



Año 22 | Número 44 | 31 de diciembre 2025 |

Hermosillo, Sonora, México. |

# NUESTRA TIERRA

Órgano de divulgación de la Estación

Regional del Noroeste, UNAM

**Ámbar: La resina que  
desafió al tiempo**

**Ballenas del Alba,  
misticetos arcaicos del  
Oligoceno**

**Descifrando las  
profundidades a través de  
fracturas submarinas**

**La influencia del  
Manganeso en la química  
de la naturaleza**

## CONTENIDO

### 2 › Editorial

### 3 › Ámbar: La resina que desafió al tiempo

### 7 › Ballenas del Alba, misticetos arcaicos del Oligoceno

### 11 › Descifrando las profundidades a través de fracturas submarinas

### 14 › La influencia del Manganeseo en la química de la naturaleza

Ilustración de portada: <https://haimaneltroudi.com/descubren-que-fracturas-submarinas-dividen-placa-del-pacifico/>



@RNTERNOUNAM @RNTERNO

El contenido de los artículos es responsabilidad de los autores y no refleja necesariamente el punto de vista del Comité editorial, ni de la UNAM. Se autoriza la reproducción de los artículos (no así de las imágenes) siempre y cuando se cite la fuente y se respeten los derechos de autor.

**Nuestra Tierra**, Año 22, No. 44 (diciembre de 2025), es una publicación semestral del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, C. P. 04510, Ciudad de México. Estación Regional del Noroeste, av. Luis Donaldo Colosio s/n y Madrid, campus UniSon, Hermosillo, Sonora, C. P. 83000. Editora responsable: Blanca González M. Número del Certificado de Reserva de Derechos al uso exclusivo del Título: 04-2004- 050610455400-102. ISSN 1665-935X. Número del Certificado de Licitud de Título y Contenido: 17529. Diseño: Alejandra Bárcenas Martínez. Impresión: Imagen Digital. Tiraje: 120 ejemplares, impresión Offset con papel couché cover de 300 g para forros y couché text de 150 g para los interiores.

## EDITORIAL

**L**a Tierra respira, late y se transforma. Sus océanos, montañas y minerales son las huellas de un pulso que no se ha detenido en miles de millones de años. Cada fractura, fósil, cristal o átomo conserva la memoria de los mundos antiguos, pero también revela que ese latido sigue vivo hoy, en los procesos que continúan modelando el planeta. La historia de Tierra no es solo pasado, sino una transformación constante, en la que todo está en permanente cambio.

En este número, viajamos al Cretácico, hace 130 millones de años, cuando la resina de plantas antiguas comenzó a atrapar fragmentos de vida, preservándolos para la posteridad. En "Ámbar: La resina que desafió al tiempo", Rocío Gutiérrez y colaboradores nos muestran cómo el ámbar, a través de sus transformaciones, se convierte en una cápsula del tiempo que nos conecta con un pasado lejano. Los autores también destacan la importancia del ámbar chiapaneco, uno de los pocos depósitos del Mioceno —entre 23 y 15 millones de años—, cuyo estudio nos ayuda a comprender la historia de la vida y los ambientes en tiempos geológicamente recientes.

Luego nos sumergimos en los mares del Oligoceno, hace más de 30 millones de años, cuando las ballenas experimentaron un giro radical en su evolución, pasando de ser carnívoras a convertirse en filtradoras de plancton. En su artículo sobre las Ballenas del Alba, Atzcalli Hernández nos guía a través de las huellas de esta transición, un cambio clave en la evolución de estos majestuosos mamíferos.

Pero no solo la vida experimenta transformaciones: el propio planeta está en constante cambio. Luis Ángel Vega y su equipo nos llevan al corazón del Golfo de California, donde la Cordillera de Alarcón —una cadena montañosa bajo el agua— se convierte en un laboratorio natural para estudiar cómo las fallas, los volcanes y el movimiento de las placas tectónicas se combinan para modelar el planeta.

Finalmente, pasamos de los procesos que transforman la Tierra a los que la mantienen en equilibrio. Un elemento clave en este balance es el manganeso, cuyas reacciones de óxido-reducción son fundamentales para procesos vitales, desde la fotosíntesis hasta la remediación ambiental. En su artículo, Marina Atilano y colaboradores nos muestran cómo el manganeso, a menudo invisible, juega un papel esencial tanto en la naturaleza como en la lucha contra la contaminación.

Así, la Tierra está en constante cambio y transformación, y como parte de ella, nosotros también lo estamos. En este número, te invitamos a pensar sobre cómo nos adaptamos a esos cambios para mantener el equilibrio.

*Blanca González M.*

### DIRECTORIO UNAM

LEONARDO LOMELÍ VANEGAS  
**Rector**

PATRICIA DOLORES DÁVILA ARANDA  
**Secretario General**

TOMÁS HUMBERTO RUBIO PÉREZ  
**Secretario Administrativo**

HUGO ALEJANDRO CONCHA CANTÚ  
**Abogado General**

MARÍA SOLEDAD FUNES ARGÜELLO  
**Coordinadora de la Investigación Científica**

RICARDO BARRAGÁN MANZO  
**Director del Instituto de Geología**

THIERRY CALMUS  
**Jefe de la Estación Regional del Noroeste**

### DIRECTORIO DE NUESTRA TIERRA

**Editora responsable**  
BLANCA GONZÁLEZ MÉNDEZ  
Secihti, ERNO, Instituto de Geología, UNAM

**Editoras asociadas**  
ADRIANA AIMÉ ORCÍ ROMERO  
ERNO, Instituto de Geología, UNAM

CLARA L. TINOCO OJANGUREN  
ERNO, Instituto de Ecología, UNAM

DENISSE ARCHUNDIA PERALTA  
Secihti, Instituto de Geología, UNAM

AURORA M. PAT ESPADAS  
Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, UNISON

MA. CRISTINA PEÑALBA GARMENDIA, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, UNISON

Para recibir esta revista vía correo escribir a:  
**[nuestratierra@geologia.unam.mx](mailto:nuestratierra@geologia.unam.mx)**

# ÁMBAR:

## LA RESINA QUE DESAFIÓ AL TIEMPO

**Rocio Citlali Gutierrez de la Garza**

Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra, UNAM | rociogutierrez@encit.unam.mx

**Ana L. Hernández-Damián**

Instituto de Geología, UNAM | alilahdez@geologia.unam.mx

**Sergio R.S. Cevallos-Ferriz**

Instituto de Geología, UNAM | scrscf@unam.mx

### INTRODUCCIÓN

El ámbar, una resina fósil, da acceso a momentos de la vida pasada conservados en ella y es uno de los registros fósiles más excepcionales que cuentan de forma directa la historia de la vida pasada. En otras palabras y de forma metafórica, el ámbar captura instantes de la vida volviéndolos inmortales, siendo pieza clave de un rompecabezas que contiene las pistas necesarias para reconstruir organismos, poblaciones y ecosistemas que ya han desaparecido. México es afortunado en tener uno de los más importantes depósitos de ámbar en el mundo con un alto valor científico.

### EL ÁMBAR ¿QUÉ? ¿CÓMO? Y ¿CUÁNDO?

El ámbar es una resina, es decir, un tipo de secreción o sustancia líquida generada por algunas plantas en el pasado, y que fue sometida a un proceso de fosilización. En la actualidad, se conocen distintas plantas que tienen la capacidad de sintetizar, almacenar y secretar distintos tipos de exudados a través de estructuras especializadas, muchos de los cuales tienen importancia económica. Por ejemplo, las gomas en la familia Burseraceae como en el "árbol del incienso" (*Boswellia*); los mucílago en Droseraceae (*Drosera*) conocida comúnmente como la familia de las "plantas carnívoras"; el látex típico de la familia Euphorbiaceae como en la "nochebuena" (*Euphorbia pulcherrima*); y las resinas, como es el caso de la "chúcata" en el mezquite (*Prosopis spp.*), de la familia Leguminosae, usada como endulzante (Fig. 1).



Figura 1. Chúcata, resina que el mezquite secreta como medio de defensa contra la chinche barrenadora. Es apreciada y colectada para consumo humano, su sabor es ligeramente dulce y de consistencia pegajosa. Fotografía: Angélica Quintanar-Castillo.

En la era Paleozoica aparecieron las plantas terrestres hace 450 Ma (Millones de años), sin embargo, el primer registro de resina fósil se documenta durante el Carbonífero hace 320 Ma en la misma era, mientras que el registro de resina con restos biológicos encapsulados dentro de este o conocidos como bioinclusiones se registra hasta el Cretácico hace aproximadamente 130 Ma. Desde la aparición de las plantas terrestres, transcurrieron ~130 Ma para que éstas produjeran resina y ~320 Ma para que esta resina se fosilizara con bioinclusiones (o al menos no se conocen previas a esta fecha) (Labandeira, 2014). Estos procesos de producción de resina y de inclusiones de entes biológicos en el ámbar son mucho más remotos que el periodo de existencia del ser humano. No obstante, al ponerlos en perspectiva con el tiempo total que la vida documentada en el registro fósil ha estado presente en la Tierra (alrededor de ~3,600 Ma), resalta que el ámbar es un producto de la vida relativamente reciente.

La resina recién exudada de una planta marca el inicio de la travesía que ésta tiene que recorrer para transformarse en ámbar. Cuando la resina es aún líquida y viscosa captura individuos, y/o parte de ellos, como microorganismos, plantas, hongos, artrópodos, pequeños vertebrados, etc. Al embeberlos se inicia el encapsulamiento y la preservación; procesos que pueden durar desde horas hasta días. Estando la resina expuesta a la intemperie, el oxígeno, la radiación solar y las elevadas temperaturas del medio comienzan el proceso de polimerización, el cual transforma a la resina y sus posibles bioinclusiones en una masa endurecida pero aún flexible, el copal. Las masas de resina pueden permanecer a la intemperie incluso décadas antes de ser transportadas a su lugar de depósito y la etapa del transporte de resina puede durar de semanas a milenios. Una vez situada la resina/copal en el ambiente sedimentario donde se desarrollará el yacimiento fosilífero, empieza el proceso de amberización, es decir el proceso de fosilización del ámbar.

Después del transporte, la resina/copal es cubierta con sedimentos y todo este conjunto se somete al aumento de presión y temperatura, que modifica la química del copal y da lugar al ámbar (Labandeira, 2014). Un conjunto de acontecimientos extraordinarios, que inician con la biocenosis (el conjunto de organismos vivos), hace que encontremos y estén a nuestro alcance los depósitos de ámbar. Son importantes entre éstos la muerte, transporte, enterramiento, exhumación, erosión, movimiento de placas y hasta un poco de suerte.

Debido a que no es claro el momento de transformación de la resina a ámbar, esto ha sido centro de debate. Al estadio intermedio entre los extremos se le conoce comúnmente como copal, el cual se caracteriza por ser relativamente suave, aromático y poco flexible, características físicas que no permiten su definición clara. Inclusive, los conflictos inician desde la etimología de la palabra copal que deriva de “copalli”, en náhuatl, que explícitamente significa “resina”. Para algunos autores son las características físico-químicas lo que permite establecer la distinción entre ámbar y copal. Una reciente propuesta ha sugerido que 2.58 millones de años (el inicio del período geológico Cuaternario) es el límite para diferenciar el ámbar del copal (Solórzano-Kraemer et al., 2020).

