones razonables, pero muy pocas de ellas se han podido someter a comprobación, y menos aún a cuantificación. Es decir, estamos ante lo que los científicos denominan una hipótesis de trabajo. La mejor prueba de ello es que, hace unos años, un grupo de astrónomos japoneses propuso lo que se dio en llamar el «modelo de Kioto», según el cual los planetas se habrían formado antes de que los gases fuesen barridos de la nebulosa solar. En esta hipótesis, los planetas terrestres tendrían al nacer una gran cantidad de compuestos volátiles (es decir, de bajo punto de fusión, como es por ejemplo el agua) y, por lo tanto, grandes cantidades de gases: la Tierra, en concreto, habría disfrutado de una tórrida atmósfera de hidrógeno (que luego perdió) 10.000 veces más densa que su atmósfera actual. Un pequeño Júpiter,

Por diferentes que sus predicciones sean respecto a los de

la hipótesis estándar, no se ha podido demostrar **que el modelo de Kioto sea incorrecto; sin embargo, no explica cómo los planetesimales, con su pequeña masa, pudieron captar tantos gases de la nebulosa protosolar, ni tampoco cómo los perdieron. En cambio, esta alternativa explica un aspecto oscuro del modelo mayoritario. Júpiter y Saturno contienen núcleos de roca y metal mucho mayores que la Tierra. Al menos estos embriones planetarios sí se formaron antes de la expulsión de los gases, ya que fueron cubiertos por cantidades gigantescas de hidrógeno y helio. En resumen, parece evidente que no tendremos hipótesis más sólidas sobre el origen preciso**

19

de los planetas hasta que no podamos estudiar en detalle la estructura de otros sistemas planetarios. Volvamos a la pista de choques. Incluso si las velocidades relativas a las que colisionaban los embriones eran pequeñas («alcances», en la jerga de la Dirección General de Tráfico), la atracción gravitacional aceleraba a los protoplanetas justo antes de los impactos, que terminarían produciéndose a velocidades respetables, unos diez kilómetros por segundo. En los momentos grandes estos choques no son elásticos (no hay rebote), lo que significa que toda la energía de la colisión se transforma en calor. Los cálculos sobre energía acumulada indican que, a lo largo de su proceso de crecimiento, los embriones planetarios pudieron acumular suficiente calor como para fundirse: durante su formación, los planetas fueron masas semisólidas de roca y metal, auténticos *carros de fuego* en los que los metales, más densos, se habrían ido hundiendo hasta el centro. Las huellas de este espectacular episodio quedaron borradas por la frénica actividad interna de nuestro planeta; pero se conservaron en el museo del Sistema Solar que es la Luna. Antes de explicar cómo pudo rastrearse esta historia hay que presentar a uno de los satélites más extraños de todo el sistema.

NACE UN SATÉLITE

La mayor recompensa científica del programa Apolo fueron, **sin duda, los 377 kilos de muestras de rocas lunares, tan antiguas que pueden considerarse un testimonio *escrito* del origen del Sistema Solar. Aunque, por motivos de seguridad, la mayoría de los alunizajes se**

EN EL PRINCIPIO...

En las zonas más planas, las llanuras de lava como *maria* (los «mares» de los antiguos astronautas fueron adiestrados para recoger los fragmentos procedentes de las tierras partes más antiguas de la Luna. El análisis de las muestras ha sido una de las empresas más cuidadosamente planificadas de la ciencia moderna. En laboratorios de polvos que (se decía) al lado de ellos muchos resultados resultaban sospechosos, equipos selectos de científicos se dispusieron a desvelar los misterios del origen de los planetas. En general, la química de las rocas recordaba mucho a la del manto terrestre, la corteza situada bajo la corteza; pero un detalle llamó la atención desde los primeros análisis: la Luna estaba aparentemente deshidratada (en general, desprovista de hidrógeno) y también empobrecida en hierro respecto a la Tierra. ¿Dónde estaban el hierro y el agua lunares?

En marzo de 1974, menos de cinco años después del lanzamiento del Apolo 11, todos los grandes nombres de la geología y meteorología reunidos en Houston (Texas, EE UU) escucharon a un joven científico desconocido, William K. Hartmann, exponía una nueva hipótesis sobre el origen de nuestro satélite era, según él, el producto de un impacto contra la Tierra del último embrión planetario que habría despedido una nube de partículas que se unió

El 11 de julio de 1969.

realizaron en las zonas más planas, las llanuras de lava conocidas como *maria* (los «mares» de los antiguos astronautas fueron adiestrados para recoger los fragmentos procedentes de las tierras altas, las partes más antiguas de la

Luna. El análisis de estas muestras ha sido una de las empresas más cuidadosamente planificadas de la ciencia moderna. En laboratorios tan impecables que (se decía) al lado de ellos muchos quirófanos resultaban sospechosos, equipos selectos de geoquímicos se dispusieron a desvelar los misterios del origen de los planetas. En general, la química de las rocas lunares recordaba mucho a la del manto terrestre, la capa rocosa situada bajo la corteza; pero un detalle llamó la atención desde los primeros análisis: la Luna estaba absolutamente deshidratada (en general, desprovista de volátiles), y también empobrecida en hierro respecto a la Tierra. ¿Dónde estaba el hierro y el agua lunares?

En marzo de 1974, menos de cinco años después de la vuelta del Apolo 11, todos los grandes nombres de las ciencias planetarias reunidos en Houston (Texas, EE UU) oyeron cómo un joven científico desconocido, William Harrmann, exponía una nueva hipótesis sobre el origen de la Luna: nuestro satélite era, según él, el producto de la colisión contra la Tierra del último embrión planetario. Este choque habría despedido una nube de partículas (que quedó en la órbita terrestre hasta que se unió para originar la Luna. No habría apenas hierro porque el núcleo del planeroide que chocó contra la Tierra se hundió, debido a su mayor densidad, en el interior terrestre; y no habría quedado agua porque la alta temperatura

, sin embargo, la Tierra contiene relativamente elevadas de metales: es muy probable que parte de los metales pesados

que todos los volátiles se vaporizasen en el espacio. El parecido químico generalizado se había formado en la misma forma; probablemente era el embrión de la vida vecina.

De hecho, y Hartmann ha confesado desconfiar, especialmente cuando Alan H. Hartmann, geocientífico, levantó la mano para su sorpresa, esta intervención necesitó apoyo. Las simulaciones por ordenador llevaron a Cameron a una conclusión sensiblemente más arriesgada: la masa del impactor era la décima parte de la terrestre. Un planeta marciano, un auténtico planeta ya que de Cameron sobre el origen de la vida se ha hecho más popular, a pesar de que los detalles son convenientes de detalle. Sin embargo, para requerir un choque excepcional, explicar qué, de entre todos los planetas interiores, la Tierra tiene un satélite gigante.

El gran impacto sobre el origen de la vida se impuso entre la comunidad científica necesario para que se aceptaran los procesos básicos en el nacimiento y la evolución de los planetas. Lo que equivale a reconocer al científico planetario Carl Sagan, nuestro vecino no abarca sólo los prados cercanos, sino un «medio ambiente cósmico», en el que las formas (microscópicas o colosales) son a menudo las que hay que contar. Esta pirueta inesperada fue confirmada por la exploración planetaria y la localización de decenas de miles de impactos en las superficies de todos los

del choque hizo que todos los volátiles se vaporizasen y se perdiesen en el espacio. El parecido químico general sugería que el intruso se había formado en la misma zona de la nube solar; probablemente era el embrión planetario de la pista vecina.

La idea era atrevida. y Hartmann ha confesado después que se sentía inseguro, especialmente cuando Alan Cameron, un prestigioso geoquímico, levantó la mano para interpellarle; para su sorpresa, esta intervención supuso un inesperado apoyo. Las simulaciones por ordenador habían llevado a Cameron a una conclusión semejante, pero aún más arriesgada: la masa del impactar debió de ser al menos la décima parte de la terrestre. Un invasor de tamaño marciano, un auténtico planeta ya formado. La variante de Cameron sobre el origen de la Luna es la que se ha hecho más popular, a pesar de que plantea diversos inconvenientes de detalle. Sin embargo, posee una virtud: al requerir un choque excepcional, explicaría también por qué, de entre todos los planetas interiores, tan sólo la Tierra tiene un satélite gigante.

La hipótesis del gran impacto sobre el origen de la Luna tardó diez años en imponerse entre la comunidad científica. el tiempo necesario para que se aceptaran los impactos como un proceso básico en el nacimiento y la evolución de los planetas. Lo que equivale a reconocer que, como dijo el científico planetario Carl Sagan, nuestro medio ambiente no abarca sólo los prados cercanos, sino que vivimos en un «medio ambiente cósmico», en el que las colisiones (microscópicas o colosales) son acontecimientos con los que hay que contar. Esta pirueta intelectual se ha visto confirmada por la exploración planetaria, y no sólo por la localización de decenas de miles de cráteres de impacto en las superficies de todos los

más sutiles. Por ejemplo, todos los planetas terrestres, de Mercurio a Marte, forman una familia bien definida en la que los cuerpos más grandes son también los más densos. Esto significa que en esencia se pueden considerar todos ellos variantes más o menos compactadas del mismo material. En el interior de un planeta como la Tierra se alcanzarán mayores presiones que en el interior de uno pequeño, como Marte, y ello hará que el material alcance mayores densidades.

Sin embargo, Mercurio, casi tan denso como la Tierra pero poco mayor que la Luna, se sale claramente de la fila. ¿Por qué este planeta es tan denso, a pesar de ser tan pequeño? Hasta la fecha, la mejor explicación es que otro gran impacto arrancó de Mercurio buena parte de su material rocoso, dejándole una proporción excesiva de metal. Como vemos, hay algo de arbitrario en los resultados de las colisiones: a veces un gran satélite, a veces un planeta superdenso, a veces un planeta *tumbado*, como Urano, cuyo eje de rotación está contenido en la eclíptica, el plano que contiene las órbitas de los planetas. Estos procesos siguen siendo, sin embargo, las mejores explicaciones para el pintoresco zoológico que es nuestro sistema de planetas, al que los impactos darían el «toque final».

El análisis de las rocas lunares no delata solamente el origen del satélite, sino que también nos contó historias de cuando el Sistema Solar era joven. Por ejemplo, casi todas las rocas lunares son brechas, es decir, han sido rotas y soldadas de nuevo por los repetidos impactos. Entre los fragmentos se ha detectado vidrio (material enfriado tan rápidamente que no pudo ordenarse y formar cristales), cuya edad delata el momento del

impacto que formó la brecha. Pues bien, aunque en la Luna se encuentran fragmentos de rocas muy antiguas (la muestra que la prensa norteamericana llamó «roca del Génesis» tiene

4.440 millones de años), no se ha hallado ningún vidrio de más de 3.920 millones de años de edad. La explicación más verosímil de esta barrera cronológica es que hace unos 3.900 millones de años la Luna sufrió un intensísimo bombardeo asteroidal, en el que se formaron las mayores cuencas de impacto, y en el cual, además, fueron destruidas buena parte de las rocas anteriores.

Este brutal acontecimiento ha recibido los nombres de cataclismo lunar () Gran Bombardeo Terminal; quizá el segundo nombre sea el más adecuado, porque difícilmente un suceso de esta envergadura pudo afectar sólo a la Luna. Se ha calculado que más de un 80% de la superficie de nuestro satélite fue destruido por los grandes cráteres y sus eyecta (fragmentos de roca expulsados en las colisiones). El periodo de bombardeo violento pudo durar tan sólo 200 millones de años, o incluso sólo 20. ¿Cuál fue su causa? ¿Quizá alguna colisión gigante en el cinturón de asteroides, que llenó de fragmentos todo el Sistema Solar? ¿O quizá una lluvia de cometas como la que sufre ahora Beta Pictoris? Contra la primera idea se puede argumentar que, tras 600 millones de años de evolución, el Sistema Solar debería haber agotado ya su ración de cataclismos; éste parece un periodo razonable para que los cuerpos adquieran órbitas «limpias», en las que no tendrían ocasión de competir entre sí. La hipótesis cometaria tiene la ventaja de que en los arrabales del Sistema Solar las influencias exteriores (el paso del Sol a través de nubes de polvo interestelar, por ejemplo) pueden ser importantes.

El H. P. III NCI II O . . .

Volveremos sobre este punto en el apartado «Tempos difíciles».

Los Océanos DE FUEGO

El análisis de las rocas de las blancas tierras altas lunares reveló otro dato interesante. La corteza lunar era muy homogénea en su composición: procedía en su totalidad de

la cristalización de un magma, y en ella predominaban los minerales ligeros, como los feldespatos, que le dan su color claro. La conclusión más razonable fue que la corteza lunar primitiva era como una enorme escoria de fundición natural: había flotado sobre un mar de magma hasta enfriarse y solidificarse. Quizá la Luna nunca estuvo fundida en su totalidad, pero al menos su exterior sí lo había estado'. Al final del viaje más arriesgado de la historia del hombre, los astronautas habían vuelto con un vellocino de oro científico: la prueba tangible de que los *carros defuego* habían existido en realidad.

¿Era el océano de magma lunar una excepción, o podrían encontrarse huellas de otros mares fundidos en los planetas terrestres? La extrapolación parecía razonable, pero, por desgracia, no había pruebas. Mientras que la Luna no ha sufrido ningún proceso que pueda borrar de su rostro la huella del fuego, la historia de la Tierra, por ejemplo, ha sido mucho más tormentosa, de forma que las evidencias han desaparecido. Sin embargo, y

¹ Lo que se explica por la mayor resistencia del interior, que dificulta el aumento de volumen, sin el cual no puede haber fusión. Por el razonamiento inverso, la descompresión (por rotura de la corteza, ¡o por ejemplo) favorecerá la producción de magmas.

basándose en la presencia de núcleos metálicos en los planetas. la mayoría de los geoquímicos tiende a admitir que, durante su formación, Mercurio, Venus, la Tierra y Marte atravesaron, igual que la Luna, por una fase de fusión generalizada que incluyó un océano de magma.

