

La revolución marina del Paleozoico medio

El gran impacto de los continentes sobre la vida en el mar



A mediados de la Era Paleozoica, hace aproximadamente 400 millones de años, los ecosistemas marinos recibieron un estímulo sin precedentes cuando los continentes comenzaron a aportar nutrientes orgánicos que se habían almacenado como producto del desarrollo de la primera vegetación terrestre. Esta fertilización a gran escala, incentivó la complejización de las redes tróficas en todos los ambientes marinos y disparó una carrera evolutiva entre nuevos tipos de depredadores y una gran variedad de presas con defensas innovadoras. Este hito único definió la historia de la vida marina en lo sucesivo y, en gran medida, es responsable de la dinámica ecológica que observamos todavía en los mares de nuestros días.



Juan José Rustán

Doctor en Ciencias Geológicas,
Investigador Adjunto del CONICET
Docente de la Carrera de Geología
Universidad Nacional de La Rioja

La fascinación que nos despiertan los océanos y sus habitantes cobra una dimensión casi fantástica cuando se trata de averiguar lo que sucedía en los escenarios marinos desaparecidos hace millones de años. Entre los interrogantes que obsesionan aún a los científicos más acostumbrados a las maravillas de la vida, se destacan una serie de acontecimientos acaecidos tempranamente en los océanos primitivos. Aunque la aparición de la vida y su diversificación inicial están en el primer puesto del podio, otros eventos bióticos de gran escala, pero menos conocidos, mantienen candentes las discusiones de los investigadores en su impulso por averiguar, desentrañar y descubrir.

Uno de estos grandes despliegues, tuvo lugar en los mares de hace unos 400 millones de años. Para dimensionar la cuestión será necesario un breve recorrido por las primeras etapas de la vida valiéndonos de una combinación entre los rigurosos datos aportados por las Ciencias de la Tierra y de la Vida y el potencial interpretativo que nos brinda la imaginación.

El edén de los primeros mares: *a sunrise reggae*

Hace unos 3500 millones de años (casi mil millones de años después del origen de nuestro planeta), la vida tuvo su primera aparición representada por sencillas formas unicelulares que dominaron los mares por largos períodos geológicos, mientras los continentes permanecían absolutamente desiertos. Estos minúsculos habitantes eran tenaces arquitectos y evolucionaron hacia formas complejas modificando en el proceso la composición química de los mares y la atmósfera con los productos de su metabolismo. Nuestro planeta, alguna vez inhóspito, se volvió paulatinamente más confortable como resultado de la actividad de estos humildes pioneros que se limitaban a cubrir el fondo marino con un tapiz protector.

Durante el prolongado intervalo inicial de la Tierra (que los geólogos denominan Precámbrico) los

mares se asemejaban a un jardín que se nutría de la luz del sol mediante fotosíntesis y florecía poblado de algas y de delicadísimos animales de aspecto plumoso que se mecían fijos al fondo, entre bochones rocosos construidos por bacterias. Este era un mundo extraño, pacífico y relajado, totalmente carente de depredadores (Figura 1).

Durante el prolongado intervalo inicial de la Tierra (que los geólogos denominan Precámbrico) los mares se asemejaban a un jardín que se nutría de la luz del sol mediante fotosíntesis y florecía poblado de algas y de delicadísimos animales de aspecto plumoso que se mecían fijos al fondo, entre bochones rocosos construidos por bacterias. Este era un mundo extraño, pacífico y relajado, totalmente carente de depredadores



Figura 1. Un fondo marino de finales del Precámbrico, hace unos 600 millones de años. En este mundo tranquilo, no había animales complejos ni depredadores. <http://unnatural.ru/unprotein-life> Autor John Sibbick

La vida se complica: comienza el Paleozoico

Acto seguido y dando lugar a uno de los mayores enigmas de la vida de todos los tiempos, aparecieron ya perfectamente definidos todos los principales grupos de animales marinos que conocemos actualmente, junto con otros bizarros e inclasificables, destinados a desaparecer para siempre. Desfilaron por primera vez organismos de construcción compleja y dotados de visión, que podían desplazarse ávidos de ingerir alimento y que, en muchos casos, estaban provistos de duros caparazones preservables

Acto seguido y dando lugar a uno de los mayores enigmas de la vida de todos los tiempos, aparecieron ya perfectamente definidos todos los principales grupos de animales marinos que conocemos actualmente, junto con otros bizarros e inclasificables, destinados a desaparecer para siempre

como fósiles.

