

# La historia de la Tierra: cronología y acontecimientos de un singular Planeta Azul\*

Gerardo J. Soto\*\*

La Tierra es un sistema dinámico que comprende océanos y una atmósfera fluidos, una siempre cambiante distribución global del hielo, la nieve y el agua subterránea, un núcleo externo líquido que está en un movimiento hidromagnético continuo, un manto con convección térmica en su interior y sometido a una isostasia activa debido a la pérdida del sobrepeso de hielo de la última era glacial, y una tectónica de placas diligente, que moviliza continuamente la litosfera. Por si fuera poco, existe una masa biosférica impresionante, y una especie en particular, el Homo sapiens, trabaja incesantemente, más sin quererlo que queriéndolo, en cambiar las condiciones naturales del planeta.

El análisis de las observaciones de lo que pasa en el espacio externo al sistema Tierra, en las últimas dos décadas y media, ha permitido nuevos y sorprendentes descubrimientos de la Tierra dinámica y sus procesos, y ha mejorado nuestro conocimiento de la interacción entre los variados subsistemas terrestres.

Además, el descubrimiento de que hay un volcanismo activo en Io y Tritón (satélites de Júpiter y Neptuno, respectivamente), de que los anillos planetarios son rasgos dinámicos y transitorios, y los recientes impactos cometarios que azotaron a Júpiter, han realzado la importancia de conocer los procesos planetarios desde una perspectiva más amplia. En tan sólo veinticinco años, nos hemos dado cuenta de que el número de procesos planetarios que operan en este momento (por lo menos los observados) en más de un lugar del Sistema Solar llenan ya una lista voluminosa. Cuáles procesos pueden suceder continuamente en el Sistema Solar, y cómo mantienen una estaticidad o una estabilidad dinámica en sus diferentes cuerpos planetarios, podría darnos una luz respecto a si otros sistemas planetarios en su operación dinámica se parecen al nuestro o no. Las teorías del colapso y el caos nos conducen a pensar que muchos lugares en nuestra galaxia (u otras galaxias) podrían tener sistemas solares parecidos al nuestro, aunque por supuesto, debe haber diferencias en la masa, localización y composición de los objetos planetarios dentro de tales sistemas.

Los grandes impactos meteoríticos en el pasado del Sistema Solar han alterado y creado estructuras internas diferentes, cambiado los momentos angulares y remodelado o producido rasgos únicos en los cuerpos planetarios. Aunque también han causado similitudes en la apariencia y composición de las superficies y atmósferas y creado los característicos anillos de polvo alrededor de los planetas gigantes. El volcanismo ha afectado algunas atmósferas directamente, como una fuente importante de volátiles, mientras que en otros podrían haber perturbado sólo las condiciones impuestas por otros procesos. En las superficies, las formas volcánicas son similares en todo el sistema. La convección interna maneja los movimientos tectónicos, contribuye a la creación de las zonas atmosféricas y tiende a homogenizar las superficies a través de la erosión. También genera el magnetismo, que tiende a dar un rasgo similarmente estructurado a las magnetosferas planetarias, diferenciadas por el tamaño y los rasgos interiores de cada planeta. Las interacciones de los plasmas y las partículas cargadas con las superficies y atmósferas planetarias tienden a erosionar el relieve y producir los fenómenos de las auroras, pero actúan diferencialmente a lo largo

\* Texto de la charla impartida en el *Aula Magna, Stvdium Generale*, el 17 de febrero de 1995.

\*\* Geólogo graduado en 1985 en la Universidad de Costa Rica. Estudios de Vulcanología en Japón. Actualmente labora en la Oficina de Sismología y Vulcanología del Instituto Costarricense de Electricidad.

del Sistema Solar. Finalmente, la vida modifica la atmósfera y el sustrato donde opera.

Dado este panorama del espacio más cercano que nos rodea, nos damos cuenta de que, para comprender mejor la historia de nuestro Planeta, debemos remontarnos a la historia del Universo en pleno, luego a la del Sistema Solar, y finalmente aterrizar -redundemos-en la Tierra.