En la Tierra, el mar de lava pudo tener hasta 1.000 kilómetros de profundidad. Datos recientes indican que **el equivalente terrestre de la «roca del Génesis» lunar, la primera escoria de nuestro planeta, fue un vulgar granito. Mientras tanto, como ya se ha mencionado, los metales (sobre todo el hierro,**

que es con diferencia el más abundante en el Universo) cayeron hasta el centro del planeta como enormes gotas fundidas; a partir de entonces la Tierra tuvo un núcleo, que fue solidificando tan lentamente que aún hoy el 95% de él sigue estando fundido. Esta zona es la que origina el campo magnético del planeta. y probablemente la que explica también una parte importante del calor que llega a la **superficie**. Es curioso pensar que, tanto al manejar una brújula de bolsillo como cuando vemos rugir un volcán, estamos contemplando restos de la energía acumulada en el principio de la Tierra. hace más de 4.500 millones de años.

AJOS DE XMAS DE DIAS

El vaivén de las mareas y su relación con la posición de la Luna fueron seguramente algunas de las primeras observaciones científicas realizadas por el hombre. Un hecho bastante menos evidente es que la Luna frena la rotación de la Tierra. El mecanismo es en el fondo igual al de los frenos de los vehículos, que hacen presión con un

EN EL PRINCIPIO...

En el principio...

o contra la rueda; la diferencia es que entre la Luna no hay contacto físico. La atracción de la Luna en la Tierra crea una protuberancia, que es atraída por la fuerza que el resto del planeta por estar más cerca de la Luna tira de ella (igual que el viento tira de una cuerda suspendida de un globo) y al hacerla girar la rotación terrestre como el disco del freno de la rueda. El principal efecto de este proceso (típico de un gran satélite, como es la Luna de nuestro planeta) es el alargamiento de los días a lo largo de la historia de la Tierra.

por la ley de la conservación de la energía.

disco rugoso
contra la
rueda: la
diferencia es
que entre la
Tierra y la
Luna no hay
contacto
físico. La
atracción de
la Luna crea
en la Tierra

una protuberancia, que es atraída con más fuerza que el resto del planeta por estar más cerca del satélite. Al girar la Tierra gira también la devación, pero la Luna tira de ella (igual que el viento arrastra una cuerda suspendida de un globo) y al hacerlo dificulta la rotación terrestre como el disco del freno impide el giro de la rueda. El principal efecto de este juego mareal (típico de un gran satélite, como es la Luna respecto a nuestro planeta) es el alargamiento de los días a lo largo de la historia de la Tierra.

Como, por la ley de la conservación de la energía, esta «cantidad de rotación» o momento angular no puede perderse, este proceso tiene otra consecuencia: el frenado de la Tierra se convierte en aceleración de la Luna; r , al girar más deprisa, la Luna se aleja de la Tierra. Nuestro satélite, por tanto, tiende a escapar; sin embargo, nadie huye eternamente: cuanto más lejos esté, menor será la elevación producida por sus mareas, menor el frenado terrestre, y por lo tanto también más lento el alejamiento lunar. Este proceso es ya insignificante: actualmente el día sólo se alarga 20 segundos cada millón de años. Pero, ¿y en el pasado? Por el mismo razonamiento, la Luna debió de estar mucho más cerca de la Tierra, las marcas debieron de ser gigantescas, y la Tierra girar mucho más deprisa. Según cálculos de Harrmann, la Luna pudo formarse a sólo unos 25.000 kilómetros de la Tierra (como comparación, el diámetro terrestre es de 12.000), es decir, quince veces más cerca que en la actualidad. Sin duda, un buen espectáculo nocturno. Por otra parte, y debido a las grandes mareas que esta configuración provocaba, su alejamiento tuvo que ser muy

BITIWI; UIA D f LA TIERRA

rápido: en unos cientos de millones de años ya estaría a la mitad de la distancia actual.

¿Queda alguna prueba de este proceso espectacular? Sí, y nos llega por una vía inesperada, de la mano de la paleontología. Está basada en un hecho sencillo: los corales depositan una fina capa de caliza cada día. Además, **igual que sucede con los anillos de los árboles, este crecimiento es sensible a las variaciones estacionales, de forma que podemos distinguir la**

zona aportada entre dos estaciones cálidas. En suma, los esqueletos de los corales (cuando están muy bien conservados) incluyen un diario, pero también un calendario anual. A principios de la década de los sesenta, esta idea se aplicó a los corales actuales, los cuales permitieron averiguar que los años tienen, en general, 365 días. Indiscutible hallazgo, pensará el lector. No tan trivial como parece, se puede responder, ya que estos calendarios vivos tienen la buena costumbre de fosilizar. Y cuando hacemos el mismo conteo de días y años sobre corales antiguos, llegamos a estimaciones sorprendentes: los corales del Devónico (hace unos 380 millones de años) exhibían 400 líneas de crecimiento por año. Otros restos fósiles semejantes pero más antiguos (550 millones de años) llegan a las 420 líneas.

Como el tiempo que la Tierra emplea en su viaje anual alrededor del Sol no varía (que sepamos), más días por año significan, lógicamente, días más cortos: hace 550 millones de años los días sólo tendrían 21 horas. Más atrás en el tiempo, las extrapolaciones se vuelven arriesgadas, ya que el frenado mareal de nuestro planeta no es constante, sino que decrece progresivamente. Y es muy probable que ni siquiera lo haga de forma homogénea, ya que las variaciones en la distribución de la masa de

18

1-... H. 1'111 1" (:11'111*.*

la Tierra (por ejemplo, la presencia de glaciares) pueden afectarlo. Se han propuesto velocidades de rotación de cuatro a cinco horas: en estas condiciones, el año tendría unos 2.000 días. Pero, sin pruebas para avalarla, esta extrapolación espectacular no pasa hoy por hoy de ser una hipótesis provisional.

ARQUEÓLOGOS DE LA ATMÓSFERA

Vivimos sumergidos en un océano de oxígeno, un peli groso

elemento que descompone los tejidos animales y facilita las combustiones espontáneas. Si hubiese tan sólo un poco más del 20% actual, quizá la vida hubiera sido inviable sobre un planeta en el que se prendería una hoguera cada vez que algún material combustible entra en contacto con el aire. El oxígeno, sin embargo, es muy poco abundante en el Universo (0,06%), y por la misma razón debió de ser un componente minoritario de la nube protosolar. ¿Cómo ha llegado a formar una quinta parte de nuestra atmósfera? Tenemos pruebas, además, de que en la Tierra primitiva no existía oxígeno libre: las rocas sedimentarias más antiguas (entre 3.800 y 3.000 millones de años) contienen minerales (como pirita, un sulfuro de hierro) que son inestables en presencia de oxígeno (la pirita de las colecciones de minerales se fondea en tilonas, en profundidad, aislada de la atmósfera). Así pues, sabemos que el oxígeno se acumuló después. La respuesta a la pregunta anterior es que esta atmósfera casi incendiaria es hija de la biosfera; un poco más adelante profundizaremos en este punto. La siguiente pregunta es qué clase de aire existía antes de la vida, y en concreto durante lo que los historia

dores de la Tierra llaman al eón Arcaico', desde el principio hasta los 2.500 millones de años (es decir, casi la primera mitad de la historia del planeta). Un tiempo tan largo que justifica el apelativo: eón viene del griego *aidn*, eternidad...

En mayo de 1968, mientras la última fiebre revolucionaria del siglo agitaba Europa, un grupo de veinticinco destacados científicos se reunía en Princeton (Estados Unidos) para discutir sobre el origen de la vida. Entre ellos se contaban personalidades tan conocidas como Carl Sagan, Lynn Margulis y James Lovelock, es decir, el mayor divulgador científico de la historia y los padres de la teoría Gaia". Pero la figura dominante de la reunión era sin duda Stanley Miller, quien había ganado fama mundial en 1953 cuando, recién terminados sus estudios de química, había conseguido sintetizar aminoácidos (los

«ladrillos del edificio de la vida», suelen llamarse) a partir de una mezcla de amoníaco, metano e hidrógeno, los gases que se suponía que componían la atmósfera primitiva de la Tierra.

¿Sobre qué podían discutir un científico planetario, dos biólogos y un químico? Precisamente sobre la clase de atmósfera que envolvía la Tierra hace 4.000 millones de años, la época en la que surgieron los primeros seres vivos. Los debates fueron grabados, de forma que podemos reproducirlos fielmente. Oigamos el momento clave:

«Este punto de vista sobre la atmósfera primitiva es que hay un trabajo por hacer: sintetizar vida», dijo Miller,

La historia de la Tierra se divide en tres periodos o eones: Arcaico hasta 2.500 millones de años. Proterozoico (primera vida) entre 2.500 y 550 millones de años, y Fanerozoico (vida visible). desde: 550 millones de años hasta la actualidad.
4 Según la cual la biosfera controla el medio ambiente de la Tierra. JO

JO N. IRI-C: PJ()

«Para hacerlo, de una u otra forma, es necesario sintetizar compuestos orgánicos. Y hasta donde yo sé, nadie ha conseguido nunca producir compuestos orgánicos bajo condiciones oxidantes, o sea, en presencia de oxígeno o con CO_2 pero sin hidrógeno. Esto significa que necesitamos condiciones reductoras, o sea hidrógeno libre, aunque sea en pequeñas cantidades. Y en estas condiciones, las especies químicas estables - al menos a bajas temperaturas- son el metano, el amoníaco, el nitrógeno, el agua y el hidrógeno».

Interviene Philip Abelson, un geoquímico especialista en atmósferas: «Pero había tal flujo de rayos ultravioleta de alta energía que cualquier cantidad de amoníaco (NH_3) que se produjese sería inmediatamente destruida. Además, a temperaturas bajas, los mecanismos de formación de amoníaco son lentísimos. Podríamos poner hidrógeno al lado de nitrógeno a 25° por toda la eternidad, y no pasaría nada».

«Lo que no entiendo es por qué sí hay amoníaco en

Júpiter», objetó alguien.

«Yo no estoy hablando de Júpiter», cortó Abelson. Va rios de los problemas centrales de la química y la biología del siglo XX están resumidos en este rápido inter cambio. En 1924, el químico ruso Alexander Oparin pro puso que la energía de las descargas eléctricas, actu ando sobre una atmósfe ra primitiva formada por amoniaco, hi drógeno y metano, había producido aminoácidos y otras moléculas orgánicas. Hacia 1950, las atmósferas planeta rias mejor conocidas eran, paradójicamente, las de los pla netas más lejanos. La causa era simple:Júpiter y Saturno están dotados de enormes envueltas de gases calientes, que proporcion an espectros nítidos, y por tanto son fáci les de analizar desde la Tierra.j unto con el hidrógeno y el

BIOGRAFÍA DE LA TIERRA

B I(I(.ItA.-iA DII-<\\
TIERR.\\

gases más abundantes en el Universo, el amo-
l metano (CH_4) resultaron ser los compuestos
más comunes en los planetas gigantes. Harold
reado con el premio Nobel y uno de los quími-
prestigiosos de la época, tomó estas atmósferas,
camente la de Júpiter, como patrón de todas
stema Solar. Urey fue el director del trabajo de
Miller, quien diseñó su famoso experimento si-
as ideas de su maestro.

acer esta propuesta, Urey ponía en juego un
básico: ¿Eran todas las atmósferas planetarias
directas de la nebulosa protosolar? Según he-
las envueltas gaseosas de los planetas gigantes
ser jirones de aquella nube atraídos por los nú-
dos de Júpiter y sus hermanos. Ahora bien, ¿se
cir lo mismo de la atmósfera terrestre? La res-
esta pregunta es negativa, y los astrofísicos han
ella estudiando el Sol. Nuestra estrella (cuya
ión se considera semejante a la de la nebulosa
surgió) contiene un millón de veces más gases
sados (neón y kriptón⁵) que la Tierra. ¿Por qué

helio, los
gases más
abundantes
en el
Universo, el
amo niaco y
el metano
(CH_4)
resultaron
ser los
compuestos
químicos
más
comunes en
los planetas
gigantes.
Harold Urey,
laureado con
el premio

Al hacer esta propuesta, Urey- ponía en juego un concepto básico: ¿Eran todas las atmósferas planetarias herederas directas de la nebulosa protosolar? Según he mos visto, las envueltas gaseosas de los planetas gigantes sí parecen ser jiro nes de aquella nube atraídos por los nú cleos sólidos deJúpiter y sus hermanos. Ahora bien , ¿se puede decir lo mismo de la atm ósfera terrestre? La res puesta a esta pregunta es negativa, y los astrofísicos han dado con ella esrudiando el Sol. Nuestra estrella (cuya composición se considera semejante a la de la nebulosa de la que surgió) contiene un millón de veces más gases nobles pesados (neón y kript ón') que la Tierra. ¿Por qué estos gases son tan escasos en nuestro planeta? Como es tos elementos deben precisamente su denominación a su repugnancia a mezclarse con otros, no podemos suponer que hayan desa parecido de escena por procesos químicos (por ejemplo, formando compuestos que hubiesen preci pitado en el fondo marino); además, su elevado peso ató mico impide que puedan perderse en el espacio como un globo hinchado con helio. Así que la única forma de elimi narlos es expulsar en bloque todos los restos de nebulosa

32

protosolar que hubiesen podido quedar rodeando a la Tierra inicial. El Sistema Solar primitivo era un lugar tan violento que no faltan mecanismos para justificar esta volatilidad: el mismo proceso que dio origen a la Luna tuvo que expulsar, con más motivo, esos volátiles iniciales. Pero, aun sin choques, las atmósferas pueden ser eficazmente erosionadas por su gran enemigo, el viento solar, sobre todo si no están protegidas. IX) Un ejemplo

magnético que desvíe las partículas cargadas.

Por lo tanto, todos los gases que rodean a nuestro planeta (y, sin duda, también a sus vecinos) han surgido de su interior posteriormente, a medida que los planetas simalcs que lo habían formado se desgusificabnn en procesos de vulcanismo masivo. En la jerga de los geoquímicos, ni la atmósfera actual ni tampoco la del Arcaico (llamada protoatmósfera) son atmósferas iniciales, sino secundarias. Si esto es así, las emanaciones que surgen actualmente del interior de la Tierra nos pueden indicar cuál fue la composición de la protoatmósfera. Estos gases volcánicos son sobre todo dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua, con trazas de monóxido de carbono

ácido clorhídrico (HCl).

