

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/290392150>

# La Frontera Final: El Océano Profundo

Book · November 2014

---

CITATIONS

2

---

READS

9,470

**2 authors:**



**Antonio Low Pfeng**  
Universidad de Los Lagos

2 PUBLICATIONS 6 CITATIONS

SEE PROFILE



**Edward Peters**  
Ensenada Center for Scientific Research and Higher Education

37 PUBLICATIONS 678 CITATIONS

SEE PROFILE

ANTONIO LOW PFENG Y EDWARD M. PETERS RECAGNO  
(EDITORES)

LA FRONTERA FINAL: EL OCÉANO PROFUNDO

# LA FRONTERA FINAL: EL OCÉANO PROFUNDO

Antonio Low Pfeng y Edward M. Peters Recagno  
(editores)



LA FRONTERA FINAL:  
EL OCÉANO PROFUNDO



# LA FRONTERA FINAL: EL OCÉANO PROFUNDO

**Antonio Low Pfeng y Edward M. Peters Recagno  
(editores)**

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)  
Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)

Primera edición: 2014

D.R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales  
Blvd. Adolfo Ruiz Cortines 4209. Col. Jardines en la Montaña  
C.P. 14210. Delegación Tlalpan, México, D.F.  
[www.semarnat.gob.mx](http://www.semarnat.gob.mx)

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC-SEMARNAT)  
Periférico Sur 5000. Col. Insurgentes Cuicuilco  
C.P. 04530. Delegación Coyoacán, México, D.F.  
[www.inecc.gob.mx](http://www.inecc.gob.mx)

Foto de portada: Claudio Contreras Koob

ISBN: 978-607-8246-70-0  
Impreso y hecho en México

# ÍNDICE

La era de los descubrimientos continúa en la frontera final, el océano profundo y mas allá <i>Paul V.R. Snelgrove</i>	ix
¿Qué es el mar profundo? <i>Elva Escobar-Briones</i>	1
Evaluación y explotación de los recursos geotérmicos del océano <i>Rosa María Prol Ledesma, Carles Canet Miquel</i>	11
Nódulos polimetálicos <i>Marlene Olivares Cruz, Mayumy Amparo Cabrera Ramírez, Leticia Rosales Hoz, Arturo Carranza Edwards</i>	31
Procedencia de los elementos químicos en los sistemas marinos y su influencia en la composición de los sedimentos <i>Viridiana Vázquez-Figueroa, Carles Canet, Rosa María Prol-Ledesma, Ruth Esther Villanueva-Estrada</i>	47
Sedimentación carbonatada, silícica y otros sedimentos químicos en los ambientes marinos profundos <i>Fernando Núñez-Useche, Ricardo Barragán, Carles Canet</i>	57

La exploración en el mar profundo de ambientes extremos: sistemas hidrotermales	86
<i>Luis A. Soto y Alejandro Estradas Romero</i>	
La exploración de las aguas profundas del Pacífico mexicano: el Proyecto TALUD	107
<i>Pablo Zamorano, Michel E. Hendrickx, Nuria Méndez, Samuel Gómez, David Serrano, Hugo Aguirre, Juan Madrid, Francisco Neptalí Morales-Serna</i>	
Foraminíferos y ostrácodos recientes de la zona batial y abisal del sur del golfo de México	153
<i>María Luisa Machain-Castillo, Frank Raúl Gío-Argáez, Elva Escobar-Briones</i>	
Los anélidos poliquetos del mar profundo en México	175
<i>Vivianne Solís-Weiss, Pablo Hernández Alcántara, Alejandro Granados Barba</i>	
Biodiversidad de los equinodermos (Echinodermata) del mar profundo mexicano	215
<i>Francisco A. Solís-Marín, A. Laguarda-Figueras, A. Durán González, A.R. Vázquez-Bader, Adolfo Gracia</i>	
Recursos pesqueros del mar profundo	255
<i>Adolfo Gracia, Ana Rosa Vázquez Bader</i>	
Análisis de vacíos y omisiones en conservación de la biodiversidad del mar profundo	273
<i>Verónica Aguilar Sierra</i>	
Efectos de las actividades humanas sobre el mar profundo: tendencias mundiales y estado actual del conocimiento en la Zona Económica Exclusiva (ZEE) de México	287
<i>Elva Escobar-Briones</i>	

# LA ERA DE LOS DESCUBRIMIENTOS CONTINÚA EN LA FRONTERA FINAL, EL OCÉANO PROFUNDO Y MAS ALLÁ

Paul V. R. Snelgrove<sup>1</sup>

**E**s posible argumentar que la era de los descubrimientos de los océanos posiblemente se inició con la expedición *Challenger* durante el periodo 1872-1876, pero el potencial de descubrimiento en los océanos se mantiene vivo al día de hoy, más de un siglo después. Una analogía moderna con dicha expedición es el recientemente completado Censo de la vida marina (2000-2010), que representa el estudio más ambicioso de ese mundo que haya tenido lugar en la historia. Este estudio de una década produjo una gran cantidad de descubrimientos e involucró a unos 2 700 científicos de más de 80 países, tanto naciones ricas como aquellas en vías de desarrollo, de tropicales a polares y desde costeras hasta oceánicas (Snelgrove 2010). Los varios miles de artículos que emergieron de ese programa destacaron no solo el descubrimiento de nuevas especies, estimadas en miles, sino también nuevos ambientes y nuevo conocimiento sobre la diversidad, distribución y abundancia de la vida (McIntyre 2010). Estos estudios identificaron ventilas más calientes y profundas que las que se conocían hasta entonces (Baker *et al.* 2010), nuevas comunidades de zonas polares (Gradinger *et al.* 2010), migraciones de animales más largas y

<sup>1</sup> Canada Research Chair in Boreal and Cold Ocean Systems. Department of Ocean Sciences and Biology Department. Memorial University of Newfoundland, St. John's NL A1C 5S7, Canadá.

consistentes de las que previamente se tenía conocimiento (Block *et al.* 2010), y una diversidad microbiana de una riqueza nunca imaginada (Amaral-Zettler *et al.* 2010). Los descubrimientos continúan aun después del Censo de la vida marina con cuatro o cinco especies marinas nuevas para la ciencia cada día, y esta tasa es limitada principalmente por la carencia de especialistas taxonómicos más que por la disponibilidad de nuevas especies (Snelgrove 2010).

Más allá de los descubrimientos nuevos, el Censo de la vida marina también ilustró lo que desconocíamos. Las bases de datos más completas de vida oceánica están agrupadas en la proximidad de los laboratorios costeros de las naciones desarrolladas y con una larga tradición de exploración científica e infraestructura, sesgando nuestro conocimiento hacia las zonas costeras del Atlántico Norte de Europa y Norte América (Webb *et al.* 2010). Intrigantemente, este sesgo subrepresenta algunos de los hábitats más diversos con respecto a latitud (Tittensor *et al.* 2010) y con respecto a profundidad (Snelgrove Smith 2002), dejando grandes oportunidades para la exploración de aguas costeras tropicales y ecosistemas de aguas profundas (Webb *et al.* 2010). De hecho, el Censo de la Vida Marina reconoce el potencial de descubrimientos en aguas profundas dedicando no menos de 5 de sus 14 programas de campo a los ecosistemas de aguas profundas. Ecosistemas de los Márgenes Continentales a una escala mundial (por sus siglas en inglés CORMARGE) examinó los ecosistemas de márgenes continentales, la Biogeografía de Ecosistemas Quimiosintéticos de Aguas Profundas (por sus siglas en inglés ChEss) estudió la biogeografía de los ecosistemas quimiosintéticos de aguas profundas, el Censo de la Diversidad de Vida Marina Abisal (por sus siglas en inglés CeDAMar) documentó patrones de diversidad en las planicies abisales del mar profundo, el Censo Global de Vida Marina en Montes Submarinos (por sus siglas en inglés CenSeam) exploró globalmente los ecosistemas de los montes submarinos, y los Patrones y Procesos de los Ecosistemas del Norte del Atlántico Medio (por sus siglas en inglés MAR-ECO) estudió los animales y su distribución en el Norte de la Dorsal Mesoatlántica. En directa correspondencia, este volumen considera a todos estos ambientes, aunque esta coincidencia no es fortuita. México y los científicos mexicanos aparecen de manera prominente en el Censo de la Vida marina, cuyas bases de datos registran a 16 científicos de diferentes agencias y regiones a lo largo de México. Una búsqueda rápida de la base de datos bibliográfica del Censo indica 53 artículos publicados que mencionan a México en sus resúmenes.

Este volumen resume estudios recientes en las aguas profundas de México. Este ambiente ofrece un alto potencial para conocimiento nuevo por dos razones. Primero, la exploración de aguas mexicanas ha entrado ahora en una era donde la expansión de la infraestructura y la capacidad científica, abren a esta región a la investigación exploratoria a un nivel nunca antes visto. Segundo, las aguas mexicanas incluyen al Pacífico y al Golfo de México cada uno con su propia y única historia geológica y evolutiva. Claramente, la Era del Descubrimiento de los océanos permanece ampliamente abierta y los científicos mexicanos están aprovechando la oportunidad. Por ejemplo, el proyecto TALUD descrito por Zamorano *et al.* (2013) señala 13 cruceros con muestreos desde 1989 a lo largo del talud continental del Pacífico y Golfo de California; estos cruceros proporcionaron considerable material para los capítulos que comprende este volumen.

