

# EVOLUCIÓN DEL CLIMA A TRAVÉS DE LA HISTORIA DE LA TIERRA

## CLIMATE EVOLUTION ACROSS THE EARTH'S HISTORY

Norma Sánchez-Santillán<sup>1</sup>  
santilla@correo.xoc.uam.mx

Rubén Sánchez-Trejo<sup>2</sup>  
rtrejo@correo.xoc.uam.mx

Guadalupe de la Lanza Espino<sup>3</sup>  
gdlle@unam.mx

René Garduño<sup>4</sup>  
rene@atmosfera.unam.mx

### Resumen

*Naturalmente, la atmósfera y, por tanto, el clima evolucionaron junto con el continente, el océano, el interior de la Tierra y todos los demás componentes planetarios. Esta co-evolución frecuentemente fue a través de catástrofes, por cierto fructíferas, especialmente para la evolución y diversificación biológicas. En varias etapas, el vulcanismo aportó ingredientes a la atmósfera, otro tanto llegó con los cometas y meteoritos; el océano contribuyó con vapor de agua con sus sucesivos cambios de estado; y la deriva de los continentes aumentó la maritimidad y disminuyó la continentalidad de los climas. El océano también dio inercia térmica y, por lo tanto, estabilidad al clima. La aparición del oxígeno favoreció la vida, su disociación fotoquímica y sus recombinaciones consecuentes dieron lugar a la capa estratosférica de ozono. Los incendios espontáneos pusieron límite superior a la concentración de oxígeno en la atmósfera, generado por la vegetación, lo cual conformó la atmósfera actual.*

**Palabras clave:** *Clima, biología, evolución, historia, Tierra.*

### Abstract

*In a natural way, the atmosphere –and therefore the climate- evolved together with the continent, the ocean, the interior Earth and all the other planetary components. This co-evolution was often via catastrophes, certainly very fruitful, especially for the biological evolution and diversification. In several stages, the volcanism contributed ingredients to the atmosphere, as much more arrived with the comets and meteorites; the ocean brought water vapor to it with its successive state changes; the continental drift increased the oceanity and decreased the continentality of climates. The ocean gave also thermal inertia and so stability to the climate. The oxygen appearance favored the life, and its subsequent photochemical dissociation and recombination yielded the stratospheric ozone layer. The spontaneous fires put upper limit to the atmospheric concentration of the oxygen generated by the vegetation, making up the present atmosphere.*

**Key words:** *Climate, biology, evolution, history, Earth.*

- 
- 1 Departamento El Hombre y su Ambiente, UAM-Xochimilco.
  - 2 Departamento El Hombre y su Ambiente, UAM-Xochimilco.
  - 3 Departamento de Zoología, Instituto de Biología, UNAM.
  - 4 Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

## El quinteto perfecto

Desde el inicio de la formación de nuestro planeta, coexistían cinco subsistemas de manera interrelacionada e interdependiente distribuidos en tres internos y dos externos. Los primeros son la corteza terrestre (tectogénesis, formación del piso oceánico, vulcanismo, sismos, pliegues, fallas geológicas y descamación), la hidrosfera (océano, agua dulce líquida y congelada) y la atmósfera, estos operaron a través de vertiginosos, e, incluso, catastróficos procesos físicos y químicos. Los subsistemas externos corresponden al Sol y la Luna; el primero sujeta gravitacionalmente a la Tierra y es su fuente de energía, esta última tiene carácter cíclico y modula etapas climáticas tan importantes para la historia geológica como las glaciaciones (Wang *et al.*, 2012), condición más frecuente en el planeta respecto a los interglaciales (Anguita, 2006). Sin embargo, hace 3,5 Ma, la actividad del Sol era 30% menor al actual, explicando, en parte, la paradoja del *Sol Débil* (Ribas, 2006), fase en la cual la temperatura de los incipientes océanos no alcanzó la temperatura de congelación como consecuencia de un importante efecto invernadero provocado por las altas concentraciones de CO<sub>2</sub> –cuya concentración en la atmósfera se piensa era del 3% contra 0,035% respecto a la actual– (Jaramillo, 1994). El aspecto de la Tierra, en esa etapa, debió de haber sido desolador, desde la perspectiva actual, con un cielo negro, por la ingente cantidad de cenizas emitidas por el vulcanismo y la delgada capa de atmósfera, en la que, incluso, al no haber ozono (O<sub>3</sub>), no había efecto invernadero (Kasting, 1993). No obstante, la penetración de rayos ultravioleta (UV) facilitó, eventualmente, las reacciones fundamentales que dieron paso al origen de la vida. La dinámica de la Luna aportó estabilidad, particularmente al clima, a través de la oblicuidad que le dio al eje de la Tierra; asimismo, la duración del día y la noche pasó de 4,5 horas de luz por 4,5 de oscuridad hasta llegar a lo que actualmente se tiene, que son 12 por 12 horas en las áreas tropicales (Williams, 2000). El paulatino alejamiento de la Luna contribuyó, incluso hasta a la fecha, a una disminución paulatina de las enormes mareas oceánicas ocasionadas por la cercanía de la Luna (Archer, 1996; López *et al.*, 2010), e incidió, sin

lugar a dudas, en la colonización de la vida del océano a la superficie terrestre al regular el clima y, en consecuencia, diversos procesos biológicos, como la evolución de los ritmos circadianos, entre muchos otros.