El estado actual del conocimiento del Universo y su evolución se ha dado gracias a los enormes avances en la Astronomía y la Astrofísica, con ayuda de las supercomputadoras para la simulación de eventos pasados y futuros con un alto grado de complicación, y con base en las observaciones del comportamiento del Universo lejano, a través de radiotelescopios, el telescopio Hubble (ya solucionado el problema de su miopía original) y otros sofisticamientos tecnológicos de avanzada.

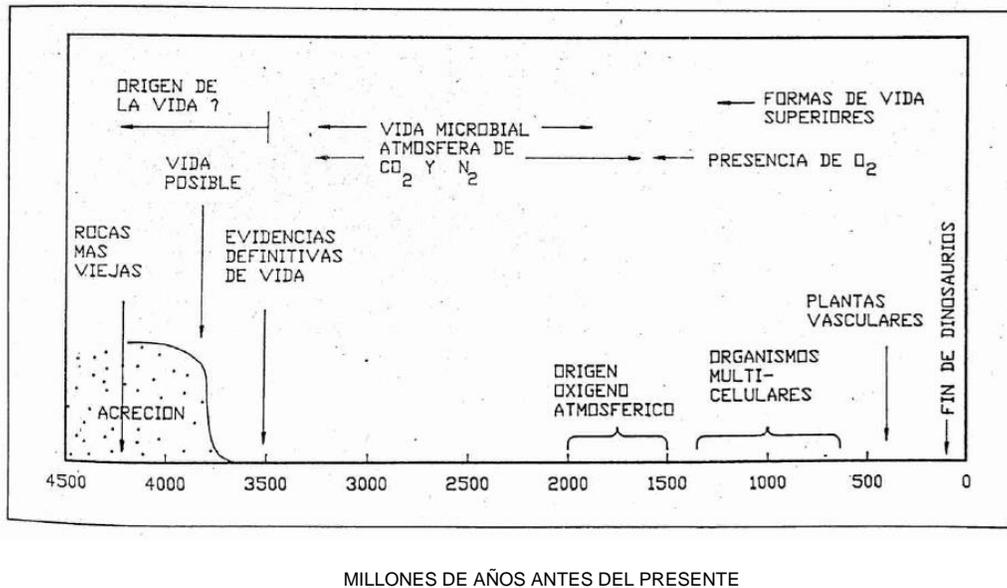
La teoría del *Big Bang*, que plantea una gigantesca explosión de un punto con masa, gravedad y energía infinitas, para explicar el origen y evolución del Universo, parece ser la más plausible hasta el momento. Esto parece haber ocurrido hace dieciséis mil millones de años ( $16 \times 10^9$  años). Un Universo aún en expansión, que en cierto momento llegará a la contracción, es la propuesta generalmente aceptada, con ciertas variantes, hoy en día.

En la complicada evolución del Universo, y después de dos tercios de su historia hasta el presente, en nuestra Vía Láctea, existió, hace unos cinco mil millones de años ( $5 \times 10^9$  años), una masa de polvo y gas interestelares relativamente fríos, que daría origen al Sistema Solar. Comentamos ya que, como en nuestro Sistema, existen y han existido condiciones similares en muchas galaxias a lo largo de la historia del Universo, por lo que es altamente probable, que condiciones como las de nuestro planeta, existan y existieran en miles de sistemas solares y tal vez en otros Universos... Esto es, que quizás muchos planetas azules como el nuestro pueden haberse desarrollado, y estar en estados evolutivos más, o menos avanzados, o bien extintos. La Tierra es singular en el entorno planetario del Sistema Solar, y así la sentimos aún más, por la arrogancia humana de sentirla nuestra, aunque no sea de nuestra propiedad, sino que somos uno más de los múltiples eslabones que la conforman.