### ¿POR QUÉ Y CUÁNTA RESINA?

Los pulsos de producción de resina han quedado registrados en diferentes momentos de la historia geológica. Las concentraciones de ámbar plantean que la cantidad de resina que se debió haber producido en esos contextos tendría que haber sido considerable. Ante esta situación surge un cuestionamiento que no puede pasarse por alto con mucha facilidad ¿Cuánta resina puede producir una planta? Lo más que podemos acercarnos a la respuesta es a través de la comparación con árboles exudantes actuales. Se sabe que los pinos exudan, por hendiduras artificiales, de 1.5 a 2.5 kg de resina por árbol por año. En contraste, el árbol de Dammar (*Agathis*) del este de Asia puede obtener hasta 10 kg de resina cada dos meses (Möller et al., 2014); lo que nos permite inferir que, así como en muchos aspectos



Figura 2. Mapa de distribución del Ámbar mexicano con bioinclusiones en Chiapas, México.



Figura 3. Flor encapsulada en ámbar de Chiapas usado en joyería.

de la biología, depende de la especie. Las plantas productoras de resina incluyen una variedad de taxones de gimnospermas y angiospermas, por lo que trazar a la planta productora de resina de cualquier ámbar es un reto. Pero aun sin saber cuál fue la planta productora, se deben considerar dos aspectos muy importantes para entender los depósitos de ámbar. El primero es que existen distintos factores que promueven la exudación de resina en las plantas. Si bien lo hacen como mecanismo de defensa puede deberse al ataque de patógenos como bacterias, hongos y/o virus, o como respuesta al fuego. El segundo es que, ante la imposibilidad de viajar en el tiempo para medir la producción de resina, y teniendo en cuenta que los reservorios de ámbar sufren un transporte antes de su depósito; hay que asumir que el ámbar representa solo una pequeña cantidad de la resina producida por el o los árboles de la comunidad original.

### EL ÁMBAR MEXICANO ES CHIAPANECO

Existen varios depósitos de ámbar en el mundo, pero solo 25 son considerados con un potencial científico; México resguarda uno de estos sitios excepcionales donde se puede encontrar ámbar con bioinclusiones. En nuestro país, los depósitos de ámbar con bioinclusiones se encuentran en Chiapas, cuyas minas se distribuyen en varios municipios, incluyendo Huitiupán, El Bosque, Pueblo Nuevo Solistahuacán, Pantelhó, San Andrés Duraznal, Palenque y Totolapa. El municipio de Simojovel de Allende, es uno de los más importantes para la comercialización, ya que es donde se extrae la mayor cantidad del ámbar (Fig.2). El gusto del público hacia el ámbar lo ha convertido en una de las biogemas más populares y son las bioinclusiones las que lo hacen excepcional científicamente; éstas agregan una belleza innata a estas piezas, convirtiéndolas en materiales muy deseados en la industria joyera (Fig. 3). Debido a su importancia tanto científica como económica, se está buscando establecer una denominación de origen, con el objetivo de garantizar una extracción sustentable y comercializable que genere mejores regalías a los pobladores, mineros y artesanos.

Otra pieza fundamental que agrega valor al ámbar de Chiapas es la edad, ya que hay muy pocos depósitos de ámbar en el mundo representando este momento en la historia. Esta varía entre 23 y 15 Ma, considerada relativamente joven y correspondiente al Mioceno en la era Cenozoica. Es precisamente durante este tiempo cuando se considera que la diversidad biológica inicia su modernización tanto en el tipo de organismos que la conforman, como en el tipo de asociaciones de los mismos. Ambos aspectos otorgan un valor superior a los fósiles de este tiempo, porque nos permiten entender la historia de la vida en tiempos geológicamente recientes incluyendo la evolución del ambiente.

Es inevitable preguntarnos cuál fue la planta que secretó la resina y dio origen al ámbar en el sur de México. Para identificarla se han llevado a cabo análisis comparativos del espectro infrarrojo entre el ámbar y las resinas de varias plantas actuales, concluyendo que el ámbar mexicano fue producido por plantas extintas del género *Hymenaea* de la familia Leguminosae. Además, se encontraron flores y hojas preservadas en el ámbar, lo cual ha permitido identificar hasta el momento tres especies extintas del grupo de leguminosas productoras de resina incluyendo a: *Hymenaea mexicana*, *H. allendis* e *Hymenaeaphyllum mirandae* lo que sugiere que el ámbar de Simojovel de Allende puede tener un origen múltiple, aunque de plantas cercanamente relacionadas (Fig.4).

Los reportes paleontológicos del ámbar de Simojovel se han centrado, en su mayoría, en animales, con relativamente pocos registros de plantas. La fauna mejor representada en el ámbar es el grupo de los artrópodos (Fig. 5), aunque muchos especímenes aún requieren una descripción taxonómica formal (Gil et al., 2012). Entre estos destacan representantes de los órdenes Diptera e Hymenoptera. De igual forma, se han reportado miriápodos y crustáceos, además de cochinillas, anfípodos, ostrácodos, copépodos, tanaideos y cangrejos. Todos estos sugieren que el ámbar se formó en un ambiente estuarino.

El ilustre botánico Faustino Miranda describió e identificó por primera vez en la década de los 60s a las plantas encapsuladas en este ámbar. En su trabajo reporta una flor del género *Tapirira* de la familia Anacardiaceae (en donde se encuentra el mango), así como folíolos del género *Acacia* de la familia Leguminosae, pero es hasta el año 2000 cuando se retomó con fuerza el estudio de plantas encapsuladas en ámbar. Las plantas con flor o angiospermas son el grupo mejor representado con 17 familias identificadas principalmente por sus flores (Fig. 6). Sumado a eso, se ha documentado presencia de polen de árboles de mangle, con los géneros *Pelliciera*, *Rhizophora* y *Engelhardia*.



Figura 4. Reconstrucción de comunidad vegetal cercana a la zona de costa, destacando plantas productoras de resina del grupo *Hymenaea* (Leguminosae) durante el Mioceno de Chiapas. Ilustración de Tania Solange Escalera Reynaldos.

Los datos paleontológicos sugieren que, en el pasado del sur de México, en particular la región de Simojovel de Allende y sus alrededores, se desarrollaba una selva tropical dominada por árboles de *Hymenaea*, adyacente a un ambiente estuarino con comunidades similares a los manglares modernos (Fig.7). En otras palabras, cuando se produjo el ámbar, el área de Simojovel de Allende estaba a nivel del mar, mientras que ahora se localiza entre los 721 y 2200 m de altitud. Implicando importantes cambios ambientales, y con ello adecuaciones de la biota que necesitan ser documentadas y explicadas con base en estudios comparativos entre el ámbar con sus bioinclusiones y la biodiversidad actual.

El ámbar representa una ventana al pasado a través de la cual, con las herramientas adecuadas, podemos observar una biodiversidad asombrosa comparable con la biodiversidad actual. Las especies reportadas hasta el momento confirman que cuando se formó en el Mioceno aún no se habían desarrollado las plantas que crecen actualmente en Chiapas, pero revelan que sus parientes vivos más cercanos estaban bien establecidos en comunidades que tampoco son las actuales, por más que comparten muchas semejanzas. El ámbar posee información crucial no solo para la paleontología, sino también para la botánica y la ecología. Se debe resaltar que a pesar de ello su valor no se limita únicamente al ámbito científico y que también tiene y tuvo impacto significativo en las esferas culturales



Figura 6. Pieza de ámbar con bioinclusiones de partes florales de *Hymenaea* spp. Colectada en Simojovel de Allende, Chiapas, México.

y económicas de las comunidades que coexisten con esta biogema. La ciencia, la cultura, la economía, etc. son razones importantes y suficientes, que dan el valor para proteger tanto los depósitos de ámbar como los ecosistemas asociados que los rodean. Si conservamos, estudiamos, entendemos y nos asombramos con el ámbar mexicano, aprenderemos a leer una historia narrada por una resina que ha perdurado a lo largo del tiempo geológico y la cual manifiesta fuertemente que la biodiversidad es un recurso natural no renovable que requiere de nuestra protección.

La elaboración de este texto se realizó con el apoyo del proyecto PAPIIT IA102024 de la DGAPA-UNAM.



Figura 5. Bioinclusión de un miembro de Hexapoda (Arthropoda) en el ámbar de México (23-15 millones de años).



Figura 7. Reconstrucción de ambiente de depósito del ámbar mexicano. Selva tropical dominada por árboles de *Hymenaea* spp. adyacente a un ambiente estuarino similar a los manglares modernos. Ilustración de Tania Solange Escalera Reynaldos.

#### Referencias

- Labandeira, C. C. (2014). Amber. In Reading and Writing of the Fossil Record: Preservation Pathways to Exceptional Fossilization: Presented as a Paleontological Society Short Course at the Annual Meeting of the Geological Society of America, Vancouver, British Columbia, October 18, 2014. Paleontological Society.
- Solórzano-Kraemer, M. M., Delclòs, X., Engel, M. S., & Peñalver, E. (2020). A revised definition for copal and its significance for palaeontological and Anthropocene biodiversity-loss studies. *Scientific reports*, 10(1), 19904.
- Gil, J. A., Carbot-Chanona, G., & José, M. A. C. (2012). Estudio del ámbar con inclusiones biológicas de la Colección Paleontológica de la Secretaría de Medio Ambiente e Historia Natural, Chiapas, México. Año 6, vol. 6, núm. 1, 23.
- Möller, A. L., Solórzano-Kraemer, M. M. & Rust, J. (2014). Gemeinsam gefangen - Szenen aus dem Bernsteinwald. *Paläontologische Gesellschaft*. Vol. 4. 24:26



# BALLENAS DEL ALBA

## MISTICETOS ARCAICOS DEL OLIGOCENO

*Atzcalli Ehécatl Hernández Cisneros*

Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, Universidad Nacional  
Autónoma de México, CP 83000, Hermosillo, Sonora, México  
atz\_nemesis@hotmail.com

### CETACEA

Los cetáceos, comúnmente conocidos como delfines y ballenas, son los animales más populares y llamativos entre los mamíferos marinos, y su linaje es el más antiguo de todos, con un registro fósil de casi 53 millones años (Ma). Cabe mencionar que los cetáceos pertenecen al grupo de los artiodáctilos (mamíferos placentarios que se apoyan y caminan con el extremo de dedos pares, es decir, vacas, hipopótamos, cabras, cerdos, camellos y jirafas; Figura 1). La clasificación moderna de las especies de cetáceos, tanto actuales como extintas, los divide de manera general en dos grandes grupos: los arqueocetos (formas primitivas anteriores a las ballenas y odontocetos) y los neocetos (cetáceos modernos, es decir, ballenas y odontocetos; Figura 1). Considerando lo anterior, las formas ancestrales de los cetáceos actuales eran radicalmente diferentes a lo que conocemos hoy en día. Por ejemplo, los primeros cetáceos, de hace 53 Ma, poseían cuatro patas para caminar sobre la tierra, y a la vez les permitían nadar en ambientes acuáticos (Figura 1). Pero, no fue hasta los últimos 41 Ma que aparecieron formas primitivas de cetáceos con hábitos plenamente marinos, este grupo de arqueocetos conocido como basilosáuridos había perdido totalmente su capacidad para andar sobre la tierra y se extinguirían casi en su totalidad alrededor de los últimos 34 Ma (Figura 1). Por otro lado, las primeras formas de odontocetos y ballenas (o neocetos) tienen su origen hace aproximadamente 36 Ma (Figura 1), y eran bastante distintos a las especies vivientes de los cetáceos modernos que conocemos, cuyos linajes tienen un registro fósil de al menos unos 15 y 5 Ma de antigüedad. Detallar el origen de los cetáceos y sus características requiere un texto sumamente extenso, lo que está fuera del alcance de este pequeño artículo. Así, en este capítulo obviaremos detalles de la historia evolutiva de los cetáceos, para hablar de un grupo específico de ballenas primitivas conocidas como eomisticetidos o ballenas del alba (familia Eomysticetidae; Figura 2).