## Primordios de la atmósfera

A través de cientos de millones de años de emisiones volcánicas, se arrojaron elementos volátiles los cuales quedaron retenidos gracias a la gravedad del planeta, y originaron la primera atmósfera primitiva compuesta por dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), nitrógeno y vapor de agua como elementos mayoritarios, y monóxido de carbono y gases de azufre como componentes minoritarios; además de una pequeña proporción de ácido clorhídrico e hidrógeno (Pérez, 2006); sin embargo, aún se discute si el proceso de nucleación requerido para la formación de nubes es semejante al actual, en el cual las cenizas funcionan como núcleos higroscópicos, entre otras cinco nucleaciones que son arena, polvo, cenizas volcánicas, polen, bacterias y virus, entre otros (Schaefer y Day, 1981; Junge y Swanson, 2008). De igual forma, la baja masa del hidrógeno facilitó su evasión hacia el espacio y, paralelamente, el bombardeo de los cometas aportó amoníaco, metano y agua, los cuales se incorporaron gradualmente a la atmósfera. Algunos autores señalan que, a lo largo de 4.000 Ma, el arribo de esos cuerpos aportaron por lo menos el 10% de toda el agua presente en el planeta (Hartogh *et al.*, 2011). Si bien la proporción del aporte de agua por esta vía fue baja, respecto al volumen total, se sabe que la Tierra estuvo sometida a un bombardeo prolongado de cometas, los cuales se expresan como cráteres en la Luna y en Marte; sin embargo, en el caso de la Tierra, estos han desaparecido a manos del intemperismo geológico, hidrometeorológico y biológico; no obstante, la importancia de tal aporte hídrico por los cometas radica en que también contribuyeron con considerables volúmenes de nitrógeno y bióxido de carbono, este último, liberado en forma gaseosa, constituyó por mucho tiempo, la base principal de la atmósfera; más tarde, fue removido por los organismos vivos y sepultado en los sedimentos bajo la forma de carbonatos (Dobretsov *et al.*,

2008), procesos que en conjunto coadyuvaron al origen y evolución de la vida.

El oxígeno jamás salió como tal del interior de la Tierra y tampoco llegó con los cometas; fue durante algún tiempo cuando la fotólisis del agua comenzó a introducirlo a la atmósfera (Fairén, 2004). Dicha reacción se desencadena cuando impacta sobre el agua, radiación UV con longitud de onda inferior a 246 nm, y rompe así la molécula en sus elementos constituyentes; actualmente, este proceso apenas ocurre. Durante los primeros millones de años, las altas temperaturas de lo que hoy sería la corteza terrestre favorecieron la evaporación hacia la atmósfera alta y con ello el engrosamiento progresivo de ésta.

Dado que el oxígeno atómico (O) es altamente reactivo, se oxidaron todos los gases atmosféricos, se transformó el monóxido de carbono en dióxido y se redujeron los componentes del azufre a trióxido de azufre, cuya posterior hidratación formaría, mucho más tarde, ácido sulfúrico; eventualmente, este caería a la superficie y produciría los sulfatos encontrados actualmente en minerales como el yeso (Gómez-Caballero y Pantoja-Alor, 2003).

### La creación de los estratos atmosféricos

Al avanzar la estratificación de sus componentes, de acuerdo con su densidad, se conformó una atmósfera cada vez más densa y gruesa, y adquirió un color blanco, con abundante CO<sub>2</sub>, nitrógeno y vapor de agua; hasta que finalmente los componentes de la atmósfera primitiva alcanzaron el punto de equilibrio crítico y permitieron la evolución de esta hasta su estructura actual. Se sabe, por la datación de los isótopos de los gases nobles, que la atmósfera primitiva poseía una cantidad de CO<sub>2</sub> cuya presión parcial era de entre 20 y 40 atmósferas actuales (Massabuau, 2003); hoy se tiene una presión total de una atmósfera/cm<sup>2</sup>, de manera que aquella era enormemente pesada; el nitrógeno por sí solo ejercía una presión semejante a la actual. Lo anterior debió tener importantes consecuencias en los procesos físicos y químicos dentro de la estructura vertical de la atmósfera, pues precisamente las reacciones químicas dependen tanto de la presión como de la temperatura para alcanzar los diferentes

tipos de estado (sólido, líquido o gaseoso) que, eventualmente, a través de procesos evolutivos, desarrollaron tanto las diferentes capas, como la composición de cada una de ellas en la atmósfera. Esta disminución de la presión barométrica ha llevado millones de años y podría ser una de las causas por las cuales la vida fuera del agua tardó en desarrollarse.

### El incipiente sistema termodinámico

Una vez que surgió la vida, las reacciones biogeoquímicas entraron en escena y desencadenaron procesos de co-evolución entre todos los componentes en un prístino ecosistema terrestre, con una abundante diversidad de nichos por conquistar. La prueba más fehaciente de esta co-evolución es la diversidad metabólica entre las eubacterias o bacterias verdaderas y arqueobacterias o extremófilas (Margulis y Fester, 1991), que pese a su simplicidad estructural fueron funcionalmente tan complejas que pudieron aprovechar y modificar todos los tipos de sustrato –orgánico e inorgánico– para obtener energía y habitar en todos los ambientes del planeta, incluso los más extremos. El flujo entre todos estos subsistemas se relaciona de tal forma que un cambio en uno de ellos, por pequeño que sea, tiene la capacidad de producir mutaciones en todos los demás, razón por la cual asumir la evolución de la Tierra implica pensar en un sistema termodinámicamente abierto y fundamentado en la segunda ley de la termodinámica.