▪ El que el CO_2 sea el gas

predominante en las emanaciones volcánicas actuales es uno de los motivos por los que los partidarios de una protoatmósfera de amoníaco y metano llevan años combatiendo a la defensiva.

Pero hay un segundo argumento, más convincente: los estudios de estrellas jóvenes han permitido reconstruir la historia inicial del Sol. En su juventud, nuestra estrella debió de atravesar una corta pero energética fase (llamada T Tauri por el nombre de la estrella en que primero se estudió) en la que habría emitido un torrente de rayos ultravioleta de alta energía; hace 4.000 millones de años

BIOGRAFÍA DE LA TIERRA

BIOGRAFÍA DE LA TIERRA

sería aún unas diez veces superior al actual. En
esenta, varios geoquímicos demostraron en sus
os que, sin una capa de ozono que protegiese la
, este baño de energía hubiese descompuesto rá-
e el amoníaco y el metano. Con la tajante frase
cierra la discusión histórica («Yo no estoy ha-
Júpiter»), Abelson marca sus distancias con la
James Miller, el amoníaco y el metano

este flujo
sería aún
unas diez
veces
superior al
actual. En

los años sesenta, varios geoquímicos demostraron en sus laboratorios que, sin una capa de ozono que protegiese la atmósfera, este baño de energía hubiese descompuesto rápidamente el amoníaco y el metano. Con la tajante frase con la que cierra la discusión histórica («Yo no estoy hablando de Júpiter»), Abelson marca sus distancias con la escuela de Urey y Miller: el amoníaco y el metano podían ser estables en los planetas exteriores, donde la radiación ultravioleta llega atenuada, pero no en los terrestres. Para éstos la mayoría de los especialistas proponían atmósferas secundarias formadas esencialmente por monóxido y dióxido de carbono, nitrógeno¹ y agua. Una atmósfera a prueba de rayos ultravioleta, porque los óxidos de carbono no tienen enlaces fuertes, resistentes a esta radiación.

Una atmósfera primordial de dióxido de carbono presenta, sin embargo, un serio inconveniente, planteado ya por Stanley Miller en su intervención: nadie había conseguido sintetizar (ni lo ha hecho después) moléculas orgánicas complejas en una atmósfera de CO₂. Así pues, esto significa que, si nos atenemos a la protoatmósfera preferida por los geoquímicos, nos quedamos sin procesos químicos sencillos que expliquen el origen de la vida en la Tierra. Abordaremos este problema al final de este capítulo.

Sin embargo, el dióxido de carbono tiene sus ventajas: por ejemplo, produce un eficiente efecto invernadero, es decir que deja pasar la radiación solar pero absorbe la energía reflejada por la superficie de un planeta, que es sobre todo infrarroja (calor). Una concentración elevada

¹ El nitrógeno se considera inicialmente porque no hay ningún proceso razonable mediante el cual este gas inerte pudiese haber sido añadido más tarde.

de CO₂, hubiera calentado la Tierra de forma aceptable. Naturalmente, en este contexto temperatura aceptable

significa temperatura idónea para los seres vivos.

La cuestión de por qué en la Tierra no hace ni demasiado calor ni demasiado frío es el centro de la llamada «paradoja del joven Sol frío», un dilema propuesto en 1972 a la comunidad científica por Carl Sagan y su colega George Mullen bajo la forma del siguiente silogismo:

- A lo largo de la evolución solar, parte del hidrógeno se convierte en helio.

- La masa de un átomo de helio es cuatro veces mayor que la de un átomo de hidrógeno. Los choques entre partículas más masivas desprenden más calor.

- Una estrella más caliente es también más luminosa, por lo que emite más energía.

- Luego el Sol calentará cada vez más, por lo que tuvo que haberlo mucho menos (aproximadamente un 30%) al principio de su evolución.

La paradoja consiste en que, según estos datos, toda el agua de la Tierra tuvo que estar congelada durante la primera mitad de su historia; sin embargo, desde hace tiempo se conocen sedimentos de más de 3.800 millones de años de edad totalmente comparables a los que hoy se depositan en los fondos marinos. Así pues, la Tierra inicial no estaba congelada. Y hoy, al cabo de 4.000 millones de años y con el Sol un 30% más caliente, no está sobrecalentada. ¿Cómo lo ha conseguido?

CO:~; TER.MOSTATO INCORPORADO

La respuesta que los propios Sagan y Mullen proponían para su paradoja era que la especial composición de la

B ltlGR AFh II F 1,,\T lf RIIA

protoatmósfera había dado lugar a un efecto invernadero mucho más intenso que el actual, con lo que se conseguía más calor aunque la radiación solar fuese mucho más débil. Y proponían al metano como protagonista del invernadero que

salvó a la Tierra del hielo. Después, cuando los inconvenientes del metano se pusieron de relieve, otros autores han aceptado la solución Sagan- \ lullen pero con el COI como gas de invernadero. Para una elevación eficaz de la temperatura (que nunca parece haber bajado de 10 °C. como media) haría falta una concentración de CO₂ de al menos un 3%. Aunque este valor es cien veces superior al actual, entra dentro de los cálculos razonables; algunos geoquímicos proponen que - la protoatm

ósfera contenía un 20% de COI' Esta es una cantidad más importante de lo que parece, porque probablemente esa atmósfera primitiva era mucho más densa que la actual: la presión en la superficie pudo ser de hasta setenta atmósferas. Sin embargo, esta atmósfera caliente plantea un problema añadido. Para que el vapor de agua se condense en lluvia hace falta que el aire esté relativamente frío, cosa que actualmente sucede hacia los diez kilómetros de altura; en cambio, si la atmósfera fuese muy cálida, el vapor de agua podría subir hasta alturas mucho mayores, de unos cien kilómetros... un peligroso lugar dominado por los temibles rayos ultravioleta, que como hemos visto, no se comporta nada amistosamente con los compuestos de hidrógeno. Rota la molécula de H₂O, el ligero hidrógeno escaparía al espacio y, si esta situación se hubiese prolongado, la Tierra hubiese perdido todo su vapor de agua, como seguramente le ha sucedido a Venus. Nuestro planeta sería ahora un desierto ardiente, en vez de un planeta oceánico. El que esto no haya sucedido

J6

E!o 1 I PRI:--Ut'IO .**

significa (lue la temperatura en la superficie de la Tierra nunca superó los 50 °C.

En resumen, la Tierra se ha conservado siempre ni muy caliente ni muy fría. y ello a pesar de que la fuente de calor ha variado sus prestaciones de forma notable. ¿Es que varió también, en paralelo, la concentración de gas de invernadero? ¿Por

casualidad! Demasiada casualidad. ¿Por designio? Esta fue la solución de la reorfa Gaia a la paradoja. Los vegetales absorben CO_2 en la fotosíntesis; en una época muy cálida, los bosques avanzan y esta mayor masa biológica absorbe más CO_2 , lo que disminuye el efecto invernadero: la Tierra se enfría. La Vida (aquí, con mayúscula) cuida la temperatura de H_2O

▪ casa común.

Los geoquímicos venían otra solución a la paradoja: también existe un termostato en las rocas (de nuestro planeta). La mayoría de las que forman la corteza están compuestas por minerales llamados silicatos. Los silicatos se forman en general a altas temperaturas (al enfriarse un magma, por ejemplo), por lo tanto son inestables en la superficie. En particular, el agua con CO_2 atmosférico ataca las rocas, destruyéndo los silicatos y

formando car-

▪ ▪ bonatos: en este proceso se consume CO_2 .

En una época muy cálida, los procesos de ataque de los silicatos se acelerarán (las reacciones químicas suelen funcionar más eficazmente a altas temperaturas). lo que consumirá un exceso de CO_2 y por consiguiente provocará un descenso de la temperatura.

Saber cuál de los dos termostatos, el vegetal o el mineral, ha salvado a la Tierra de ser un páramo helado o un desierto ardiente es una de las grandes preguntas, aún por resolver, de la ciencia moderna. La primera solución ha sido tachada de mística: la diosa Gaia protegiendo el

• •

BIOGEOGRAFÍA DE LA TIERRA

arca de Noé. Lo cierto es que los dos termostatos no son excluyentes, sino compatibles; y que en este debate estamos aprendiendo que el mantenimiento de condiciones habitables en un planeta depende de procesos sutiles y no siempre bien comprendidos.

Williarn Harrmann, a quien presentamos como uno de los creadores de la hipótesis del gran impacto sobre el origen de la Luna, no está convencido de que hace 3.900 millones de años un **enjambre de grandes asteroides** cayese sobre los cuerpos del interior del Sistema Solar. Su principal argumento contra el Gran Bombardeo Tennesseano es que habrían transcurrido ya más de 600 millones de años desde el origen del sistema. Las grandes catástrofes, **como la que dio origen a la Luna, habían acabado aparentemente hacía cientos de millones de años. ¿Cómo explicar este repunte tardío de las colisiones? ¿Dónde habían estado los impactores durante todo este tiempo?** Los discos de polvo alrededor de las estrellas jóvenes **duran entre 300 y 400 millones de años; suponemos que algo semejante sucedió en el caso del Sol.** Después, los procesos más socorridos para explicar la llegada de cuerpos extraños a las órbitas de los planetas terrestres son los choques en el cinturón de asteroides, choques en los que se producen fragmentos que invaden otras órbitas. Pero el tamaño y la frecuencia de las cuencas de impacto lunares requieren docenas de impactares de más de cien kilómetros de diámetro, y por lo tanto superan con mucho los tamaños típicos, no sólo de los fragmentos producidos en las colisiones, sino de los propios asteroides.

Sin embargo, análisis recientes de vidrios de impacto lunares siguen proporcionando todavía la misma edad: nunca más de 3.920 millones de años. Como vamos adelantamos (véase

«Nace un satélite»), quizá el bombardeo terminal fue obra no de asteroides sino de cometas; se ha argumentado que Urano y Neptuno pudieron atraer un enjambre de éstos hacia la zona

interior del Sistema Solar: pero sigue sin haber ninguna explicación lógica para la cuestión crítica. el tiempo.

En cualquier caso, aunque no entendamos el proceso, sí podemos formular una pregunta intrigante: ¿Qué efectos pudo tener el Gran Bombardeo Terminal sobre los planetas terrestres, y específicamente sobre la Tierra? Considerando que la superficie de nuestro planeta es catorce veces más grande que la de la Luna, y que su gravedad es seis veces mayor (lo que supone también mayor capacidad de atracción de potenciales impactos), se ha calculado que sobre la Tierra debió de caer un número de asteroides unas 25 veces mayor que sobre la Luna: del orden de un millar de cuerpos de decenas a centenares de kilómetros de diámetro. Si el bombardeo hubiese durado tan sólo 20 millones de años. esto significaría que nuestro planeta habría sufrido un impacto de consecuencias globales aproximadamente cada 20.000 años; es decir, una crisis ambiental casi permanente. Si el periodo bélico hubiese sido más dilatado, habría habido intervalos de calma del orden de los 100.000 años.

En los últimos años se ha intentado precisar la influencia que esta tardía lluvia sólida pudo tener sobre una Tierra en la que la vida estaba intentando asentarse. Una forma de relacionar estos dos fenómenos es comparar el tiempo necesario para las síntesis químicas que podrían conducir a la vida con el intervalo medio de caídas

19

de grandes asteroides. Mientras el primero sea más largo que el segundo, la vida no está garantizada: para emplear las palabras de Stanley Miller, el «trabajo por hacer» - la síntesis de la vida- no podría llevarse a cabo por falta de condiciones laborales. Ahora bien. los bioquímicos reclaman tiempos entre cien mil y un millón de años para esta tarea; lo cual. teniendo en cuenta el ritmo de las colisiones, haría las síntesis difícilmente viables. ¿Tendría entonces la vida que esperar hasta el final del bombardeo? Ésta es la respuesta clásica, con la que todo parece encajar, ya que rocas de 3.850 millones de años ya presentan indicios biológicos. Un guión impecable: acaba el

último chaparrón cósmico y entra en escena la Vida sacudiendo su paraguas. El problema es de probabilidad: la de que encontremos preservados indicios precisamente del primer ser vivo que existió en la Tierra es pequeñísima. En pura lógica, encontrarlos en rocas de 3.850 millones de años (las rocas sedimentarias más antiguas, hay que subrayar) significa que la vida empezó en la Tierra hace al menos 4.000 millones de años.

y aquí nos damos de bruces con un serio obstáculo: lo que antes llamamos crisis ambiental permanente. Se han realizado cálculos de la cantidad de energía liberada en los impactos del gran bombardeo terminal. Su distribución más probable es: 50% en fundir y vaporizar las rocas de la zona de impacto, 25% radiada al espacio, y 25% en vaporizar agua marina. Este último factor es crítico: esta vaporización masiva (una ebullición, por tanto) no se limitaría a la zona del impacto, sino que, a partir de un cierto tamaño del proyectil, se produciría una onda de choque global que afectaría a toda la Tierra. Los objetos de algo menos de 200 kilómetros de diámetro harían hervir la zona fórica (los 200 metros más superficiales del

E: " U . I' NIM:JPIO . . .

mar) en todo el planeta; y un impacto de unos 500 kilómetros pondría en ebullición la hidrosfera restante en su totalidad.

Algunos de los efectos de estos choques térmicos (como tsunamis gigantes y lluvias de ácido nítrico producido por la combinación explosiva del nitrógeno atmosférico) serían casi insuperables; pero otros (como una atmósfera de vapor de agua y *vapor de roca* a 1.700 °C y 100 atmósferas, que impediría la fotosíntesis) podrían durar cientos o incluso miles de años. Así que, sin pedir permiso a los operarios, el taller de la vida era esterilizado cada cierto tiempo, aparentemente antes de que la cuadrilla bioquímica tuviese ninguna opción de acabar su trabajo; o, en caso de que lo hubiese hecho, desbaratando irremisiblemente el producto de aquél.