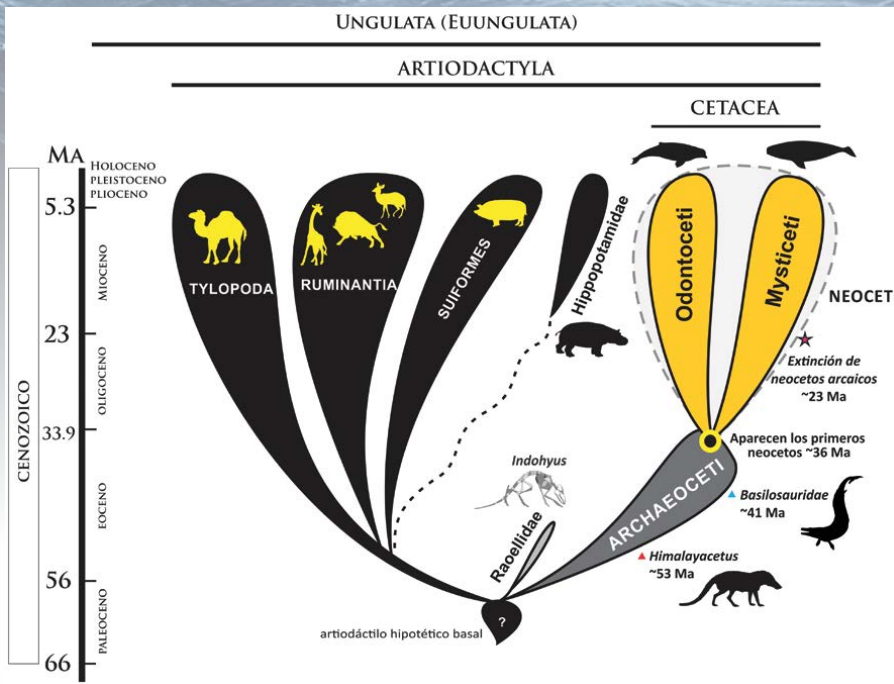


Figura 1. Representación del origen de los cetáceos dentro de la línea evolutiva de los artiodáctilos. El linaje de los cetáceos aún no está resuelto del todo, las primeras formas de cetáceos tuvieron otros parientes cercanos como los raoéllidos (Raoellidae), pero debido a los pocos fósiles conocidos su relación no es clara. Los cetáceos, extintos y las especies actuales, están constituidos por dos grandes grupos, los arqueocetos y los neocetos. Los neocetos son el grupo que da origen a las formas modernas de cetáceos

**EOMISTICETIDOS, BALLENAS PECULIARES**

Los primeros fósiles de eomisticetidos fueron descritos en el año 2002 y provienen de las formaciones geológicas Ashley y Chandler Bridge, del estado de Carolina del Sur, EEUU. Los paleontólogos estadounidenses, Albert E. Sanders y Lawrence G. Barnes, establecieron los criterios base para identificar a estos misticetos arcaicos y les dieron el nombre de ballenas del alba. Etimológicamente el nombre "eomisticetido" viene de los términos griegos εως (eos), que significa alba o amanecer; μυςτακο (mystako) que quiere decir bigote (haciendo referencia a las barbas en la boca de las ballenas modernas); y κητος (ketos, también cetus o cete en Latín) que significa criatura gigante marina. A partir de entonces, otros ejemplares se han descubierto en diversas localidades en los márgenes del Océano Pacífico (Japón, EEUU, México, Nueva Zelanda, Australia), en el Atlántico Norte (EEUU, Alemania), y posiblemente en el antiguo mar Mediterráneo (Austria),

rasgo es tan solo un aspecto secundario ya que poseen otros atributos morfológicos que los hacen más interesantes. ¿Cuáles son, y por qué son relevantes en la historia evolutiva de las ballenas? Para responder esta pregunta, es necesario entender que el actual mecanismo de alimentación por filtración presente en las ballenas modernas (ballenas francas, grises, jorobadas y rorcuales) es sin duda innovador y es la cereza del pastel en la historia evolutiva de las ballenas. Si se pone atención, notaremos que las

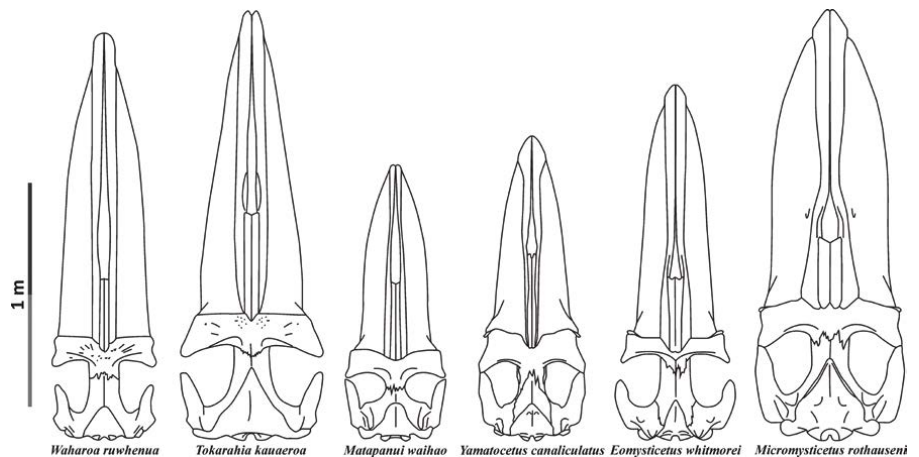


Figura 2. Algunas especies de eomisticetidos (familia Eomysticetidae; tomado y modificado de Boessenecker y Fordyce, 2016). Note el peculiar cráneo longirostrino o de rostro largo. Este grupo tiene un registro fósil desde los 34 hasta 23 millones de años aproximadamente (época Oligoceno). No obstante, estas ballenas posiblemente habrían sobrevivido a la transición climática entre las épocas Oligoceno y Mioceno (entre los 23 y 22 Ma aproximadamente).

aún por confirmar. Actualmente, se estiman 13 especies diferentes, y de todas las localidades, Nueva Zelanda posee el mayor número de especies fósiles descritas (seis en total). No obstante, puede que en un futuro cercano algunas localidades del Pacífico Norte, por ejemplo, de México, incrementen la lista de eomisticetidos conocidos (Figura 3).

Las ballenas del alba o eomisticetidos, son una forma ancestral de misticetos, no mayores a los 6m de longitud, que marcan un punto relevante en la historia evolutiva de las ballenas y se estima que habitaron en todos los océanos del mundo durante la época del Oligoceno (entre los 34 a 23 Ma aproximadamente). Estas ballenas son parte del grupo conocido como Chaeomysticeti (queomisticetos), o en términos más simples, el grupo de las ballenas verdaderas o ballenas barbadas. Asimismo, los eomisticetidos se caracterizan por poseer un cráneo con un rostro muy largo, en términos técnicos longirostrino. Sin embargo, este

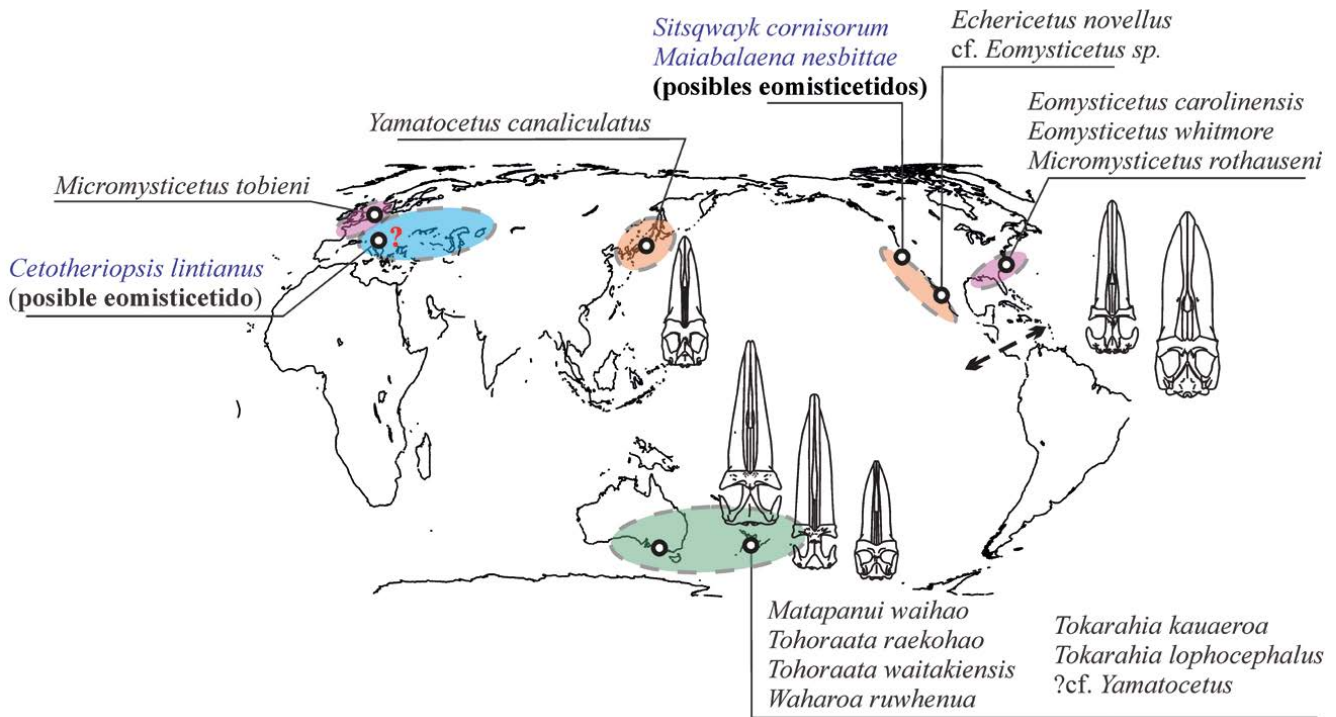


Figura 3. Mapa con la distribución de las especies fósiles conocidas de la familia Eomysticetidae. Se indican en azul especies de otros géneros (*Sitsqwayk*, *Maiabalaena*, *Cetotheriopsis*) que posiblemente son parte del grupo, pero aún no hay un consenso científico absoluto al respecto.

ballenas actuales no poseen dientes, sino barbas (estructuras filamentosas y queratinizadas, es decir, constituidas de la proteína queratina, igual que las uñas y el cabello). Este rasgo único les acredita el nombre de ballenas barbadas, pero las ballenas no siempre fueron barbadas. De hecho, las primeras ballenas tenían dientes, lo suficientemente grandes y fuertes para prensar y rasgar carne. La pérdida de los dientes y el origen de las barbas marcan el antes y el después en la historia evolutiva de los misticetos, y es uno de los principales enigmas a resolver para los paleontólogos (Figura 4).