### El origen del ozono y su imprescindible papel en la evolución orgánica

La presencia del oxígeno molecular (O<sub>2</sub>), tanto en la hidrosfera como en la atmósfera, si bien está en discusión, la teoría más aceptada es que se originó a partir de procesos fotosintéticos de cianobacterias ancestrales que, a lo largo de millones de años, incrementaron su concentración. Conforme aumentó el oxígeno molecular, la atmósfera engrosó y alcanzó mayor altura, en la parte superior de ésta se disoció por la radiación UV y se recombinó, y produjo una molécula triatómica de oxígeno denominada ozono (O<sub>3</sub>). Sin duda, la acumulación del O<sub>3</sub> fue uno de los

factores que marcó el rumbo de la evolución orgánica en la Tierra, pues esta capa actúa como un filtro altamente eficiente el cual evita el paso de la radiación UV que daña el material genético de los organismos; sin embargo, es posible que los rayos UV hayan desencadenado el mecanismo genético emergente de almacenar la información en más de un gen, para limitar las mutaciones.

### **Vida: la forma más improbable de la materia**

En presencia de agua y oxígeno molecular, el proceso evolutivo produjo una gran diversidad de organismos (plantas, animales, hongos y microorganismos) en los mares y cuerpos de agua continentales. Hablar de biodiversidad implica un concepto fundamental basado en la segunda ley de la termodinámica, en la cual la evolución es la responsable de que el orden y estabilidad de los organismos sea, sin lugar a dudas, la más improbable de las formas, pues los conjuntos de especies que conforman las intrincadas redes tróficas van variando en tiempo y espacio a través de mecanismos de especiación y extinción puntual, donde los procesos climáticos, oceánicos y geológicos en todas las escalas espaciales y temporales están intrínsecos, de manera que la evolución transita de manera rítmica en la siguiente secuencia: tras una extinción, los nichos quedan libres para ser ocupados por otros organismos bajo otra sinfonía de caracteres.

### **Las vicisitudes para invadir el medio terrestre**

La colonización de la vida desde el medio acuático hacia las tierras emergidas fue un gran paso para todos los seres vivos, debido a que precisó de una reformulación del plan estructural metabólico y fisiológico, para aprovechar el oxígeno atmosférico y hacer frente a las condiciones fluctuantes de temperatura, disponibilidad de humedad en el ambiente y fuentes de agua para abastecerse. El clima en las porciones emergidas de la superficie terrestre tiene una capacidad calorífica sustantivamente menor que el océano, razón por la cual las fluctuaciones térmicas del clima continental son mucho más amplias que

del clima oceánico. Paralelamente, se requirieron dos formas estructurales fundamentales para la colonización: las extremidades como mecanismo de locomoción y la cabeza como una articulación del tronco; es decir, la conformación de un cuello, tanto en invertebrados como en vertebrados, como un proceso de evolución convergente, hace 420 Ma; es decir, en el Silúrico Medio.

### **La relevancia de la paradoja equilibrio-desequilibrio**

La evolución conlleva ciclos en los cuales ocurren cambios de fase de los diferentes componentes tanto abióticos como bióticos que interactúan y se retroalimentan. Los ciclos involucran una sucesión paulatina que incluye etapas ordenadas cuya duración es, generalmente, prolongada desde una perspectiva temporal, para luego transitar por etapas de desequilibrio o inestabilidad, mediante las cuales un evento en uno de los sistemas detona otros en los demás; lo que les permite eventualmente una evolución. De tal suerte que nunca regresan a su estado original, dado que durante el proceso evolutivo adquieren información que van incorporando hasta llegar a un nuevo estado de equilibrio para luego transitar hacia el desequilibrio, etapa regularmente más rápida que la primera, para dar lugar a un nuevo ciclo de glaciación/interglaciación. En cada ciclo, la información se almacena en el genoma y permite una mayor riqueza de la vida. Un claro ejemplo de esto son las proteínas de choque calórico *hps70* cuya función es almacenar la información de la variabilidad climática por la que ha transitado cada especie a lo largo de las distintas eras geológicas, lo cual les permite sobrevivir, incluso a través de períodos glaciales e interglaciales (Mohanty *et al.*, 2010). Una parte fundamental para comprender los ciclos es el anidamiento que se da entre unos y otros, así como la velocidad de estos; en los cuales, el papel de la temperatura crítica, sobre todo para la disponibilidad de la humedad absoluta en el ambiente, así como de otros elementos de la atmósfera, les permite cambiar de estado, dentro de una atmósfera que a través de miles de millones de años pasó de un carácter reductor a uno oxidante.

## Co-evolución: orgánico-inorgánico

El proceso de transición de la atmósfera químicamente reductiva a oxidante debe involucrar a los ciclos de las rocas, del carbono y del agua, por mencionar sólo tres. Con esta visión, evitaríamos los modelos sistemáticamente reduccionistas basados en el principio de causa-efecto que muchas veces resultan inconexos para comprender las diferentes etapas de la evolución, o mejor dicho de la co-evolución, en la cual intervienen biota, corteza terrestre (litosfera que incluye tanto la porción sólida como la líquida –océanos–) y atmósfera.

Desde la perspectiva sistémica, podríamos preguntarnos si ¿debemos considerar si las rocas volcánicas son la materia prima para todos los procesos petrogenéticos posteriores?, o si ¿la actividad volcánica en el eón Arqueano producía el mismo tipo de edificación volcánica que la actual?, si ¿ha variado el ritmo e intensidad del vulcanismo terrestre a medida que nuestro planeta se ha ido enfriando?, o ¿qué ha detonado los periodos de intensa actividad volcánica a lo largo del registro geológico? y si ¿la intensidad, frecuencia y posible ciclicidad del vulcanismo terrestre podrían extrapolarse a otros cuerpos planetarios con satélites? Todas estas preguntas requieren un profundo análisis para cada una de las eras geológicas, pues no tuvo el mismo impacto en la biodiversidad, basta revisar el caso de las extinciones ocurridas durante la superpluma del Cretácico Medio, cuando se presentó una actividad volcánica generalizada a nivel planetario, donde mediante procesos convectivos el magma emergió hacia la litosfera (Larson, 1995) y la separación de los continentes (deriva continental) permitió una radiación y aislamiento de especies, a diferencia de los procesos volcánicos que dieron origen a las tierras emergidas durante el Precámbrico con condiciones climáticas totalmente diferentes, reflejadas en los antagónicos climas entre ambos periodos. Sin embargo, el vulcanismo inicial podría resultar bastante alejado del actual, dado que el grosor de la corteza terrestre era distinto al presente; así como los procesos de tectónica de placas en los que están involucrados los mecanismos de subducción, hoy ampliamente conocidos; sin embargo, eran inexistentes en la