De este violento guión se deduce que los primeros intentos de producir vida fueron muy probablemente frustrados por impactos asteroidales. Podemos dejar volar la imaginación y pensar en

las otras posibles biosferas, no necesariamente iguales a la presente, que podrían haber echado raíces en la Tierra. Esta cuestión está relacionada además con uno de los grandes debates sobre el origen de la vida en la Tierra: el que se refiere al marco físico de las síntesis prebióticas. ¿Un charco mareal o una chimenea hidrotermal en el fondo oceánico: El primer ambiente es el preferido de la biología clásica: siempre se recuerda que el mismo Charles Darwin citó expresamente la posibilidad de que la vida surgiese en una zona litoral, en la que la evaporación favorecería la concentración de los productos de las primeras síntesis. Pero las chimeneas profundas tienen la ventaja de estar más protegidas de la esterilización, ya que sólo los impactos más grandes proporcionarían energía suficiente para hacer hervir también el océano profundo. Aunque los cálculos son muy

toscos, se ha propuesto que hace 4.000 millones de años la zona fótica podría ser esterilizada cada 900.000 años, mientras que el mar profundo sólo sería visitado por los intrusos cada diez millones de años.

Las zonas profundas tienen además, como se verá, la ventaja de depender menos de la fotosíntesis, por lo que soportarían mejor la oscuridad posterior a los choques. En esto se basan muchos investigadores del origen de la vida para opinar que si ésta tuvo la oportunidad de originarse en chimeneas hidrotermales profundas, probablemente lo hizo. Se ha propuesto que, si las síntesis prebióticas tuvieron lugar en este ambiente protegido, quizá la vida pudo surgir sobre la Tierra hace 4.400 millones de años; en cambio, si tuvo que originarse en la expuesta zona intermareal, no lo habría hecho hasta hace 3.800 millones de años. En uno y otro caso, los bioquímicos siguen sorprendidos por la rapidez de un proceso en teoría tan complejo, y desarrollado además en unas condiciones ambientales tan traumáticas que algunos han llegado a preguntarse si este chaparrón de roca pudo ser, de

alguna forma inimaginable, biológicamente beneficioso. Lo que sí se puede asegurar es que este bombardeo cósmico contaminó químicamente los planetas interiores: los impactares, asteroides o cometas, pudieron traer nuevos componentes químicos. Agua, por ejemplo. Pero éste es otro tema, que trataremos a continuación.

LA TIERRA COMIENZA A ESCRIBIR SU DIARIO DE VIAJE

Cada vez que bebemos un refresco, las burbujas nos recuerdan que el dióxido de carbono es muy soluble en

EN EL PRINCIPIO...

Ex :L'IR I:" CIP IO ..•

El mismo proceso debió de operar, aunque a escala global, en la Tierra recién nacida. Los gases que comenzaron a acumularse por degasificación del interior formaron una densa atmósfera de CO_2 , vapor de agua y otros gases. ¿Cómo sería esta Tierra primitiva vista desde el espacio? Nada parecido al actual oasis blanco y azul. Era un planeta ardiente velado por una niebla roja. Ahora lo está Titán, el satélite de Saturno. Y es precisamente lo que marca la diferencia: el famoso biólogo James Lovelock (a quien encontramos antes en el capítulo sobre la protoatmósfera) compara el oxígeno a los eficientes detergentes destructores de materia orgánica. Un viajero del tiempo no habría encontrado grandes diferencias entre la Tierra arcaica y Venus. Pero como la Tierra estuvo lo bastante fría, el agua, mucho más volátil que el CO_2 y el nitrógeno, se condensó. Las depresiones se llenaron rápidamente con agua. Al disolverse, el CO_2 se transforma en ácido carbónico y caliente (entre 30 y 60 °C) debido al elevado calor interno. Aún desprendía la Tierra recién solidificada. Así, un ácido caliente es sin duda un disolvente muy eficaz. Por lo que el carbónico arrastró rápidamente

agua. El mismo proceso debió de operar, aunque a escala global, en la Tierra recién nacida. Los gases que comenzaron a acumularse por

desgasificación del interior generaron una densa atmósfera de CO₂ vapor de agua y nitrógeno. ¿Cómo sería esta Tierra primitiva vista desde una nave espacial? Nada parecido al actual oasis blanco y azul, sino un planeta ardiente velado por una niebla roja, como ahora lo está Titán, el satélite de Saturno. Y es el oxígeno el que marca la diferencia: el famoso biólogo inglés James Lovelock (a quien encontramos antes en el simposio sobre la protoatmósfera) compara el oxígeno a la lejía, dos eficaces detergentes destructores de materia orgánica. Un viajero del tiempo no habría encontrado muchas diferencias entre la Tierra arcaica y Venus.

Cuando la Tierra estuvo lo bastante fría, el agua, que es menos volátil que el CO₂ y el nitrógeno, se condensó. Las depresiones se llenaron rápidamente con un agua ácida (al disolverse, el CO₂ se transforma en ácido carbónico) y caliente (entre 30 y 60 °C) debido al elevado calor que aún desprendía la Tierra recién solidificada. Aunque diluido, un ácido caliente es sin duda un disolvente eficaz, por lo que el carbónico arrastró rápidamente iones de las primeras rocas: el sabor salado del agua marina no se debe al amargo llanto de los pueblos mediterráneos (como propone Joan Manuel Serrat en una inolvidable canción), sino a las condiciones químicas de la Tierra recién nacida.

¿Proviene del interior terrestre toda y cada uno de los 1.348 kilómetros cúbicos de agua que forman la hidrosfera actual? La respuesta tradicional es un sí rotundo, aunque una alternativa reciente propone que algunos de los últimos impactores fueron cometas que aportaron una parte del agua, o incluso toda. Chris Chyba,

un joven científico planetario, ha calculado que si tan sólo un 10% de los cuerpos que chocaron contra la Tierra en su etapa de crecimiento final hubiesen sido cometas, toda nuestra agua (y también la poca que pueda existir en la Luna) sería de origen cometario. Una curiosa materia

de reflexión para la próxima vez que tomem os un baño en el mar.

Los compuestos de carbono podrían haber seguido la misma ruta. Teniendo en cuenta que se trata de especies químicas muy volátiles, lo lógico es que se encuentren sobre todo en las zonas exteriores del Sistema Solar (por la misma razón, en las mañanas de invierno el vapor de agua se condensa en los cristales de la ventana, y no sobre las mantas de la cama) ", La exploración del Sistema Solar ha demostrado que la proporción de carbono respecto al resto de los elementos va creciendo con la distancia al Sol, hasta alcanzar un máximo en los cometas: son los compuestos de este elemento, en una concentración cinco mil veces superior a la que tienen en la Tierra, los que dan al núcleo del cometa Halley su color casi negro. De hecho, el interior del Sistema está desprovisto de carbono respecto al exterior: por eso, para explicar por qué Venus y Marte tienen (y la Tierra primordial tuvo) atmósferas ricas en carbono, el bombardeo cometario resulta un mecanismo coherente. Aun así, la concentración de carbono en la biosfera nos habla de

1 A mitad de la década de los noventa, la sonda Lunar Prospector o LUNAR PROSPECTOR (LUNAR PROSPECTOR) podrían interpretarse suponiendo que había en el fondo de algunos cráteres lunares que no recibían nunca la luz solar se concentraban capas de hielo.

Los volátiles, como el vapor de agua, pasan a líquidos o sólidos al enfriarse sobre una superficie a baja temperatura. El exterior del Sistema Solar está más frío que la zona interna, lo que explica la gran cantidad de hielo en esa zona externa: las cortezas de los satélites y los cometas son sobre todo hielo.

la ingente tarea química de los seres vivos, que a lo largo de miles de millones de años han conseguido hacer acopio de grandes cantidades de un elemento tan escaso en el planeta.

Si los cometas nos pudieron traer agua y carbono,

¿por qué no también en aminoácidos o proteínas, las materias primas de la vida? El principal inconveniente de esta atractiva hipótesis es que los impactos generan muy altas temperaturas, en las que los compuestos orgánicos no se encuentran en su ambiente ideal. Lo normal sería que cualquier molécula compleja que pudiese viajar a bordo de un cometa se fragmentara cuando éste chocase contra un planeta. Y aunque Chyba y Sagan propusieron que sólo la mitad de los cometas llegan hasta la órbita terrestre a muy alta velocidad, no todos los autores están de acuerdo con estos cálculos.

Volvamos al ^{238}U . Tanto si es un producto de la desgasificación como si es un regalo de los cometas, el ^{238}U no universal cubrió muy pronto la Tierra, ya que hay datos que prueban su existencia muy temprana: están grabados en los granos de un mineral prácticamente indestructible llamado circon, que se encuentra como accesorio en el granito, y cuya dureza le ha convertido en un auténtico superviviente de los primeros días de la Tierra. A mediados de los años ochenta, investigadores australianos idearon una nueva técnica para averiguar no ya la edad de un mineral aislado, sino incluso la de cada parte del mineral (como los adolescentes, muchos minerales crecen por etapas, de forma que su centro es más antiguo que sus bordes). El aparato que pusieron a punto se llama microsonda iónica, y lanza chorros de iones sobre un punto del mineral, del que desaloja y analiza los átomos. Ahora bien, al formarse el circon

4<

atrapa átomos de uranio, un elemento inestable? que se convierte en plomo a una velocidad que se ha determinado de forma muy exacta. Esta propiedad conviene a los circones en relojes de precisión, ya que midiendo la proporción de uranio que queda, y la de plomo formado, sabremos cuánto tiempo ha

pasado desde que se originó el mineral.

Dado el amor de los anglosajones por las siglas, no es de **extrañar que este instrumento maravilloso haya sido** bautizado «SH RIMP» (gamba), de Sensitive High Resolution Ion MicroProbe (las dos últimas palabras significan microsonda iónica). Se ha dicho que este **aparato ha abierto una ventana sobre los años de aprendizaje del planeta, y sin embargo sus primeros resultados fueron recibidos con mucha** **desconfianza; el geoquímico británico Stephen Moorbath, uno de los mayores especialistas mundiales en datación de rocas muy antiguas, tras conocerse las primeras edades de circones, su periores a los 4.000 millones de años, comentaba en 1986: «Mientras tanto [se confirman por otros métodos los resultados] intentaré reprimir una pesadilla que me asalta una y otra vez: que SH RIMP obtiene uno de estos días una edad claramente mayor que 4.600 millones de años [la edad aceptada para la Tierra]»,**

Tal catástrofe no se ha producido, y por el contrario **la «gamba» sigue produciendo noticias sobre la Tierra joven.** Por ejemplo, a principios de 2001 un resultado espectacular de SHRIMP **acaparó titulares en la prensa científica: algunos circones de Australia habían sido**

«Los elementos que, como el uranio, se descomponen espontáneamente emitiendo partículas» radiación se denominan radiactivos, y las partículas expulsadas chocan con los átomos vecinos, desprendiendo calor.

E: - t L PRI > C1PIO ...

datados en unos millones de años. Los minerales no estaban en granitos, sino en rocas sedimentarias. Esto significaba que los granitos que contenían los circones se habían erosionado, y que sus restos habían sido arrastrados, probablemente por un río, hasta quedar depositados en su desembocadura. Y aquí residía el interés de la noticia: los procesos deducidos (erosión, transporte, sedimentación) constituyen el triunvirato más clásico

• de acontecimientos geológicos. Para que puedan

pro ducirse hacen falta tierras emergidas (aunque sean de pequeña extensión) y océanos; descubrir la huella de estos procesos, que son triviales en la Tierra actual, fue todo un acontecimiento. La datación de estos humildes minerales (su tamaño medio rondaba un cuarto de milímetro) significaba también extender a las primeras tierras y los primeros mares una partida de nacimiento muy antigua, sólo unas decenas de millones de años después del origen de la propia Tierra. A su vez, unos mares tan antiguos proporcionan una base más creíble a las especulaciones sobre vida anterior a 3.500 millones de años.

La microsonda iónica ha podido también identificar la roca más antigua: es un gneis (una roca metamórfica, es decir, formada por la transformación a alta presión y temperatura de otra, en este caso un granito) del norte de Canadá, cuyos circones comenzaron a formarse hace 3.962 millones de años (el método es tan preciso que el error de la datación es de sólo ± 3 millones de años, o sea un 0,07%). Es aquí donde hemos encontrado por fin los restos directos de los primeros continentes. Sin embargo, las rocas de edad arcaica forman pequeñas manchas dispersas por todos los continentes. ¿Por qué hay tan poca corteza antigua?

BIO(; R A. ; In : LA U, R R

Como en la historia humana, las épocas más remotas también son las más difíciles de estudiar, y por los mismos motivos: los documentos han sido destruidos. En el caso de la historia humana, a los actos de barbarie, indiscriminada o intencionada, se han sumado los accidentes: las termitas, el fuego o las inundaciones son los grandes enemigos de nuestra memoria escrita. Para la historia de nuestro planeta, si se exceptúa el expolio de algunos yacimientos de fósiles, el vandalismo no es tan importante. Pero la Tierra misma es una eficaz planta recicladora que se alimenta de rocas para fabricar más rocas; a las variantes de reciclado llamamos también procesos geológicos. Dicho de otra forma, el depósito de combustible que aún queda en su interior está tan lleno que la Tierra sigue

siendo un planeta muy activo: las rocas antiguas son destruidas, o deformadas hasta volver se irreconocibles. Por ejemplo, las rocas sedimentarias cambian sus propiedades (v. gr., los fósiles desaparecen) cuando son sometidas a altas presiones y temperaturas; o una roca volcánica es desmenuzada por la acción del agua y los cambios térmicos.

Así que hay muy buenas razones para justificar la escasez de rocas antiguas. Sin embargo, para tratar esta cuestión en profundidad debemos retroceder hasta principios del siglo xx, cuando estaba naciendo la geología moderna.

UN PROFETA RECHAZADO

Nueva York, 1926. La Asociación Americana de Geólogos del Petróleo había convocado una reunión, reservada a los especialistas, sobre la deriva continental. La idea de

EN EL PRINCIPIO...

derivan como balsas de piedra a través de los océanos había sido lanzada por un tal Alfred Wegener. No sólo no era profesor universitario sino que era geólogo, y cuyo único logro había sido participar en dos expediciones a Groenlandia. Su libro *El origen de los continentes y océanos* que lo que le llevó a recolectar datos para su teoría fue una intuición que le sobrevino al mirar sobre un globo terráqueo los continentes de África y Suramérica. Esta idea fue rechazada por el mundo académico como una hipótesis no científica, todo científico clásico, que ordena la naturaleza de una forma absolutamente neutral hasta que sobreviene por sí solos una hipótesis.

