

La explosión del Cámbrico: un evento único de diversificación de *phyla*

Maricruz **Rangel-Galván**

Se sabe que la formación de la Tierra ocurrió aproximadamente hace cuatro mil 650 millones de años. A partir de entonces, hasta el presente, se establece el tiempo geológico que divide en categorías (como supereón, eón, era y periodos) los eventos en la historia de la Tierra y de la vida. La primera y más grande división del tiempo geológico corresponde al supereón Precámbrico que, a su vez, contiene a los eones Hádico, Arcaico y Proterozoico. En la Figura 1 se muestran algunos acontecimientos importantes ocurridos durante el Precámbrico que dieron las condiciones necesarias para que ocurriera la explosión del Cámbrico. El periodo Cámbrico se ubica en la escala temporal que comprende de 541 millones de años hasta 485 millones de años (Palmer y Barret, 2010).

Así como el tiempo geológico se divide en categorías, los organismos se clasifican también de manera ordenada y jerárquica en las categorías: reino, filo (*phylum*, singular; *phyla*, plural), clase, orden, familia, género y especie. La explosión del Cámbrico fue un evento único que se caracteriza por la diversificación de los organismos a nivel de *phyla*; su importancia radica en que dio origen a casi todos los *phyla* que conocemos actualmente. Además, durante la explosión del Cámbrico se genera una complejización de las formas corporales en muchos linajes animales, algunos de ellos con relación filogenética con los animales modernos.

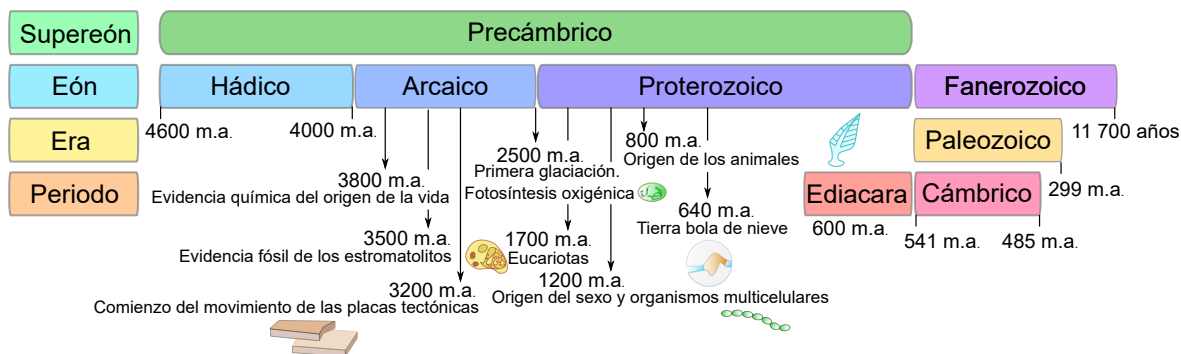


Figura 1. Escala de algunos periodos de tiempo geológico y los principales eventos ocurridos en la historia de la Tierra hasta alcanzar el periodo Cámbrico.

La principal particularidad de los *phyla* es determinar los planes corporales de los organismos en el árbol de la vida. El plan corporal permanece como un patrón básico sobre el cual los animales siguen evolucionando y diversificándose en otras características como el tamaño, el metabolismo y las especializaciones ecológicas.

Por ejemplo, el plan corporal de los vertebrados consiste en poseer simetría bilateral, un endoesqueleto y un sistema nervioso ubicado en la parte dorsal; el plan corporal de los artrópodos consiste en poseer cuerpos segmentados, exoesqueleto y apéndices articulados, mientras que el plan corporal de los moluscos consiste en cuerpos blandos, sin segmentos, generalmente protegidos por conchas.

En particular, el linaje de los artrópodos tuvo un auge en su diversidad durante el periodo Cámbrico (Trestman, 2013).

La explosión del Cámbrico expuso un problema a la teoría de Darwin que planteaba que la vida, conforme evolucionaba, daba lugar de manera gradual a organismos cada vez más complejos.

En la época de Darwin se justificó que la repentina aparición de una fauna compleja del Cámbrico se debía a la falta de registros fósiles antes de ese periodo.

Sin embargo, más que un cambio gradual, parecen haber existido periodos de rápida diversificación acompañados de cambios en las condiciones ambientales (Penumaka, 2011).

