

EL LARGO Y TORTUOSO CAMINO

Manuel CATALÁN MOROLLÓN



The long and winding road that leads to...

(Lennon-McCartney).

Introducción



las 1600 horas 53 minutos de la tarde (hora local) del 12 de enero de 2010, un terremoto de magnitud 7 asoló Haití. El análisis de los registros sísmicos situó su foco a unos 10 km de profundidad y a 25 km al suroeste de la capital, Puerto Príncipe. Cuarenta y seis días más tarde, a las 0300 horas 34 minutos (hora local) del 27 de febrero, otro seísmo, esta vez de magnitud 8,8, asoló el sur de Chile. Su foco fue situado a unos 105 km al noroeste de la ciudad de Concepción y a 35 km de profundidad. Diversas razones hicieron que, pese a ser el terremoto de Chile casi 50 veces superior en cuanto a la liberación de energía, los daños materiales y humanos no fueran en absoluto comparables. En el caso del de Haití, la menor profundidad del foco, unas infraestructuras muy deficientes, una economía extremadamente pobre y una prácticamente nula respuesta institucional, hicieron que la cifra aproximada de muertos fuera de 300.000 en Haití frente a los 800 de Chile.

A estos dos seísmos añadimos los acaecidos en el entorno de Japón en febrero y marzo de ese año, el de Baja California (4 de abril), el del norte de Sumatra (6 de abril y 9 de mayo), el de Vanuatu (27 de mayo y 10 de agosto)...

¿Está aumentando el número de terremotos?

Una simple consulta a los registros correspondientes a las bases de datos mundiales revela que la situación es estable. El promedio establecido desde

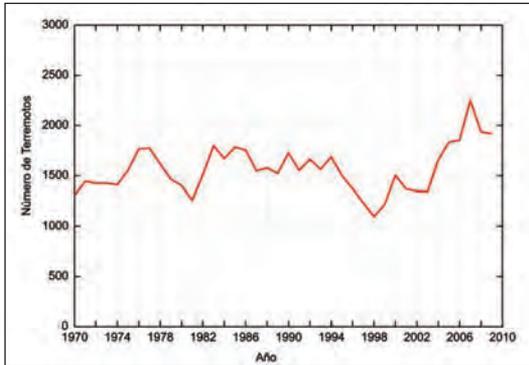


Figura 1.—Número de seísmos, con magnitudes comprendidas entre 5 y 7, acaecidos anualmente entre 1970 y 2009.

número de estaciones sísmicas de banda ancha desde las 50 que la componían en 1998 a las 151 que la conforman actualmente. Esto último justificaría el aumento en el número de seísmos detectados, con magnitudes comprendidas entre 5 y 7 a partir de 1998 (figura 1), mientras que el número de seísmos de magnitud superior a 7 permanece aproximadamente estable (figura 2). También ha influido el aumento en la sensibilidad de los sensores, pues permitirían detectar un mayor número de terremotos con independencia de su magnitud o de su localización; y por último, el hecho de que la información se encuentre disponible de forma prácticamente instantánea para cualquier persona, sin mayor necesidad que un

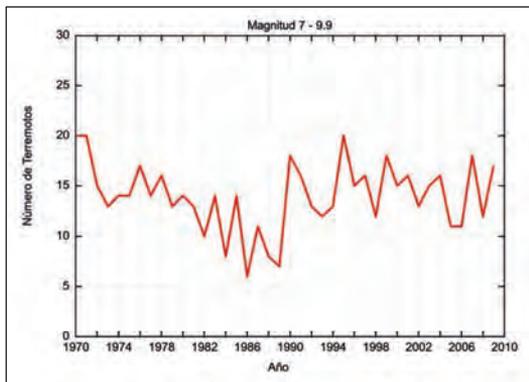


Figura 2.—Número de seísmos, con magnitudes superiores a 7, acaecidos anualmente entre 1970 y 2009.

par de *clicks* en el monitor del ordenador.