Durante quince años perturbando la tranquilidad de los geólogos norteamericanos, que en su mayoría eran de la escuela de la deriva. Sin embargo, todos los grandes ya-

EN LA PRÁCTICA...

que los continentes derivan como balsas de piedra a través de los océanos había sido lanzada por un tal Alfred Wegener, un alemán que no sólo no era profesor universitario sino que ni siquiera era geólogo, y cuyo único logro destacado había sido participar en dos expediciones a Groenlandia. En su libro *El origen*

delos ccntinentesy oda nos confesaba además que lo que le llevó a recolectar datos para confirmar su teoría fue una intuición que le sobrevino al comprobar sobre un globo terráqueo 10 bien, que encajaban las costas de África y Suramérica. Esta metodología fue considerada por el mundo académico como una afrenta al método científico clásico, que ordena recopilar datos de forma absolutamente neutral hasta que éstos compongan por sí solos una hipótesis.

Su teoría llevaba quince años perturbando la tranquilidad de los geólogos norteamericanos, que en su mayoría la rechazaban. Sin embargo, todos los grandes va-

cimientos de petróleo en Norteamérica ya habían sido descubiertos. y los especialistas se planteaban empezar la prospección en el mar, Evidentemente, los supuestos de la búsqueda serían muy distintos según que los océanos fuesen permanentes o por el contrario fueran surgiendo y desapareciendo a medida que los continentes se desplazaban sobre ellos. Por esa razón fue convocado el simposio. Su moderador era un geólogo holandés de renombre imponente: Walther van Waischoor van der Graaf. Estas fueron sus palabras iniciales:

«No nos perdamos en detalles menores: no los resolveremos ni siquiera en varias generaciones. Intentemos en cambio aproximarnos en los principios importantes. ¿Es posible la deriva continental? ¿Existen pruebas de ella? ¿Dada una respuesta verosímil a los muchos problemas que hasta ahora no han sido explicados adecua-

aconsejable que, en la medida de lo posible, nos pusiésemos de acuerdo y no nos negásemos por más tiempo a considerar siquiera la idea de los desplazamientos continentales; creo que, si la tuviésemos en cuenta como una posibilidad seria, cooperaríamos mucho mejor en nuestra tarea común, que es resolver el problema de la evolución de la Tierra».

Pero estas constructivas palabras sólo fueron tenidas en cuenta por algunos de los ponentes. La mayoría, que incluía a profesores de las universidades más prestigiosas de Estados Unidos, rechazó rotundamente las ideas de Wegener.

Encontramos una muestra representativa de sus argumentos en el párrafo con el que Bailey Willis, profesor emérito de la universidad californiana de Stanford, cerró su alocución:

«Cuando consideramos la manera en la que se presenta la teoría encontramos: que el autor no ofrece pruebas directas de su verosimilitud; que las pruebas indirectas reunidas a partir de la geología, la paleontología y la geofísica nada prueban; que, al buscar los argumentos de estas ciencias conexas, se han seleccionado los que podrían apoyar la teoría mientras que se han ignorado los hechos y pruebas contrarios a ella. De esta forma, da la impresión de que el libro ha sido escrito más por un abogado que por un investigador imparcial. Pero importa muy poco lo que pensemos de esta teoría; el futuro la tratará con imparcialidad, de acuerdo con el principio de que la verdad sobrevive sin ayuda».

No es difícil adivinar una intención despectiva en esta última frase, que, sin embargo, se convirtió en una de las grandes verdades del simposio: el tiempo ---cuarenta años escasos- hizo justicia al meteorólogo alemán. Lo cierto es que bajo estas posturas defensivas se adivina el

, 1 1'111^\n(11'10 ...

miedo: si
Wegener tenía
razón, había que

olvidar casi toda la geología construida desde mediados del siglo XIX, y comenzar de cero!", y sin embargo, y a pesar de todas estas reticencias, pocas décadas más tarde las ciencias de la Tierra se reorganizaron en torno a la idea de los desplazamientos continentales. Alfred Wegener no pudo ser testigo de su triunfo, porque sólo cuatro años después de la reunión de Nueva York moría en su tercera expedición a Groenlandia, al perderse en el hielo al intentar llevar víveres a una estación aislada en el centro del casquete glaciar. Su epitafio reproduce un fragmento de un antiguo poema: «La materia pasa, las estirpes se suceden, tú mismo has muerto como ellas. Sólo conozco una cosa que no muere nunca: la memoria de una muerte gloriosa».

Y, SIN embargo, SE RUEVE

En 1964 se celebra en Londres un Congreso Internacional de Geología. El geofísico británico sir Edward Bullard demuestra el poder de una herramienta científica emergente: gracias a los ordenadores, su equipo ha podido comprobar la intuición de Wegener, al encajar matemáticamente los bordes de los continentes que rodean al océano Atlántico. Un ajuste casi perfecto, y un golpe de efecto mortal para la doctrina que defendía la inmovilidad de los continentes y los océanos.

„ En 1912, el geólogo norteamericano James Hall publicó su teoría de la deriva continental, en la que argumentaba que las montañas se formaban debido al levantamiento de sedimentos depositados en los bordes de los continentes. Aunque nadie podía nunca explicar el mecanismo de los levantamientos, la teoría del geosinclinal reinó sin oposición durante un siglo, hasta que fue destronada por la versión moderna de las ideas de Wegener.

51

Por su parte, persiguiendo el petróleo, los oceanógrafos han descubierto unos fondos marinos llenos de sorpresas. Las dorsales oceánicas son grandes desgarrones sumergidos, zonas donde se crea el propio fondo del mar, separando los continentes al hacerlo. Las misteriosas trincheras (o fosas) oceánicas parecen zonas donde se zambulle el fondo marino, que vuelve

al interior de la Tierra como una escalera mecánica que desaparece en el interior del mecanismo. Y hasta los terremotos cooperan, ya que permiten detectar movimientos a gran profundidad: los continentes y los fondos oceánicos sólo son pasajeros del movimiento global de la Tierra. Como una gran olla de caldo hirviendo, nuestro planeta se mueve para expulsar el calor que acumuló en su formación, y el que la radiactividad ha seguido produciendo después.

Sigue una época febril: entre diciembre de 1967 y septiembre de 1968, los descubrimientos se suceden y se publican a ritmo frenético, a veces semanal. La oposición cerrada de los geólogos norteamericanos de principios de siglo se ha convenido, curiosamente, en pasión por la deriva continental, porque esta revolución científica es esencialmente angloamericana.

Los grandes equipos de investigadores en geofísica y oceanografía en Inglaterra (la Universidad de Cambridge) y Estados Unidos (el Laboratorio Scripps en California, el Observatorio Lamont-Doherty en Nueva York, y la Universidad de Princeton, en Nueva Jersey) entablan una encarnizada lucha por ser los primeros en redefinir la geología. Se empieza a entrever un nuevo planeta dinámico, ni uno solo de cuyos átomos (desde las nubes hasta el mismo centro de la Tierra) tiene un momento de reposo. La teoría que explica este planeta redescubierto tiene

—),

EN EL INICIO...

al principio un nombre provisional: se la denomina nueva tectónica global, y poco después tectónica de placas, ya que su descubrimiento central es que la capa externa rígida del planeta (litosfera) se divide en placas que interactúan entre sí.

Años después, uno de los protagonistas de esta etapa crítica (William Menard, un oceanógrafo californiano) la describió en un libro que llamó *Los océanos de la verdad*. El título alude a la famosa frase que Isaac Newton pronunció poco antes de morir: «No sé qué pensarán de mí

los siglos posteriores: yo me veo a mí mismo como un niño que, jugando en la playa, se alegró al hallar una concha más bonita que las demás, mientras el océano de la verdad yacía ante mí sin que yo pudiese comprender¹²». Una confesión de humildad especialmente encomiable en una persona de habitual tan poco humilde como fue Newton. Tiene además este título una segunda connotación: los estudiosos de la Tierra habían intentado comprenderla analizando sólo los continentes, es decir, la tercera parte de la superficie del planeta, pero sin apenas conocer las zonas sumergidas. No es de extrañar que se equivocasen. Los océanos (aunque también el interior de la Tierra, revelado por las ondas sísmicas) pusieron al descubierto un planeta bien distinto del que habían defendido los adversarios de Alfred Wegener en Nueva York en 1926.

¹¹ Tectónica (del griego *tektonos*, constructor) es la rama de las ciencias de la Tierra que estudia los procesos de deformación de las rocas.

¹² En 1910, Carl Sagan volvió a utilizar la misma imagen en un capítulo de su obra *Cosmos* titulado " En la orilla del océano cósmico»: al comenzar a explorar su vecindad planetaria, el hombre actual acaba de mojar tímidamente la punta del pie en el agua de un océano del que desconoce casi todo.

R~f~lit' L. T IERRA

LA NUEVA
Tn:RR~

Como las
catedrales de la
Edad Media,
las grandes teo-
rías científicas
crecen a
impulsos, y
varían a veces

nota blemente (complicándolos, en general) sus diseños iniciales. La tectónica de placas es un buen ejemplo de este tipo de evolución, ya que su versión de los años sesenta difiere bastante de la actual; pero no nos detendremos en estos cambios, porque para un viajero del tiempo lo único interesante es comprender cómo funciona (o creemos que funciona) la Tierra actual, y así intentar luego explicar su historia.

Hablar del «funcionamiento» de la Tierra no es algo casual sino intencionado: forma parte de la tradición científica llamada mecanicismo, en la que se descompone un sistema complejo en sus partes fundamentales para entender las reglas por las que se rige. Desde este punto de vista, la Tierra puede compararse a un motor cuyo combustible es la energía depositada en su interior por los planetesimales que la formaron, más el calor desprendido por los elementos radiactivos. Todo el interior del planeta está, como adelantamos, en movimiento, y equivale por tanto a las bielas y pistones de un motor de explosión; las placas litosféricas (continentes + fondos oceánicos) son equiparables a las ruedas, las partes móviles visibles desde el exterior. Los terremotos son como el traqueteo de cualquier motor al moverse; éste no parece estar especialmente bien engrasado. Y evidentemente los volcanes deben ser el tubo, múltiple, de escape.

La Figura I ayuda a visualizar esta imagen. Tanto el núcleo metálico (fundido en su parte exterior) como el manto rocoso están animados por el movimiento llamado



1. La tectónica de placas. La corteza, tanto

continental (ligera y gruesa) como oceánica (densa y fina), forma con el manto más superficial la litosfera, la capa más rígida de la Tierra que se mueve sobre el interior fluido. Este es rocoso (manto) hasta los 2.900 km, y metálico (núcleo) desde allí hasta el centro.

convección: sus zonas más calientes se expanden y al hacerlo pierden densidad y suben; luego se enfrían, vuelven a hacerse densas y descenden. Aunque una olla de agua calentándose sea un buen ejemplo de convección, es importante recalcar que (salvo el núcleo externo) la Tierra es sólida. ¿Cómo puede fluir, si es sólida? Porque las altísimas presiones del interior (unos cuatro millones de atmósferas en el centro) hacen que sus materiales se comporten como fluidos¹¹. Este flujo en estado sólido se transmite a la litosfera, cuyas placas son como un

¹¹ Por la misma razón los asteroides tienen formas irregulares en su superficie: esféricas, como los planetas: la presión en su interior no es suficiente para hacer fluidos sus materiales. Los planetas y los litos grandes flotan en el espacio.



2. Las placas litosféricas actuales son: 1, Pacífica; 2, Norteamericana; 3, Suramericana; 4, Africana; 5, Eurasiática; 6, Indoaustraliana; 7, Antártica; 8, de Nazca; 9, Arábiga; 10, de Cocos; 11, Filipina. Las líneas gruesas son las dorsales oceánicas; las finas, fallas transformantes, las de triángulos, las zonas de subducción. Los números junto a flechas indican la velocidad de separación en centímetros al año.

rompecabezas (Figura 2), pero uno cuyas piezas varían de forma y de sitio con el tiempo: crecen, se rompen, se sueldan, son destruidas. Las interacciones entre las placas litosféricas constituyen la base de la geología actual, cuyos principales conceptos son:

- Los puntos calientes. Son columnas¹¹ de material a alta temperatura que, calentado por el núcleo, surge desde la base del manto (2.000 km). Cuando este material llega cerca de la superficie, y gracias al descenso de presión, se funde y provoca vulcanismo, tanto en los

¹¹ ..Pluma_ es una traducción incorrecta del inglés *plume*, que significa precisamente columna¹¹ (de humo, por ejemplo).

océanos (por ejemplo, las islas Hawai) como en los continentes (la meseta basáltica del Deccán, en la India). - La destrucción de litosfera. Sucede en las llamadas zonas de subducción (ver de nuevo la Figura 1). donde el fondo oceánico se hunde a través del manto, hasta el mismo núcleo, 2.900 kilómetros más abajo (por lo tanto, constituyen el «flujo de retorno» de los puntos calientes). Al descender, algunos minerales son comprimidos y su densidad aumenta. Este peso añadido actúa como un ancla sobre el resto de la placa, tirando de ella: por eso se mueven los continentes.