En este contexto, la anatomía craneal de los eomisticetidos indica que son una forma transicional entre las ballenas dentadas y las ballenas barbadas, ya que probablemente poseían dientes no funcionales o remanentes y barbas que les permitían filtrar sus alimentos. Esta idea tiene su fundamento en la presencia de alveolos (huecos donde se insertan y crecen los dientes; Figura 4) en la parte distal o anterior de la maxila y mandíbulas de algunos especímenes; y la forma del paladar junto con numerosos ductos venosos y nerviosos asociados a los tejidos que hacen crecer a las barbas. Sin embargo, hay un pequeño detalle en esta historia, y es que no se han encontrado barbas fosilizadas del Oligoceno (~34 a 23 Ma). El registro mejor preservado de un fragmento de barbas tiene aproximadamente 8 Ma (época Mioceno, que abarca de 23 a 5 Ma), y la razón de no encontrar con facilidad barbas o fragmentos de las mismas reside en que estas partes relativamente blandas se degradan muy rápido antes de quedar mineralizadas (fosilizadas). No obstante, hay otros indicadores, como la estructura anatómica y los hallazgos de estudios isotópicos aplicados a dientes y hueso fosilizados. Estos estudios químicos, han identificado baja presencia y concentración del isótopo Carbono 13 ( $\delta^{13}C$ , relacionado con la fuente de alimento y presencia de plantas) y del isótopo Oxígeno 18 ( $\delta^{18}O$ , relacionado con la salinidad y flujos de agua dulce), y sostienen que los eomisticetidos probablemente ya se alimentaban de plancton (un conjunto de organismos marinos muy

pequeños, microscópicos, que incluye larvas de animales marinos y microalgas) en zonas lejanas a las costas, siendo capaces de filtrarlo con ayuda de las barbas.

Debe decirse que, todavía falta por estudiar otras formas primitivas de ballenas que vivieron a la par de los eomisticetidos, y quizás compartan algunos rasgos como los dientes remanentes. No obstante, es claro que los eomisticetidos son las formas más arcaicas de las ballenas con barbas, ya que son el grupo más cercano a sus primas las ballenas dentadas (Figura 5). Actualmente, nuestros conocimientos acerca de los eomisticetidos incluyen datos sobre formas juveniles que muestran etapas de desarrollo y crecimiento. Además, los recientes análisis de las relaciones filogenéticas (parentesco en términos evolutivos), así como el descubrimiento de nuevas especies, como *Echericetus novellus* del Oligoceno de México, están modificando el conocimiento sobre su origen, adaptaciones biológicas, distribución geográfica, entre

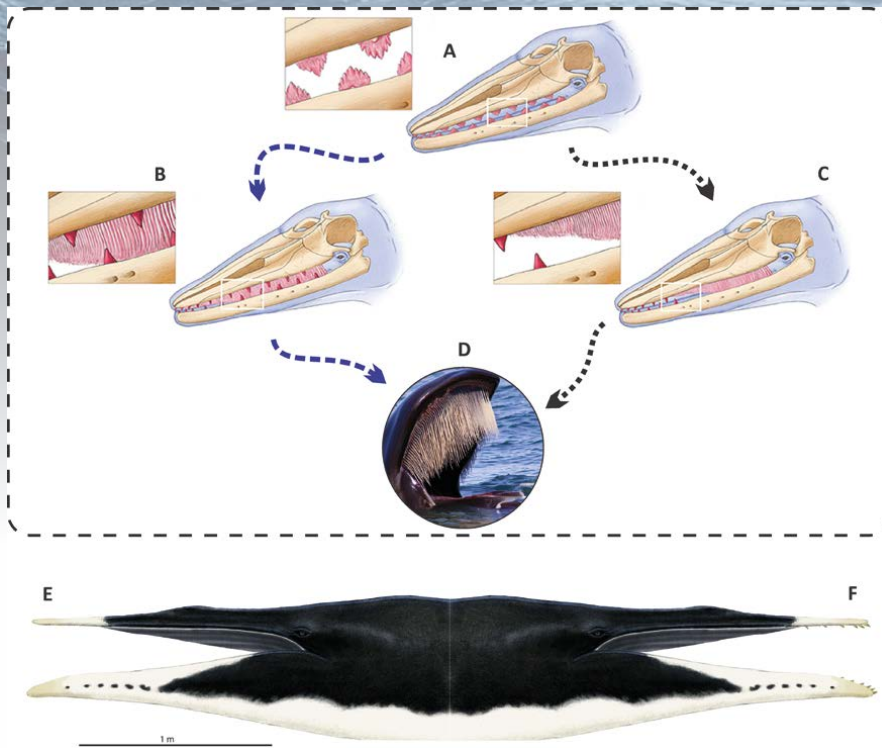


Figura 4. De ballenas dentadas a ballenas barbadas. A-D, Los posibles caminos que pudieron darse durante la sustitución de los dientes por las barbas en ballenas (tomado y modificado de Peredo et al., 2017). A, las ballenas tenían dientes, esto significa que se alimentaba de manera raptora, es decir, cazaban presas individuales peces y otros animales marinos. Se plantea que quizás pudieron filtrar alimento aprovechando las múltiples ornamentaciones presentes en sus dientes, pero esta idea tiene poca aceptación. B, se considera que las barbas y los dientes pudieron aparecer simultáneamente en algunas ballenas (como en los etiocetidos) pero aún existen dudas acerca de este escenario. C, algunas ballenas arcaicas como los eomisticetidos pudieron presentar dientes remanentes en la parte anterior de su hocico, mientras más al interior de la boca aparecerían las primeras barbas; esta idea es aceptada, pero con reservas. D, ejemplo de la boca de una ballena actual, los dientes han desaparecido para ser sustituidos completamente por las barbas. E-F, representación de un eomisticeto con barbas, y con dientes remanentes y barbas, respectivamente; (*Waharoa ruwhenua*; tomado de Boessenecker y Fordyce, 2015).

otros. Por último, la época del Oligoceno fue un momento único ya que las condiciones ambientales y climáticas eran particularmente distintas a las actuales. Por ejemplo, los polos tenían pequeños glaciares incipientes, la Corriente Circumpolar Antártica empezaba a existir y su influencia en las condiciones oceanográficas globales era menor que el actual, los Océanos Atlántico y Pacífico estaban conectados a través de la región de Centroamérica, y muchos de los ecosistemas marinos actuales apenas empezaban a formarse. Además, se ha considerado que este escenario, en una combinación de factores biológicos y físicos, favoreció un momento de gran diversidad para los cetáceos. Tanto las primeras formas de odontocetos como las ballenas (neocetos o nuevos cetáceos) coexistieron con formas relictas de sus hermanos arqueocetos, los basilosauridos. De este peculiar conjunto, las características de los eomisticetos (ballenas del alba) marcaron el inicio del nuevo amanecer de las ballenas modernas.

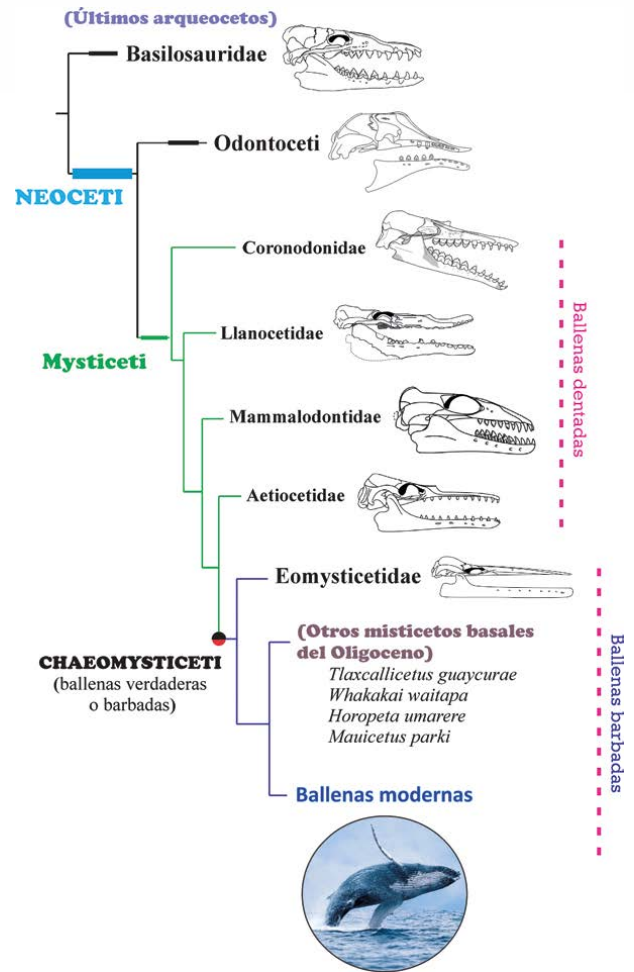


Figura 5. Simplificación de las relaciones filogenéticas de las ballenas. Nótese la posición de los eomisticetidos en relación con las ballenas dentadas y las ballenas barbadas modernas.

**Referencias**

Boessenecker, R.W. & Fordyce, R.E. 2015. Anatomy, feeding ecology, and ontogeny of a transitional baleen whale: a new genus and species of Eomysticetidae (Mammalia: Cetacea) from the Oligocene of New Zealand: PeerJ 3, e1129. <https://doi.org/10.7717/peerj.1129>

Boessenecker, R.W. & Fordyce, R.E. A new eomysticetid from the Oligocene Kokoamu Greensand of New Zealand and a review of the Eomysticetidae (Mammalia, Cetacea): Journal of Systematic Palaeontology, 15(6), 429-469. <http://dx.doi.org/10.1080/14772019.2016.1191045>

Peredo, C.M., Pyenson, N.D. & Boersma, A.T. 2017. Decoupling tooth loss from the evolution of baleen in whales: Frontiers in Marine Science, 4(67), 1-11. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00067>

Tsai, C.-H. 2023. In search of the origin of crown Mysticeti: Journal of the Royal Society of New Zealand, <https://doi.org/10.1080/03036758.2023.2249410>

# DESCIFRANDO LAS PROFUNDIDADES A TRAVÉS DE FRACTURAS SUBMARINAS

*Luis Angel Vega Ramírez<sup>1\*</sup>, Ronald Michael Spelz Madero<sup>1</sup>, Juan Contreras Pérez<sup>2</sup>, Raquel Negrete Aranda<sup>3</sup>, Florian Neumann<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México.