En octubre de 2009, tras impartir una conferencia sobre temas relacionados con Geofísica durante unas jornadas en la Universidad de Córdoba, una persona me planteó la siguiente pregunta: ¿Debemos considerar estos cataclismos como una manifestación de las siete plagas bíblicas, o por el contrario admite

que comienzan los registros (principios del siglo xx) marca al año unos 17 terremotos significativos, con una magnitud comprendida entre 7,0 y 7,9, y uno grande (8,0 o superior).

Probablemente, el aumento del número de estaciones sísmicas distribuidas por todo el mundo ha contribuido a generar esa sensación. Este número ha pasado de unas 350 en 1931 a más de 8.000 en la actualidad. En concreto, la red mundial norteamericana ha visto incrementado el número de estaciones sísmicas de banda ancha desde las 50 que la componían en 1998 a las 151 que la conforman actualmente. Esto último justificaría el aumento en el número de seísmos detectados, con magnitudes comprendidas entre 5 y 7 a partir de 1998 (figura 1), mientras que el número de seísmos de magnitud superior a 7 permanece aproximadamente estable (figura 2). También ha influido el aumento en la sensibilidad de los sensores, pues permitirían detectar un mayor número de terremotos con independencia de su magnitud o de su localización; y por último, el hecho de que la información se encuentre disponible de forma prácticamente instantánea para cualquier persona, sin mayor necesidad que un

una visión alternativa? La respuesta podríamos pensar que debía ser obvia; sin embargo, tras sopesarla, mi contestación fue un simple «depende...».

Para poder justificarla me gustaría proponerles un recorrido por el largo y tortuoso devenir de nuestro planeta, enlazando diversos procesos físicos, de modo que seamos capaces de apreciar aquellos aspectos que lo hacen verdaderamente único, a él y a su historia.

El sistema autosostenible

La Tierra ha permanecido orbitando en torno a una estrella de forma relativamente estable durante miles de millones de años. Aunque la vida pudiera existir en otros lugares, la posibilidad de encontrar vida compleja, tal y como se ha desarrollado en la Tierra, es extremadamente difícil.

Comparando algunos aspectos, como presencia de vida, posesión de agua líquida, campo magnético propio, tectónica de placas, la posesión de un satélite como la Luna, etc., observaríamos que ninguno de los planetas terrestres (Mercurio, Venus y Marte), a excepción de la Tierra, los posee, al menos no en la actualidad, aunque algunos de estos procesos, como la tectónica de placas o la posesión de agua líquida, pudieron estar presentes en algún momento de sus historias. Todo ello nos lleva a formular la siguiente pregunta: ¿Cuáles han sido aquellos factores que han podido resultar determinantes para permitir la existencia de vida animal en nuestro planeta?

Existe un acuerdo generalizado dentro de la comunidad científica en considerar como requisito fundamental para el desarrollo de la vida la presencia de agua líquida. Esto se fundamenta en las propiedades específicas poseídas en exclusividad por el agua, como:

- Permanecer en estado líquido dentro de un intervalo muy amplio de temperaturas (0° C a 100° C a una atmósfera de presión).
- El extremo superior en el que se puede encontrar en estado líquido (100° C) se aproxima a la temperatura máxima capaz de ser soportada por las moléculas orgánicas complejas.
- Su capacidad para disolver nutrientes y desechos, actuando como medio de transporte de diversas sustancias químicas, siendo en sí misma un reactivo.
- La característica aparentemente inocua de que al helarse se vuelve menos densa que su forma líquida. Esto último proporciona estabilidad, pues bastaría con considerar la hipótesis de un enfriamiento excesivamente virulento, ello conllevaría la formación de capas de hielo. El agua bajo las mismas, así como la vida que ésta contuviera, tendería a mantenerse estable. Si por el contrario el hielo se hundiera, en lugar de flotar, un ulterior enfriamiento conllevaría al descenso de la

masa helada, quedando ahora expuesta la masa líquida, lo cual facilitarían la congelación de mayores cantidades de agua.

Aunque la vida pudiera existir utilizando como sustento líquidos tales como el metano o el etano, el resto de características antes mencionadas convierten el agua en un líquido más propicio para sustentar la actividad biológica. Partiendo, por tanto, de considerar al agua líquida como elemento clave para la aparición y sustento de la vida, podríamos aventurar la siguiente pregunta-hipótesis: ¿Ha retenido nuestro planeta el agua líquida debido a su campo magnético?