Por algún motivo aún no satisfactoriamente explicado, aquel polvo y gas en forma de nebulosa condensaron en gránulos sólidos que se acrecieron como cuerpos de mayor tamaño, llamados planetésimos, los que a su vez colisionaron y se acrecieron para formar protoplanetas. Un progresivo colapso gravitacional conllevó a que la masa se concentrara principalmente en el centro del sistema, aunque algunos otros corpúsculos se desarrollaron periféricamente. Los cuerpos más lejanos originaron los gigantes planetas exteriores, de menor densidad y compuestos más ligeros, pero de enorme masa. Júpiter y Saturno habrían condensado a partir de enormes burbujas en la nebulosa, más similares a protoestrellas que a protoplanetas, pero como no tenían suficiente masa, no pudieron desarrollar reacciones de fusión, y podríamos catalogarlos como estrellas abortadas. Los corpúsculos más cercanos al Sol originaron los planetas interiores -o terrestres-, de mayor densidad, con compuestos y elementos más densos, pero de masas menores. El centro de gravitación, que concentraba el 99% de la masa total -suficiente para desencadenar reacciones nucleares de fusión-, dio origen al Sol. Los planetas interiores, al sufrir un colapso gravitacional, se diferenciaron en núcleos metálicos de alta densidad, partes intermedias o mantos de mediana densidad, y costras de poco espesor y densidad, llamadas cortezas. Este proceso se asemeja al de la fusión en hornos de alta temperatura. Al haber una enorme liberación de energía gravitacional durante este proceso, se transformó en energía calórica, la cual alcanzó a fundir las incipientes cortezas, dando paso a océanos de magma globales. Esto sucedió hace 4600 millones de años. Lo sabemos con base en la datación radiométrica a través de los isótopos de los meteoritos, cuerpos primitivos del Sistema Solar (muchos de ellos son restos de asteroides, que son los fragmentos no acrecionados y que no alcanzaron a formar planetas), cuyas edades máximas son de 4560 millones de años. Asimismo, conocemos parte de la composición e historia del Sistema Solar primitivo (e incluso de contaminantes extraños al sistema mismo), por la comparación de los diferentes tipos de cuerpos meteoríticos recuperados en todo el mundo.

La primera centena de millones de años del Sistema Solar fue de un enfriamiento paulatino de las cortezas planetarias. Durante este período, probablemente un asteroide del tamaño de Marte chocó contra la Tierra, y de esta tremenda colisión, se generó una "gota", que formó la Luna, cuya edad más o menos coincide con la de los meteoritos ( $4,5 \times 10^9$  años: esa es la edad de las rocas más antiguas recuperadas de la Luna por las misiones Apolo). Al respecto de la edad de los diferentes cuerpos del Sistema, su evolución, composición y otros, los conocemos gracias a la Planetología Comparativa, iniciada por Galileo, con sus observaciones de la Luna y de los satélites de Júpiter. Hoy disponemos de satélites artificiales -que han fotografiado y mapeado los planetas terrestres principalmente-, los datos y muestras recogidos en las misiones Apolo, y nuevos datos obtenidos con telescopios de alta resolución.

Pasemos ahora a repasar la evolución de la Tierra (Fig 1): Luego del proceso de acreción de partículas más temprano, y de la formación de océanos de lava, ocurrió un paulatino enfriamiento de tales océanos y una pausada transformación por el movimiento de las placas primitivas, originadas durante el enfriamiento, así como una incipiente erosión y sedimentación y luego por metamorfismo. Las rocas más antiguas del planeta, parcialmente preservadas como tales, o como minerales que han sido re TRABAJADOS sedimentariamente, datan de hace 4000 millones y 4300 millones de años respectivamente. Estas rocas se encuentran en medio de los llamados escudos o cratones continentales, "fossilizados" en Antártida, Groenlandia y Canadá.