<sup>2</sup>Laboratorio de Tectonofísica y Flujo de Calor, Departamento de Geología, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Posgrado en Ciencias de la Tierra.

<sup>3</sup>Investigadora Por México CONAHCYT, Laboratorio de Tectonofísica y Flujo de Calor, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, Baja California, México.

<sup>4</sup>GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, Alemania.

\*luisvega@uabc.edu.mx

## EXPLORANDO LAS DORSALES DEL FONDO MARINO

¿Qué son las dorsales centro-oceánicas? Imagina que el fondo del océano tiene su propia cordillera, una cadena montañosa marina que se extiende por todo el océano. ¡Así de asombrosa es la dorsal centro-oceánica! Esta cadena es la más extensa y activa volcánicamente en la Tierra.

Las dorsales se forman cuando el magma, que es roca fundida del interior de la Tierra, asciende y llena el espacio que se abre entre grandes bloques de la corteza terrestre llamados placas tectónicas. Este proceso crea nuevo fondo oceánico, como si la Tierra tuviera una costura gigante que recorre su superficie, similar a las costuras de una pelota de béisbol, pero de unos impresionantes 70,000 kilómetros de longitud (Small, 2013).

Pero, ¿qué son las placas tectónicas? Piensa que la superficie de la Tierra es como un gran rompecabezas. Cada pieza de este rompecabezas es una placa tectónica, que es una sección enorme de la capa externa de la Tierra. Estas placas flotan y se mueven lentamente sobre una capa más blanda debajo de ellas, similar a como un trozo de madera flota en el agua.

Las dorsales oceánicas son zonas clave donde se crea el fondo marino. Sin embargo, aún hay muchas preguntas sobre cómo interactúan los procesos volcánicos y las fracturas en estas áreas. Por ejemplo, ¿qué sucede cuando la Tierra se agrieta y el magma emerge desde las profundidades? ¿Cómo se forman y evolucionan estas fracturas o fallas? Entender estos procesos nos ayuda a comprender mejor la dinámica de nuestro planeta.

## UN VIAJE EN EL TIEMPO: EVOLUCIÓN DE NORTEAMÉRICA

Las placas tectónicas no están quietas; se mueven constantemente, aunque muy despacio, a un ritmo similar al que crecen nuestras uñas (de 2 a 15 centímetros al año). Pueden separarse, chocar o deslizarse lateralmente. Estos movimientos son responsables de la formación de montañas, volcanes y la ocurrencia de terremotos.

Hace millones de años, el borde occidental de Norteamérica era un lugar donde chocaban placas tectónicas. Una placa llamada Farallón se hundía debajo de Norteamérica. Pero hace unos 29 millones de años, esto cambió cuando la placa del Pacífico comenzó a interactuar con Norteamérica, iniciando una nueva era geológica. Este movimiento dio origen al Golfo de California.

## LA CORDILLERA ALARCÓN: UN LABORATORIO SUBMARINO

En el extremo sur del Golfo de California se encuentra la Cordillera Alarcón, una cadena montañosa submarina que funciona como un laboratorio natural para la investigación científica al contener una gran diversidad de estructuras geológicas, vida marina y potencial de energía geotérmica. Aquí, las placas tectónicas se separan, permitiendo que el magma ascienda y forme nueva corteza oceánica. Con una longitud de 50 kilómetros y sumergida a profundidades de hasta 2,700 metros, esta cordillera está flanqueada por grandes fracturas donde las placas se deslizan lateralmente una junto a la otra.

## EXPLORANDO LAS FRACTURAS DE LA CORDILLERA ALARCÓN

Nuestro equipo estudia la zona norte de la cordillera, donde hemos identificado estructuras como fallas (escalones en el terreno), fisuras o grietas, flujos de lava y áreas con actividad hidrotermal. En particular, nos enfocamos en las fallas, que son fracturas en la corteza terrestre donde los bloques de roca se desplazan entre sí.

Para entender mejor estas estructuras, utilizamos herramientas especiales:

1. Mapeo detallado del fondo marino: Usamos una herramienta llamada sonar, el cual funciona emitiendo ondas de sonido al fondo marino. Estas viajan a través del agua, rebotan al chocar con el fondo u objetos sumergidos y luego regresan al emisor. Al medir el tiempo que tardan en volver se puede calcular la profundidad y así crear mapas precisos de la topografía submarina. Esto nos permite "ver" el relieve del fondo del océano a través del sonido.
2. Iluminación artificial: Aplicamos algoritmos que simulan cómo la luz y las sombras caerían sobre el terreno submarino, resaltando formas y características que podrían pasar desapercibidas. Aunque en las profundidades del océano la luz no llega, esta técnica permite iluminar virtualmente el terreno resaltando estructuras como valles, montañas submarinas, grietas y fallas que podrían pasar desapercibidas sin este procesamiento.
3. Medición del desplazamiento de las fallas: para entender cómo se mueven las fallas y cómo afecta el paisaje submarino es importante medir el desplazamiento de falla, es decir, cuánto se han movido los bloques de roca respecto a lo largo de estas fracturas. Te estarás preguntado ¿Cómo medimos el movimiento y crecimiento de una falla? Imagina una fractura en el suelo donde un lado se ha movido respecto al otro como si fueran los escalones de una casa. Para medir cuánto se han desplazado, tomamos mediciones transversales del terreno en los puntos más altos y bajos de los escalones. Luego, medimos la distancia entre estos puntos. Esto nos da una idea de cuánto se ha movido la falla a lo largo del tiempo (Figura 1).

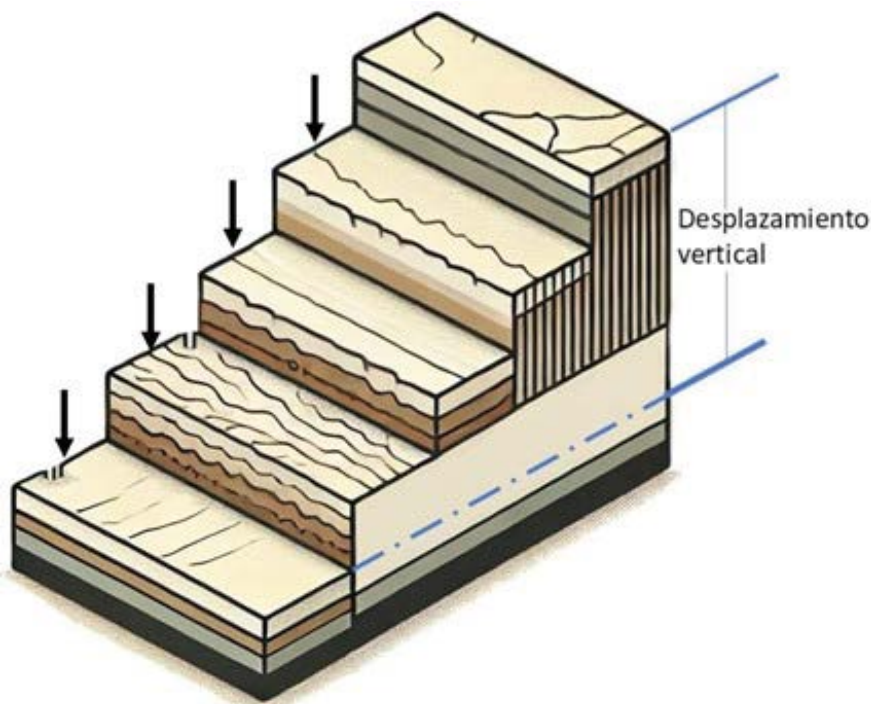


Figura 1. Representación esquemática de un sistema de fallas. Las flechas negras hacia abajo indican el desplazamiento vertical acumulado de cada bloque del terreno a lo largo de la falla. La medición total del desplazamiento vertical se obtiene sumando el desplazamiento individual de cada bloque desplazado.

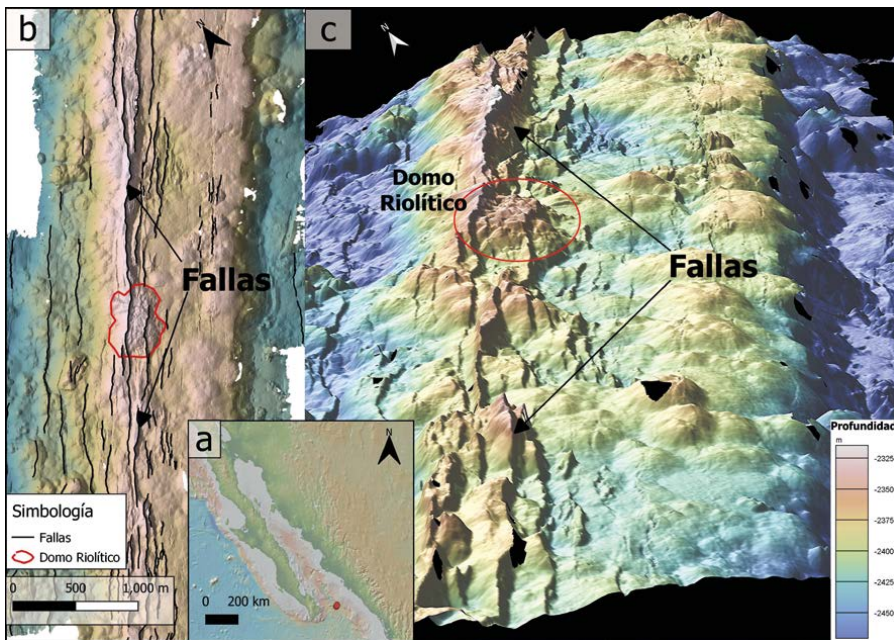


Figura 2. (a) Ubicación general del área de estudio en el Golfo de California, marcada con un punto rojo. (b) Vista en planta de la Cordillera Alarcón, mostrando las fallas (líneas negras) y la ubicación del domo riolítico (polígono rojo). (c) Imagen tridimensional oblicua que resalta las fallas y el domo riolítico en la Cordillera Alarcón, proporcionando una mejor perspectiva de la forma y el relieve del terreno. A la derecha se presenta una escala de profundidad que abarca desde -2325 hasta -2450 metros.

Gracias a estas técnicas, pudimos identificar con precisión las fallas y otras estructuras en el fondo marino. Respecto al crecimiento de fallas, estas en un principio son pequeñas y sus segmentos no están conectados (como una línea punteada). Con el tiempo, a medida que se acumula más desplazamiento, estos segmentos comienzan a unirse y formar fallas más grandes y complejas. Esto podría suceder en el futuro con algunas de las fallas que observamos en la Cordillera Alarcón. Las fallas más maduras tienden a concentrar más movimiento en su parte central, lo que puede influir en la actividad sísmica de la región.