Con esta aparición explosiva de nuevos diseños biológicos en los océanos quedaba oficialmente inaugurada la Era Paleozoica, hace unos 540 millones de años, mientras los continentes con-

tinuaban desprovistos de vida.

A partir de este gran evento evolutivo, se inició un abundante y continuo registro de fósiles que relata con detalle los pormenores de la historia de la vida hasta nuestros días. Durante los 290 millones de años de duración de la Era Paleozoica, antes de que aparecieran los dinosaurios, las aves y los mamíferos, se sucedieron varios eventos destacables incluyendo la conquista de la tierra firme, devastadoras etapas de extinción masiva y revoluciones ecológicas globales que delinearon para siempre las características de los principales ecosistemas que conocemos en la actualidad. Uno de estos grandes eventos se conoce como la Revolución Marina del Paleozoico medio.

El antecedente de principios del Paleozoico: una cuestión de fondo

En un verdadero acto de ambición, teniendo en cuenta la espectacular explosión de los albores del Paleozoico, la vida marina redobló la apuesta embarcándose en un nuevo proyecto de diversificación. Esta vez, mientras los continentes sufrían apenas tímidos intentos de conquista por parte de las primeras plantas (hace unos 470 millones de años), un nutrido elenco de formas de vida se encargó de explotar especialmente los ambientes relacionados con los fondos marinos.

En esta situación, nos hubiese llamado la atención la escasez de formas de movimientos enérgicos, en especial de depredadores

Mientras los continentes sufrían apenas tímidos intentos de conquista por parte de las primeras plantas (hace unos 470 millones de años), un nutrido elenco de formas de vida se encargó de explotar especialmente los ambientes relacionados con los fondos marinos

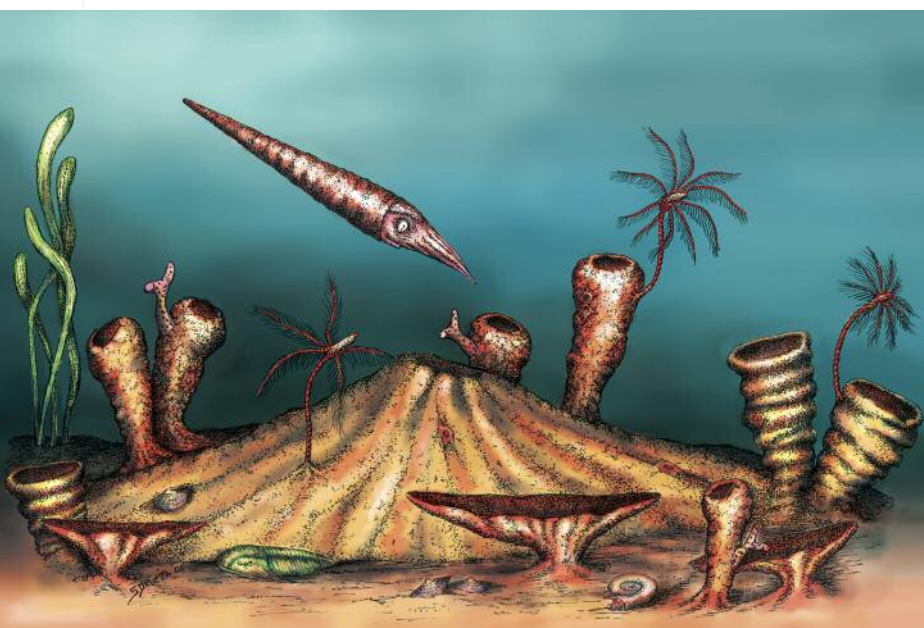


Figura 2. Luego de la explosiva aparición de una gran diversidad de organismos con esqueletos, que caracterizó el comienzo de la Era Paleozoica (hace unos 540 millones de años), la vida continuó asociada a los recursos del fondo marino. Imagen: S. Druetta.