Tierra primigenia, lo predominante era la convectividad del magma hacia la incipiente corteza, posiblemente elaborada a manera de edificios volcánicos similar al fenómeno de los denominados volcanes en escudo de la cual Carracedo *et al.* (2005) muestra un ejemplo del proceso.

## Las emisiones volcánicas en la génesis de la atmósfera primigenia

La fracción gaseosa de la mayor parte de los magmas volcánicos constituye sólo del 1% al 6% de su masa; aún así, la cantidad total de gases emitidos en una erupción puede llegar a superar varios miles de toneladas al día. Si bien la proporción de gases volcánicos puede variar sustancialmente en función del tipo de vulcanismo, los valores medios de las emisiones suelen contener 70% vapor de agua, 15% CO<sub>2</sub>, 5% nitrógeno, 5% de dióxido de azufre y cantidades menores de cloro, hidrógeno, argón, monóxido de carbono y metano, entre otros. A partir de estos datos, es fácil imaginar que los gases aportados por las erupciones contribuyeron significativamente a la composición química de la atmósfera actual, cuya principal característica es su alta dinámica temporal y espacial. Su evolución posterior debe interpretarse en el marco de un complejo sistema de interrelaciones en las que la temperatura del planeta, la presencia de agua, la desgasificación volcánica y el ciclo del CO<sub>2</sub> son sólo algunos de los factores influyentes. Las emisiones desde la génesis de la atmósfera primigenia y a lo largo de la evolución de la Tierra antes de la colonización continental por la vida han evolucionado tanto en cantidad como en composición de los gases emitidos, simplemente por los cambios de la temperatura crítica que se han dado junto con las transformaciones del grosor y densidad de la atmósfera. En este proceso, la aparición de la vida (y la fotosíntesis), la presencia de agua y la actividad volcánica fueron fundamentales. La actividad volcánica y su papel en la evolución de la corteza y de la atmósfera, así como en los ciclos biogeoquímicos, no pueden plantearse desde un catastrofismo ingenuo; sino como una opción que abrió las puertas hacia el surgimiento biológico. La frecuencia e intensidad del vulcanismo actual es local en diversas regiones del planeta, si bien

genera alteraciones a nivel global en cuanto la dinámica meteorológica por la rápida dispersión del contenido emitido durante las emisiones a la atmósfera, su impacto geológico y biológico lo es a escala local; sin embargo, desencadena una reacción en cadena; al modificarse un ecosistema, los aledaños también, de manera que deben considerarse diferentes escalas de análisis temporales y espaciales. Un caso de mayor envergadura sería la esperada súper erupción del Parque Yellowstone (Perkins y Nash, 2002) de la cual se sabe tiene un ciclo de 600.000 años; periodo temporal corto en relación al ciclo de vida del planeta se refiere, pero sin duda ha contribuido en los procesos de extinción puntual.

Eventualmente, el vulcanismo conformó una atmósfera secundaria rica en hidrógeno, pero pobre en oxígeno, lo cual desencadenó un efecto invernadero, debido a que la radiación UV proveniente del Sol quedó atrapada en las capas superiores de la atmósfera por las moléculas de  $O_3$ , que en ausencia de oxígeno llegaba libremente a las capas bajas de la atmósfera. Un aspecto sobresaliente de la composición de ésta, tanto actual, como la secundaria; es decir cuando ya tenía un carácter oxidante, es la abundancia de vapor de agua, el principal gas de efecto invernadero.

La incorporación de oxígeno libre ( $O_2$ ) a la atmósfera fue gradual, se estima que hasta hace aproximadamente 2.000 Ma se contó con cantidad suficiente para formar la capa de  $O_3$ , y su principal papel en la evolución de la vida fue proteger de los rayos UV a la superficie terrestre, lo cual permitió un desarrollo más acelerado de la diversidad biológica (Dobretsov *et al.*, 2008). Sin embargo, en otros planetas, donde la capa de  $O_3$  es inexistente, es posible que los seres vivos desarrollen otras estrategias emergentes para evitar daños en su material genético, tal vez corazas formadas por minerales que funcionen como una barrera reflexiva.

### **La biodiversidad primitiva: altamente dinámica**

La diversificación de la vida marina y terrestre ha estado estrechamente ligada con cuatro factores. Primero, la tectónica de placas con una incipiente deriva continental dada la

poca proporción de tierras emergidas, donde la orografía se constituyó por acción volcánica, derivado de los iniciales procesos de subducción. Segundo, ubicación de las tierras emergidas respecto al ecuador térmico; pues la distribución del calor emanado por el Sol era transportado, al igual que hoy, por las corrientes marinas y la circulación general de la atmósfera. Tercero, con el tamaño de la corteza terrestre emergida y la cercanía o lejanía del océano propiciando climas húmedos o secos, respectivamente. De manera que la biodiversidad es un concepto muy dinámico, puesto que la composición de las especies varía en el tiempo y en el espacio a través de procesos de especiación y extinción, regulados en buena medida por las fluctuaciones en su ambiente, este último regido por cambios geológicos y climáticos. Y cuarto, con la composición química de la atmósfera.