MILLONES DE AÑOS ANTES DEL PRESENTE  
 FIGURA 1: EVENTOS MÁS IMPORTANTES EN LA HISTORIA DE LA TIERRA

La Tierra primitiva desarrolló un profuso volcanismo, supridor de volátiles, que dio paso a su vez a una atmósfera rica en  $\text{CO}_2$  y  $\text{N}_2$  (bióxido de carbono y nitrógeno). El inicio del ciclo del agua originó asimismo océanos primitivos, que rellenaron las cuencas dejadas en medio de las placas móviles. La actividad de la tectónica de placas parece haber empezado bastante temprano en la Tierra, pero con una dinámica mucho mayor que la actual, debido a un régimen térmico mucho más acentuado que el presente, regido principalmente por la convección térmica de un manto aún muy caliente y a la desintegración radiactiva de isótopos de vida media corta.

Desgraciadamente, el grueso de las rocas más antiguas de la Tierra ha desaparecido, por ser este un planeta tan dinámico. Por comparación con otros planetas que detuvieron su historia mucho antes, y se han quedado estáticos, como la Luna o Marte, hemos llegado a entender las condiciones de la Tierra primitiva.

La vida se empezó a desarrollar, en forma de células procariotas (sin membrana nuclear) hace unos 3800 millones de años probablemente, aunque las primeras evidencias seguras de vida se encuentran en fósiles de bacterias de 3500 millones de años. Este tipo de vida primitiva prevaleció durante 2000 millones de años, en medio de océanos que cambiaban su composición química lentamente, en continua interacción con la atmósfera. Hace unos 2000 millones de años se inició el enriquecimiento acelerado del oxígeno en la atmósfera, que le daría luego un carácter oxidante, parecido al actual, lo cual está documentado por rocas con altos contenidos de óxidos de hierro, que precipitaron en los océanos primitivos a nivel global, unos 1500 millones de años atrás en nuestra historia. Este dramático cambio en la química atmosférica e hidrosférica, conllevaría a un desarrollo más profundo de las formas de vida: las células eucariotas (con membrana nuclear, y por lo tanto núcleo celular definido) que se llegaron a desarrollar cerca de hace 1700 millones de años, aunque sus fósiles más antiguos tienen 1400 millones de años. A partir de protozoarios flagelados coloniales, probablemente evolucionaron los metazoarios hace unos 700 millones de años, que sin embargo no tenían partes duras (conchas).

Durante el largo lapso desde el origen de la Tierra hasta hace tan sólo 570 millones de años (o sea, un

88% del total de la historia del planeta) no hubo otro tipo de vida sino aquellos carentes de partes duras. A esta parte de la historia terrestre se le llama *Precámbrico*, pues es anterior al período Cámbrico (Fig. 2: la Tabla del Tiempo Geológico). De hecho, la historia del Planeta se ha dividido en tres *eones*, o lapsos geológicos mayores: *Arcaico*, *Proterozoico* y *Fanerozoico*. El último de estos significa "de la vida visible", pues los organismos con partes duras que se desarrollaron permiten una mejor y clara subdivisión de los sistemas vivos, que son suficientemente evidentes en los fósiles.

| Millones años | Eón   | Era               | Período     | Época       |
|---------------|---|-------------------|-------------|-------------|
| 0,01          | F<br>A<br>N<br>E<br>R<br>O<br>Z<br>O<br>I<br>C<br>O | Cenozoico         | Cuaternario | Holoceno    |
| 1,6           |   |                   |             | Pleistoceno |
| 65            |   |                   | Neogeno     | Plioceno    |
|               |   |                   |             | Mioceno     |
|               |   |                   | Paleógeno   | Oligoceno   |
|               |   |                   |             | Eoceno      |
| 250           |   | Mesozoico         | Cretácico   |             |
|               |   |                   | Jurásico    |             |
|               |   |                   | Triásico    |             |
| 570           |   | Paleozoico        | Pérmico     |             |
|               | Carbonífero   |                   |             |             |
|               | Devónico  |                   |             |             |
|               | Silúrico  |                   |             |             |
|               | Ordovícico  |                   |             |             |
| 2500          | Proterozoico  | Cámbrico          |             |             |
|               |   | Neoproterozoico   |             |             |
|               |   | Mesoproterozoico  |             |             |
| 4000          | Arcaico   | Paleoproterozoico |             |             |