y nadadores expertos como los peces, lo cual dejaba sin explotar gran parte del agua como espacio vital. Los animales se encontraban organizados en rígidos niveles verticales, a unos pocos centímetros por sobre el fondo marino, mayormente enfrascados en una pasiva competencia por obtener las partículas de alimento que se encontraban suspendidas en el agua o espar-

Figura 3. Durante el Paleozoico medio, hace unos 400 millones de años, los océanos comenzaron a mostrar la influencia del aporte de nutrientes desde los continentes, acumulados gracias al desarrollo de la vegetación terrestre. Esta fertilización de gran escala disparó un drástico aumento en la productividad biológica y las interacciones entre consumidores marinos se vieron fuertemente estimuladas a nivel global. Ilustración de un bosque Devónico por Eduard Riou (1838-1900), fuente: *The World Before the Deluge* 1872, USA.



cidas por el fondo (Figura 2). Este era el reino de todo lo que permaneciera en el lecho marino, recolectando y procesando partículas nutritivas en una aburrida monotonía. Así de estático habría sido el escenario precursor de la revolución por los alimentos que sobrevendría a continuación.

¡La mesa está servida! Una revolución por nuevos recursos alimenticios

Hacia mediados de la Era Paleozoica (hace alrededor de 400 millones de años) un decisivo fenómeno de reorganización de las cadenas alimentarias se generó cuando los continentes comenzaron a suministrar gran cantidad de nutrientes hacia los océanos, por primera vez en la historia de nuestro planeta. Los continentes habían estado almacenando materia orgánica durante el prolongado proceso de conquista del medio terrestre por parte de las plantas (Figura 3). Éstas se diversificaron en tiempo récord, desarrollaron suelos ricos en componentes orgánicos, incrementaron la descomposición biológica de las rocas

Hacia mediados de la Era Paleozoica (hace alrededor de 400 millones de años) un decisivo fenómeno de reorganización de las cadenas alimentarias se generó cuando los continentes comenzaron a suministrar gran cantidad de nutrientes hacia los océanos, por primera vez en la historia de nuestro planeta

y aumentaron la productividad fotosintética total. Como resultado, el Paleozoico medio atestiguó el comienzo de un verdadero proceso de fertilización de los océanos mediante el aporte significativo de carbono y otros elementos químicos esenciales para la vida (fundamentalmente fósforo y nitrógeno). El acontecimiento se vio particularmente favorecido por bajos niveles del mar, que contribuyeron a la mejor exposición y erosión de las masas continentales emergidas.

Los complejos mecanismos ecológicos desencadenados por este repentino aporte de gran cantidad de recursos energéticos, trastocaron radicalmente las relaciones entre organismos con-