Mecanismo de pérdida de constituyentes atmosféricos

El concepto de velocidad de escape es el de aquella velocidad que necesita cualquier cuerpo para escapar de la atracción gravitatoria de la Tierra, o de cualquier otro objeto de gran masa. En el caso de la Tierra, este cuerpo precisaría de 11,2 km/s, mientras que en el caso de Marte bastaría con 4,8 km/s (como consecuencia de su menor masa), y en el de Venus con 10,3 km/s.

La Mecánica Estadística nos demuestra cómo un átomo, de encontrarse inmerso en un ambiente a una temperatura suficientemente alta, dispondría de energía cinética suficiente como para superar el umbral impuesto por la velocidad de escape. Este mecanismo de pérdida de componentes atmosféricos (denominado mecanismo térmico) es especialmente efectivo para los primeros elementos de la Tabla Periódica, caso por ejemplo del hidrógeno. No obstante, carece de eficacia por ser demasiado lento y por la moderada amplitud de las temperaturas en la alta atmósfera (500° C en la parte alta de la termosfera y 2.500° C en la exosfera).

Los procesos no-térmicos comprenden aquellos mecanismos en los que se produce un intercambio de energía entre constituyentes atmosféricos con partículas introducidas principalmente por el viento solar: protones (iones de hidrógeno) y electrones, o bien con radiación altamente energética (proceso conocido como fotoionización). De esta manera se consigue dotar de energía cinética suficiente a una fracción de átomos, favoreciendo su escape, o alternativamente permitiendo su ionización (como consecuencia de un intercambio no tan eficaz en términos energéticos), dejándolos sometidos a la *Fuerza de Lorentz*, con lo que escaparían igualmente de la atracción gravitatoria al ser capturados por el campo magnético interplanetario.

Tanto Marte como Venus poseen campos magnéticos débiles en contraste con el momento magnético de la Tierra. Por ello, al interactuar el viento solar con la magnetosfera terrestre, éste es desviado a una distancia superior que en el caso de Marte y Venus. De esta forma, la mínima distancia de aproximación del viento solar en nuestro planeta es de unos 10 radios terrestres, a

diferencia del caso de Marte y Venus, en donde este acercamiento se produce a tan sólo 1,5 veces el radio del planeta en cuestión. Existen investigadores que opinan que la pérdida de constituyentes atmosféricos ha podido ser especialmente eficaz en el caso de Marte y de Venus a través de los mecanismos antes mencionados: fotoionización, o debido al impacto con electrones o protones procedentes del viento solar, consecuencia todo ello de la carencia de campo magnético. Esto pudiera haber provocado la fuga de hidrógeno y posiblemente también de oxígeno, y de manera indirecta la desaparición del agua.

El calor como fuente de evolución del núcleo

Desde el momento de su formación la Tierra comenzó a ser víctima de su propia gravedad, evolucionando hacia una estructura estable en la que los materiales más densos ocuparon las zonas más profundas, mientras que los menos densos se asentaron sobre las capas más externas. Conforme penetramos en su interior, tanto la temperatura como lógicamente la presión se ven incrementadas. Como consecuencia, la región conocida como núcleo externo (2.900-5.100 km de profundidad) se encuentra en estado fluido. Esto no ocurre al seguir descendiendo, debido a que el punto de fusión aumenta proporcionalmente con la presión y el material presente en el núcleo interno, pese a soportar temperaturas comparables a las de la superficie del Sol (aproximadamente 5.000 °C), no es capaz de alcanzar ese umbral, encontrándose en estado sólido.

El campo magnético de la Tierra

El campo magnético terrestre es generado por el movimiento convectivo de material ionizado presente en el núcleo externo. Este movimiento opera como una gigantesca máquina de calor, en la que éste es transportado en dirección radial, desde el núcleo al manto. Para prolongarse en el tiempo, este proceso precisa de aporte calorífico y de un manto capaz de liberar las cantidades ingentes de energía cedidas por el núcleo durante su enfriamiento. Existen cuatro fuentes principales de calor:

- La desintegración de elementos radiactivos conforma una fuente destacable de calor en el seno de la Tierra. Esta fuente de energía ha debido disminuir su eficiencia a medida que los elementos se han ido desintegrando.
- El segundo mecanismo consiste en la pérdida del calor primigenio de la Tierra. En la actualidad éste se reduce al enfriamiento de su núcleo interno. Este proceso constaría de dos partes: una pérdida de calor

consecuencia de un proceso secular de enfriamiento, y la liberación de energía interna debido a la solidificación de las zonas más externas del mismo.