EL ORIGEN DE LA EXPLOSIÓN DEL CÁMBRICO

Fueron necesarios diferentes factores geológicos, ambientales y biológicos para que se diera la explosión del Cámbrico. Dentro de los eventos geológicos, tenemos la formación de los supercontinentes: Gondwana, Laurentia, Baltica y Siberia, que son resultado del movimiento de las placas tectónicas. Gondwana estaba formado por Australia, sur de África, China, India, Sudamérica y Antártida; mientras que Laurentia comprendía la región de Norteamérica, y Baltica la región escandinava. Asimismo, la actividad volcánica submarina del Precámbrico contribuyó a cambios en la concentración de los gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO_2). Los cambios en su concentración en el ambiente y disuelto en los mares afectó la temperatura global. Durante el Precámbrico, el CO_2 en la atmósfera disminuyó, mientras que su contenido en el mar se incrementó, generando una temperatura global baja, este proceso dio lugar a la “Tierra bola de nieve”. El resultado de estas condiciones ambientales fue una circulación oceánica fuerte generada por las diferencias de temperatura en el Ecuador con respecto a los polos. Una consecuencia de ello es que el suplemento de nutrientes, como el fósforo y el nitrógeno, se depositó sobre los márgenes continentales, además de producirse una intensa producción de plancton. En el periodo Cámbrico ocurrió un aumento en la temperatura global de la tierra, pasando de la Tierra bola de nieve del Precámbrico a la Tierra en condiciones de invernadero.

Durante estas condiciones hubo un incremento de CO₂ atmosférico acompañado de un decremento en las concentraciones del CO₂ en el mar. Una de las principales causas del cambio de concentración del CO₂ fue la precipitación del carbonato de calcio (CaCO₃) en el mar (Tucker, 1992).

El incremento de CaCO₃ hizo que las concentraciones de calcio aumentaran en el mar dando como resultado innovaciones evolutivas necesarias para regular los niveles de calcio en los organismos. En efecto, el calcio es un ion importante en diversos procesos celulares, por ejemplo, en la expresión génica, la mitosis, la contracción muscular, la secreción de hormonas y la secreción de neurotransmisores. Sin embargo, el incremento del calcio citosólico es responsable de dañar la mitocondria, de condensar la cromatina, de la degradación de enzimas, además de estar involucrado en el proceso de la muerte celular programada. Es por ello que tener mecanismos eficientes de regulación de las concentraciones de calcio en los organismos fue una presión evolutiva importante para su supervivencia. Entre estos mecanismos se encuentran los que están relacionados con el influjo y eflujo eficiente del calcio por medio de canales iónicos o intercambiadores. También los mecanismos que involucran impermeabilidad, precipitación y unión a las paredes o capas externas de los iones de calcio. La regulación del calcio se remonta al origen de la vida, ya que incluso los organismos procariotas más primitivos cuentan con bombas de calcio y un sistema de intercambio Ca²⁺/H⁺ y Na⁺/Ca²⁺ para regularlo. Cabe mencionar que en el Precámbrico, el calcio fue promotor de innovaciones como la multicelularidad y la fotosíntesis. En cambio, en el periodo Cámbrico, el aumento en las concentraciones de calcio contribuyó principalmente a la biomineralización para lograr la formación del exoesqueleto de conchas y la esqueletogénesis. Se tiene la hipótesis que la biomineralización surgió como uno de los mecanismos de desintoxicación de los organismos debido al incremento nocivo de los niveles de calcio. Además de esta estrategia, otros organismos respondieron al estrés del incremento en

la concentración del calcio secretando moléculas complejas como polisacáridos y glicoproteínas, formando compuestos organometálicos –el calcio es un metal alcalinotérreo de acuerdo con la tabla periódica– (Kazmierczak y cols., 2013).

Por otro lado, el proceso de fotosíntesis, generado principalmente por las cianobacterias, dio origen a la gran oxigenación del Precámbrico. El oxígeno, un gas tóxico para los organismos anaeróbicos, dio lugar a la posterior diversificación de los organismos aeróbicos.