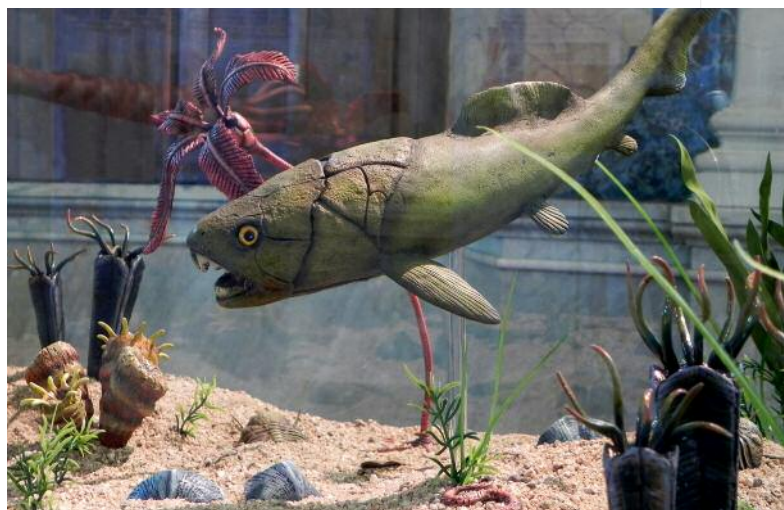


Figura 4. La Revolución Marina del Paleozoico medio implicó un la aparición de grandes depredadores y de nuevas defensas adaptativas en las presas. Los estilos de vida muy activos se volvieron comunes, particularmente en las aguas libres. La reconstrucción pertenece a la Muestra Paleontológica "500 millones de años de viaje submarino: la vida en los mares primitivos" expuesta en la Academia Nacional de Ciencias en Córdoba (Diseño del diorama: Santiago Druetta).

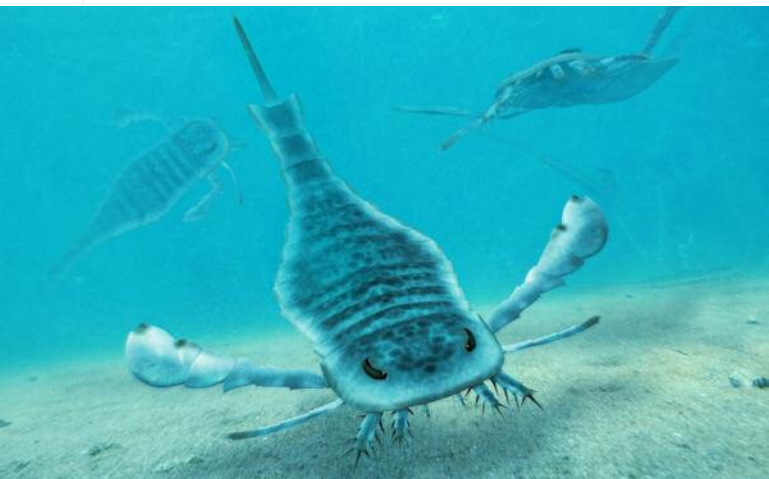


Figura 5. Algunos depredadores muy particulares son típicos del Paleozoico medio, como los extinguidos escorpiones marinos. Créditos: Obsidian Soul

sumidores en todos los ecosistemas marinos y comenzó una encarnizada disputa evolutiva por el aprovechamiento de los nuevos alimentos disponibles. Pronto, nuevos y singulares protagonistas aparecieron en escena y la abundancia y diversidad de especies marinas comenzó a aumentar aceleradamente.

En este contexto, la Revolución Marina del Paleozoico medio es una hipótesis que explica un doble conjunto de evidencias del registro paleontológico: por un lado, la rápida aparición de nuevos tipos de depredadores especializados y como contrapartida, una serie de radicales respuestas defensivas en las presas (Figura 4). La propuesta supone que se intensificaron las interacciones bióticas de enemistad o antagonismo (particularmente de depredación y competencia) y predice la diversificación y



Figura 6. El trilobite *Echidnops taphomimus* del Devónico de Argentina, adquirió la capacidad de enterrarse para protegerse mientras cambiaba de caparazón. El fósil ilustrado representa un caparazón dejado por el animal dentro del sedimento, luego de desprenderse de él durante el proceso de muda. Foto: J. J. Rustán.