- Cadenas de montañas (orógenos, Figura 3). En la subducción se producen dos efectos: calor y compresión. El calor (que se debe a la fricción y a la propia compresión) se transmite hacia arriba, produciendo magmas, que llegan a la superficie (volcanes) o se solidifican hacia los diez o veinte kilómetros de profundidad (plutones). Al enfriarse los magmas, se forman rocas como andesitas (volcánica) y granitos (plutónica): unas y otras forman la corteza continental, de baja densidad. Además, la placa que subduce comprime el borde continental, deformándolo (pliegues, fallas) y engrosándolo. Al engrosarse, esta corteza ligera elevará su línea de flexión: por eso se levantan las montañas, algo que nunca pudo explicar la teoría del geosinclinal. Sin embargo, el máximo levantamiento de las montañas se produce cuando otro continente llega a la zona de subducción. El choque de los dos continentes produce un orógeno de colisión (Figura 3c), como el Himalaya o los Pirineos,

- Dorsales oceánicas, Son los relieves sumarios descubiertos en los años sesenta, y las zonas más jóvenes de los océanos. Grandes fallas se abren en el fondo oceánico a medida que las placas son arrastradas por la sub

O

3. La subducción genera cadenas de montañas: (a) es un orógeno de borde, formado por subducción del fondo oceánico bajo un continente. Sobre la corteza oceánica viajan «terrenos» (como un arco de islas, por ejemplo) que chocan (b) contra el continente. Cuando lo que llega a la zona de subducción es un continente, la menor densidad de su corteza le impide subducir, por lo que se empotra contra el otro continente, formando un orógeno de colisión (c).

ducción . Por estas grietas (también denominadas con la palabra inglesa *rifts*) surge material fundido del interior: a veces proviene de puntos calientes, y otras se forma a causa de la propia descompresión que produce la fractura . En conjunto, las dorsales son zonas de creación de litosfera, que compensa a la que se destruye en la subducción.

LXS PRUEBAS A FAVOR DE LA NUEVA TIERRA

Algunas de las pruebas que se esgrimen para demostrar la realidad de la tectónica de placas son las mismas que propuso Wegener: por ejemplo, el encaje de los continentes. Este no es tan sólo una cuestión de geometría, ya que también las estructuras geológicas (como los orógenos) continúan a uno y otro lado de los océanos, como las tarjetas de visita rotas que sirven de contraseña en las películas de espías. También los fósiles que hallamos en continentes hoy muy separados sirven como testigos de su unión. La mayoría de los argumentos a favor de esta teoría, sin embargo, son nuevos:

- Distribución de los sedimentos oceánicos. Las dorsales, el lugar donde teóricamente se crea corteza oceánica, no están cubiertas por sedimentos, lo que confirma su juventud. En cambio, en las zonas de subducción, enormes masas de sedimentos se resisten (a causa de su baja densidad) a ser subducidas, y se adosan al continente, deformándose y mezclándose con rocas del manto y con otras volcánicas del fondo oceánico. El conjunto se denomina prisma de acreción. Las ofiolitas son prismas de acreción antiguos, incorporados ya a los continentes.
- Edad de la corteza oceánica. Confrontando lo anterior, se han podido medir las edades máximas de la corteza

reza oceánica en los lugares más lejanos a las dorsales, y edades menores de un millón de años en éstas. Las edades máximas son, además, de sólo unos 180 millones de años, lo que significa que únicamente el 7% de la historia de la Tierra está registrado en los océanos. Así pues, el fondo oceánico se renueva, como predice la teoría,

- **Bandeado magnético.** Al formarse, los minerales de hierro se magnetizan, como pequeñas brújulas, en la dirección del campo terrestre. Las rocas volcánicas del fondo oceánico, que contienen estos minerales, tienen la curiosa propiedad de presentar bandas alternantes paralelas a las dorsales, con máximos y mínimos de magnetismo. La explicación es que el fondo oceánico, al formarse en las dorsales, adquiere la magnetización del campo terrestre, que (por causas aún desconocidas) cambia de polaridad cada cierto tiempo". Por eso, si medimos el campo magnético actual junto a una roca de igual polaridad, los dos se sumarán y tendremos un máximo; en caso contrario, se restarán y habrá un mínimo. El fondo oceánico se ha comparado a un código de barras, un registro en código binario (norte/sur) de dos historias distintas: la del campo magnético y la de la evolución de las cuencas oceánicas.

- **Paleomagnetismo.** En el momento de su formación, cada pequeña brújula marca la dirección de los polos magnéticos. Ahora supongamos que un continente se rompe en varios más pequeños; cada fragmento seguirá un camino distinto (alguno puede girar, por ejemplo), lo que desorientará las pequeñas brújulas fósiles. En cada momento de la historia parecerá que había tantos polos

1. Si el viajero del tiempo hubiese llegado a la Tierra hace un millón de años, su brújula hubiese apuntado hacia el sur.

(J)

Norte magnéticos como continentes. A no ser que se proponga un campo magnético con docenas de polos Norte (y otros tantos Sur, claro), hay que aceptar el mo

vimiento de los continentes.

- Anomalías paleoclimáticas. Glaciares en el Sáhara, sales (clima árido y cálido) en el norte de Canadá... Las rocas que están donde no deben solamente pueden entenderse si aceptamos que los continentes han movido.

Por último, hoy disponemos de la prueba definitiva, que Wegener buscó pero no pudo conseguir por falta de tecnología adecuada: la medición directa de los movimientos continentales. Valiéndose de satélites especiales que reflejan la luz de proyectores láser, los científicos han medido los desfases de las ondas causados por los movimientos de las placas litosféricas. Los primeros resultados se obtuvieron en 1990, y supusieron una confirmación espectacular de las predicciones de la teoría. Desde entonces, se puede decir que la tectónica de placas ha sido confirmada con una garantía estadística del 95%, que es el porcentaje medio de coincidencia de las mediciones.

Este punto es el adecuado para una pequeña reflexión sobre las diferencias entre la vieja y la nueva geología. La teoría del geosinclinal dominó esta ciencia durante más de un siglo (exactamente de 1859 a 1964) a pesar de no poder responder a cuestiones tan básicas como el origen de las cadenas de montañas. En cambio, tan solo pasaron 20 años entre la definición de la tectónica de placas y su confirmación cuantitativa. La gran diferencia es que esta última teoría hacía predicciones numéricas: tal continente se movería en tal sentido, y lo haría a determinada velocidad. Naturalmente, estas predicciones eran extrapolaciones de lo que los

(, 1

BIOGEOGRÁFICA LITIGACIÓN

geo físicos habían averiguado sobre el pasado del planeta. De este matrimonio entre geología y física surgió la nueva Tierra.

Repitamos ahora la pregunta que nos hacíamos en el apartado «La Tierra comienza a escribir su diario de viaje», pero con una pequeña variación: ¿por qué hay tan poca corteza arcaica? Además de los conocidos procesos de reciclaje de rocas, ¿podría ser que la corteza creada en la primera mitad de la historia de la Tierra hubiese sido también destruida por subducción? Hace pocos años, es la última pregunta no sólo no podía responderse, sino que además carecía de sentido. En la tectónica de placas clásica, la corteza continental, a causa de su baja densidad, no subduce; sin embargo, cada vez hay más indicios de corteza continental cuyos minerales de alta presión indican que ha «bajado a los infiernos» (o más bien al Purgatorio, ya que ha vuelto a la superficie). Aunque es la corteza oceánica la que experimenta sistemáticamente subducción, fragmentos de la continental también pueden ser arrastrados. En todo caso, ¿había tectónica de placas en el Arcaico?

Euan Nisbet, un pastor de la Iglesia presbiteriana que es además uno de los grandes especialistas en el eón más antiguo, escribía en 1985, sin duda recordando la *terra incognita* de los mapas renacentistas, decorada con dragones, que «mientras que los tiempos recientes [los últimos 600 millones de años] son el territorio de la tectónica de placas, en el Arcaico subsiste aún una malsana fauna de bestias fabulosas que se esconden de la luz

de la nueva geología». Veamos cuáles son las diferencias (también hay algún parecido) entre la Tierra arcaica y la actual:

- Una atmósfera distinta, sin oxígeno libre (aunque

tampoco reductora) pero que generaba un efecto invernal muy superior al actual y que compensaba la debilidad inicial del Sol.

- Una hidrosfera moderadamente más cálida que la actual (30-60 °C), y medio ácido. Eso podría explicar la ausencia de calizas,

- c-Una Tierra que conservaba aún mucho del calor inicial. Esto significaría un manto más caliente que ahora, y por lo tanto más fluido: la circulación convectiva sería más rápida. Significaría también magmas más calientes que los modernos. Unas lavas ricas en magnesio que sólo existen en el Arcaico, las komatiitas, tienen minerales que indican que fueron emitidas a 1.600 °C. Las lavas basálticas, las más comunes en la Tierra actual, sólo alcanzan los 1.200 °C.

Las formaciones más típicas de la corteza continental arcaica eran conjuntos de rocas volcánicas y sedimentarias no muy metamorfozadas, que formaban bandas llamadas «cinturones de rocas verdes» (por el mineral clorita, de este color, que se forma en el metamorfismo ligero).

Había también enormes cantidades de minerales de hierro: de hecho, ésta es la fuente de casi todo el hierro que explotamos. Son las formaciones bandeadas de

Las rocas sedimentarias formadas sobre todo por el mineral calcita, de fórmula carbonato cálcico (CaCO_3). En la Tierra actual, la mayoría de las calizas se deposita por influencia de los seres vivos. En medio ácido se disuelven, en medio básico se precipitan.

hierro, llamadas así porque este elemento, en forma de óxidos, alterna con sedimentos ricos en sílice. Estas formaciones se generaron en volcanes submarinos profundos pero se depositaron como sedimentos en plataformas continentales, o sea en fondos marinos someros.

Su interés científico (que se suma al económico) reside en que reflejan una atmósfera y una hidrosfera sin oxígeno libre. El razonamiento es el siguiente: si el agua de los mares arcaicos hubiese contenido oxígeno disuelto, el hierro (que tiene una fuerte tendencia a formar óxidos) se hubiese combinado con él nada más surgir de los volcanes, para depositarse después sobre la corteza oceánica. Por el contrario, si pudo llegar disuelto a las plataformas continentales es porque en el mar profundo (y, por extensión, en el resto de los mares y en la atmósfera) no había oxígeno con el que combinarse. En las plataformas continentales, el hierro disuelto se encontró con bacterias fotosintéticas (fossilizadas a veces en las capas de sílice) que le cedieron el oxígeno que segregaban: esta precipitación masiva constituyó los actuales yacimientos.

Esto es lo que los especialistas en fabulosas bestias arcaicas han podido reconstruir en una primera aproximación. Dibujado el cuadro general, acerquémonos a ver algún detalle de interés. Probablemente el mejor lugar del mundo para esta inspección sea el distrito de Isua, en Groenlandia, un cinturón de rocas verdes que contiene rocas volcánicas y sedimentarias y que, por la excelente conservación de sus afloramientos, algunos geólogos han llamado «el paraíso arcaico». Allí, en el extremo de una isla frente a la costa, aflora un nivel de hierro bandeado de unos tres metros de espesor cuya edad es superior a 3.850 millones de años. Otras rocas cerca-

F" 11 11.1KUTU 1...

nas parecen rutilantes, es decir, sedimentos depositados por corrientes de turbidez, avalanchas densas de partículas que descienden por el fondo oceánico hasta las llanuras abisales. La existencia de sedimentos profundos alternando con rocas volcánicas ha llevado a diversos investigadores (por ejemplo, el groenlandés Jón Rosing, del Museo Geológico de Copenhague) a proponer que estas rocas forman parte de una ofiolita, es decir, un antiguo prisma de acreción.

Recordemos que un prisma de acreción se forma por aplastamiento contra el borde continental de parte de las rocas de una placa litosférica que ha llegado hasta una zona de subducción. La conclusión es que en la Tierra existían placas litosféricas que subducían hace unos 3.900 millones de años. Es decir, tectónica de placas. ¿Exactamente igual que la actual? Hasta hace unos pocos años se solía decir que las placas litosféricas del Arcaico tenían que ser más plásticas que las

Ochoy, como consecuencia del mayor flujo térmico. Sin embargo, la existencia de diques y de grandes fallas (datos ambos que implican rigidez de la corteza) de edad arcaica ha convencido a la mayoría de científicos de que esta tectónica de placas inicial era idéntica a la presente. Además, en Isua se han descubierto rocas de hasta siete edades distintas entre 3.900 y 3.600 millones de años, lo que se ha interpretado como una serie de choques de arcos insulares contra el borde continental (como los ilustrados en la Figura 3). Hoy se piensa que los cinturones de rocas verdes representan los arcos de islas del Arcaico.

Suráfrica y Australia completan con Groenlandia la trilogía de los paraísos arcaicos. Dos paraísos lejanos... en la actualidad. Según una arriesgada hipótesis propuesta a principios de la década de los noventa por Alfred Kroner, un científico de la Universidad de Jülich (Alemania), las curvas paleomagnéticas de las zonas más antiguas de los dos continentes (Kaapvaal, en Suráfrica, y Pilbara, en Australia) coinciden durante casi todo el Arcaico, de lo que dedujo que las dos regiones fueron una sola durante buena parte de este eón. Investigaciones posteriores han apoyado esta idea. El supuesto continente de Vaalbara (nombre formado con una sílaba de la primera región y dos de la segunda) habría existido entre 3.600 y 2.700 millones de años, lo que lo convertiría en el continente más antiguo reconstruido. Sin embargo, un dato discordante ha surgido de esta hipótesis: puesto que las curvas paleomagnéticas permiten averiguar las distancias recorridas por los continentes, una simple división por el tiempo empleado en el viaje (que obtendremos de la edad de las rocas) permitirá deducir la velocidad de cruce. Kroner ha

calculado así que VaalBara viajó a una velocidad media de 1,7 cm/año, se me parece a la velocidad a la que se abre el Atlántico en la actualidad, y que contradice la teoría según la cual en el Arcaico los movimientos del manto debían ser más rápidos que los actuales y, por lo tanto, mayor la velocidad de las placas. Es evidente que este problema tiene varias soluciones sencillas: o bien los continentes no viajaron en línea recta, o bien pudieron detenerse a descansar en el camino.

Proyectos internacionales en marcha intentarán resolver estos últimos monstruos de la selva arcaica. Entre otras cuestiones aún sin precisar están las siguientes: ¿Representan todos los cinturones de rocas verdes arcos insulares, o hay variantes significativas? ¿En qué tipo de corteza se depositaron los primeros sedimentos? ¿Cuál

E:; n 1' 11 1'1 IPh 1 ..•

era la
composición
del ambiente de
mar hace
4.000 millones
de años: ¿En
qué
condiciones se
formaron las
komatiitas?
¿Podemos
esperar
encontrar
granitos de
4.400 millones
de años, como
los circones de
Australia? Y
una especial



mente intrigante : ¿Por qué no encontramos brechas de impacto entre las rocas de más de 3.800 millones de años? En efecto , todas las rocas lunares de esta edad llevan las cicatrices del gran bombardeo terminal. ¿Por qué no las terrestres? ¿Quizá no son representativas, () de alguna forma fueron protegidas de las colisiones? ¿O tal vez hay algo equivocado en nuestras reconstrucciones?