La teoría del uniformitarismo, propuesta por Hutton (1785), establece que las leyes físicas, químicas y biológicas que actúan hoy, lo han hecho también en el pasado geológico. Este axioma asimismo denominado actualismo por algunos geólogos, si bien se cumple para todas las eras geológicas, las velocidades de los procesos han cambiado en cada era geológica (Tarbuck y Lutgens, 2000); sin embargo, los preceptos de dicha teoría no se aplican al inicio de la Tierra, pues las condiciones no eran semejantes a las actuales, ya que el oxígeno promotor de la oxidación de las rocas estaba ausente y, por lo tanto, las reacciones eran meramente fisicoquímicas, altamente reductoras y no había bioquímica generada por los microorganismos. En cambio, estaban muy presentes la meteorización y alteración hidrotermal de las rocas y su consecuente erosión, tal y como lo señala Ebert (1970) en su trabajo sobre la geología del Precámbrico en lo que se conoce como el Cinturón de Borborema.

### **El estado primordial de la Tierra: glaciación**

Durante el Precámbrico, el 88% de la historia de la Tierra (4.500 a 570 Ma), se produjeron dos glaciaciones; primero, la Huroniana con una duración de 400 Ma, dividida en tres etapas frías, la cual pudo ser consecuencia de la reducción del

metano y la contribución de oxígeno producido por las cianobacterias, pues el marcado descenso térmico regula la dinámica de los gases, la cual está regida por la presión, el volumen y la temperatura. La segunda glaciación, a finales del Precámbrico (1.000 a 580 Ma), se extendió por todos los continentes y abarcó incluso, latitudes tropicales; sin embargo, se desconoce el grosor de la capa de hielo formada sobre los océanos, y los organismos unicelulares se refugiaron en algunos mares tropicales no congelados y en fondos marinos. La magnitud de la glaciación precámbrica convirtió al planeta en lo que hoy se denomina, según Hoffman y Schrag (2002), la Teoría de la *Bola de Nieve*. Entre las causas que se atribuyen al fenómeno están la destrucción de los gases de invernadero, el enorme albedo planetario, el movimiento de las placas continentales con la conformación del súper continente Rodinia y la eventual fragmentación y dispersión de este.

### **La calidez del planeta: madre de la explosión de la vida**

A comienzos del Cámbrico, los mares se elevaron, se inició el ciclo de Wilson que cerraría, a finales del Paleozoico, las masas continentales para conformar el Pangea (Wilson, 1963), las cuales se fueron fraccionando a gran velocidad (15 cm/año), comparada con la cifra actual que es de 2,5 cm/año, para formar los escudos de Laurentia, Báltica y Siberia hacia el ecuador desde el gran continente austral, Gondwana, al formar la orogénesis pan-africana que se extendió desde el polo sur hasta el ecuador. En esta etapa, se produjo la mayor explosión de vida, la cual coincidió con una bonanza climática en un proceso dinámico de co-evolución, aunado a la abundancia de mares someros y abiertos por la separación de las masas continentales, donde la temperatura promedio se estima en 22°C, lo que desencadenó el consecuente aislamiento de especies, las cuales se fueron diversificando filogenéticamente hasta conformar otras nuevas, proceso denominado vicarianza (Mayr, 1976).

Durante el Ordovícico, el desplazamiento de la corteza llegó hasta las porciones australes del globo y se desencadenó una gran glaciación que duró cerca de 20 Ma. A mediados del Silúrico, los hielos se retiraron y de nuevo predominó

un clima cálido. Posteriormente, entre el Carbonífero y el Pérmico, se produjo la mayor glaciación del Paleozoico, la cual duró 100 Ma. El inicio del Carbonífero fue cálido; en los bloques continentales situados en torno al ecuador, en gran parte de la antigua América del Norte y de Europa se desarrollaron extensos bosques en ambientes pantanosos que formaron los actuales depósitos de carbón. Paralelamente, se establecieron en las plataformas continentales, abundantes sedimentos calcáreos que pudieron emitir ingentes volúmenes de CO<sub>2</sub> hacia la atmósfera para enfriar el clima de la Tierra. Nuevamente, entre el Carbonífero Medio y el Superior ocurrió otra expansión de glaciares, y descendió el nivel del mar. Así, la génesis y evolución del Pangea produjeron importantes fluctuaciones climáticas, con características áridas en el interior del continente y húmedas o de gran maritimidad hacia los litorales, lo cual ocasionó con ello, la gran extinción del Pérmico (Crowley *et al.*, 1991; Agustí, 1996).

### **Mosaico orográfico y celdas de circulación atmosférica: motores de la biodiversidad**

En el Mesozoico (248 a 65 Ma), predominaron los climas cálidos, no hubo ninguna glaciación. Probablemente, la separación de los diversos bloques que constituyeron el Pangea estuvo acompañada de una gran actividad volcánica. Con esta separación, se mitigaron los climas áridos, se volvieron más húmedos y favorecieron un gran desarrollo vegetal. A través del Triásico, Jurásico y Cretácico, la separación de los continentes y la orogénesis fueron colosales, trajeron consigo un efecto fundamental en los climas de la Tierra, denominado sombra orográfica y, en consecuencia, una mayor diversidad de ambientes climáticos que funcionaron como nuevos nichos ecológicos. Finalmente, en el Cenozoico, los continentes continuaron su desplazamiento hasta alcanzar su distribución actual. Lo estructuralmente distinto, respecto a las anteriores etapas geológicas, es la disposición de las celdas de Hadley, las cuales desencadenan la circulación general de la atmósfera, sobre todo en la tropósfera, porción particularmente importante para el desarrollo de la vida. En anteriores eras, el análisis

de la disposición, tamaño e intensidad de las celdas, junto con la composición de la atmósfera, podrían aportar datos para comprender los climas de entonces. Asimismo, es importante destacar que cada periodo glacial conlleva alteraciones en la difusión de los gases entre la atmósfera y el océano, al reducir la humedad ambiental y desencadenar importantes sequías. Sin embargo, un aspecto favorable para los organismos terrestres son los puentes intercontinentales que se forman durante las glaciaciones para la radiación de especies hacia otras regiones.