La Revolución Marina del Paleozoico medio es una hipótesis que explica un doble conjunto de evidencias del registro paleontológico: por un lado, la rápida aparición de nuevos tipos de depredadores especializados y como contrapartida, una serie de radicales respuestas defensivas en las presas

predominio de formas de vida de alta demanda energética (con modos de vida muy activos y altos requerimientos metabólicos). En la concepción central de este fenómeno evolutivo, subyace la idea de una carrera de armas entre depredadores y presas que involucró un lapso fundamentalmente comprendido entre los 440 y los 300 millones de años (los períodos geológicos correspondientes al Silúrico, Devónico y Carbonífero de la Era Paleozoica). Los grandes cambios en el estilo de vida de los habitantes marinos se vieron incentivados a su vez por crecientes niveles de oxigenación, causados por el incremento en la fotosíntesis global de las plantas terrestres y las algas marinas microscópicas.

Los nadadores activos se volvieron dominantes en detrimento de modos de vida más pasivos y asociados a los fondos, más comunes hasta ese momento. De hecho, las consecuencias más notables de esta revolución tuvieron lugar en las aguas alejadas de los fondos, que se vieron invadidas por una pesadilla de nuevos y aterradores protagonistas.

Aparecieron peces de todo tipo (Figura 4), en ocasiones gigantes, dotados de temibles mandíbulas llenas de dientes cortantes y placas trituradoras. Entre los artrópodos, se destacaban escorpiones marinos de más de un metro de largo que patrullaban las aguas blandiendo mortíferas pinzas raptoras (Figura 5). Astutos parientes extinguidos de calamares y pulpos, con picos punzantes como los de los loros, evolucionaron para reclamar su cuota de carne fresca en el dominio de las aguas libres (imagen de portada). Éstos desarrollaron caparazones fuertemente enrollados y reforzados que les permitieron regular eficientemente la flotabilidad y resistir altas presiones sin perder velocidad y maniobrabilidad, lo cual los habilitó para realizar incursiones rapaces incluso a grandes profundidades.

La respuesta evolutiva en las presas fue igual de espectacular. El aumento en la presión de depredación indujo la adquisición generalizada de defensas morfológicas, como espinas, armaduras y gruesos caparazones, además de conductas disuasivas y evasivas, como el ocultamiento, la capacidad de excavar y enterrarse (Figuras 6 y 7, ver recuadro), el incremento en la movilidad, el camuflaje, y la capacidad de regeneración de partes dañadas.

En este cambio radical de las reglas de interacción biológica yace la esencia de la revolución ecológico-evolutiva del Paleozoico medio. La dinámica de la vida en los mares había cambiado por completo y nunca volvió a ser como antes.

Enterrarse para cambiar de caparazón: una conducta defensiva extrema en los trilobites

Aunque los estudios preliminares de la Revolución Marina del Paleozoico medio se han enfocado en los depredadores, un renovado conjunto de investigaciones están dirigidas a saber lo que ocurrió con las presas. Existen reportes acerca del aumento de estrategias defensivas típicas, como la espinosidad, que se observa en parientes de las estrellas y erizos de mar, en caracoles, almejas y otros animales provistos de valvas. Sin embargo, hay pocos estudios sobre los trilobites, un importante grupo de simpáticos artrópodos marinos del Paleozoico, de aspecto similar a los actuales bichos-bolita. Los trilobites eran animales altamente móviles y, por lo tanto, son ideales para analizar comportamientos defensivos, sobre todo teniendo en cuenta que los estudios previos se han centrado en grupos prácticamente incapaces de desplazarse. Antecedentes interesantes indican que precisamente a mediados del Paleozoico varios grupos de trilobites desarrollaron independientemente la capacidad de enterrarse en el sedimento blando para mudar el caparazón, a resguardo de depredadores durante esta etapa de gran vulnerabilidad de su ciclo vital (Figura 7). Otros indicios de la necesidad de adquirir defensas se relacionan con la alta diversidad de trilobites fuertemente espinosos y provistos de otras estructuras defensivas inusuales, como cuernos, espadas y tridentes frontales (Figura 7). En el marco de los proyectos de investigación que lleva adelante el CICTERRA, se están estudiando aspectos evolutivos de los trilobites que puedan ser mejor explicados en el contexto del aumento en la presión de depredación del Paleozoico medio. Esperamos que, dentro de poco, estas nuevas investigaciones nos permitan escribir algunas líneas más sobre la Revolución Marina del Paleozoico medio.