El estudio de estas cuestiones se enmarca en un método de trabajo muy específico de la geología. que es el actualismo. El actualismo nos permite deducir las condiciones del pasado a partir de comparaciones con el presente: por ejemplo, deducimos que las rocas de Isua son una ofiolita por comparación con los prismas de acreción actuales. Pero los procesos que no permiten comparaciones por no suceder ya en la Tierra actual quedan fuera del dominio del actualismo. Hoy no se forman ko-

- manitas, ni hay una densa atmósfera de

CO₂, ni chocan planetas contra la Tierra . ¿Con qué bases podemos entonces reconstruir el pasado, tanto el semejante al presente como el distinto de él? Lo haremos con una mezcla de actualismo y extrapolaciones osadas, algunas de las cuales caen de lleno en una metodología que ha sido duramente criticada en todos los libros clásicos de geología: el catastrofismo, teoría que intentaba explicar los procesos geológicos como sucesos en los que se liberaban cantidades ingentes de energía. Algunas propuestas catastrofistas (como el hundimiento de continentes enteros) han pasado a la selva fabulosa de Nisbet, pero

Hiragana (Hiragana) F U T I
tKK"

otras, como
las
colisiones, se

han convertido en elementos respetables de la geología. De todas las cuestiones pendientes sobre este primer acto de la historia del planeta destacaremos, por sus muchas implicaciones, la aparente tranquilidad cósmica de las primeras rocas: su carencia de huellas de impactos afecta a un tema tan crítico para unos seres vivos pensantes como es el origen mismo de la vida.

A PESAR DE TODO, LA VIDA ASO.

El origen de la vida en la Tierra es quizá el más interdisciplinar de los temas científicos, ya que, además de la propia biología y su rama bioquímica, interesa a la astronomía y a la geología, sin olvidarnos de la filosofía. Pero lo que lo convierte en uno de los más arduos problemas de la ciencia moderna no es su carácter de misterioso, sino su lejanía en el tiempo y su categoría de hecho único. Esto último, un problema común en las ciencias de la Tierra, queda de relieve cuando nos preguntamos, por ejemplo, si las proteínas, o el carbono mismo, son imprescindibles para la vida, o tan sólo son las variantes elegidas (de entre muchas posibles) por la vida en este planeta. Más enigmática aún es la posibilidad de que existan otros sistemas de transmitir información distintos a los ácidos nucleicos¹¹, el código genético que el hombre comparte con los mirlos, los álamos y las bacterias.

¹¹ Las moleculas producidas por los seres vivos, que contienen los mecanismos de la herencia, y las instrucciones para producir proteínas. Se llaman así por concentrarse en el núcleo de la célula.

Algo parecido sucede con el intervalo de tiempo necesario para que lo vivo aparezca en un planeta (por cierto. ¿es imprescindible un planeta?): no sabemos si el apareamiento con el que se aposentó la vida en la Tierra es un rasgo casual o necesario. La ciencia moderna está poniendo cerco a esta cuestión

fundamental, pero es importante evitar pensar que nuestro planeta es el modelo biológico universal. Por ejemplo, en un artículo reciente, Christopher McKay, un especialista en la búsqueda de vida en Marte, planteaba los siguientes requisitos mínimos para la vida:

- Una fuente de energía, normalmente luz solar. - Carbono.
- Agua líquida.
- Algunos otros elementos, como nitrógeno, fósforo o azufre.

Es evidente que con estas premisas difícilmente se podrá encontrar en Marte una vida que no sea exactamente igual que la terrestre. El tiempo dirá si estas búsquedas geocéntricas tienen o no sentido. Lo que parece claro es que no podremos despejar nuestras dudas hasta que no encontremos otra biosfera. Si alguna vez creemos haberlo conseguido. ¿cómo sabremos que estamos ante un sistema vivo? Definiciones como la de Francis Crick, uno de los descubridores del ADN (ella vida parece ser casi un milagro, tantas son las condiciones que debieron cumplirse para ponerla en marcha»), no son realmente muy útiles, salvo para valorar la dificultad de la tarea. Otras, como «La vida es información [contenida en los ácidos nucleicos] replicable [mediante proteínas] al abrigo de una membrana», aunque son ultraprecisas, no nos ayudarían mucho en la búsqueda porque, ¿cómo saber, por ejemplo, el tiempo típico de replicación? Un explorador



espacial podría quedarse perplejo durante años ante un **liquen alienígena**. Una tercera posibilidad, «La vida es desequilibrio, e imprime en el ambiente las huellas de ese desequilibrio». del belga Christian de Duve, resulta **mejor sin duda: por lo menos ya sabemos que debemos buscar moléculas complejas o concentraciones anómalas de elementos o de sus isótopos**. Así estamos reconstruyendo la vida en el principio de la Tierra, y así nos preparamos para buscarla en otros mundos. Esta fortaleza formidable se puede asaltar por dos vías: el laboratorio y la Naturaleza. El punto de partida inevitable de la vía experimental es el ya comentado - ¹⁸, y famoso, ensayo de Stanley Miller, que, aunque impecable desde el punto de vista de su diseño, estaba basado en unas ideas erróneas sobre la composición de la protoatmósfera; sin duda merece quedar registrado en la historia de la ciencia, pero siempre que se aclare que sus supuestos entran en contradicción con las hipótesis actuales sobre la Tierra primitiva. Como advertía el propio Miller, si se repite el experimento empleando los gases que creemos que formaban la protoatmósfera (CO₂, N₂, H₂O) no se forma ningún aminoácido. Sin embargo, todo el mundo está de acuerdo en que no podemos sintetizar proteínas, las factorías de la materia orgánica, sin aminoácidos; lo que nos conduce a una difícil situación, para la cual, afortunadamente, se ha encontrado una elegante respuesta que veremos en el apartado siguiente.

Además de este problema básico, la síntesis de aminoácidos que consiguió Miller en 1953 se ha revelado, medio siglo después, como un callejón sin salida: los

¹⁸ En el artículo «Arqueólogos de la atmósfera».

experimentalistas no han podido sintetizar ni proteínas de estructura típica ni ácidos nucleicos, los pasos obli gados en la tarea de reconstruir vida en el laboratorio. De hecho, esta vía ha dejado prácticamente de mencio narse en la li teratura especializada, a pesar de lo cual Miller sigue protagonizando todos los debates sobre el tema. Algunos autores han apuntado que, sin conocer el ambiente en el que la Naturaleza llevó a cabo esta operación. el método experimental está condenado ne cesariamente al fracaso. Por ejemplo, la síntesis de vida pudo requerir condiciones especiales, como algún cata lizador específico (se han propuesto varios tipos de mi nerales, como son las arcillas, la piritita o la galena). Sin más que intuiciones sobre estos detalles, qui z á esencia les, intentar dar con la receta de la vida puede parecer se a la búsqueda de la piedra filosofal: una tarea imposi ble porque no se comprende el sistema que se trata de reproducir.

Esto nos lleva directamente al segundo enfoque: la búsqueda de las hue llas de la vida en los escenarios donde se origin ó. En los últimos año s, ayudados por la tecnología SH RIJ,1 P, los científicos han conseguido remontarse de forma espectacular en el tiempo. Sin em bargo, no han logrado retroceder lo sufi ciente río arri ba como para ser testigos del nacimiento de la biosfera: las rocas más antiguas encontradas están marcadas ya por la huell a de la vida. El año 1975 es una fecha clave en esta búsqueda. Manfred Schidlowski, un bioquím i co de l Instituto Max Planck, en Alemania , anu nciaba un descubrimiento sorprendente: los análisis de isóto pos de carbono de las rocas de Isua, en Groenlandia. reflejaban un exceso del isótopo ligero (Figura -1) que es típico de los sedimentos donde ha habido actividad

0
-10
-20
-30
-40
-50



ACTUALIDAD

-J. Distribución isotópica del carbono inorgánico y del carbono de origen biológico que se producen en la actualidad, comparadas con la de las formaciones de hierro bandeado de Isua (la línea gruesa es la media), El empobrecimiento de estas últimas en carbono 13 solapa claramente con los del carbono actual de origen biológico. Simplificado de Mojzsis et al., *Nature*, 383-386, 1992.

orgánica". Parecían las huellas dactilares de la vida. Pero, ¿lo eran realmente? El anuncio fue recibido con escepticismo: ¿vida reflejada en rocas de más de 3.800 millones

El carbono de origen biológico es menos reactivo que el geológico (lo que puede demostrarse en que, a pesar de requerir más energía para ser movilizado); por tanto, los seres vivos, al asimilarse preferentemente el último, hacen que la actividad biológica en las rocas enriquecidas en carbono 12. Por consiguiente, este dato se expresa en términos de empobrecimiento en el carbono 13 (variaciones de $\delta^{13}C$ negativas); sin embargo, existe una continua fuente de confusión en lo que respecta a esta expresión, ya que a veces el empobrecimiento en carbono 13 se refiere al sistema completo (y entonces las variaciones negativas de $\delta^{13}C$ indican actividad biológica), pero otras veces (como en el caso de la Tierra moderna, que veremos en el capítulo siguiente) se refiere a los sedimentos de una época en general. Supongamos un tiempo muy lejano en el que la actividad biológica es insignificante y el carbono 13 se acumula en la materia orgánica (y entonces las variaciones negativas de $\delta^{13}C$ indican actividad biológica), pero otras veces (como en el caso de la Tierra moderna, que veremos en el capítulo siguiente) se refiere a los sedimentos de una época en general. Supongamos un tiempo muy lejano en el que la actividad biológica es insignificante y el carbono 13 se acumula en la materia orgánica (y entonces las variaciones negativas de $\delta^{13}C$ indican actividad biológica), pero otras veces (como en el caso de la Tierra moderna, que veremos en el capítulo siguiente) se refiere a los sedimentos de una época en general.

na. 1; rid. 11

de años, y que (en ese momento) son las más antiguas de la Tierra? La casualidad parecía increíble. Los fósiles más antiguos no pasan de 3.500 millones de años, y no existen otros restos hasta los 2.500 millones de años. Paralelamente, William Schopf un micropaleontólogo de la Universidad de California, que es la gran autoridad mundial en los fósiles más antiguos, estaba preparando un catálogo con las falsas alarmas sobre fósiles arcaicos, que llamó despectivamente «dubiofósiles...», microfósiles dudosos. El ambiente era el peor posible, y el mismo Schidlowski no tuvo más remedio que reconocer que las rocas estaban muy alteradas por el metamorfismo; aun así, seguía defendiendo que sólo la actividad de seres vivos podía provocar un empobrecimiento tan marcado en carbono $\delta^{13}C$. Sin embargo, Schopf ganó: oficialmente, la vida siguió comenzando hace 3.500 millones de años.

Veintiún años después, en Orleans, Francia, Stephen Mojzsis, un joven doctor (como Hartmann, como Miller antes), anunció nuevos datos de empobrecimiento de carbono pesado en grafito (un mineral de carbón) en rocas de Groenlandia todavía un poco más antiguas, cercanas a 3.900 millones de años. Schopf vio que peligraba su récord mundial, y se mantuvo incrédulo: «... es un trabajo muy interesante, pero creo que deberíamos reservar un juicio más sólido hasta que tengamos más experiencia con esta técnica...». Se refería a SHRIMP, la técnica que ya llevaba años revolucionando la ciencia de medir edades. A pesar de las protestas, Mojzsis ganó la batalla: las posibles alternativas para explicar la anomalía isotópica fueron descartadas una a una, y su análisis le permitió caracterizar la asociación biológica conservada en la roca como un conjunto complejo de bacterias,

algunas fotosintetizadoras. El 7 de noviembre de 1996, *Nature*, la revista científica más leída del mundo, ilustra su portada con los gráficos de Groenlandia y un gran titular: «Las huellas más antiguas de vida en la Tierra». En 1999, el groenlandés Minik Rosing confirma nuevas anomalías y declara tajante: «Hace 3.900 millones de años, la vida ya había tomado el timón».

¿EN LA PLAYA, O EN EL FONDO DEL MAR?

En el párrafo final de *El origen de las especies*, Charles Darwin hizo una suprema concesión al espíritu religioso de la época y afirmó: «Hay grandeza en esta idea de que la vida [...] fue originalmente alentada por el Creador en contadas formas, o acaso en una sola». Sabemos que no era realmente sincero porque poco después, en una carta a su amigo John Hooker que se ha hecho tan famosa como su obra capital, dejaba el origen de la vida no en manos de Dios sino de la química: «La vida podría haber surgido en una charca templada *fo tcarm littlepontfJ*, con toda clase de sales de amonio y fósforo. luz, calor, electricidad, etcétera». Una charca en la llanura interna real de un mar arcaico caliente ha sido la versión moderna de la charca templada de Darwin. Esta idea ha sobrevivido un siglo casi exacto (desde 1871 hasta la década de 1970) como el lugar ideal para el origen de la vida, y aún sigue siendo uno de los ambientes que se proponen; sin embargo, ha sido superado por otras posibilidades. Actualmente, la mayoría de los especialistas prefieren pensar en ambientes de alta temperatura, aunque también se han propuesto medios fríos, como lagos subterráneos bajo los glaciares. Las alternativas *vivos* para el origen de

.. H I RE:\UPIO. ""

la vida son tres: las llanuras intermareales, los sistemas hidrotermales (someros o profundos) y el origen extra terrestre (panspermia).

La primera hipótesis se basa en que la evaporación concentraría los productos químicos aportados por el mar, facilitando las reacciones prebióticas (pre-biológicas); en marea alta, los productos de las síntesis se dispersarían. Los inconvenientes son dos: por una parte, la protoatmósfera no parece haber sido, como vimos, muy propicia para las síntesis de especies químicas que acabarían originando vida. El otro inconveniente es que un sistema que se abre a diario no es idóneo para mantener una concentración alta durante tiempos largos.