- El calor proveniente del impacto de aquellos objetos que se incorporaron a la Tierra mientras ésta se formaba. Esta fuente de calor debió de bastar por sí sola para fundir gran parte de las zonas externas de aquel planeta joven.
- La liberación de energía potencial gravitatoria en forma de calor, consecuencia de la migración de elementos pesados: hierro y níquel (inicialmente repartidos de forma homogénea) hacia el centro del planeta que, tal como se ha comentado anteriormente, dieron lugar al núcleo. Estas dos últimas fuentes de calor [c) y d)] no son relevantes en la actualidad.

La tectónica de placas

Al comienzo del siglo XX la geología era exclusivamente una ciencia que se ocupaba del estudio de las rocas sobre las masas continentales. Esta rama de la ciencia se consideraba suficientemente madura y capaz de explicar las características y causas de las deformaciones observadas en los sistemas montañosos a partir de movimientos fundamentalmente verticales. Este modelo fue retado por las hipótesis de Alfred Wegener, que mantenía que todos los

continentes inicialmente estuvieron unidos en uno solo llamado *Pangea*. Este macrocontinente eventualmente quedó fragmentado, desplazando sus bloques hasta alcanzar la configuración actual.

Estas ideas fueron desechadas en su momento por la comunidad científica, principalmente debido a que no supo explicar el mecanismo capaz de poner en marcha estas enormes masas. En segundo lugar debemos de tener en cuenta que Wegener era meteorólogo, y este hecho actuó en su contra. Esto puede pare-

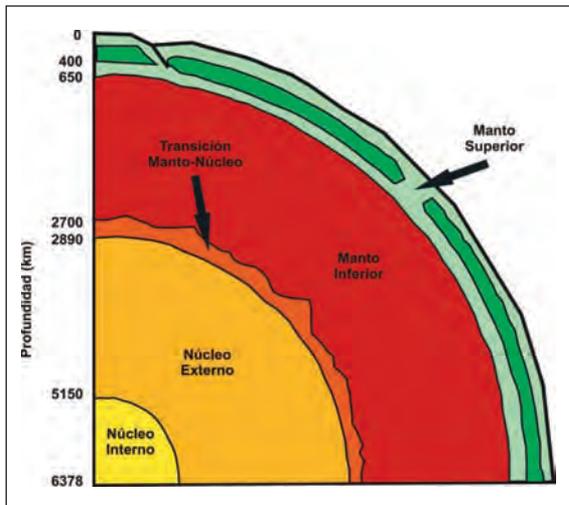


Figura 3.—Estructura simplificada del interior de nuestro planeta. Se muestran las discontinuidades más importantes.