Se ha propuesto que los organismos eucariotas pudieron responder mediante la compartimentación de las células para proteger el ADN de los agentes reactivos de oxígeno durante el aumento de los niveles de este elemento (Penumaka, 2011). Los procesos celulares de respiración aeróbica producen una mayor cantidad de moléculas de ATP (adenosín trifosfato, por sus siglas en inglés: *adenosine triphosphate*), lo que significa tener la capacidad de realizar funciones fisiológicas que requieran un mayor costo energético. En tres linajes animales: artrópodos, cordados y moluscos (principalmente el grupo de los cefalópodos donde se encuentran los pulpos y calamares) se identifica el surgimiento de funciones fisiológicas complejas o de cuerpos complejos activos. Estos cuerpos se caracterizan por tener sentidos distales que permiten la manipulación de objetos y el desplazamiento en el espacio con una movilidad activa por medio de extremidades con varios grados de libertad. La presencia de cuerpos complejos activos está acompañada de una manifestación cognitiva básica que, por medio del aprendizaje asociativo, va llevando a los organismos a evolucionar hacia un comportamiento complejo e inteligente (Trestman, 2013).

Se considera que *Haikouella* fue el primer organismo vertebrado del Cámbrico que podría tener los elementos básicos que requiere de una conciencia sensorial. La conciencia sensorial entendida como una representación del mundo exterior, producida por una configuración neuronal organizada, ya sea de manera espacial o no espacial

(que incluye a los sistemas visual, somatosensorial, vestibular, auditivo, olfativo y gustativo). Se necesita un cerebro que tenga un prosencéfalo (no necesariamente una corteza cerebral), un mesencéfalo y un rombencéfalo como requisito para desarrollar la conciencia sensorial.

Estas áreas permiten el relevo jerárquico de la información y además son zonas de integración sensorial donde emerge la atención, la sincronización y la conciencia sensorial. De los sentidos sensoriales distales, el sentido de la vista pasó de ser un sistema que podía identificar presencia o ausencia de luz a generar imágenes complejas. Los animales interpretan dichas imágenes y se tiene la hipótesis de que su desarrollo tuvo una mayor contribución en el progreso de la conciencia sensorial (Feinberg y Mallat, 2013).

Se ha propuesto como alternativa para explicar el origen de la diversificación de los *phylum*, bajo las condiciones geológicas y ambientales explicadas anteriormente, la apertura de nichos ecológicos vacíos (conjunto de factores bióticos y abióticos con los que los organismos se relacionan), donde proliferó la vida, a razones logarítmicas, bajo condiciones de libre competencia en un tiempo específico (Gould, 1989).

El plancton, que proliferó en la superficie marina, provocó que los animales dejaran de aprovechar nutrientes solo del fondo marino (bento) por mecanismos de filtrado que se encuentran en la mayoría de los animales de la fauna del Ediacara. Al aprovechar el recurso del plancton se promueve un aumento en la actividad metabólica y en la complejización de los animales. Las cadenas tróficas se extienden y así se produce una adaptación evolutiva con influencia entre dos o más especies (coevolución) de tipo presa-depredador. Los depredadores, ahora orientados por el sentido de la vista, generaron una presión de selección evolutiva porque las presas para sobrevivir requerían de diversas estrategias como el camuflaje, las defensas mecánicas, la cripsis, entre otras (Trestman, 2013).

SITIOS ARQUEOLÓGICOS DEL PERIODO CÁMBRICO

Se denomina *Lagerstätten* –una palabra de origen alemán que significa yacimiento– a los sitios arqueológicos con una riqueza considerable de fósiles bien conservados que describen una fauna determinada, incluyendo en varias ocasiones información de organismos con tejidos blandos. Existen diversos *Lagerstätten* correspondientes a la fauna del periodo Cámbrico. Entre ellos podemos mencionar Sirius Passet en el norte de Groenlandia, Emu Bay Shale en la costa norte de la isla del Canguro en Australia, Alum Shale de Suecia, Burgess Shale en Columbia Británica, Canadá y Maotianshan Shale o biota de Chengjiang en la provincia de Yunnan, China.

La fauna de Burgess Shale fue descubierta en 1909 por Charles Dolittle Walcott, un paleontólogo y secretario del Instituto Smithsonian quien colectó alrededor de 40,000 especímenes. Este sitio arqueológico fue visitado por paleontólogos de la Universidad de Harvard y miembros del Museo Real de Ontario (Morris, 1979). En 1971 el profesor de geología en Cambridge y experto en trilobites, Harry Whittington, reexaminó y reclasificó los especímenes de este sitio arqueológico (Gould, 1989). Por otro lado, en 1984 se encontró el primer fósil de cuerpo blando en Maotianshan Shale, descubierto por el profesor Xian-Guang Hou que, junto con sus colegas de la Universidad de Yunnan, Oxford, y miembros del Museo de Historia Natural de Londres, registraron unas 250 nuevas especies (Xian-Guang y cols., 2017).