Además, encontramos que en la relación entre el tamaño de las fallas con su desplazamiento existe una relación directa: cuanto más larga es la falla, mayor es el desplazamiento que ha acumulado. Por ejemplo, una falla de 10 kilómetros de largo puede tener un desplazamiento de unos 100 metros, mientras que una más pequeña podría tener un desplazamiento de solo unos centímetros. Este patrón nos ayuda a entender cómo evolucionan las fallas en el tiempo.

### INTERACCIÓN ENTRE FALLAS Y UN DOMO VOLCÁNICO

La Cordillera Alarcón es especial porque, además de las rocas volcánicas comunes, encontramos un domo volcánico con características no antes vistas en el fondo oceánico. Este domo está constituido de lavas más viscosas y ricas en sílice. Es raro encontrar este tipo de lavas en dorsales oceánicas y hasta donde nosotros sabemos solo se han registrado en lugares como Islandia (Sidgurdsson, 1977).

También observamos que algunas fallas parecen haber sido afectadas por la presencia del domo. Por ejemplo, en la Figura 2, una falla se ha extendido hasta encontrarse con el domo, y éste ha funcionado como una barrera ocasionando que el crecimiento lateral o longitudinal de la falla se viera afectado ralentizándolo, favoreciendo la acumulación de desplazamiento vertical. Al mismo tiempo, otras fallas cercanas al domo podrían haber sido bloqueadas en su crecimiento lateral debido a la presión que ejerce el

magma en su ascenso sobre las rocas circundantes al momento de formar el domo (Vega-Ramirez, 2018). Esto nos muestra cómo los procesos volcánicos están relacionados con procesos tectónicos y cómo estos pueden influir en el desarrollo y morfología del fondo oceánico.

### CONCLUSIONES

De este estudio aprendimos que la formación y evolución de las fallas en la Cordillera Alarcón están influenciadas tanto por el movimiento de las placas tectónicas como por la actividad volcánica. Ambos procesos trabajan juntos para moldear el fondo marino. La presencia de un domo volcánico actúa como una barrera natural que afecta el crecimiento y desplazamiento de las fallas cercanas. Esto es importante para entender la dinámica tectónica y volcánica de la región. Además, la relación entre el tamaño de las fallas y su desplazamiento vertical en esta zona es similar a lo observado en otras partes del mundo; esto sugiere que hay patrones comunes en cómo las fallas evolucionan en diferentes contextos geológicos.

Nuestro planeta es dinámico y está en constante cambio. Estudiar lugares como la Cordillera Alarcón nos permite entender mejor cómo las profundidades del océano esconden procesos fascinantes que moldean la Tierra. Las interacciones entre las fracturas del suelo oceánico y la actividad volcánica nos revelan cómo se crean y transforman las cordilleras submarinas, ofreciéndonos una ventana al interior de nuestro mundo.

### Referencias

- Small, C. (2013). Global Systematics of Mid-Ocean Ridge Morphology (pp. 1–25). <https://doi.org/10.1029/GM106p0001>
- Sigurdsson, H. (1977). Generation of icelandic rhyolites by melting of plagiogranites in the oceanic layer. *Nature*, 269(5623): 25–28.
- Vega-Ramirez, L. A. (2018). Análisis estructural de la Cordillera Alarcón en Golfo de California a partir de datos batimétricos de alta resolución. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.

# LA INFLUENCIA DEL MANGANESO EN LA QUÍMICA DE LA NATURALEZA



Imagen de Internet.

**Marina M. Atilano-Camino<sup>1\*</sup>, Aurora M. Pat-Espadas<sup>2</sup>, Francisco E. Molina Freaner<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de Ecología, UNAM, Av. Luis Donaldo Colosio M. s/n y Madrid, Hermosillo, Sonora, C.P. 83000

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, UNISON, Hermosillo, Sonora, CP. 83000

\*marina.atilano@ecologia.unam.mx

En la naturaleza ocurren muchos procesos que pasan inadvertidos pero que juegan un papel tan importante que, sin ellos, el equilibrio que conocemos no existiría. Estos procesos comparten algo en común: implican el intercambio de energía entre átomos y moléculas, un fenómeno que involucra a los electrones. Quizás el ejemplo más conocido de estos procesos de intercambio de energía que existen en la naturaleza es la fotosíntesis de las plantas donde ellas usan la luz solar para transformar el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y el agua en azúcar; en este proceso ocurre un canje donde el agua le da electrones a otras partes de la planta y se libera oxígeno. Otro ejemplo es la respiración, un proceso que todos realizamos para obtener energía de los alimentos que comemos, y es aquí donde ocurre ese intercambio de energía, ya que los alimentos (azúcares, proteínas, o lípidos) que ingerimos donan electrones, que después el oxígeno que respiramos atrapa y los convierte en el  $\text{CO}_2$  que exhalamos y en agua. La oxidación

de los metales es otro ejemplo clásico. Este proceso ocurre cuando un metal, como el hierro, entra en contacto con el aire y el agua. El oxígeno del aire reacciona con el hierro, provocando que el hierro pierda electrones y se transforme en óxido de hierro, el polvo marrón-anaranjado que se observa en la superficie del metal. Ahora que conocemos un poco sobre estos procesos que ocurren diariamente en la naturaleza, les pondremos nombre: procesos de óxido-reducción de la naturaleza. A continuación detallaremos un poco más sobre ellos.

Los procesos redox se definen como el intercambio de electrones (energía) entre dos moléculas o sustancias, donde siempre habrá dos partes en la reacción: la oxidación, que es cuando la molécula pierde electrones\*, y la reducción que ocurre cuando la molécula gana esos electrones (Figura 1A). Si ejemplificáramos este proceso en una situación cotidiana, podría explicarse como un intercambio de regalos, donde una persona (molécula) tiene el rol de dar un regalo (electrones) y la otra persona de recibir esos regalos. Los procesos redox son fundamentales en la naturaleza al impactar en diversos procesos biológicos, químicos y geológicos. Algunos metales tienen una relación estrecha en los procesos redox gracias a su capacidad de ganar o perder electrones. Este artículo se centrará en el manganeso.

El manganeso (Mn) es un elemento químico esencial que desempeña un papel crucial en diversos procesos redox en la naturaleza. Este elemento tiene la capacidad para cambiar fácilmente entre diferentes estados de oxidación (de +II a +VII), esto lo podríamos entender como el saldo de electrones que tiene el manganeso para intercambiar con otros átomos (Figura 1B). Es decir, el Mn tiene estados de oxidación positivos (+2, +3, +4, +5, +6 y +7) lo que significa que ha perdido electrones, como si le hubieran dado diferentes regalos; esta característica química lo convierte en un participante activo en una amplia gama de reacciones químicas en diversos entornos naturales (De Mello Prado, 2021).

\*Electrones: pequeñas partículas de energía que se mueven alrededor del núcleo de un átomo, pero que no lo hacen en un camino fijo, sino que forman nubes electrónicas donde es más probable encontrarlos.

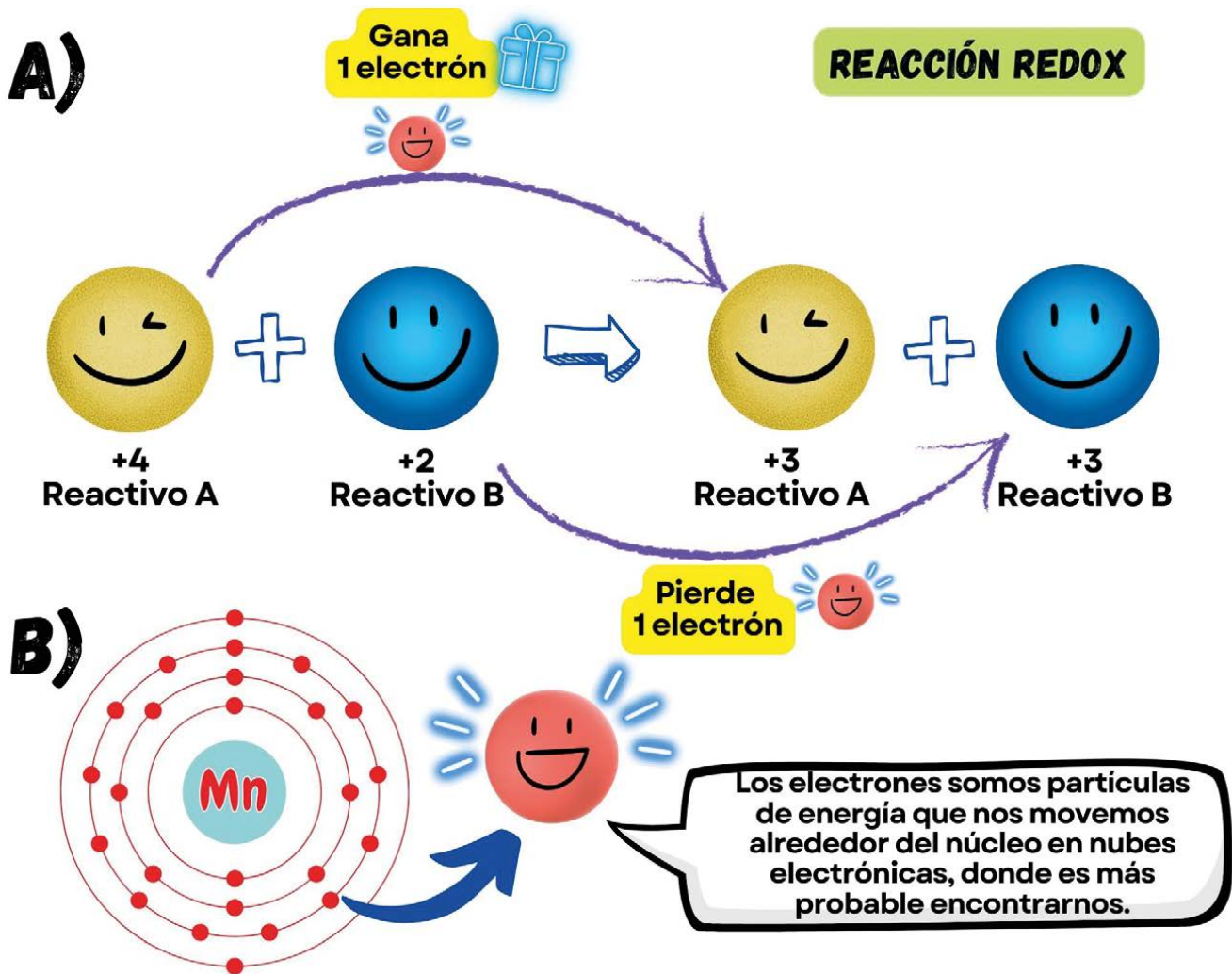


Figura 1. Reacción tipo redox (A) y estructura química del manganeso (B) (Imagen del autor).