De la gran variedad de hábitats en aguas mexicanas, los ambientes de aguas profundas sobresalen particularmente como una fuente promisoría de descubrimientos (Escobar-Briones 2013b). Análisis recientes de las tasas de descubrimientos de peces, que están dentro de los grupos de organismos marinos mejor conocidos, sugieren que los ambientes de mar profundo tienen una alta probabilidad de proporcionar especies nuevas para la ciencia (Mora *et al.* 2008). Para grupos menos conocidos de invertebrados como son los nemátodos, crustáceos y gusanos poliquetos, el mar profundo ofrece una promesa aún más grande de descubrimientos, dado que estos grupos están especialmente submuestreados, y la tasa de descubrimientos permanece extremadamente alta (Ebbe *et al.* 2010). Microbios, que previamente se pensaba que eran poco diversos, ahora son reconocidos como una fuente potencialmente vasta de millones de especies, y ambientes extremos en el mar profundo, como las ventilas hidrotermales, pueden constituir semilleros de diversidad (Amaral-Zettler *et al.* 2010).

Las aguas profundas de México incluyen una amplia diversidad de ambientes que van de ventilas hidrotermales (Soto and Estradas 2013) a cañones y montes submarinos, y un amplio rango de ambientes sedimentarios (Vázquez-Figueroa *et al.* 2013). De hecho, desde la perspectiva de la conservación los ambientes de mar profundo representan una prioridad mayor por su gran diversidad de hábitats y procesos (Aguilar 2013). Desde la perspectiva de la diversidad biológica, los capítulos de este volumen proveen rica evidencia para nuevos descubrimientos. Solís-Weiss *et al.* (2013) reportan 291 y 42 especies de gusanos poliquetos del Pacífico y del Golfo de México, respectivamente, ilustrando las diferencias entre los esfuerzos de muestreo en las dos cuencas

y posibles diferencias en diversidad biológica. Las masas de agua y el tipo de hábitat ayudan a definir la distribución y diversidad de los foraminíferos y ostrácodos (Machain-Castillo *et al.* 2013). Los equinodermos ilustran la potencial importancia de las aguas mexicanas para la diversidad global, dado que las 643 especies conocidas para la región, comprenden cerca del 10% de las 7 000 especies conocidas para este grupo a nivel mundial (Solís-Marín *et al.* 2013). Incluso dentro de los peces mejor conocidos nuevo conocimiento continúa emergiendo (Gracia-Gasca y Vázquez-Bader 2013).

Mi sesgo propio favorece estudios biológicos por el bien del conocimiento puro, pero la amplia variedad de hábitats en las aguas profundas de México, ofrece una fértil oportunidad para descubrimientos que van más allá de la biología. Estas regiones oceánicas son lugares importantes para el ciclo de los elementos (Vázquez-Figueroa *et al.* 2013) que son críticos para una amplio rango de funciones y servicios oceánicos (Snelgrove *et al.* 1997). Nuestro limitado conocimiento de la sedimentación en las profundidades del océano (Núñez-Useche *et al.* 2013) y el funcionamiento de los sistemas de ventilas hidrotermales (Soto y Estradas 2013) representan lagunas de conocimiento que pueden ser abordados a través de estudios en los sistemas de aguas profundas de México.

Como concluye el capítulo final del volumen, no podemos darnos el lujo de retrasar el estudio de los ecosistemas del océano profundo. Aunque el ambiente de mar profundo contiene “una vasta diversidad biológica y ofrece una importante riqueza de recursos de importancia económica” (Escobar 2013b) actualmente una amplia variedad de actividades, basadas en las tecnologías hoy disponibles, amenazan a los ambientes de mar profundo (Escobar-Briones 2013b). Nuevos intereses en el futuro potencial de la extracción de la energía geotérmica (Prol-Ledesma y Canet 2013) y la minería de sulfuros polimetálicos (Olivares *et al.* 2013), podría sumarse a estas presiones, y plantea la pregunta sobre la vulnerabilidad de los ecosistemas de aguas profundas mexicanas. Un análisis de las lagunas de conocimiento en este volumen, identifica 26 sitios de mar profundo prioritarios para la conservación en aguas mexicanas, que representan el 25% de los 106 sitios marinos prioritarios de todos los ambientes oceánicos del mundo (Aguilar 2013). Hasta la fecha, sólo 2 de estos sitios cuentan con protección. En esencia, corremos el riesgo de modificar mucho los ambientes oceánicos de aguas profundas, incluso antes de que hayan sido muestreados por los científicos.

Aunque un estudio a escala global, como el Censo de la Vida Marina, no se puede repetir, las naciones marítimas como México deben trabajar para entender y proteger sus ambientes oceánicos. Si no hacen tal esfuerzo, nadie más lo hará. Incluso en mi propio país, Canadá, que se considera rico en muchos aspectos, tiene un largo camino por recorrer en el establecimiento de áreas marinas protegidas. En la medida de lo posible, debemos asegurarnos de que las decisiones sobre el uso y la protección del océano utilicen la mejor información científica disponible. Los esfuerzos de conservación que no producen éxitos tangibles pierden rápidamente el apoyo, y las acciones de gestión son mucho más propensas a obtener resultados cuando están basadas en sólidos conocimientos científicos y claros objetivos de conservación. Los programas nacionales de investigación, tales como los descritos en este volumen en última instancia conducen la mayoría de los avances en la investigación, y los programas internacionales principalmente sirven para catalizar e incrementar la eficiencia de tales esfuerzos. Independientemente de si optamos por avanzar en la investigación del océano por razones éticas y de protección o porque reconocemos la necesidad de los servicios vitales que proporcionan a la humanidad, tenemos mucho que ganar generando un mayor y mejor conocimiento, y aplicando ese conocimiento a la sostenibilidad de los océanos. *Carpe diem*.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, V. 2013. Análisis de vacíos y omisiones en conservación de la biodiversidad del mar profundo. En: A. Low Pfeng y E. M. Peters Recargno (eds.). *La frontera final: el océano profundo*. INECC, México. Pp. 265-276.
- Amaral-Zettler, L., Artigas, L. F., Baross, J., Bharathi, L., Boetius, A., Chandramohan, D., Herndl, G., Kogure, K., Neal, P., Alió, C.-P., Ramette, A., Schouten, S., Stal, L., Thessen, A., de Leeuw, J. y Sogin M. 2010. A global census of marine microbes. En: A. D. McIntyre, ed. *Life in the World's Oceans: Diversity, Distribution and Abundance*. Oxford: Wiley-Blackwell. Pp. 223-245.
- Baker, M.C., Ramirez-Llodra, E.Z., Tyler, P.A., German, C.R., Boetius, A., Cordes, E.E., Dubilier, N., Fisher, C.R., Levin, L.A., Metaxas, A., Rowden, A.A., Santos, R.S., Shank, T.M., Van Dover, C.L., Young, C.M. and Warén, A. 2010. Biogeography, ecology and vulnerability of chemosynthetic ecosystems in the deep sea. En: A. D. McIntyre (ed.), *Life in the World's Oceans: Diversity, Distribution and Abundance* (Oxford: Blackwell Publishing Ltd., 2010). Pp. 161-182.