Si actualmente se llevase a cabo una votación entre los especialistas para designar el ambiente favorito como cuna de la vida, la ganadora sería sin duda una chimenea hidrotermal. Varios factores han confluído para colocar esta idea, relativamente nueva, en el centro de la escena. El primero fue el descubrimiento, en los años setenta y por medio de sumergibles de investigación, de comunidades de seres vivos en torno a sistemas de evacuación de agua hasta a 400 °C (en profundidad, debido a la alta presión, el agua hierve por encima de 100 °C). que se escapa de cámaras magmáticas en las dorsales oceánicas, Se constató que se trataba del único ecosistema terrestre que no dependía de la energía solar", y que, por tanto, tampoco dependía de

Esta no es totalmente cierta, ya que algunas bacterias de estos ambientes obtienen energía oxidando gases (que proceden de una cámara magmática, por ejemplo H₂S) con oxígeno que fue producido mediante ϕ (un proceso que sí requiere energía solar) por organismos superficiales, como la *algas*. Otros microorganismos, en cambio, viven dentro de H₂O y H₂ con azufre (ambos de origen volcánico). en este caso sí tendrían una independencia energética absoluta respecto al Sol.



la composición de la atmósfera, ya que podía funcionar con independencia de los acontecimientos de la superficie. Y aquí se encontró por fin la salida al laberinto de Miller: aunque la composición de la protoatmósfera no fuese reductora, emisiones de gases reductores de origen volcánico podían crear (por ejemplo, en cavidades cerradas en rocas volcánicas, o incluso en el interior de minerales, como las arcillas) microambientes en los que las síntesis (de aminoácidos y posteriores) pudiesen llevarse a cabo.

El segundo hallazgo que contribuyó a realzar el papel de las chimeneas hidrotermales fue la reorganización, en 1981, del *árbol de la vida* (Figura 5). Se cayó entonces en la cuenta de un hecho sorprendente: todas las encrucijadas situadas cerca de las raíces (es decir, las líneas más primitivas) estaban ocupadas por organismos que viven a temperaturas entre 80 y 110 °C: son los llamados hipertermófilos. Aunque no todos los microbiólogos están convencidos, este hecho podría implicar que el ancestro (o, más bien, la población ancestral) común a toda la vida se sentiría a sus anchas cerca de una chimenea hidrotermal. Aquí surgen dos posibilidades, a cual más interesante, que Euan Nisbet (quien al fin y al cabo no puede negar su condición eclesiástica) llama, respectivamente y con sentido bíblico del humor, «Edén hipertermófilo» y «Arca de Noé hipertermófila». El paraíso hipertermófilo podría ser de tipo volcánico (como las chimeneas actuales), o bien caldeado por impactos asteroidales. El modelo del Arca se produciría si un impacto elevase la temperatura de la hidrosfera, aunque sin vaporizarla, de forma que sólo sobreviviesen los termófilos.

Un tercer argumento a favor de un origen de la vida a alta temperatura es la presencia en muchos orga

Al gas

Hip. rt . , , ,ófí los

. to ~ Q9: os



.1 , El jirhol genealc')gico de los seres vivos. Las rama s procarioru

y arquea, formada s por organismos uni celulares de células sin nú clco, se clasificaban como una **sola** hasta ¡t!)S. Lis arqueas están, sorprendentemente. m.is próximas a los seres complejos (cucario t ;IS, seres nn i o pluricelulares forma dos por células con núcleo) que a Lis bacterias. Las líneas de trazos indican las simbiosis media nte las que muchas bacteria s se convi rticnm en órganos internos de los organismos complejos (los cucariotas), un proceso que se detall a en el capítulo segundo,

nismos primitivos de las llamadas proteínas de choque térmico, que (entre otros muchos usos) sirven para proteger a sus poseedores de los cambios bruscos de temperatura. ¿Para qué necesitaría proteínas así una bacteria que viviese en un charco marca l? Estas moléculas, en cambio} podrían ser muy útiles como herramientas de



reparación de daños bioquímicos en hipertermófilos que viviesen alrededor de chimeneas volcánicas, a los que cambios en el flujo de las corrientes podrían exponer a

rápida s fluctuaciones de temperatura.

No resulta muy sorprendente que Stanley J. Miller no esté en absoluto de acuerdo con un origen hidrotermal de la vida. Objeta que las dorsales oceánicas son sistemas muy inestables. En efecto, los valles de *rift* en los fondos oceánicos actuales se activan y se desactivan de nuevo (para abrirse en otro lugar) con intervalos de pocos millones de años: una chimenea concreta no duraría mucho más de 100.000 años, un tiempo insuficiente para las síntesis prebióticas. Además, temperaturas demasiado altas desestabilizan las proteínas. Su dictamen final es la pida y no del todo académico: «Basura». Nisbet trata: en torno a cada chimenea existiría un gradiente de temperaturas, de forma que los hipertermófilos podrían elegir su rango favorito, de 80 a 110 °C. En cuanto a la inestabilidad de los sistemas, apunta dos posibles respuestas: o bien la evolución prebiótica es más rápida de lo que pensamos, o bien las comunidades hipertermófilas son capaces de desplazarse, colonizando los nuevos sistemas hidrotermales a medida que se forman. Esta capacidad migratoria sería una evidente ventaja cuando los hipertermófilos evolucionasen para poder abandonar los sistemas hidrotermales y colonizar los océanos. Pero eso aún requerirá algunos ajustes importantes en la

maquina.

Este discutido mundo hidrotérmico contiene un mensaje de fuerte carga simbólica: esta conexión entre el interior y la superficie puede representar a la madre Tierra alimentando a su primera prole con calor y nutrientes. Después, el Sol tomará el relevo.

Los ácidos nucleicos contienen las instrucciones para fabricar proteínas. En tipo de proteínas, las enzimas, son necesarias para producir ácidos nucleicos. De forma que ni los ácidos nucleicos ni las proteínas pueden existir por sí mismos.

Entonces, ¿cómo aparecieron en la célula estos dos tipos de moléculas? Aparentemente, la única solución posible (aunque inverosímil) a este enigma es que unos y otras surgiesen al mismo tiempo. Este problema del huevo y la gallina complicó aún más, si cabe, la vía experimental hacia el origen de la vida, una vía que se atascó en la síntesis de proteínas pero que, incluso si hubiese tenido éxito, no hubiese resuelto nada, ya que, por sí solas, las proteínas no son otra cosa que moléculas complejas, sin ninguna capacidad para reproducirse.

A finales de la década de 1960, y de forma independiente, varios bioquímicos consiguieron resolver este dilema. Uno de ellos, el británico Leslie Orgel, cuenta su razonamiento:

«Propusimos que el ácido ribonucleico [ARN, una molécula gigante parecida al ADN pero de hélice sencilla] habría aparecido primero, estableciendo lo que ahora se llama "mundo de ARN". Se ría un sistema en el que el ARN catalizaría todas las reacciones necesarias para que el primer ser vivo se alimentase y se reprodujese: esto implicaba la capacidad de producir proteínas, que podría haberse desarrollado siempre que el ARN estuviese dotado de dos propiedades que entonces no eran evidentes: la de duplicarse sin la ayuda de proteínas, y la de catalizar todos los pasos de la síntesis de las proteínas. Si propusimos el ARN fue porque es una molécula más sencilla que el ADN, y también porque no



era difícil imaginar mecanismos en los que el ADN podía formarse a partir del ARN»,

Orgel y sus colegas no vieron confirmados sus propios conceptos hasta principios de los años ochenta, cuando se demostró que el ARN podía autocopiarse sin necesidad de enzimas, y que además podía desempeñar el papel de una enzima, o sea proporcionar la base de un metabolismo (fabricar alimentos), aunque fuese primitivo. El problema se resolvía con una gallina que era huevo al mismo tiempo. La historia de la vida en la Tierra se dividiría en un antes y un después del ADR-, la poderosa fábrica de proteínas que domina la biosfera actual, en la que el ARN tiene un papel secundario. De ahí la expresión «mundo de ARN», una época en la que la maquinaria bioquímica era distinta de la presente.

¿Es este mundo un mundo real, o una entelequia como el séptimo cielo del cantante catalán Sisa? El ARN, aunque es una molécula más sencilla que el ADN, es difícil de sintetizar en el laboratorio, incluso en condiciones óptimas. Y, una vez sintetizada, sólo empezará a autorreplicarse si el investigador se lo facilita bastante. «Es una molécula bastante inepta, especialmente si se la compara con las proteínas», admite Orgel. Además, los experimentos son tan complicados que no se puede averiguar a través de ellos nada sobre las condiciones reales del mundo de ARN. Stanley Miller protesta también en contra de esta hipótesis: «Las condiciones para el origen de la vida tuvieron que ser fáciles, no especiales». Quizá, después de todo, hubo un mundo más sencillo, anterior al de ARN. Ulteriormente, el equipo de Orgel está estudiando una molécula del mismo grupo pero aún más sencilla, el ácido péptidonucleico (APN), de propiedades parecidas y síntesis más fácil. Lo que es cierto es que el

Jo>. ~tPll l"l l Plll...

par



ADK-proteína, hasta no le ce mucho tiempo considerado imprescindible, se aleja rápidamente del centro de la escena del origen de la vida.

1. VASORES OH ESPACIO

En 1969, un meteorito cayó cerca de la ciudad de Murchison, en el oeste de Australia. Recogido de inmediato, resultó pertenecer al grupo de las denominadas condritas carbonáceas, que se caracterizan por tener hasta un 4% de carbono. Cuando se analizó, el meteorito de Murchison parecía un producto del experimento de Miller, ya que rebosaba aminoácidos. No sé eso: mientras que cualquier sustancia biológica terrestre es, como las personas diestra o zurda (los términos científicos son dextrógiro y levógiro, lo que significa que polarizan la luz hacia la derecha o hacia la izquierda), los aminoácidos sintetizados en un laboratorio son la mitad diestros y la mitad zurdos. Esto significa que los procesos químicos tienen igual probabilidad de producir un tipo u otro, mientras que los seres vivos siguen construyendo el mismo tipo con el que comenzaron. Los aminoácidos del meteorito de Murchison eran dextrógiros y levógiros al 50%, lo que significaba que la roca no había sido contaminada con materia orgánica terrestre. Los aminoácidos habían sido fabricados en el cinturón de asteroides, y más concretamente en su parte más lejana (<1500 millones de kilómetros), en la que abundan los asteroides ricos en carbono.

La posibilidad de que la vida terrestre provenga del espacio fue sugerida por vez primera, hacia el año 500 a.C., por el filósofo griego Anaxágoras, quien la llamó

...

Hilbert, J. L. (1931) In: J. L. T. J. U. L. L. \

panspermia

(mezcla de semillas), concibiéndola como un gran intercambio entre los muchos mundos habitados. La idea resucitó en el siglo XL precisamente al estudiarse los primeros meteoritos carbonosos. El físico británico lord Kelvin, uno de los científicos más prestigiosos de su época, opinaba que «debemos aceptar como altamente probable la existencia de incontables piedras meteóricas portadoras de semillas que vayan por el espacio». En cambio, el químico sueco Svante Arrhenius rechazó esta posibilidad con un argumento que pareció irrefutable: «Hay que considerar fantástica la idea de que organismos incluidos en meteoritos sean transportados por el espacio universal y depositados en otros cuerpos celestes. La superficie de los meteoritos se vuelve incandescente a su paso por la atmósfera, con lo que cualquier germen que pudiesen transportar quedaría destruido».

Si Arrhenius hubiese tenido la oportunidad de recoger un meteorito recién caído, hubiese comprobado con sorpresa que estaba helado. Las rocas son muy malas conductoras del calor, por lo cual el generado en el paso del meteorito a través de la atmósfera produce tan sólo la fusión de una capa superficial de uno o dos milímetros, y se pierde cuando esta corteza fundida se desprende en gotas incandescentes (que son los rastros luminosos de los meteoros). De esta forma, tan sólo serían destruidas las sustancias situadas en la superficie del meteorito, pero no las que se hallasen en su interior: así se explica la supervivencia de los aminoácidos de Murchison. Este meteorito marcó la resurrección de la idea de la panspermia; sin embargo, no representó ningún avance real en el problema del origen de la vida en la Tierra. Como vimos (en el apartado «¿En la playa, o en el fondo

En: H. P. Miller 1950...

del mar?»), los aminoácidos son fáciles de producir en nuestro planeta.

La cuestión clave es, por supuesto, si han podido llegar a nuestro planeta organismos vivos desde el espacio. Hoy nadie discute esta *posibilidad*: la materia a debate es su *probabilidad*. En los últimos años del siglo XX, la discusión se ha centrado en

la probabilidad de que la vida en la Tierra se haya originado... en 1a rt La controversia se produjo cuando en un meteorito de inequívoco origen marciano (catalogado como ALH84001 por el lugar del impacto, en la Antártida, y fecha de su hallazgo) se hallaron formas semejantes a las bacterias terrestres. Sabemos que los fragmentos de asteroides que viajan por el interior del Sistema Solar juegan un billar cósmico que tiene como consecuencia el intercambio de rocas entre planetas: un asteroide choca contra un planeta, y las salpicaduras del impacto viajan por el espacio hasta caer en otro. Si las rocas de la zona de impacto contenían orgánismos, éstos pueden viajar como pasajeros hasta otro planeta siempre que logren superar tres situaciones peligrosas: el impacto de salida, las condiciones del viaje interplanetario, y la brusca llegada a destino. Como hemos visto, este último escollo no es difícil de vencer siempre que el pasajero esté bien abrigado en el interior de la roca. Algo semejante se puede decir de la salida de un planeta como Marte, porque los diecinueve meteoritos marcianos que han llegado a la Tierra no están demasiado alterados por choques ni altas temperaturas (se ha demostrado que la temperatura de ALH84001 en su salida fue inferior a 40 °C), lo que significa que tuvieron un despegue relativamente suave. El gran problema de la panspermia es el viaje interplanetario. En el espacio, al vacío y a la temperatura cercana al