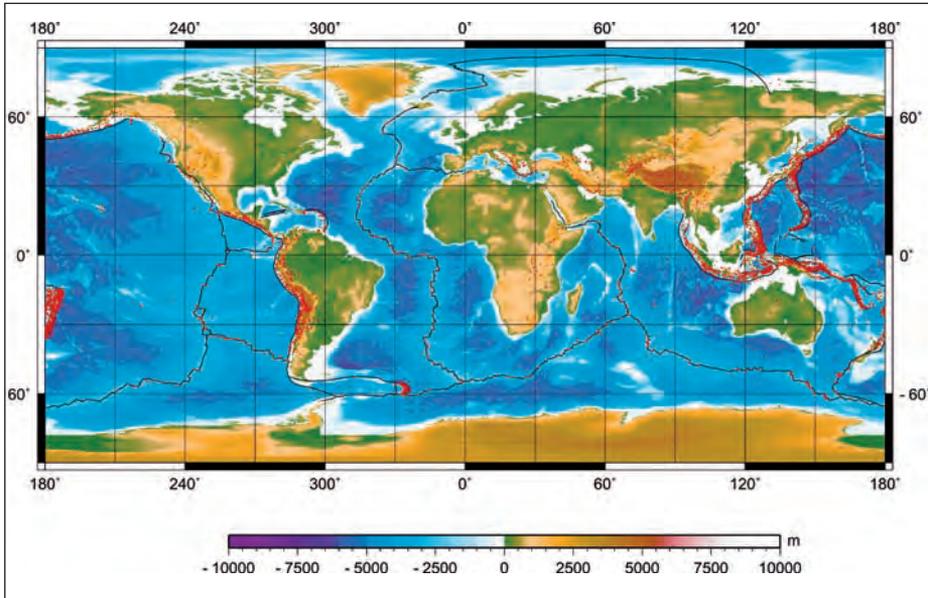


Figura 4.— Mapa batimétrico y topográfico de nuestro planeta. En círculos rojos se muestra la localización de seísmos acaecidos entre 1980-1990 (magnitud > 5). En trazo fino negro se dibujan los límites de placas.

cer una pobre justificación desde un punto de vista científico (y lo es), pero desde una perspectiva sociológica manifiesta una reacción bastante usual ante lo que llamamos «intrusismo».

No obstante, las evidencias paleomagnéticas que habían ido obteniéndose a lo largo de las primeras décadas del siglo XX, junto con otras obtenidas a partir de levantamientos científicos marinos realizados durante los últimos años de la década de los 50 y comienzos de los 60, fueron demoledoras, poniendo así en marcha una revolución en las ciencias de la Tierra. Aquel mundo dividido en dos dominios —uno viejo y estable representado por los fondos oceánicos, y otro, los continentes, que concentraba las principales variaciones—, tuvo que ser absolutamente modificado en 180°.

Según la tectónica de placas, la litosfera se encuentra dividida en placas rígidas, separadas por fracturas lineales que pueden ser fácilmente identificadas en un mapa a partir de diversos indicios: la acumulación de terremotos, la localización de grandes cadenas montañosas, las alineaciones volcánicas y la presencia de fosas marinas.

Hay un total de siete placas principales y varias más pequeñas, las cuales se mueven unas respecto a otras a un ritmo de unos pocos centímetros al año.



Figura 5.—Recreación artística del océano de magma que se cree existió en los primeros años tras la formación de la Tierra. Se observan pequeñas islas de material solidificado que posiblemente formaron la corteza terrestre primigenia.

Las placas tectónicas se crean en las dorsales centro-océánicas (donde un hueco es generado continuamente al separarse una placa respecto de la otra), y desde donde son transportadas por fuerzas convectivas o gravitacionales en un lento viaje que dura millones de años, siendo destruidas en las zonas de subducción, donde una placa se hunde dentro del manto.

El transporte convectivo requiere de un manto capaz de evacuar el calor que recibe del núcleo. El ritmo al que el núcleo pierde calor es controlado por la diferencia de temperatura entre éste y el manto. Diversos estudios sugieren que es la tectónica de placas el hecho diferencial que permite mantener ese gradiente de temperatura entre ambos, mediante la cesión de calor proveniente del manto a través de la superficie de los fondos oceánicos, o mediante la incorporación de corteza oceánica antigua, y por tanto fría, en las zonas de subducción que penetrarían en la Tierra probablemente hasta las proximidades de la transición manto-núcleo (2.900 km de profundidad).

La tectónica de placas no es el único régimen convectivo posible. Algunos estudios proponen como factibles otros dos: el del océano de magma y el de la lámina estática (una costra protegiendo el interior del planeta, bajo la cual podrían tener lugar procesos convectivos). Todos ellos podrían haberse desarrollado en los planetas terrestres (Mercurio, Venus y Marte).

Mercurio y Marte posiblemente han experimentado un régimen de placa estática. Tienen litosferas excesivamente gruesas y poco flexibles, por lo que la convección podría desarrollarse en el interior, sin manifestación externa. En el extremo opuesto se encontraría la Tierra, con el sistema de placas tectónicas, que permite la evacuación de gran cantidad de calor en las zonas oceánicas gracias a un espesor litosférico reducido.