- Block, B.A., Costa, D. P. and Bograd S.J. 2010. A view of the ocean from Pacific predators. In A. D. McIntyre, ed. *Life in the World's Oceans: Diversity, Distribution and Abundance* (Oxford: Wiley-Blackwell, 2010). Pp. 291-311.
- Olivares, M., Cabrera, M.A., Rosales, L. and Carranza-Edwards, A. 2013. Nódulos poli-metálicos. En: A. Low Pfeng y E. M. Peters Recargno (eds.). *La frontera final: el océano profundo*. INECC, México. Pp. 31-56.
- Ebbe, B., Billett, D.S.M., Brandt, A., Ellingsen, K., Glover, A.G., Keller, S., Malyutina, M., MartínezArbizu, Molodtsova, T., Rex, M., Smith, C., and Tselepidis A. 2010. Diversity of Abyssal Marine Life. En: McIntyre AD, editor. *Life in the World's Oceans: Diversity, Distribution and Abundance*. Oxford: Wiley-Blackwell. Pp. 161-182.
- Escobar-Briones, E. 2013a. ¿Qué es el mar profundo? En: A. Low Pfeng y E. M. Peters Recargno (eds.). *La frontera final: el océano profundo*. INECC, México. Pp. 1-10.
- Escobar-Briones, E. 2013b. Efectos de las actividades humanas sobre el mar profundo tendencias mundiales y estado actual del conocimiento en la Zona Económica Exclusiva (ZEE ) de México. En: A. Low Pfeng y E. M. Peters Recargno (eds.). *La frontera final: el océano profundo*. INECC, México. Pp. 277-292.
- Gracia-Gasca, A. and Vázquez Bader, A.R. 2013. Recursos pesqueros del mar profundo. En: A. Low Pfeng y E. M. Peters Recargno (eds.). En: A. Low Pfeng y E. M. Peters Recargno (eds.). *La frontera final: el océano profundo*. INECC, México. Pp. 247-264.
- Gradinger, R., Bluhm, B.A., Hopcroft, R.R., Gebruk, A.V., Kosobokova, K., Sirenko, B., and MarcinWesławski, J. 2010. Marine life in the Arctic. In A. D. McIntyre (ed.), *Life in the World's Oceans: Diversity, Distribution and Abundance*. Oxford: Blackwell Publishing Ltd. Pp. 183-202.
- Prol Ledesma, R.M. y Canet, C. 2013. Evaluación y explotación de los recursos geotérmicos del océano. En: A. Low Pfeng y E. M. Peters Recargno (eds.). *La frontera final: el océano profundo*. INECC, México. Pp. 11-30.
- McIntyre AD, editor. 2010. *Life in the World's Oceans: Diversity, Distribution and Abundance*. Oxford: Blackwell Publishing Ltd.
- Machain-Castillo, M.L., Gío-Argáez, F.R. y Escobar-Briones, E. 2013. Foraminíferos y ostrácodos recientes de la zona batial y abisal del sur del Golfo de México. En: A. Low Pfeng y E. M. Peters Recargno (eds.). *La frontera final: el océano profundo*. INECC, México. Pp. 149-168.
- Mora, C., Tittensor, D. P. y Myers, R. A. 2008. The completeness of taxonomic inventories for describing the global diversity and distribution of marine fishes, *Proc. Roy. Soc. B.*, 275: 149–155.

- Núñez-Useche, F., Barragán, R. y Canet, C. 2013. Sedimentación carbonatada, silícea y otros sedimentos químicos en los ambientes marinos profundos. En: A. Low Pfeng y E. M. Peters Recargno (eds.). *La frontera final: el océano profundo*. INECC, México. Pp. 57-84.
- Snelgrove, P. V. R. 2010. *The Census of Marine Life: Making Ocean Life Count*. Cambridge University Press. 286 pp.
- Snelgrove, P. V. R., Blackburn, T. H., Hutchings, P., Alongi, D., Grassle, J. F., Hummel, H., King, G., Koike, I., Lamshead, P. J. D., Ramsing, N. B., Solís-Weiss, V., y Freckman D.W. (1997) The importance of marine sediment biodiversity in ecosystem processes *Ambio* 26: 578-583.
- Snelgrove, P. V. R. y Smith, C.R. 2002. A riot of species in an environmental calm: the paradox of the species-rich deep-sea floor. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.* 40: 311-342.
- Solís-Marín, F.A., Laguarda-Figueras, A., Durán González, A., Vázquez-Bader A.R. y Gracia-Gasca, A. 2013 Biodiversidad de los equinodermos (Echinodermata) del mar profundo mexicano. En: A. Low Pfeng y E. M. Peters Recargno (eds.). *La frontera final: el océano profundo*. INECC, México. Pp. 207-246.
- Solís-Weiss, V., Hernández, P. y Granada, A. 2013. Los anélidos poliquetos del mar profundo en México. En: A. Low Pfeng y E. M. Peters Recargno (eds.). *La frontera final: el océano profundo*. INECC, México. Pp. 169-207.
- Soto, L.A. y Estradas, A. 2013. La exploración en el mar profundo de ambientes extremos: sistemas hidrotermales. En: A. Low Pfeng y E. M. Peters Recargno (eds.). *La frontera final: el océano profundo*. INECC, México. Pp. 105-149.
- Tittensor, D. P., Mora, C., Jetz, W., Lotze, H. K., Ricard, D., Vanden Berghe, E. y Worm, B. 2010. Global patterns and predictors of marine biodiversity across taxa. *Nature* 466: 1098-1101.
- Vázquez-Figueroa, V., Canet, C., Prol-Ledesma, R. M. y Villanueva-Estrada, R. E. 2013. Procedencia de los elementos químicos en los sistemas marinos y su influencia en la composición de los sedimentos. En: A. Low Pfeng y E. M. Peters Recargno (eds.). *La frontera final: el océano profundo*. INECC, México. Pp. 47-56.
- Webb, T., Vanden Berghe E. y O'Dor, R. K. 2010. Biodiversity's big wet secret: The global distribution of marine biological records reveals chronic under-exploration of the deep pelagic ocean. *PLoS One* 5(8): e10223. doi:10.1371/journal.pone.0010223.
- Zamorano, P., Hendrickx, M. E., Méndez, N., Gómez, S., Serrano, D., Aguirre, H., Madrid, J. y Morales-Serna, F. N. 2013. La exploración de las aguas profundas del Pacífico mexicano el Proyecto Salud. En: A. Low Pfeng y E. M. Peters Recargno (eds.). *La frontera final: el océano profundo*. INECC, México. Pp. 85-104.



# ¿QUÉ ES EL MAR PROFUNDO?

Elva Escobar Briones<sup>1</sup>

## RESUMEN

El mar profundo es el bioma más grande del planeta y el menos estudiado. Se describen los patrones ambientales y procesos que permiten entender la biodiversidad de este bioma, la variabilidad de ésta y analiza brevemente algunas de las amenazas generadas por las actividades antropogénicas actuales.

*Palabras clave:* océano profundo.

## ABSTRACT

The deep sea is the largest and least studied biome in the planet. This study describes the deep sea environmental patterns and processes, which allows a better understanding of its biodiversity and variation, and briefly analyses some of the threats created by current anthropogenic activities.

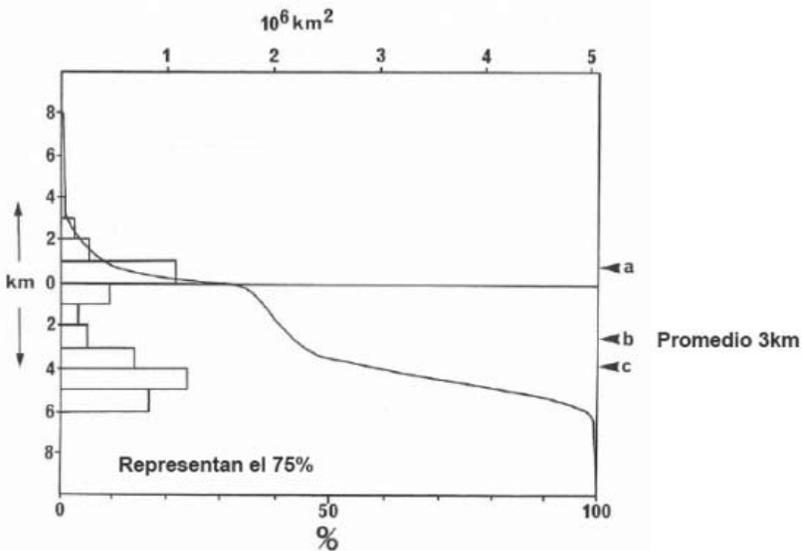
*Keywords:* deep ocean.

<sup>1</sup> Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. A.P. 70-305 Ciudad Universitaria. escobri@cmarl.unam.mx.

## INTRODUCCIÓN

El mar profundo es el bioma más grande en la Tierra, que cubre el 75% del área y casi el 80% del volumen (Fig. 1). El mar profundo se define como aquella zona que se presenta a profundidades mayores de 200 m y se refiere tanto a la masa de agua como a los fondos marinos. El mar profundo también presenta una serie de características que hacen de éste un entorno distinto a cualquier otro ecosistema marino, la oscuridad permanente, el efecto de la presión hidrostática, la baja temperatura y la dependencia de otros ecosistemas para sostener a los organismos, haciéndolo único para todo el planeta. En el mar profundo predominan los procesos heterotróficos; las comunidades dependen del flujo de materia orgánica producida en la superficie del océano por medio de fotosíntesis. La limitante alimenticia define la vida que habita la mayor parte de los fondos con excepción a los ecosistemas como las ventilas hidrotermales y las infiltraciones frías donde bacterias quimioautotólicas desempeñan el papel de productores primarios, sostenidos por fuentes de energía química, en lugar de la luz solar característica de los ecosistemas de la superficie del océano.

Figura 1. Curva hipsográfica y distribución del mar profundo con respecto al resto del planeta Tierra.