### CICLO BIOGEOQUÍMICO DEL MANGANESO

El manganeso es un mineral que se encuentra en la naturaleza, principalmente en rocas, suelos y hasta en el océano; y participa en el equilibrio de nuestro planeta a través del ciclo biogeoquímico del manganeso, que es como un gran viaje que realiza a través de la Tierra pasando por diferentes lugares y transformándose en el camino. El ciclo comienza cuando el manganeso que se encuentra en rocas y suelos es liberado gradualmente principalmente por erosión, y llega al suelo por medio de la descomposición de minerales y la acción de microorganismos (Sujith & Bharathi, 2011). Los procesos de transformación del manganeso dependerán de la presencia o ausencia de oxígeno. Por ejemplo en ambientes con oxígeno como suelos superficiales, ríos, lagos oxigenados, etc., el manganeso presente como Mn(II) se oxida (es decir, regala electrones) cambiando a manganeso (IV) (Mn(IV)), transformación influenciada por bacterias oxidantes de manganeso. El Mn(IV) forma óxido de manganeso que se precipita (es decir es insoluble) y por lo tanto se acumula en sedimentos y corteza terrestre.

Por otro lado, en condiciones sin oxígeno como el fondo de lagos y ríos, aguas subterráneas, sedimentos marinos profundos, pantanos, etc,

algunas bacterias pueden reducir el manganeso (Mn(IV)) (es decir, gana electrones) utilizándolo como aceptor de electrones (que guarda los electrones) para su metabolismo y así ganar energía, liberando como resultado Mn(II) al ambiente. Además, en ecosistemas marinos, el manganeso forma nódulos, que son formaciones rocosas en el fondo del mar enriquecidas de metales y representan una fuente importante de recursos minerales (Figura 2). En otros escenarios como el suelo, el manganeso presente es aprovechado por las plantas a través de sus raíces, al absorberlo como nutriente, y posteriormente utilizarlo en la fotosíntesis y para crecer.

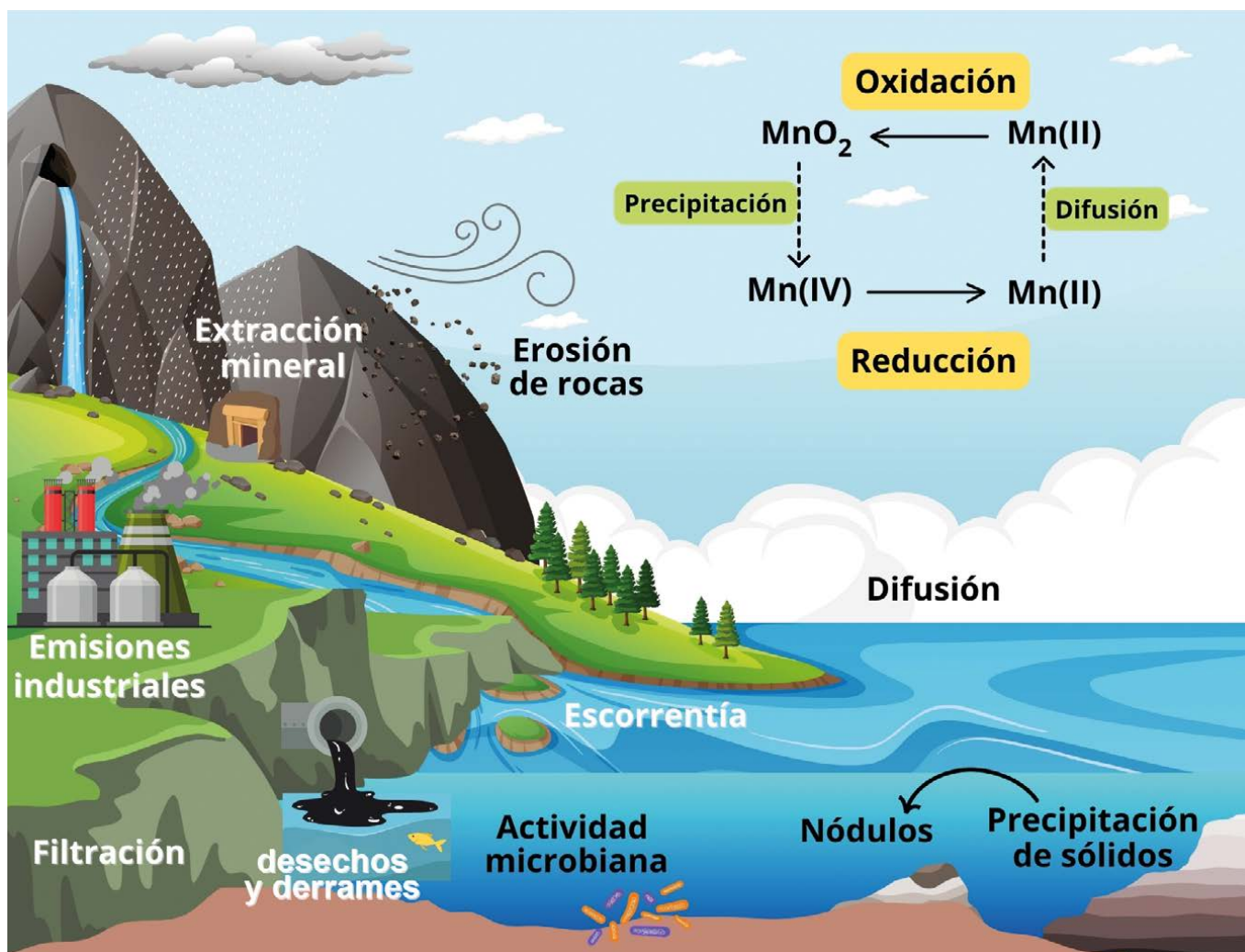


Figura 2. Mecanismos de ocurrencia relacionados en el ciclo biogeoquímico del manganeso (Imagen del autor).

### IMPACTO DEL MANGANESO EN LOS PROCESOS REDOX DE LA NATURALEZA

El manganeso desempeña un papel fundamental en diversos procesos esenciales en la naturaleza, especialmente en reacciones de tipo redox (De Mello Prado, 2021). Entre los procesos más destacados se encuentran (Figura 3):

- **Fotosíntesis:** El Mn es la pieza clave para romper la molécula del agua (H<sub>2</sub>O) en hidrógeno (H) y oxígeno (O), cuando esto ocurre la planta aprovecha la energía que se libera. Las plantas tienen pequeños laboratorios llamados cloroplastos, dentro de ellos existe un grupo especial de átomos de Mn; este grupo llamado complejo de manganeso es el martillo que rompe las moléculas

del agua. La luz solar llega a las hojas y el complejo del manganeso toma la energía necesaria y la utiliza para romper las moléculas del agua, en este paso, se libera oxígeno (que es lo que respiramos gracias a las plantas) y electrones (energía) que la planta utiliza para crear su alimento (azúcares).

- **Respiración celular:** El Mn es parte de diversas enzimas que son pequeñas máquinas dentro de las células que ayudan a que las reacciones químicas sucedan más rápido; una de ellas es la superóxido dismutasa de manganeso que ayuda a eliminar residuos que son dañinos en las células, y mantenerlas saludables mientras generan energía. También, algunas bacterias utilizan el Mn(IV) como aceptor de electrones en su respiración anaeróbica (proceso biológico que ocurre cuando no se utiliza oxígeno como aceptor de electrones), liberando energía para su crecimiento y metabolismo.
- **Degradación de materia orgánica:** Algunas bacterias y hongos desempeñan un papel crucial en la descomposición de la materia orgánica, utilizando el Mn como facilitador en diversas reacciones, al promover la transferencia de electrones y aumentar la velocidad a la que ocurren.
- **Ciclo del nitrógeno:** El Mn tiene un papel esencial, ya que interviene de forma positiva en la labor de algunos microorganismos que se encargan de la conversión de nitrógeno inorgánico (como nitrógeno molecular (N<sub>2</sub>), amoníaco (NH<sub>3</sub>), nitrato (NO<sub>3</sub>), nitritos (NO<sub>2</sub>), entre otros) en nitrógeno orgánico (como aminoácidos, urea, proteínas, etc.). Su protagonismo se

debe a que actúa como ayudante (cofactor) de ciertas enzimas que producen algunos microorganismos para llevar a cabo estas transformaciones del nitrógeno.

- **Formación de minerales:** Los cambios en los estados de oxidación del manganeso dan lugar a la generación de minerales como la pirolusita ( $Mn^{4+}O_2$ ), la manganita ( $Mn^{3+}O(OH)$ ), o la combinación con otros compuestos para formar minerales como la rodocrosita ( $Mn^{2+}CO_3$ ) o la rodonita ( $(Mn^{2+})SiO_3$ ).

**BIORREMEDIACIÓN E IMPACTO AMBIENTAL**

Las actividades humanas, como la minería, la agricultura y la industria, pueden afectar significativamente el ciclo del manganeso y sus procesos redox en el ambiente. La liberación excesiva de manganeso al ambiente puede tener consecuencias negativas, como el crecimiento desmedido de algas en cuerpos de agua (eutrofización). Este suceso impacta negativamente ya que esta superabundancia de algas bloquea la luz del sol, impidiendo que las plantas acuáticas profundas crezcan. Además, cuando las algas mueren se consume el oxígeno del agua para su descomposición, reduciendo el oxígeno para peces y animales acuáticos y provocando incluso su muerte.

Sin embargo, el papel que puede desempeñar el manganeso para remediar problemas ambientales como la contaminación del suelo o el agua es interesante (Wang et al., 2023). Por ejemplo, el manganeso puede interactuar con diversos microorganismos para facilitar los procesos de biorremediación al degradar o remover contaminantes. A continuación, mencionaremos algunos de ellos (Figura 4).

**Eliminación de elementos potencialmente tóxicos.** El Mn(IV) puede precipitar y formar sólidos que tienen la afinidad para retener otros metales

pesados como plomo, cobre, o cadmio. Este proceso se conoce como adsorción. También puede oxidar al arsénico (As(III)) a una forma menos tóxica como As(V) ayudando a removerlo del suelo o del agua.

**Estimulación para la biodegradación de hidrocarburos.** Algunas bacterias aprovechan el Mn(IV) para capturar electrones y este proceso facilita la degradación (oxidación) de contaminantes como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) como el naftaleno, antraceno, fluoreno, fenantreno, etc. que tienen un amplio uso en la industria del petróleo y el carbón, la producción de plásticos y resinas, entre otros.

**Promover la desnitrificación.** Otras bacterias conocidas como desnitrificantes pueden utilizar el Mn(IV) para capturar electrones y transformar los nitratos ( $NO_3^-$ ) a nitrógeno gaseoso ( $N_2$ ), y de esta forma eliminar este tipo de contaminantes del agua.