FIG. 2: TABLA DEL TIEMPO GEOLÓGICO

El eón Fanerozoico está subdividido básicamente a partir de los grandes cambios en los sistemas ecológicos globales, la vida y su evolución, detectados en los fósiles preservados en las rocas. Debido a lo primitivo de la vida antes del Fanerozoico y al insuficiente registro fósil, no es posible seguir ese mismo patrón para la subdivisión del tiempo geológico. De modo que las subdivisiones que se hacen de las diferentes eras y períodos en el Proterozoico obedecen más bien a fenómenos geológicos y tectónicos determinados en las rocas de estos períodos. No obstante, el inicio del Proterozoico está marcado por la presencia de conjuntos de microfósiles ecológicamente heterogéneos y morfológicamente diferenciados y por una gran diversidad de estromatolitos (algas coloniales que formaban cúmulos o montículos).

Después de la aparición de las especies con partes duras en el inicio del Cámbrico, se da una profusión exponencial de las especies vivas, pasando de ambientes netamente marinos en el Paleozoico temprano, a ambientes terrestres en el Paleozoico tardío. Las mayores subdivisiones del tiempo geológico durante el Fanerozoico, en las eras *Paleozoica*, *Mesozoica* y *Cenozoica*, se hacen con base en los momentos de las extinciones masivas. Debido a razones que aún están en discusión, en ciertos momentos de la historia terrestre, ocurrieron tales extinciones. Esto significa que una parte porcentual significativa de las especies vivientes en esos momentos, se extinguieron definitivamente, para luego dar paso al fortalecimiento de especies resistentes a los nuevos hábitats, mejor adaptadas. La extinción masiva más dramática ocurrió en el límite Permo-Triásico, o sea entre las eras Paleozoica y Mesozoica. A finales del Mesozoico (el famoso límite Cretácico-Terciario, conocido mejor como el K-T), se extinguieron los poderosos y fabulosos dinosaurios, y por ello es el más conocido y quizás espectacular.

Porqué ocurrieron estas extinciones masivas en el pasado, aún está en controversia. Se han esgrimido muchos argumentos, como súbitos cambios en los hábitats o similares, pero la causa primigenia quizás fue: 1) gigantescos impactos meteoríticos o cometarios, que generarían enormes cantidades de polvo, gases e incendios forestales, y por ende prolongados y severos cambios en el clima mundial, o 2) una anómala actividad volcánica a nivel global, que inyectó cantidades colosales de gases a la atmósfera, con cambios dramáticos en ella. Sin embargo, con el descubrimiento del gigantesco cráter de impacto de Chicxulub en Yucatán, de 180 kilómetros de diámetro, ya casi no cabe duda de que un meteorito de unos 10 km fue el que impactó la Tierra y lanzó billones de toneladas de polvo, gases y roca fundida a la atmósfera y aun fuera del Planeta. Una mundialmente distribuida capa de arcillas anómalamente enriquecida en iridio, producida durante una lluvia global de polvo de rocas y meteorito al final del Cretácico, es la prueba más conspicua de este nefasto cataclismo.

Luego de la extinción de los colosales dinosaurios, en conjunto con el 60% de todas las especies vivientes del Planeta, llega el florecimiento espectacular de los mamíferos, que, aunque ya existían, se encontraban relegados ante el poderío y predominio de los saurios en los diferentes hábitats. No sólo los animales, sino las plantas superiores se desarrollan durante el Cenozoico. Corona el proceso evolutivo de los seres vivos en la Tierra, la aparición del hombre (el *Homo sapiens sapiens*, la especie que es el hombre moderno apareció hace tan sólo unos 40 mil años), que quizás, paradójicamente, sea quien determine su final.

Entender la historia de nuestro planeta, no sólo es útil para el conocimiento académico. Si logramos entender con suficiente exactitud los mecanismos que hayan originado los profundos cambios en la biota terrestre y en los hábitats que la soportan, podremos enfrentar en el futuro el gran reto de tratar de evitar una tragedia ecológica similar, que conllevaría a un colapso biótico y a una posible extinción masiva, sólo que esta vez por causas antropogénicas. Nos enfrentamos a la horrorosa paradoja de si desarrollar nuestra civilización a costa de masacrar nuestros geosistemas.