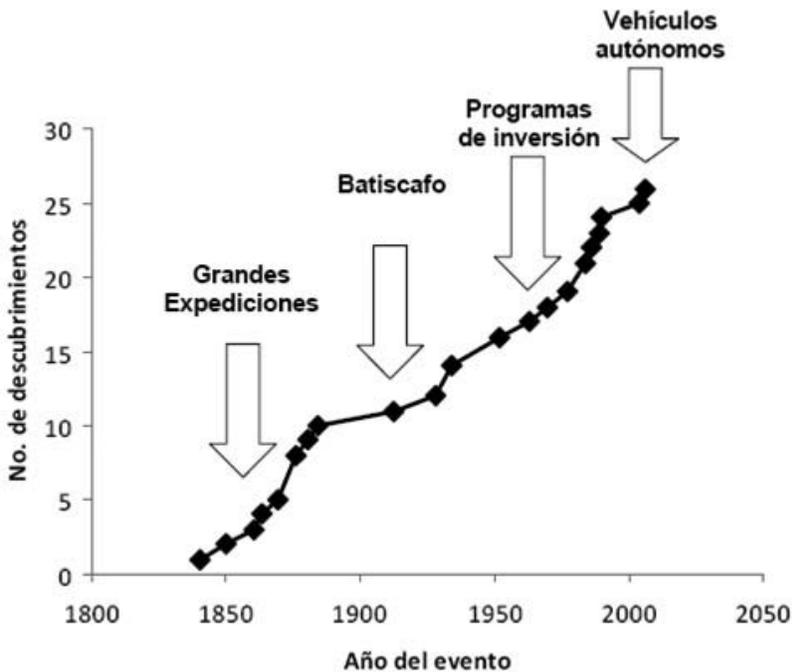


no y de la tierra emergida. Otros ecosistemas, tales como los montes submarinos, cañones o corales de aguas frías incrementan su productividad a través de los procesos físicos específicos, tales como la modificación de corrientes por la topografía, el transporte y agregación de partículas y material degradado. Debido a sus atributos abióticos únicos los fondos marinos albergan fauna especializada.

La investigación enfocada al mar profundo inició con las campañas del buque Challenger a finales del siglo XIX. Desde entonces y hasta la fecha el desarrollo tecnológico e inversión financiera han estimulado la investigación científica de mar profundo conllevando con ello a diversos descubrimientos que han cambiado nuestra manera de entender la vida y su evolución en el planeta (Fig. 2).

No obstante, a más de un siglo de exploración y estudios científicos, el conocimiento sobre el mar profundo es aún limitado; lo anterior se reconoce ya que la tasa de descubrimiento de hábitats y de especies procedentes de las

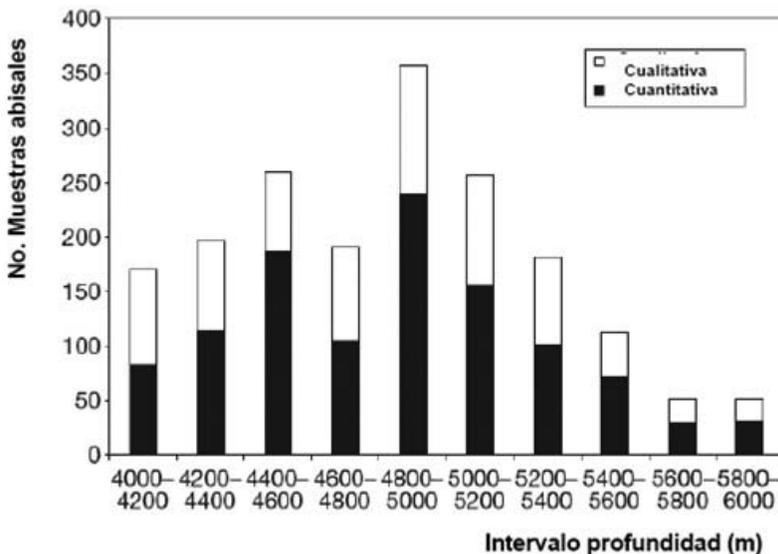
Figura 2. Factores del desarrollo tecnológico y la inversión financiera relacionados al crecimiento en la tasa de descubrimientos del mar profundo.



grandes profundidades se mantiene en aumento. Solamente desde 1840 se han descrito 27 hábitats y ecosistemas nuevos en el margen continental hasta las grandes trincheras. Aún en el siglo XXI se siguen realizando grandes descubrimientos. La configuración geológica, física y geoquímica del fondo marino y la columna de agua en mar profundo conforman hábitats muy diversos de características únicas que sostienen asociaciones y comunidades de fauna específica. A nivel mundial se desconoce la extensión que alcanza cada uno de de estos hábitats nuevos y solamente se ha estimado de manera muy general en virtud a que solamente una parte muy pequeña se ha estudiado ya que la gran mayoría de estudios son de naturaleza cualitativa (Fig. 3).

Este capítulo describe los patrones ambientales y procesos que permiten entender la biodiversidad de este bioma, la variabilidad de ésta y analiza brevemente algunas de las amenazas generadas por las actividades antropogénicas actuales.

Figura 3. Variación a lo largo de la profundidad de las muestras de naturaleza cualitativa con respecto a las de naturaleza cuantitativas (Modificado de Stuart *et al.* 2008).



## ANTECEDENTES

Al establecer prioridades de financiamiento para la investigación los gobiernos federal y estatal, la industria y las agencias de financiamiento, se debiera realizar un balance de los beneficios a la salud humana, del suministro de alimentos y de cómo mejorar el nivel de vida y compararlos contra los beneficios menos evidentes de los servicios que provee la biodiversidad del planeta y los escenarios de lo que pudiera pasar de desaparecer esta biodiversidad. A la fecha la investigación científica ha descubierto casi 2 millones de especies que indica que hemos hecho un importante avance en el conocimiento sobre la biodiversidad con respecto a lo que se sabía hace apenas un siglo. Sin embargo, casi cuatro quintas partes de las especies en el planeta son desconocidas aún para la ciencia, y la gran mayoría habita los océanos.

La biodiversidad del mar profundo es tal vez la más elevada en el planeta. Ésta está compuesta principalmente por la macrofauna y la meiofauna que habitan el sedimento superficial y que a primera vista se distribuyen con alta uniformidad. Este patrón se presenta comúnmente en hábitats de los márgenes continentales y las extensas planicies abisales exhibiendo solamente en montes submarinos y en corales de aguas frías una diversidad desigualmente elevada razón por la que se les conoce como “*hot spot*” en términos de su diversidad. Sin embargo, en algunos de los ecosistemas caracterizados éstos por procesos fisicoquímicos extremos (extremadamente reductores, carentes de oxígeno, con elevada salinidad o alta temperatura) la biodiversidad de las comunidades es baja, con abundancia y biomasa elevadas, y dominadas por unas cuantas especies como es el caso de las ventilas hidrotermales.

A la fecha la ciencia reconoce dos patrones de distribución en la escala grande de la diversidad para el mar profundo que se ejemplifican en las comunidades bénticas. El primer modelo reconoce que la diversidad sigue un patrón unimodal (Fig. 3) con respecto a la profundidad donde los valores más elevados se observan a profundidades intermedias (de 2 000 a 3 000 m). Este patrón no es un patrón universal, varía localmente determinado por los procesos abióticos y estacionales que pueden modificar esta tendencia. El segundo modelo reconoce una disminución de la diversidad hacia los polos. Este modelo ha suscitado controversia con base en la intensidad mayor de estudios en el océano Ártico y mar profundo frente a la Antártica, requiriendo estudios basados en bases más extensas de datos más robustos para realizar un estudio comparativo. Debido

al conocimiento limitado que tenemos en la actualidad sobre la composición de especies y la cobertura de hábitats, los estudios biogeográficos solamente pueden realizar análisis de datos por región o por grupo taxonómico. En el 2009 un grupo de científicos enfocados a dar herramientas para la conservación de la biodiversidad describió, con base en la información disponible de factores ambientales y la composición taxonómica, provincias biogeográficas para el mar profundo, tanto para la columna de agua como para el fondo marino. Este esquema biogeográfico propuesto tiene una utilidad en la escala global y contempla 30 provincias pelágicas y bentónicas. Las segundas reanalizan considerando 4 intervalos de profundidad, batial superior, batial inferior, abisal y hadal y reconoce así mismo 10 provincias para ecosistemas hidrotermales (UNESCO 2009).

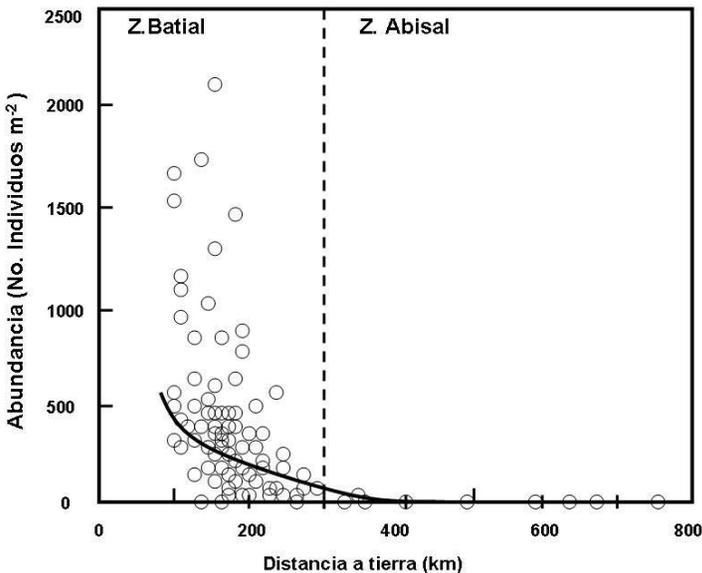
Uno de los problemas con los que se confronta el estudio global de la biodiversidad y su aplicación a la biogeografía o a la conservación es el número elevado de especies nuevas que continúan describiéndose en la ciencia, solamente basta analizar la descrita en los pasados diez años y sin embargo la lentitud con la que éstas se describe por los expertos, los cuales existen en números reducidos a nivel mundial. Lo anterior conlleva a la necesidad que exista una mejor coordinación taxonómica con los muestreos en la escala global. Ésta es particularmente difícil de alcanzar pero es esencial si se desea analizar el crecimiento de la diversidad y las tendencias biogeográficas con las cuales ésta se conecta.