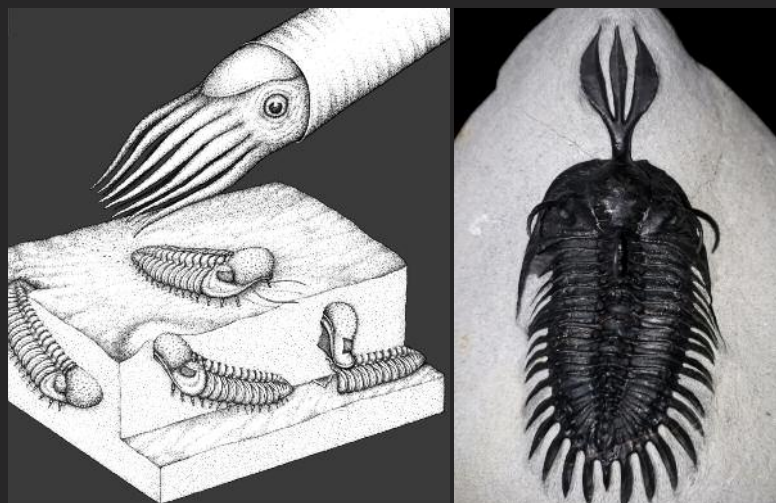


Figura 7. (Izquierda) Durante el Paleozoico medio ciertos trilobites desarrollaron la capacidad de enterrarse para mudar de caparazón, para lograr protección contra sus depredadores habituales, como los cefalópodos. Ilustración tomada de Rustán et al., 2011. (Derecha) Otros adquirieron largas espinas y desconcertantes estructuras morfológicas para defenderse, como *Walliserops aff. lindoei* del Devónico de Marruecos. Foto: J.J. Rustán.

La dinámica de la vida en los mares actuales: un legado

La influencia recíproca entre los continentes y los océanos, que se desencadenó con consecuencias tan fructíferas para la vida a mediados del Paleozoico, puede comprobarse aún en nuestros días. Aunque es verdad que la vida volvió a experimentar revoluciones comparables, como sucedió posteriormente hace unos 180 millones de años cuando los mares del Mesozoico se poblaron de monstruos marinos de origen reptiliano, la crisis precursora que sacudió del letargo las interacciones entre consumidores marinos, puede rastreadse fácilmente hasta el Paleozoico medio. La evidencia de los fósiles es contundente.

La influencia recíproca entre los continentes y los océanos, que se desencadenó con consecuencias tan fructíferas para la vida a mediados del Paleozoico, puede comprobarse aún en nuestros días

Muchas de las escenas que hoy nos cautivan en los documentales sobre la vida marina, como gigantes tiburones atacando a sus presas o enormes torbellinos de peces disfrutando de la bonanza de las aguas ricas en alimento, podrían haberse rodado ya en las aguas remotas del Paleozoico medio.

RB

Referencias bibliográficas/lecturas sugeridas

Bambach, R.K. (1999). Energetics in the global marine fauna: a connection between terrestrial diversification and change in the marine biosphere. *Geobios* 32, 131-144.

Klug, C., Kroeger, B., Kiessling, W., Mullins, G.L., Servais, T., Frýda, J. y Turner, S. (2010). The Devonian nekton revolution. *Lethaia*, 43(4), 465-477.

Rustán, J.J., Balseiro, D., Waisfeld, B., Foglia, R.D. y Vaccari, N.E. (2011). Infaunal molting in Trilobita and escalatory responses against predation. *Geology*, 39(5), 495-498.

Signor, P.W. III y Brett, C.E. (1984). The mid-Paleozoic precursor to the Mesozoic marine revolution. *Paleobiology* 10, 229-245.