Los fósiles de Maotianshan Shale y de Burgess Shale son relativamente más importantes que los otros *Lagerstätten* del Cámbrico, porque describen la biota –conjunto de especies que habitan un área dada– del Cámbrico temprano y del Cámbrico medio, respectivamente. Los fósiles de Maotianshan Shale representan una fauna del Cámbrico hacia 12 millones de años antes que las de Burgess Shale. Los fósiles de estos sitios, al conservar información de tejidos blandos, nos dejan obtener mayor información de la estructura interna de los organismos depositados, lo que permite una mejor



Figura 2. Representación ilustrativa de la fauna del Cámbrico en la que se muestran a los siguientes organismos: (1) *Ottoia*, (2) *Sanctacaris*, (3) *Hallucigenia*, (4) *Quadrolaminiella*, (5) *Aysheaia*, (6) *Dinomischus*, (7) *Yunnanocephalus*, (8) *Canadaspis*, (9) *Pikaia*, (10) *Archisaccophyllia*, (11) *Opabinia*, (12) *Odontogriphus*, (13) *Vauxia*, (14) *Wiwaxia*, (15) *Thaumaptilon*, (16) *Fuxianospyra* y (17) *Anomalocaris*. Ilustración basada en Gould SJ, 1989 y Xian-Guang H y cols., 2017.

clasificación taxonómica y descripción de su paleoecología (Xian-Guang y cols., 2017).

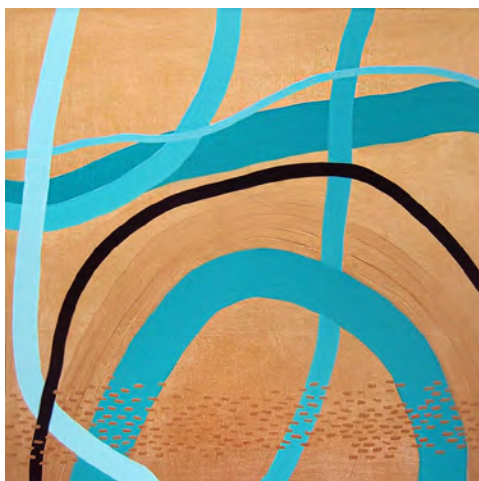
ORGANISMOS DEL PERIODO CÁMBRICO

El hábitat de los mares del Cámbrico comprende aguas someras poco profundas. En general, la paleoecología describe tres nichos ecológicos principales, los animales que se encuentran por debajo o sobre el sedimento (bentos), los animales que nadan activamente en las columnas de agua (necton) y los organismos que flotan errantes en la superficie marina (plancton). La fauna bentónica se divide en infauna y epifauna. La infauna corresponde a los organismos que excavan y se desplazan en el interior del sustrato construyendo túneles, tal como lo hace el priapulido *Ottoia*. La epifauna define a los organismos que viven sobre el sedimento, ya sea anclados o desplazándose sobre la superficie. Algunos organismos anclados sobre el sedimento son el cnidario *Archisaccophyllia*, el alga *Fuxianospyra* (Xian-Guang y cols., 2017), los poríferos *Quadrolaminiella* y *Vauxia* (Palmer y Barret, 2010) y los animales *Dinomischus* y *Thaumaptilon*. Los organismos que se desplazan sobre el sedimento son el artrópodo quelicerado *Sanctocaris* (Gould, 1989), al artrópodo trilobite *Yunnanocephalus* (Palmer y Barret, 2010), el crustáceo malacostráceo

Canadaspis y los animales *Hallucigenia* y *Wiwaxia* (Gould, 1989). La mayoría de la fauna del Cámbrico era bentónica, representando un 87.5 % (Morris, 1979). La fauna del necton corresponde a organismos que nadan sobre las columnas de agua. En este grupo tenemos al artrópodo predador *Anomalocaris*, el cordado *Pikaia* y los animales *Opabinia* y *Odontogriphus*. Se pensaba que *Aysheaia* era un parásito de esponjas como *Vauxia* (Gould, 1989). Finalmente, el plancton lo constituyen animales que viven en suspensión y que se desplazan pasivamente por las corrientes oceánicas.