Aunque no existen Phyla exclusivos de aguas profundas, en los niveles taxonómicos inferiores la composición de la fauna se comporta de manera distinta de la que se encuentra en la superficie del océano. Entre los patrones que caracterizan a las especies de aguas profundas se reconocen patrones de agregación de organismos, en aspectos de tallas existe el gigantismo o el enanismo. Todos ellos están relacionados con la disminución en la disponibilidad de alimentos con el incremento en la profundidad. La limitación de alimento en el lecho marino y en la columna agua a gran profundidad se refleja en la estructura trófica de las comunidades de aguas profundas que se han adaptado a la disponibilidad baja de energía nutricional. En la mayoría de los ecosistemas del tipo heterotrófico la megafauna dominante se compone de detritívoros, mientras que los filtradores son abundantes en hábitats con substratos rígidos como los que ocurren sobre las dorsales, en los montes submarinos, a lo largo de las paredes de cañones y en los arrecifes profundos con coral. En contraste los ecosistemas quimioautotróficos que presentan hábitats con condiciones

ambientales reducidas se caracterizan tróficamente por presentar un predominio en las relaciones simbióticas.

Debido a lo remoto del mar profundo con respecto a la zona costera los impactos sobre éste bioma no se han abordado con detalle sino hasta recientemente. A éstos no se les toma seriamente ya que la abundancia de los diferentes taxa disminuye con distancia a la costa (Fig. 4). Conforme se agotan los recursos biológicos y minerales en la tierra y en aguas costeras, y a la par se lleva a cabo un mayor desarrollo tecnológico se promueve mayor interés a los servicios que ofrecen los recursos de aguas profundas. Aunque a menudo desconocidos, los efectos de las actividades humanas son evidentes ya en los ecosistemas de aguas profundas – resultado de la extracción de recursos de interés minero, la exploración y explotación de hidrocarburos, la pesca, los recursos genéticos y el deshecho de basura. Debido al conocimiento limitado de la diversidad biológica y el funcionamiento de los ecosistemas de las aguas profundas y debido a las adaptaciones de las historias de vida de diversas especies de agua profunda (por ejemplo, la lenta tasa de crecimiento y la madurez tardía), es esencial que la comunidad científica trabaje en estrechar lazos con

Figura 4. Disminución de la abundancia con la distancia a la costa.



la industria, con las organizaciones para la conservación y con los tomadores de decisiones para explorar y desarrollar alternativas para la conservación y gestión de los recursos naturales.

## CONCLUSIONES

1. El mar profundo es el bioma más grande del planeta y el menos estudiado. En los pasados 50 años se han hecho grandes descubrimientos. Este bioma incluye una gran variedad de hábitats únicos cuya extensión sigue siendo desconocida en la escala global ya que en proporción el área que se ha investigado es mínima. La región hadal (> 6 000 a 11 000 m) siguen siendo la menos estudiada de todos los ecosistemas de aguas profundas.

2. La falta de luz solar por debajo de 250 m da como resultado una ausencia de producción primaria en la mayoría de los ecosistemas de aguas más profundas (Gage y Tyler 1991). Entre las excepciones se encuentran las ventilas hidrotermales y las infiltraciones frías, ecosistemas donde los microorganismos quimiosintéticos desempeñan el papel de los productores primarios (Jannasch 1995).

3. Los hábitats y ecosistemas de mar profundo, por ejemplo, las planicies abisales, se encuentran entre los ecosistemas más limitados en alimentos a nivel global (Smith *et al.* 2008), generando baja biomasa (Rex *et al.* 2006; Rowe *et al.* 2008) con excepción de aquellos ecosistemas que están pulsados por quimiosíntesis y aquellos ubicados bajo las zonas de surgencia.

4. La diversidad marina es la más elevada en la Tierra (Hessler y Sanders 1967; Snelgrove y Smith 2002), presenta un patrón unimodal de diversidad con relación a la profundidad (Rex 1981; Rex *et al.* 1993), y disminuye hacia los polos, por lo general son uniformes (Gage y Tyler 1991; Flach y de Bruin 1999). La excepción son las ventilas hidrotermales, las zonas de mínimo de oxígeno y las infiltraciones frías donde predomina un número bajo de especies, altamente adaptadas, muy abundantes.

5. Las características de las comunidades en aguas profundas son distintas de las de aguas someras. Aunque no existen Phyla de invertebrados exclusivos de mar profundo a niveles taxonómicos menores los grupos normalmente raros y abundantes como los protozoos predominan en biomasa, definen los patrones de biodiversidad y determinan el flujo de energía en los sedimentos de agua profunda.

6. La naturaleza interconectada de los hábitats y de la fauna del mar profundo, la limitada cobertura actual de las muestras recolectadas y tasa baja en la descripción de las especies que se encuentran en las colecciones dificultan una coordinación con la taxonomía, haciendo particularmente difícil comprender los patrones de diversidad (regional y mundial) en la gran escala (Mora *et al.* 2008).

7. Muchas especies de aguas profundas se caracterizan en su talla por gigantismo (anfípodos, isópodos, picnogónidos, algunos pepinos de mar, xenofóforidos) o presentan enanismo (nemátodos, bivalvos protobranquios y muchos otros taxa). En ambos casos, el principal mecanismo que explica estos patrones de talla en los organismos es la adaptación a la disminución en la disponibilidad de alimentos con el incremento de la profundidad.

8. Aunque algunas áreas del mar profundo las condiciones son aún prístinas, ya se comienza a reconocer un mayor impacto por actividades humanas que va relacionado con la disminución de obtención de recursos naturales y minerales en continente y que iniciada ya la extracción en aguas someras avanza hacia mar profundo conforme se desarrolla nueva tecnología.

9. Los efectos de impactos antropogénicos en hábitats de aguas profundas y las comunidades son en su mayoría desconocidos y difíciles de predecir debido al número elevado de especies raras, hábitats especiales y el a menudo crecimiento lento y retraso en la madurez de especies de aguas profundas. Los servicios que proveen los ecosistemas de mar profundo se comienzan a conocer apenas pero esperamos incrementen con el desarrollo tecnológico y conocimiento científico.

## AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Nacional de Ecología por la organización del Primer Seminario de Mar Profundo, al apoyo de las gestiones del ICML a lo largo del estudio de largo plazo para adquirir conocimiento de las comunidades de mar profundo en México. A CONACYT, a CONABIO y a PAPIIT y a diversas agencias internacionales (NSF, MMS) por el financiamiento en diversas etapas para realizar las observaciones de largo plazo en mar profundo. A la valiosa colaboración internacional.

## BIBLIOGRAFÍA

Flach, E y de Bruin, W. 1999. Diversity patterns in macrobenthos across a continental slope in the NE Atlantic, *J. Sea Res.*, 42, 303–323.