Eventualmente, las condiciones climáticas, geológicas y oceanográficas, aunadas a las influencias lunar y solar, varían irremisiblemente, de manera que para poder analizar cada era geológica hay que contemplar el lento descenso de la rotación de la Tierra, el cual influyó la duración de los días respecto a las noches, los ciclos de actividad solar, el clima de los continentes, la composición y la dinámica atmosférica. Con ello se podrán comprender adaptaciones biológicas específicas de acuerdo con las características geológicas y físicas del entorno; como sería el caso de las semillas de los pinos de la especie *Pinus hartwegii*.

Durante la época en la que se conformó la genealogía de la especie señalada, la atmósfera respecto a la actual era más abundante en oxígeno y predominaban las temperaturas altas; estas condiciones pudieron haber generado nubes de gran desarrollo vertical en donde imperaba una alta convectividad, la cual se alimentaba de la abundante humedad relativa proveniente de elevadas tasas de evaporación. Todas estas características propiciaron el desarrollo frecuente de tormentas eléctricas, eventualmente detonadoras de incendios. El fuego como condición recurrente orilló a las incipientes especies de pinos a desarrollar mecanismos para continuar y mantener su poblaciones; de manera que la viabilidad de las semillas contenidas en la estructura reproductiva (estróbilos) debió desarrollar dos estrategias paralelas: contener semillas viables en ausencia y presencia de fuego, para que bajo cualquiera de las condiciones meteorológicas señaladas, las semillas tuvieran éxito. De manera que la estrategia que se observa en la actualidad explica el porqué sólo un tercio de las semillas contenidas en dicha estructura reproductiva sean

biológicamente viables cuando las testas o envolturas de éstas están sometidas a las altas temperaturas registradas durante un incendio; mientras que los otros dos tercios lo hacen bajo condiciones normales y aseguran así la reproducción de la especie bajo una u otra situación.

Este mecanismo de viabilidad en las testas de las semillas de las coníferas podría ser una alternativa de reproducción en la cual se obtendrían dos ventajas: primero, aprovechar la abundancia de humus, con gran disponibilidad de nutrientes por la degradación de la materia orgánica durante el incendio y; segundo, la ruptura de la testa que alberga la semilla, sólo en una porción de la piña. Este mecanismo alternativo de reproducción se convierte en una propiedad emergente para la sobrevivencia de la especie. Se podrían ejemplificar diversas adaptaciones de distintas especies a lo largo de cada era geológica, lo que daría pie a una nueva visión integradora de la evolución de la vida bajo condiciones que ahora podríamos pensar extremas, pero que lejos del catastrofismo desencadenan la sinergia de los procesos co-evolutivos.

### **Invasión terrestre**

Durante la transición de la vida marina a la terrestre, gran parte de los organismos desarrollaron exoesqueletos que impidieron la desecación y pudieron colonizar tierra firme. Algunos peces desarrollaron pulmones y generaron la opción de un nuevo grupo filético capaz de colonizar las tierras emergidas.

La vida marina tardó miles de millones de años en colonizar la corteza terrestre; las primeras plantas terrestres se establecen hacia finales del Silúrico (Era Paleozoica), de manera que transcurrieron 408 Ma (Cuadro 1). Una de las causas probables fue la falta de suelo como un sustrato para la vegetación, pues las rocas tuvieron que pasar por innumerables procesos de erosión y sedimentación, en los que la elevación del nivel del mar pasó por etapas sucesivas de inundación y transgresión marina. Otra de las causas pudo haber sido que las mareas eran muy rápidas y amplias, la presencia de las diferentes capas de la atmósfera con desigual concentración de gases, sobre todo de oxígeno, constituyen junto con otros elementos, la radiación tardía de la vida en otro tipo de sustrato.

Cuadro 1  
Escala de tiempo geológico (Datos de la Sociedad Geológica de América)

Era	Período	Época	Ubicación (Ma)	Características biológicas
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	0,01	Desarrollo de los seres humanos
		Pleistoceno	1,8	
	Terciario	Plioceno	5,3	"Edad de los mamíferos"
		Mioceno	23,8	
		Oligoceno	33,7	
		Eoceno	54,8	
Mesozoico	Cretácico	Paleoceno	65,0	Extinción de los dinosaurios y muchas otras especies
		Jurásico	144	Primeras plantas con flores
		Triásico	206	Primeras aves
Paleozoico	Carbonífero	Triásico	248	Dinosaurios dominantes
		Pérmico	290	Extinción de los trilobites y muchos otros animales marinos
		Pensilvaniense	323	Primeros reptiles
	"Edad de los anfibios"	Grandes pantanos carboníferos		
	Devónico	Misisipiense	354	Anfibios abundantes
		"Edad de los peces"	417	Primeros insectos fósiles
	Silúrico	"Edad de los invertebrados"	443	Peces dominantes
	Ordovícico		490	Primeras plantas terrestres
Cámbrico	540		Primeros peces	
Precámbrico	>Denominado colectivamente<	"Abarca alrededor del 88% de la escala del tiempo geológico"	4.500	Trilobites dominantes
				Primeros organismos con concha
				Primeros organismos pluricelulares
				Primeros organismos unicelulares
				Origen de la Tierra

## Oxígeno vs bióxido de carbono: buscando el equilibrio en un planeta viviente

Uno de los mayores enigmas a lo largo de la historia biológica de la Tierra es porque

el oxígeno no continuó aumentando conforme la vida vegetal, sino que fue colonizando el planeta hasta nuestros días, estabilizándose su concentración en el 21% de la atmósfera actual (Cuadro 2).