En la Figura 2 se muestra una ilustración de estos organismos. Para mostrar mejor sus características morfológicas no se considera una escala de tamaños relativos. A los organismos que aprovechaban los residuos orgánicos contenidos en los fondos marinos se les denomina limívoros, mientras que a los organismos que se alimentan a partir de partículas suspendidas en el agua se les denomina filtradores, si las toman de manera activa, o suspensívoros, si lo hacen de forma pasiva porque están fijados en el sustrato. Otras formas de obtención de alimentos incluyen a los predadores, los carroñeros y los parásitos (Xian-Guang y cols., 2017).

© María Eugenia Jiménez Melo. Sin título.
Acrílico/tela, 70 x 70 cm, 2009.



© María Eugenia Jiménez Melo. Principio femenino.
Acrílico/tela, 150 x 150 cm, 2005.

Entre los *phyla* que tienen algún representante actual podemos mencionar a los priapulidos, los braquiópodos, las algas, las esponjas, los cnidarios, los artrópodos y los vertebrados. Los demás animales se colocaron en nuevos *phylum* que actualmente están extintos (Palmer y Barret, 2010).

El predador carnívoro con mayor tamaño, artrópodo más famoso de este periodo, es *Anomalocaris*, con una longitud promedio de un metro. En el Cámbrico temprano se identifica a la especie *Anomalocaris saron* (Xian-Guang y cols., 2017), mientras que en el Cámbrico medio se ha descrito a la especie *Anomalocaris canadaspis*. Inicialmente se había considerado erróneamente al organismo *Anomalocaris* como tres organismos diferentes, su aparato bucal como la medusa *Peytoia*, el cuerpo como el pepino de mar *Laggania* y los apéndices –piezas bucales para tomar el alimento– como una pieza bucal del artrópodo *Sidneyia* denominada Apéndice-F; fue en 1985 cuando Whittington y Briggs armaron al artrópodo *Anomalocaris* (Gould, 1989). Los representantes de los cordados en el Cámbrico temprano fueron los organismos *Haikouella* (Feinberg y Mallatt, 2013) y *Haikouichthys* (Xian-Guang y cols., 2017) y en el Cámbrico medio el organismo *Pikaia*. La supervivencia de *Pikaia* durante este periodo representa, desde el punto de vista evolutivo, nuestra presencia en la Tierra en el tiempo actual. Como conclusión podemos decir que la explosión

del Cámbrico tiene una importancia particular en la historia de la vida en la Tierra porque es un periodo de proliferación de casi todos los *phyla* que conocemos actualmente. La explicación de este evento único aún está en investigación, ya que es complicado involucrar simultáneamente factores geológicos, biológicos y ambientales.

B I B L I O G R A F Í A

- Feinberg TE, Mallatt J (2013). The evolutionary and genetic origins of consciousness in the cambrian period over 500 million years ago. *Front Psychol* 4:1-27.
- Gould, SJ (1989). *Wonderful Life: The Burgess Shale and the Nature of History*. Hutchinson Radius.
- Kazmierczak J, Kempe S, Kremer B (2013). Calcium in the Early Evolution of Living Systems: A Biohistorical Approach. *Curr Org Chem* 17:1738-1750.
- Morris SC (1979). The Burgess Shale (Middle Cambrian) Fauna. *Annu Rev Ecol Syst* 10:327-349.
- Palmer D, Barrett P (2010). *Evolución historia de la vida*. Gaia Ediciones.
- Penumaka BA (2011). The Cambrian Explosion and the Origins of Diversity. *Harvard Sci Rev* 44-47.
- Trestman M (2013). The Cambrian Explosion and the Origins of Embodied Cognition. *Biol Theory* 8:80-92.
- Tucker ME (1992). The Precambrian-Cambrian boundary: seawater chemistry, ocean circulation and nutrient supply in metazoan evolution, extinction and biomineralization. *J Geol Soc* 149:655-668.
- Xian-Guang H, Aldridge RJ, Bergström J, Siveter DJ, Siveter DJ, Xiang-Hong F (2017). *The Cambrian fossils of Chengjiang, China: The flowering of early animal life*. Wiley Blackwell.

Maricruz Rangel-Galván
Facultad de Ciencias Químicas
Laboratorio de Química Teórica
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
marirangal@gmail.com