- Gage, J. D. y Tyler, P. A. 1991. *Deep-Sea Biology: A Natural History of Organisms at the Deep-Sea Floor*, Cambridge University Press, Cambridge, Gran Bretaña.
- Hessler, R. R. y Sanders, M. L. 1967. Faunal diversity in the deep-sea, *Deep-Sea Res.*, 14, 65–78, 20.
- Jannasch, H. W. 1995. Microbial interactions with hydrothermal fluids. En: Humphris, S. E., Zierenberg, R. A., Mullineaux, L. S., y Thomson, R. E. (eds.). *Seafloor Hydrothermal Systems: Physical, Chemical, Biological, and Geological Interactions*. Geol. Monogr. Ser. 91, 25 American Geophysical Union, Washington DC, 273–296.
- Mora, C., Tittensor, D. P. y Myers, R. A. 2008. The completeness of taxonomic inventories for describing the global diversity and distribution of marine fishes, *Proc. Roy. Soc. B.*, 275, 149–155.
- Rex, M. A. 1981 Community structure in the deep-sea benthos, *Ann. Rev. Ecol. Evol. S.*, 12, 331–353.
- Rex, M. A., Stuart, C. T., Hessler, R. R., Allen, J. A., Sanders, H. L. y Wilson, G. D. F. 1993. Global-scale latitudinal patterns of species diversity in the deep-sea benthos, *Nature*, 365, 636–639.
- Rex, M. A., Etter, R. J., Morris, J. S., Crouse, J., McClain, C. R., Johnson, N. A., Stuart, C. T., Deming, J. W., Thies, R. y Avery, R. 2006. Global bathymetric patterns of standing stock and body size in the deep-sea benthos, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 317, 1–8.
- Rowe, G. T., Wei, C., Nunnally, C., Haedrich, R., Montagna, P., Baguley, J. G., Bernhard, J. M., Wicksten, M., Ammons, A., Briones, E. E., Soliman y Deming, J. W. 2008. Comparative biomass structure and estimated carbon flow in food webs in the deep Gulf of Mexico, *Deep-Sea Res. II*, 55, 2699–2711.
- Smith, C. R., De Leo, F. C., Bernardino, A. F., Sweetman, A. K., y Martínez Arbizu, P. Abyssal food limitation, ecosystem structure and climate change, *Trends Ecol. Evol.*, 23, 518–528, 2008.
- Snelgrove, P. V. R. y Smith, C. R. 2002. A riot of species in an environmental calm: The paradox of the species-rich deep sea, *Oceanogr. Mar. Biol.*, 40, 311–342.
- Stuart, C. T., Martínez Arbizu, P., Smith, C. R., Molodtsova, T., Brandt, A., Etter, R. J., Escobar-Briones, E., Fabri, M. C. y M. A. Rex. 2008. CeDAMar global database of abyssal biological sampling. *Aquatic Biology*, 4: 143–145.
- UNESCO. 2009. *Global Open Oceans and Deep Seabed (GOODS) – Biogeographic Classification*. París, UNESCO-IOC. (IOC Technical Series, 84).

# EVALUACIÓN Y EXPLOTACIÓN DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS DEL OCÉANO

Rosa María Prol Ledesma, Carles Canet<sup>1</sup>

## RESUMEN

Los manantiales hidrotermales submarinos son una vasta fuente de energía, que ofrece grandes recursos con un mínimo de contaminación. En este trabajo se hace una revisión del efecto que tendría la producción de energía geotérmica a partir de las manifestaciones hidrotermales en el océano. Como ejemplo presentamos la generación de energía geotérmica en la Cuenca de Wagner, en el norte del Golfo de California, y la presencia en el mercado de un sistema comercial para la generación de energía: el sistema Marshall.

*Palabras clave:* energía geotérmica, desarrollo sustentable, ventilas hidrotermales submarinas, Golfo de California

## ABSTRACT

Submarine hydrothermal systems can be regarded as a vast energy resource, which contains large amounts of energy with minimal contamination. Here, we present a review of the effects of geothermal energy production at the submarine hydrothermal manifestations. Furthermore, we include an example of geothermal energy generation at the Wagner Basin in the northern Gulf of California; also we present information about a commercial system for submarine vents exploitation.

*Keywords:* Geothermal energy, sustainable development, submarine hydrothermal vents, Gulf of California.

<sup>1</sup> Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas de ventilas hidrotermales de fondo oceánico (*hydrothermal vents*) son expresiones de los sistemas geotérmicos submarinos, en los que el fluido dominante es agua de mar calentada durante su circulación por el interior de la Tierra. Estos sistemas pueden encontrarse a diversas profundidades y se han dividido en dos clases: profundos y someros. Los sistemas profundos se localizan a profundidades mayores de 200 m y los someros a profundidades menores. Esta división se ha hecho con base en las características geoquímicas y biológicas de los sistemas estudiados. Se ha observado que a esa profundidad ocurren cambios importantes tanto en las características biológicas del ecosistema, como en los parámetros físico-químicos del fluido termal (Tarasov et al. 2005).

La profundidad de 200m corresponde con diferencias en la estructura de las comunidades ecológicas y con otros parámetros ambientales y composicionales. Las comunidades profundas se diferencian de las someras por la ausencia de diatomeas, tapetes bacterianos-algales y fitoplancton, por una menor riqueza de especies, y por una influencia mayor de las ventilas activas en la estructura espacial de las comunidades y mayor biomasa dominada por formas simbióticas (Tarasov et al. 2005).

No existen diferencias significativas entre la biogeografía de zonas dentro y fuera del área activa de ventilas, tanto para las profundas como para las someras. Sin embargo, la proporción de la materia orgánica producida por quimiosíntesis y fotosíntesis juega un papel crucial en la evolución de los ecosistemas de las ventilas. Cuando se calcula globalmente, esta proporción aumenta con la profundidad hasta una profundidad crítica de 200m. Por esta razón, la profundidad de 200 m es un criterio objetivo para clasificar las ventilas en profundas y someras. Esta profundidad coincide, además, con un cambio brusco en la pendiente de la curva de ebullición para el agua de mar, a 20 bar (Bischoff y Rosenbauer 1984, Butterfield et al. 1990).

## SISTEMAS HIDROTERMALES SUBMARINOS PROFUNDOS

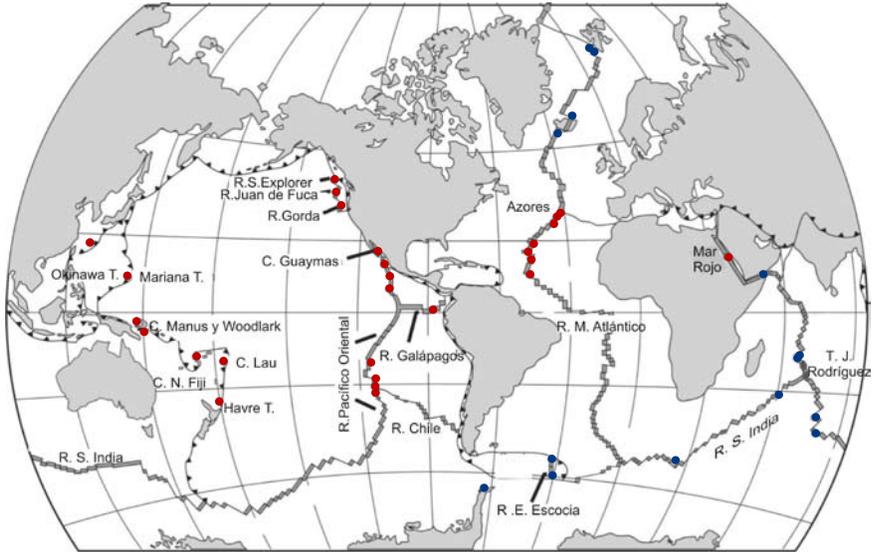
Los sistemas hidrotermales submarinos profundos se encuentran distribuidos globalmente, pero en su mayoría están relacionados con las dorsales oceánicas donde tiene lugar la generación de corteza oceánica.

El descubrimiento de la actividad hidrotermal submarina se remonta a 1965, cuando se hallaron albercas de salmueras hidrotermales densas y depósitos de lodos metalíferos en el *rift* axial correspondiente a la zona de expansión oceánica del Mar Rojo (Degens y Ross 1969). Dichas manifestaciones hidrotermales de fondo oceánico corresponden al sitio conocido como “Atlantis II Deep”, el cual, con 94 millones de toneladas y leyes de 0.45 % de Cu, 2.07 % de Zn, 39 ppm de Ag y 0.5 ppm de Au, constituye el mayor depósito metalífero submarino conocido (p.e., Missack *et al.* 1989, Herzig 1999). Posteriormente, en 1976, se descubrió en la dorsal de las Galápagos un sistema hidrotermal de baja temperatura, con lodos ricos en esmectita de hierro y óxidos de manganeso asociados. En 1979, en la dorsal oceánica del Pacífico Este, a una latitud de 21°N, aconteció el descubrimiento de uno de los fenómenos marinos más espectaculares de los fondos marinos y que más ha atraído la atención de la comunidad científica: se describieron por primera vez chimeneas mineralizantes activas (*black smokers*), y en ellas se reportó la emisión rápida de agua a 350° C muy rica en metales disueltos (Macdonald *et al.* 1980). Dichas chimeneas son estructuras métricas a través de las cuales tiene lugar la descarga de fluidos hidrotermales procedentes de sistemas de circulación hidrotermal de la corteza oceánica, y se alzan sobre montículos muy ricos en sulfatos (barita y anhidrita) y en sulfuros de metales base (p.e. calcopirita, wurtzita, esfalerita) con metales preciosos (Scott 1997).

Desde entonces se han descubierto más de 100 sistemas de manantiales termales de fondo oceánico, con temperaturas de hasta 405°C, principalmente en ambientes tectónicos relacionados con la formación de corteza oceánica y, más raramente, en montes submarinos (Fig. 1). La mayor parte de dichos sitios se distribuyen en los océanos Pacífico y Atlántico, aunque también se han descrito en el océano Índico y en el mar Mediterráneo (Scott 1997). La anatomía subsuperficial de las estructuras mineralizadas asociadas a los manantiales hidrotermales oceánicos se conoce gracias a los sondeos efectuados en el sistema TAG, ubicado en la dorsal Mesoatlántica (Humphris *et al.* 1995). Una revisión de todos los datos disponibles para los sistemas hidrotermales submarinos profundos se puede encontrar en el volumen 6 del Tratado de Geoquímica de German y Von Damm (2004).