Cuadro 2  
Oxígeno atmosférico según Cloud (1981)

Tiempo en Ma	Hecho que determina la necesidad de oxígeno	Oxígeno atmosférico (porcentaje respecto al actual)
2.000	Metabolismo de oxidación Capas rojas generalizadas	Inicio de la acumulación Formación de una capa de O <sub>3</sub>
1.400-1.300	Células eucariotas	Más del 1%
700-670	Seres multicelulares	6 a 7%
600-550	Esqueletos externos	10%
400	Plantas terrestres	100%

Dado que la vida vegetal produce oxígeno, debe existir algún sumidero que lo retire conforme se forma; sin embargo, los dos sumideros conocidos, hasta ahora, son la oxidación de la materia orgánica e inorgánica, ambas insuficientes para frenar su aumento. Mediavilla (2010) sugiere que en los últimos cientos de millones de años, la actividad volcánica ha descendido y la oxidación de los nuevos materiales inorgánicos emplea mucho menos oxígeno que en sus orígenes. Asimismo, señala que el otro sumidero de oxígeno es la oxidación de los hidrocarburos generados por la descomposición anaerobia, los cuales se acumulan en suelos, zonas pantanosas y fondo del océano cercano a la costa, pero cuando ocurren levantamientos continentales o descensos del nivel del mar, ocurre una desecación de los humedales aunada a su deforestación y, en consecuencia, los sedimentos quedan expuestos a la intemperie, la erosión se acelera y con ella se impulsa la descomposición aerobia de los hidrocarburos y del humus de los suelos con una disminución del oxígeno y aumento del CO<sub>2</sub>. No obstante, estas reacciones de

oxidación se han desarrollado a lo largo de la historia biológica de la Tierra y jamás frenaron el aumento del oxígeno del aire.

Tras analizar lo anterior, Lovelock (1992) sugirió que la Tierra utiliza el fuego como método para mermar el oxígeno atmosférico; sin embargo, por debajo de un 15% nada ardería y por encima de un 25% la combustión es instantánea y destruiría todos los bosques. De manera que la reacción de combustión mantiene en equilibrio la concentración del oxígeno superficial, al tiempo que produce CO<sub>2</sub> y frena la fotosíntesis en las áreas carbonizadas en la siguiente secuencia. Al comienzo del incendio, la materia orgánica reacciona con el oxígeno formando CO<sub>2</sub> y agua; posteriormente, el fuego consume rápidamente el oxígeno cercano a la superficie y los compuestos presentes en el suelo resienten su escasez para oxidarse por completo, por lo que se generan compuestos de carbono más reducidos; tras la escasez del oxígeno superficial el fuego se amortigua hasta que eventualmente se apaga, a no ser que rachas de viento traigan consigo aporte de oxígeno y aviven las llamas. El mecanismo antes mencionado constituye una

búsqueda del equilibrio de ambos gases indispensables para la vida, mecanismo que la biota vegetal ha utilizado como un recurso evolutivo en aquellas especies en las cuales el fuego es imprescindible para que sus semillas se liberen al ambiente, reforesten las áreas siniestradas y colonicen otras más en un proceso cíclico, en tanto otra perturbación mayor no cambie las concentraciones de ambos gases en la atmósfera. Situación que se mantiene en constante equilibrio dinámico hasta la actualidad.

## Epílogo

La visión sistémica aplicada a la Astrobiología y la evolución de la Tierra resulta fundamental para visualizar procesos interrelacionados e interdependientes que han co-evolucionado de manera paralela. Desde esta perspectiva, se visualiza el efecto que procesos astronómicos, como la evolución del Sol como fuente primordial de energía externa y el distanciamiento en la cercanía entre la Luna y la Tierra, inciden en la evolución de la duración del día y la noche, así como la paulatina, pero sostenida disminución de enormes mareas oceánicas. De igual forma, la transición de la composición de la atmósfera a través de la historia geológica de la Tierra y los diversos procesos geológicos han intervenido sobre los mecanismos biológicos de carácter fisiológico en animales, fenológico en plantas y, eventualmente, evolutivo en ambos reinos, sobre los ritmos circadianos, las estrategias reproductivas y la radiación a través de la vicarianza; por enunciar sólo algunos. En sentido opuesto, se puede visualizar el proceso de retroalimentación que los seres vivos han ejercido en la composición de la atmósfera y el intemperismo, entre otros. Sin caer en una visión causa-efecto, sino de un complejo mecanismo de relojería, que pese a lo fino de sus intrincadas relaciones, ha permitido, gracias al potencial evolutivo tanto de los seres vivos como de los entornos geológicos, atmosféricos y oceánicos, procesos y mecanismos que a través de la evolución abren camino a cada nuevo reto planteado en su entorno, ya sea de manera abrupta o bajo un pausado, pero sostenido proceso de cambio en el planeta.