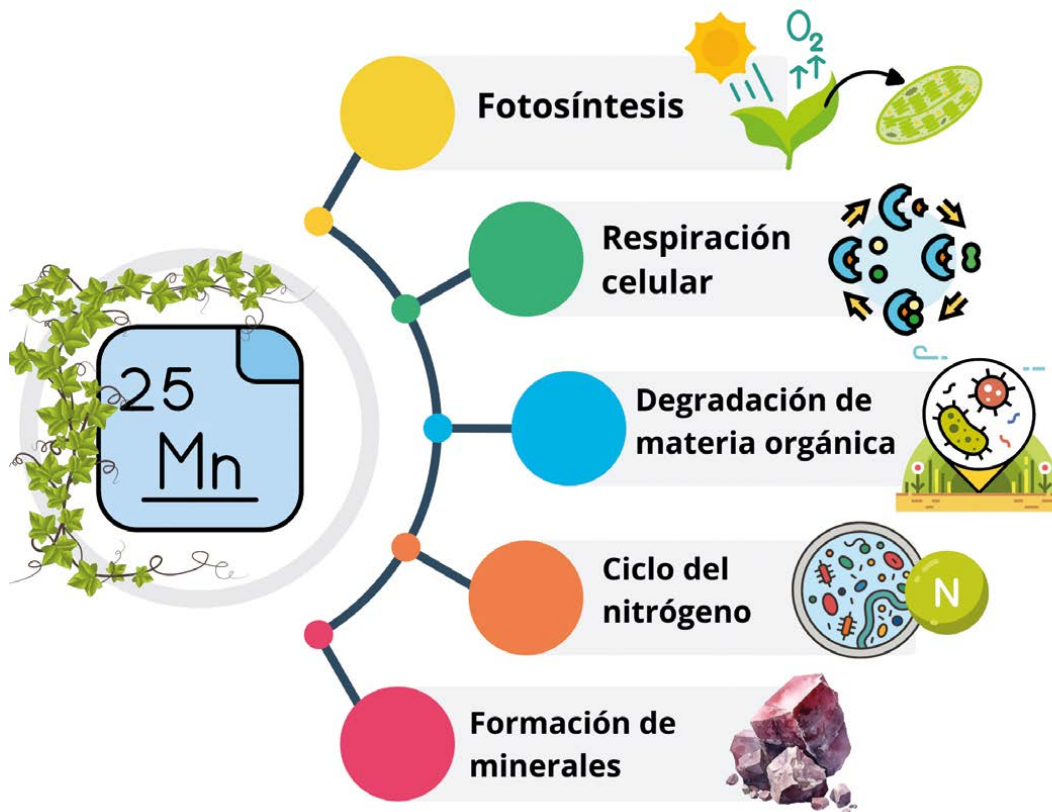


Figura 3. Esquema del papel que tiene el manganeso en los procesos naturales (Imagen del autor).



Figura 4. Aplicación del manganeso para resolver problemáticas ambientales (Imágenes recuperadas de: [www.canva.com](http://www.canva.com)).

## PARA TERMINAR

El manganeso es un elemento esencial que desempeña un papel fundamental en diversos procesos redox en la naturaleza. Por otro lado, las actividades humanas pueden influir en el ciclo del manganeso y sus procesos redox, lo que puede tener consecuencias ambientales. Sin embargo, en otro enfoque el proceso redox del manganeso presenta un gran potencial para la biorremediación de diversos contaminantes en agua y suelo. Sus propiedades lo convierten en una alternativa atractiva a las tecnologías de remediación tradicionales y la investigación de su implementación a gran escala es prometedora.

## Referencias

- De Mello Prado, R. 2021. Manganese. En R. De Mello Prado, Mineral nutrition of tropical plants. Springer International Publishing. 203-213
- Sujith, P. P., & Bharathi, P. A. L. 2011. Manganese Oxidation by Bacteria: Biogeochemical Aspects. En W. E. G. Müller (Ed.), Molecular Biomineralization. Springer Berlin Heidelberg. 52, 49-76
- Wang, Y., Bai, Y., Su, J., Ali, A., Gao, Z., Huang, T., Cao, M., & Ren, M. 2023. Advances in microbially mediated manganese redox cycling coupled with nitrogen removal in wastewater treatment: A critical review and bibliometric analysis. Chemical Engineering Journal, 461, 141878.

## Nuestra Tierra

### Revista de divulgación

Nuestra Tierra es una publicación semestral de la Estación Regional del Noroeste de la Universidad Nacional Autónoma de México con la cooperación del Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora. Es un medio de divulgación de Ciencias Naturales como son las Ciencias de la Tierra y las Biológicas, aunque puede cubrir otras áreas del conocimiento científico. Su objetivo es presentar, de manera accesible, artículos y reportajes sobre investigaciones en estos campos, tanto en México como en otras partes del mundo, además de temas de interés general relacionados con nuestro planeta y el universo.

Se sugiere que los autores de las contribuciones sean especialistas o conocedores del tema. No se aceptan, en cambio, artículos de investigación ni informes de trabajo. La revista está dirigida a personas con estudios universitarios y estudiantes de nivel medio superior, por lo que se deben seguir las siguientes normas:

### Normas Editoriales

**Tipos de contribuciones:** 1) artículos cortos de 1 a 2 cuartillas incluyendo las ilustraciones; 2) artículos en extenso, de 3 a 6 cuartillas incluyendo las ilustraciones.

**Lenguaje:** Los autores deben utilizar un lenguaje claro y sencillo, sin ser coloquial, ya que se debe hacer accesible la información sin perder rigor académico.

**Terminología especializada:** Se debe evitar el uso de términos técnicos y especializados siempre que sea posible. En caso de que su uso sea indispensable, estos deben acompañarse de una definición breve y clara entre paréntesis, comillas, en una nota al pie de página o cuadro de texto resaltado.

**Abreviaturas y acrónimos:** Sólo utilizar los de uso común y ampliamente comprendidos por el público en general.

**Texto:** Los artículos deben ser redactados en español, en formato "Word", con letra Times New Roman, tamaño 11, interlineado a doble espacio y todos los márgenes de 2.5 cm. Se recomienda dividir el texto mediante subtítulos en negrita (sin numerar). Se debe incluir un resumen de 80 a 100 palabras y 3 a 4 palabras clave relacionadas con el artículo. En el texto solo se deben mencionar los fondos que financiaron el artículo, evitando cualquier tipo de agradecimiento o dedicatoria.

**Imágenes, fotografías, cuadros y figuras:** Las imágenes, fotografías, cuadros y figuras deben incluirse en el texto en la secuencia correspondiente y también enviarse como archivos independientes numerados en el orden de aparición. El texto debe estar en español y ser legible. En caso de utilizar imágenes de terceros, se debe adjuntar el formato descargable con la cesión de derechos del autor original y contar con los permisos de reproducción correspondientes cuando no sean de creación propia. El número máximo de imágenes será de 5. Las imágenes deberán tener una resolución mínima de 300 dpi, con formato JPEG, PNG, TIFF o PDF. Si las imágenes provienen de internet, se recomienda guardarlas con el tamaño más grande para asegurar la mejor resolución posible.

Los pies de figura deben incluirse debajo de la imagen o gráfico, indicando el número correspondiente y deben proporcionar la información necesaria para comprender el contenido sin la necesidad de consultar el texto principal.

**Citas:** Se sugiere un máximo de 3 citas a lo largo del texto, utilizando el siguiente formato:

Para un autor: apellido y fecha (Torres, 1997).

Para dos o más autores: en orden cronológico (Torres et al., 1987; Barrón, 2006).

**Referencias:** Deben ir al final del texto utilizando el formato APA. Ejemplo: Apellido(s), Inicial(es), Año, Título: Título de la revista, volumen, número de la primera y la última página del artículo. Ejemplo: Barrios D., 1991, El oro y la historia de Perú: Historia Latinoamericana, 100, 35-40.

**Envío:** Los trabajos deberán enviarse en formato DOC o RTF (Rich Text Format). El nombre del archivo deberá incluir el primer apellido del autor principal y una palabra clave relacionada con el artículo. Ej: Larios\_volcanes.doc

**Revisión:** Los artículos recibidos serán sometidos a una evaluación inicial para determinar si cumplen con los objetivos y estándares de la revista. Si se requieren modificaciones sustanciales, el manuscrito podrá ser devuelto con sugerencias antes de su revisión. Aquellos que superen esta etapa pasarán a una revisión por pares bajo el sistema de simple ciego. Los comentarios y observaciones se enviarán al autor para correcciones. Los artículos que no alcancen la calidad requerida en contenido o escritura podrán ser rechazados sin responsabilidad por parte de la revista.

### ¿Te interesa publicar con nosotros?

Envía tu artículo al correo:  
[nuestratierra@geologia.unam.mx](mailto:nuestratierra@geologia.unam.mx)

Nuestro nuevo sitio web está en marcha. Pronto podrás enviar tus artículos directamente a través de [revistanuestratierra.unam.mx/NT](http://revistanuestratierra.unam.mx/NT)

**Contacto:** Blanca González, editora responsable  
Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, UNAM, Hermosillo, Son.



La UNAM te abre las puertas a una formación de excelencia a través de programas de posgrado que impulsan el conocimiento y el desarrollo en el país.

En la Estación Regional del Noroeste, Hermosillo:

- ✓ **Ciencias de la Tierra**  
Maestría y Doctorado en Ciencias de la Tierra — [pctierra.unam.mx](http://pctierra.unam.mx)
- ✓ **Ciencias Biológicas**  
Maestría y Doctorado en Ciencias Biológicas — [pcbiol.posgrado.unam.mx](http://pcbiol.posgrado.unam.mx)

En otras sedes de la UNAM en el país:

- ✓ **Físico-Matemáticas**  
Maestría en Ciencias (Física) • Maestría en Ciencias (Física Médica)  
Doctorado en Ciencias (Física) — [posgrado.fisica.unam.mx](http://posgrado.fisica.unam.mx)  
Maestría y Doctorado en Ciencias de la Tierra — [pctierra.unam.mx](http://pctierra.unam.mx)
- ✓ **Ciencias Biomédicas y de la Salud**  
Maestría y Doctorado en Ciencias Biológicas — [pcbiol.posgrado.unam.mx](http://pcbiol.posgrado.unam.mx)  
Doctorado en Ciencias Biomédicas — [pdcab.unam.mx](http://pdcab.unam.mx)  
Maestría en Ciencias (Neurobiología) — [maestria.inb.unam.mx](http://maestria.inb.unam.mx)  
Maestría y Doctorado en Ciencias Bioquímicas — [bioquimicas.posgrado.unam.mx](http://bioquimicas.posgrado.unam.mx)  
Maestría en Medicina Veterinaria y Zootecnia • Maestría y Doctorado en Ciencias de la Producción y de la Salud Animal — [saludanimal.posgrado.unam.mx](http://saludanimal.posgrado.unam.mx)
- ✓ **Ciencias Químicas**  
Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas — [cienciasquimicas.posgrado.unam.mx](http://cienciasquimicas.posgrado.unam.mx)
- ✓ **Ciencias del Mar y Limnología**  
Maestría y Doctorado en Ciencias del Mar y Limnología — [marylimnologia.posgrado.unam.mx](http://marylimnologia.posgrado.unam.mx)
- ✓ **Ciencias de la Sostenibilidad**  
Maestría y Doctorado en Ciencias de la Sostenibilidad — [sostenibilidad.posgrado.unam.mx](http://sostenibilidad.posgrado.unam.mx)

*Estudia con nosotros: formación científica  
para quienes transforman el futuro.*