La circulación de fluidos hidrotermales provoca una intensa alteración de la corteza oceánica. La interacción agua-roca, tanto química como isotópica, depende de las variaciones en temperatura y permeabilidad y, por lo tanto,

Figura 1. Localización de las zonas de ventilas hidrotermales submarinas profundas conocidas actualmente. En rojo están las ventilas activas conocidas y en azul los sitios donde se infiere que existen ventilas hidrotermales con base en anomalías geoquímicas. Tomado del sitio <http://triton.ori.u-tokyo.ac.jp/~intridge/wg-gdha.htm>.



varía mucho en función de la profundidad. Esta alteración de la corteza oceánica conlleva una extensa mineralización, la cual tiene lugar donde los metales extraídos de ésta se concentran en la zona cercana a la interfase sedimento-agua (Herzig y Hannington 1995). Esto causa la formación de yacimientos minerales (Fig. 2), que en su versión fósil (*i.e.*, sulfuros masivos vulcanogénicos, depósitos sedimentario-exhalativos) son comúnmente explotados en los continentes.

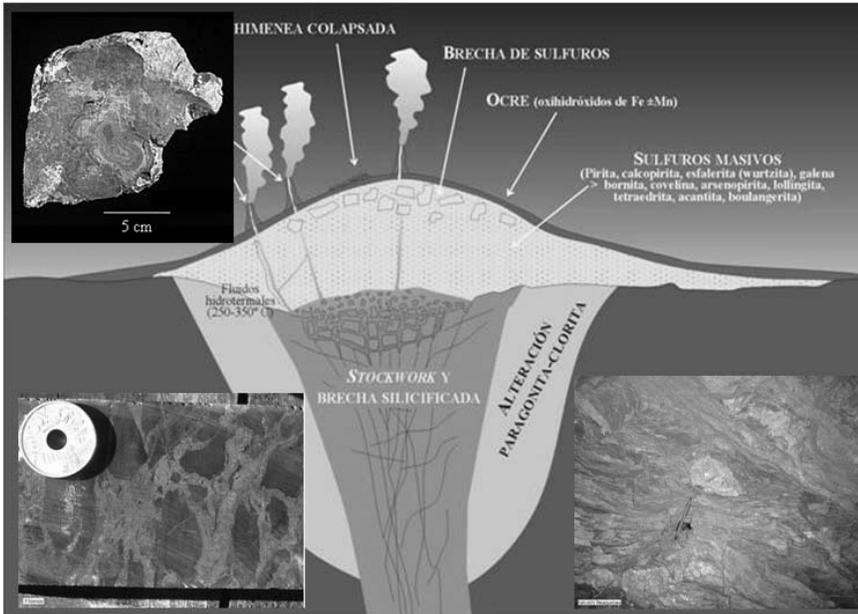
Las ventilas submarinas sostienen complejas comunidades de organismos (Fig. 2). La emisión de fluidos hidrotermales (temperatura elevada + componentes inorgánicos) favorece el desarrollo de comunidades de microorganismos termófilos quimiosintéticos: Autótrofos – quimio-litoautótrofos (*chemolithoautotrophs*) y Heterótrofos – quimio-organótrofos (*chemoorganotrophs*). Estos organismos son la base de la cadena trófica y en ocasiones su actividad metabólica favorece la precipitación de minerales. Su estudio ha

aportado mucha información sobre la biosfera primitiva y ha originado nuevas teorías del origen de la vida (Farmer 2000).

## SISTEMAS HIDROTHERMALES SUBMARINOS COSTEROS O DE POCA PROFUNDIDAD

Los estudios de actividad hidrotermal submarina generalmente se han enfocado a los sistemas de fondo oceánico, en zonas de dorsal y en cuencas de trasarco. En cambio, muy pocos sistemas hidrotermales costeros han sido estudiados en detalle. En la figura 2 se presenta la distribución global de los sistemas someros que han sido reportados en la bibliografía. El estudio de los sistemas hidrotermales submarinos de poca profundidad puede aportar mucha información para la comprensión de diversos procesos biogeoquímicos, de las diferencias entre actividad hidrotermal continental y submarina, de la formación de yacimientos minerales y del ciclo geoquímico de los elementos

Figura 2. Esquema de un sistema hidrotermal submarino profundo, donde se muestra la formación de depósitos minerales.



en los océanos. Las ventilas someras nos proporcionan un laboratorio natural donde estudiar la interacción de fluidos hidrotermales con sedimentos no-consolidados, agua de mar y rocas. La descarga del fluido termal a profundidades someras tiene lugar en muy diversos ambientes tectónicos, especialmente aquéllos con actividad volcánica submarina y subaérea, a lo largo de arcos de islas volcánicas y de dorsales oceánicas (Islandia o las Islas Azores), así como en áreas de volcanismo oceánico de intraplaca (Benjamínsson 1988, Fricke *et al.* 1989, Dando y Leahy 1993, Hannington *et al.* 2001, Hoaki *et al.* 1995, Fitzsimons *et al.* 1997, Scott 1997, Savelli *et al.* 1999, Stoffers *et al.* 1999, Geptner *et al.* 2002). Varias ventilas submarinas someras han sido descritas en ambientes relacionados con arcos de islas; por ejemplo en la ensenada de Kraternaya, Islas Kuriles (Tarasov *et al.* 1985), en la bahía de Plenty, Nueva Zelanda (Stoffers *et al.* 1999), en Matupi Harbor (Tarasov *et al.* 1999) y las Islas Ambitle y Lihir, Papúa Nueva Guinea (Pichler *et al.* 1999a), en el mar Egeo y el Mediterráneo oriental (Sedwick y Stüben 1996, Dando *et al.* 1999, Dando *et al.* 2000), a lo largo de la dorsal de Kolbeinsey, cerca de Islandia (Botz *et al.* 1999), y en las costas de Dominica, en el mar Caribe (Bright 2004).

Aunque menos frecuentes, también se han descrito sistemas de ventilas someras en márgenes continentales afectadas por procesos activos de extensión tectónica. Por ejemplo, en México se conocen en la zona de Punta Mita (Prol-Ledesma *et al.* 2002) y en dos sitios en las costas de la Península de Baja California: en la Punta Banda de Ensenada y en Bahía Concepción (Vidal *et al.* 1978; Prol-Ledesma *et al.* 2004).

También se tienen reportes de actividad hidrotermal somera en lagos relacionados con *riffts* continentales, por ejemplo: el lago Baringo, Kenya (Renaut *et al.* 2002), el lago Tanganyika, Tanzania (Barrat *et al.* 2000), y Lago Baikal, Rusia (Crane *et al.* 1991). Además, se conoce la presencia de ventilas sublacustres en algunos lagos de cráter como el lago Taupo, Nueva Zelanda (de Ronde *et al.* 2002), y en el Crater Lake de Oregon, EUA (Dymond *et al.* 1989). La composición química de los fluidos expulsados por las ventilas sublacustres es más similar a la de manantiales termales continentales que a la de las ventilas submarinas.

Los fluidos hidrotermales son una fuente de elementos que pueden generar depósitos de óxidos, sulfuros y metales preciosos (Hein *et al.* 1999, Stoffers *et al.* 1999, Prol-Ledesma *et al.* 2002, Canet *et al.* 2005b). En muchos sistemas someros, a diferencia de los sitios de mayor profundidad, la baja presión

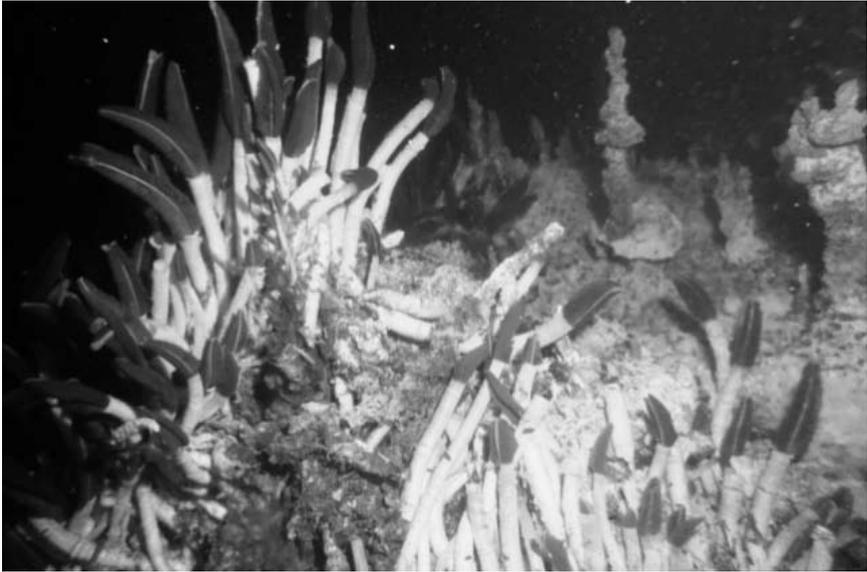
hidrostática y, por lo tanto, la menor temperatura de ebullición del agua, conlleva a al depósito subsuperficial de los metales.