## Referencias bibliográficas

- Agustí, J. (Ed.), (1996). *La lógica de las extinciones*. Colección Metatemas. Vol. 42. Edit. Tusquets. Barcelona, 227 p.
- Anguita, F. (2006). Las causas de las glaciaciones. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 13(3): 235-241.
- Archer, A.W. (1996). Reliability of lunar orbital periods extracted from ancient cyclic tidal rhythmites. *Earth and Planetary Science Letters*, 141(1-4): 1-10.
- Carracedo, J.C., Pérez, F.J. y Meco, J. (2005). La Gea: Análisis de una isla en estado post-erosivo de desarrollo. En: Rodríguez O. (Ed.), *Patrimonio natural de la isla de Fuerteventura*. pp. 27-44. Cabildo de Fuerteventura. Centro de la Cultura Popular Canaria. Tenerife.
- Cloud, P. (1981). *El cosmos, la Tierra y el hombre. Breve historia del universo*. Edit. Alianza. Universidad. Madrid, 355 p.
- Crowley, T., Baum, S. and Hyde, W. (1991). Climate model comparison of Gondwanan and Laurentide Glaciations. *Journal of Geophysical Research*, 96(D5): 9217-9226.
- Dobretsov, N., Kochanov, N., Rozanov, A. and Zavarzin, G. (Eds.), (2008). *Biosphere origin and evolution*. Edit. Springer. New York, 427 p.
- Ebert, H. (1970). The Precambrian geology of the "Borborema"-Belt (States of Paraíba and Rio Grande do Norte; northeastern Brazil) and the origin of its mineral provinces. *Geologische Rundschau*, 59(3): 1292-1326.
- Fairén, G.A. (2004). *Astrobiología*. Edit. Sirius. España, 211 p.
- Gómez-Caballero, J.A. y Pantoja-Alor, J. (2003). El origen de la vida desde el punto de vista geológico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 56(1): 56-86.
- Hartogh, P., Lis, D.C., Bockelée-Morvan, D., de Val-Borro, M., Biver, N., Küppers, M., Emprechtinger, M., Bergin, E.A., Crowsier, J., Rengel, M., Moreno, R., Szutowicz, S. and Blake, G.A. (2011). Ocean-like water in the Jupiter-family comet 103P/Hartley 2. *Nature*, 478: 218-220.

- Hoffman, P. and Schrag, D.P. (2002). The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change. *Terra Nova*, 14(3): 129-155.
- Hutton, J. (1785). *Theory of the Earth; or an investigation of the laws observable in the composition, dissolution, and restoration of the land upon the globe*. Transactions of the Royal Society of Edinburgh.
- Jaramillo, J.V. (1994). El Cambio Global: Interacciones de la biota y la atmósfera. *Ciencias*, 35: 4-14.
- Junge, K. and Swanson, B.D. (2008). High-resolution ice nucleation spectra of sea-ice bacteria: implications for cloud formation and life in frozen environments. *Biogeosciences*, 5(3): 865-873.
- Kasting, J.F. (1993). Earth's early atmosphere. *Science*, 259(5097): 920-926.
- Larson, R. (1995). Superpluma del Cretácico Medio. *Investigación y Ciencia*, (223): 64-69.
- López de Azarevich, V., Omarini, R., Sureda, R. y Azarevich, M. (2010). Ritmitas mareales en la formación Puncoviscana (S.L.) en la localidad de Rancagua, Noroeste Argentino: Dinámica mareal y consideraciones paleoastronómicas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 66(1): 104-118.
- Lovelock, J.E. (1992). *Gaia: una ciencia para curar el planeta*. Edit. Oasis. Barcelona, 192 p.
- Margulis, L. and Fester, R. (Eds.), (1991). *Symbiosis as a source of evolutionary innovation: speciation and morphogenesis*. Edit. Massachusetts Institute of Technology, 459 p.
- Massabuau, J.-C. (2003). Primitive, and protective, our cellular oxygenation status? *Mechanisms of Ageing and Development*, 124(8-9): 857-863.
- Mayr, E. (1976). *Evolution and the diversity of life: Selected essays*. Harvard University Press. Massachusetts, 921 p.
- Mediavilla, M.J. (2010). Origen y evolución del oxígeno atmosférico. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 18(1): 16-24.
- Mohanty, B., Mohanty, S., Sahoo, J. and Sharma, A. (2010). Climate change: impacts on fisheries and aquaculture. En: Simard, S. (Ed.), *Climate change and variability*. Chapter 7: 119-138. Sciyo, InTech Publishing.
- Pérez, R. (2006). *Dinámica atmosférica y los procesos tormentosos severos*. Edit. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Mendoza, 137 p.
- Perkins, M. and Nash, B. (2002). Explosive silicic volcanism of the Yellowstone hotspot: The ash fall tuff record. *Geological Society of America Bulletin*, 114(3): 367-381.
- Ribas, I. (2006). La evolución de la actividad solar y sus efectos sobre los planetas. *Boletín Informativo de la Sociedad Española de Astronomía*, 16: 15-31.
- Schaefer, V.J. and Day, J.A. (1981). *A field guide to the atmosphere*. The Peterson Field Guide Series. Houghton Mifflin Company Boston, 359 p.
- Tarback, E. y Lutgens, F. (2000). *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la Geología Física*. Edit. Pearson, Prentice Hall. México, 685 p.
- Wang, Z., Wu, D., Song, X., Chen, X. and Nicholls, S. (2012). Sun-Moon gravitation-induced wave characteristics and climate variation. *Journal of Geophysical Research*, 117: 1-20.
- Williams, G.E. (2000). Geological constraints on the Precambrian history of Earth's rotation and the Moon's orbit. *Reviews of Geophysics*, 38(1): 37-59.
- Wilson, T. (1963). Hypothesis of Earth's behaviour. *Nature*, 198(4884): 925-929.