Debemos considerar Venus como un caso aparte. Aunque su tamaño y posiblemente su composición son similares a los de la Tierra, no hay casi ninguna evidencia de que haya desarrollado tectónica de placas en algún momento de su historia.

La información disponible de este planeta es poca y ambigua. Los datos en cuanto a las características de su litosfera son confusos, y el aspecto uniforme de su superficie no contribuye a aclarar las cosas. Este último extremo sugiere algún tipo de episodio volcánico masivo, o como también ha sido propuesto, un posible colapso litosférico, consecuencia de su propio peso, al desarrollar un espesor excesivo, desapareciendo en el manto y dando lugar al desarrollo de una nueva litosfera.

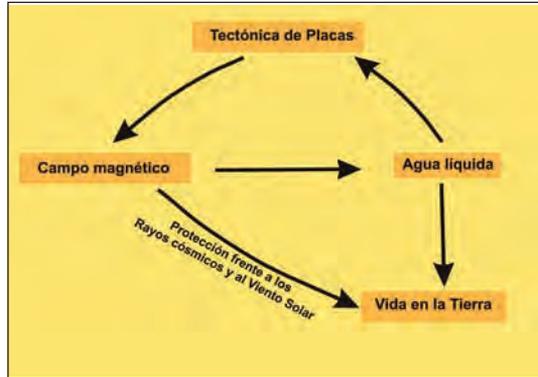


Figura 6. —La ilustración describe las posibles relaciones entre la existencia de agua, la tectónica de placas y la posesión de un campo geomagnético. Todo ello permitiría un sistema autosostenible, dando lugar a un planeta habitable.

¿Cuál es la razón por la que un planeta similar en tamaño a la Tierra, como es Venus, no desarrolle tectónica de placas?

Podría ser consecuencia de que el flujo interno de calor fuera menor del preciso, o que la litosfera fuera significativamente más rígida. Una posibilidad ciertamente extendida propone que sea la presencia de agua líquida la responsable de hidratar la litosfera, de modo que disponga de la flexibilidad suficiente para soportar las flexuras propias de una subducción. Todo ello sólo se habría podido desarrollar en nuestro planeta.

De ser este último extremo correcto, se cerraría un ciclo en el que hemos planteado como punto de partida, para la existencia de vida, la presencia de agua líquida. La posesión de un campo magnético propio cumpliría así un doble objetivo: protegería al planeta en cuestión de los efectos nocivos de la

radiación cósmica sobre cualquier forma de vida que se desarrollara en su superficie, y permitiría también que su atmósfera no se vaciara de constituyentes básicos para el mantenimiento de agua líquida a lo largo de su historia.

A su vez, el campo magnético terrestre precisa de fuentes de calor internas y de un sistema de enfriamiento suficientemente eficaz para su sostenimiento en el tiempo. Esto último lo posibilitaría la tectónica de placas, que a su vez requeriría para su sostenimiento de la hidratación que proporciona la posesión de océanos de agua líquida.

Conclusiones

A lo largo de este artículo hemos puesto de manifiesto qué factores hacen diferente a nuestro planeta de aquellos otros del Sistema Solar llamados genéricamente planetas terrestres (Mercurio, Venus y Marte). Entre todas las diferencias hemos centrado nuestra atención en un factor clave para la existencia de vida, como es la presencia de agua líquida y su conexión con el hecho de que nuestro planeta disponga de campo magnético propio. Hemos diseñado un ciclo efectivo para el desarrollo de la vida, que se inicia y termina con la presencia de agua líquida como elemento indispensable, y en el que, en último extremo, la posesión de un campo magnético propio permitiría su sostenimiento estable en el tiempo.

La justificación a aquel «depende...», en contestación a la pregunta formulada al finalizar una conferencia, y con el que prácticamente iniciábamos el artículo, se fundamentaba en que estas peculiaridades (disponibilidad de agua líquida y campo magnético propio) conectan de lleno con la existencia de la tectónica de placas, la ocurrencia de terremotos y de erupciones volcánicas. Estos hechos siempre son negativos desde lo puntual, pero en último extremo son síntomas de un planeta vivo que, pese a estar inmerso en un universo frío, es capaz de albergar y mantener vida a partir de su energía interna.