Por otra parte, el conocimiento de las diferentes etapas del planeta, y las sucesiones estratigráficas, nos son útiles en la prospección de combustibles y minerales, aunque desgraciadamente no los explotemos lo más racionalmente, o al menos sosteniblemente. Valga citar como ejemplos de recursos minerales restringidos a ambientes y épocas particulares, los yacimientos importantes de uranio relacionados con oro, que debido a los ambientes predominantemente no oxidantes del Arcaico y el Paleo y Mesoproterozoico, se desarrollaron. Al cambiar las condiciones de la atmósfera primitiva a un ambiente oxidante, se dieron las condiciones óptimas para la formación de grandes depósitos de óxidos de hierro, que hoy son explotados profusamente en diversas partes del planeta. La secuencia biótico-temporal, nos conduce a encontrar riquísimos yacimientos de carbón en las secuencias sedimentarias del Paleozoico, y notables yacimientos de hidrocarburos en los del Mesozoico.

Si podemos descifrar los mecanismos que originaron las catástrofes mayores en el pasado, podríamos prevenirlas en el futuro. Sirva como buen ejemplo -lo que no es ciencia ficción- que debido al descubrimiento y entendimiento del mecanismo de los impactos meteoríticos gigantes en el pasado, tanto en la superficie terrestre como en la de nuestros planetas vecinos -y con mucha más razón luego del impacto del cometa Shoemaker-Levy el año pasado contra Júpiter-, mu-

chos astrónomos y astrofísicos han comprendido finalmente que esto es un peligro latente en el futuro, y se han abocado a estudiar las órbitas de los asteroides cercanos a la Tierra (¡cerca de cien cuerpos de más de un kilómetro de diámetro ya han sido descubiertos!), para tratar de modelar por computadora sus trayectorias futuras, y si fuera del caso una posible colisión, poder destruirlo con anterioridad con bombas termonucleares. Suena de nuevo a ficción, pero son eventos posibles por ocurrir en el futuro, los cuales sólo hemos podido empezar a prever, entendiendo el pasado de nuestro planeta. Sólo espero que no sea una secuencia de estupideces humanas la que desencadene el inicio del Pentanario, el período geológico que llegará a suceder al Cuaternario cuando una nueva extinción masiva ocurra.

Los procesos dinámicos que tienen lugar en la Tierra sólida, océanos, atmósfera y ionosfera son inestables y sensibles a la influencia directa e indirecta de los impactos tecnogénicos como la creación de lagos artificiales, la extracción de minerales, las pruebas nucleares, el lanzamiento de cohetes y la contaminación del océano y la atmósfera. Tales efectos causan una compleja cadena de eventos cuyo carácter difiere con mucho de los escenarios naturales, y cuyos cambios se acumulan con el tiempo y con la creciente actividad industrial. Eventualmente esto desembocará en un incremento de la influencia antropogénica que desestabiliza los procesos geofísicos en un amplio rango de escalas espaciales y temporales, fluctuaciones magnificadas y un ascenso en la magnitud y frecuencia de los eventos catastróficos. La humanidad debe controlar y corregir los procesos naturales y artificiales en el tiempo para mitigar los desastres naturales y antropogénicos. No tenemos otra alternativa, si queremos sobrevivir.

**NOTA:** Debido al formato de charla en que está escrito este artículo, y a lo voluminoso de las referencias que habría que hacer (cerca de centena y media), he decidido prescindir de ellas, recalcando que la manera a como están dichas las cosas son de mi entera responsabilidad. Debo, eso así, aclarar que la Fig. 1 es una modificación sustancial de una figura aparecida en un artículo de la revista **Reviews of Geophysics** (vol. 27, No. 2, pp. 189-214) bajo la autoría de C. McKay y C. Stoker.