Los fluidos de ventilas someras generalmente presentan características geoquímicas transicionales entre las ventilas profundas y los sistemas subaéreos y lacustres (Dymond *et al.* 1989, Barrat *et al.* 2000, Schwarz-Schampera *et al.* 2001, de Ronde *et al.* 2002; Renault *et al.* 2002; Prol-Ledesma *et al.* 2002, 2004). Además, los variados ambientes tectónicos que contienen a los sistemas de ventilas someras pueden tener una influencia significativa en la química de los fluidos. Los estudios de modelación química e isotópica del agua termal descargada por las ventilas someras muestran que frecuentemente incluyen una componente meteórica (Prol-Ledesma *et al.* 2003 y 2004, Villanueva *et al.* 2005).

La presencia de una fase predominante de gas es un rasgo característico de las ventilas someras, por lo que también se les conoce como manifestaciones “gaso-hidrotermales” (Tarasov *et al.* 1990). El flujo de gas impulsa un sistema de circulación del agua marina en el sedimento (O’Hara *et al.* 1995). La composición química de la fase gaseosa libre es generalmente similar a los gases disueltos identificados en las ventilas profundas, con el dióxido de carbono como gas predominante (Pichler *et al.* 1999b, Dando *et al.* 2000, Botz *et al.* 2002, Amend *et al.* 2003, Hall-Spencer *et al.* 2008); aunque en algunos casos el ácido sulfhídrico (de Ronde *et al.* 2001) o el metano (Prol-Ledesma *et al.* 2002) pueden encontrarse en concentraciones elevadas. Los hidrocarburos descargados por las ventilas someras tienen en general un origen mixto: son generados por procesos geotérmicos así como por procesos de actividad microbiana. Entre los minerales descritos hay sulfuros (pirita, marcasita, cinabrio, realgar y oropimente), sulfatos (anhidrita, yeso y barita), carbonatos (calcita y aragonita), fosfatos (hidroxilapatito), óxidos de hierro y manganeso (ferrihidrita, todorokita), azufre nativo, sílice opalina y mercurio elemental (p.e., Stoffers *et al.* 1999, Canet *et al.* 2005b). Ocasionalmente se han observado depósitos estromatolíticos finamente laminados de sílice y/o calcita (o tobas), por ejemplo, se reportaron depósitos de calcita en Punta Mita, en la costa occidental de México, a profundidades de 10 metros (Canet *et al.* 2003). También hay micro-estromatolitos de sílice y calcita en Bahía Concepción, en las costas orientales de la Península de Baja California (Canet *et al.* 2005a).

Los depósitos hidrotermales presentan un escaso desarrollo de estructuras mineralizadas (por ejemplo chimeneas); generalmente consisten en fangos piri-

Figura 3. Manifestaciones submarinas en la Cuenca de Guaymas a 2000 m de profundidad que alcanzan temperaturas de hasta 300°C y generan chimeneas de anhídrido con sulfuros, sílice y calcita.



tíferos y disseminaciones, costras de óxidos de hierro y manganeso, tobas calizas y sínters, así como vetas y costras de alteración hidrotermal.

## UTILIZACIÓN DE ENERGÍA GEOTÉRMICA PARA DESALACIÓN

El uso de recursos geotérmicos para desalación de agua de mar se propuso desde los años setenta (Awerbuch *et al.* 1976, Laird y Tleimat 1976). Recientemente, el acelerado incremento en la demanda de agua potable y los altos costos del petróleo han impulsado el uso de fuentes renovables de energía para la desalación de agua de mar (Rodríguez-Gironés *et al.* 1996, Belessiotis y Delyannis 2000). La falta de agua es mayor en áreas desérticas remotas, las cuales generalmente se encuentran fuera de las redes nacionales de energía eléctrica. Por ejemplo, la Península de Baja California está relativamente desconectada del resto de México y proveerla de combustibles es relativamente caro; sin embargo, esta zona posee fuentes renovables de energía que incluyen la solar, viento, mareas y geotermia, las cuales pueden ser utilizadas con fines de desalación (Hiriart 2006). Un desa-

rollo turístico, a veces desmesurado, ha llevado a un aumento en la población y, en consecuencia, se ha disparado la demanda de energía y agua. Todo esto ha provocado que se evaluaran varias zonas geotérmicas costeras como parte de un proyecto multidisciplinario realizado por la UNAM, el proyecto IMPULSA IV, titulado “Desalación de agua de mar con energías renovables”.

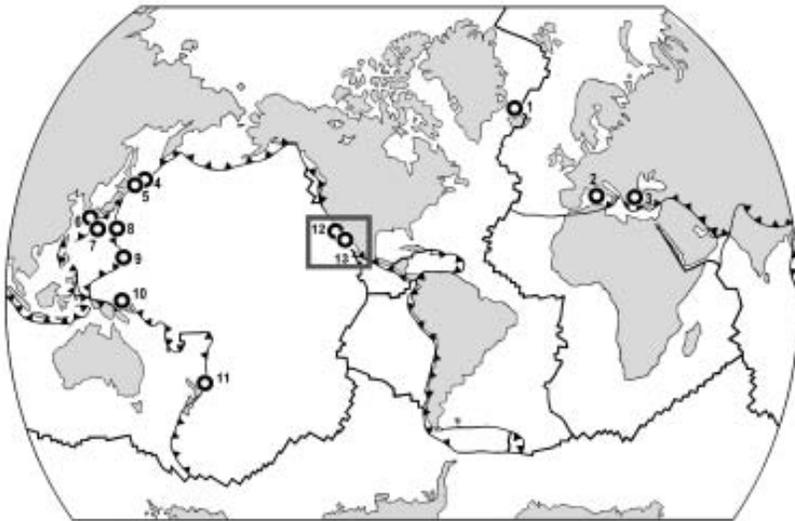
El potencial geotérmico de Baja California es bien conocido y existen numerosos trabajos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y de instituciones académicas que describen manantiales y/o pozos geotérmicos (Vidal *et al.* 1978, Quijano 1985, Casarrubias-Unzueta y Leal-Hernandez 1993, Casarrubias-Unzueta y Romero-Ríos 1997, Portugal *et al.* 2000, Barragán *et al.* 2001). Sin embargo, los estudios geotérmicos convencionales, que se enfocan a los campos geotérmicos para producción de energía, han dejado de lado muchas áreas de baja entalpía (Torres *et al.* 2005), las cuales podrían ser consideradas para la producción de electricidad (hasta 5 MW) o para ahorrar energía en el proceso de desalinización de agua de mar, por ejemplo, Bahía Concepción (Prol-Ledesma *et al.* 2004) y Los Cabos (López-Sánchez *et al.* 2006). Además de las áreas reportadas, el proyecto IMPULSA IV de la UNAM ha generado información acerca de nuevas áreas geotérmicas que pueden ser desarrolladas para proporcionar agua potable a comunidades rurales y a zonas turísticas de gran importancia (Fig. 4). En este proyecto se ha asignado una alta prioridad a las áreas de Ensenada (Punta Banda), en Baja California, y de Bahía Concepción y Los Cabos, en Baja California Sur (números 1, 2 y 3 en la Fig. 4), debido a que en ellas hay una gran necesidad de energía y agua debido a un rápido crecimiento de la población en esas áreas (Prol-Ledesma *et al.* 2008). También gracias al proyecto IMPULSA IV se han descubierto probables recursos geotérmicos en la Cuenca de Wagner en el norte del Golfo de California, (número 4 en la Fig. 4), promoviendo de esta forma la explotación sustentable de los sistemas hidrotermales submarinos con el uso de una nueva tecnología más amigable con el medio ambiente (Hiriart 2006).

Se han desarrollado varios sistemas para utilizar la energía geotérmica, o bien el agua calentada con agua geotérmica, para desalinizar agua de mar en la Península de Baja California; además se han considerado varias opciones para producir energía eléctrica usando recursos geotérmicos de baja entalpía (Hiriart 2007).

## ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA A PRODUCIR EN VENTILAS SUBMARINAS

Los cálculos de la energía disponible a partir de ventilas submarinas se han realizado tomando en cuenta parámetros idealizados basados en manifestaciones específicas, y que no necesariamente representan valores comunes en este tipo de manifestaciones. Por ejemplo, considerando como modelo las características de algunas ventilas en la Cuenca de Guaymas, Hiriart (2006) ha tomado los siguientes parámetros de ventilas:

Figura 4. Distribución mundial de los sistemas hidrotermales submarinos someros (<200 mbnm). (1) Kolbeinsey, Islandia. (2) Islas Azores, Portugal. (3) Cabos Palinuro y Messino, mar Tirreno, Italia. (4) Isla Vulcano, islas Eolias, Italia. (5) Islas Santorini y Milos, mar Egeo, Grecia. (6) White Point, California, EUA. (7) Punta Banda, Baja California, (8) Bahía Concepción, Baja California Sur, y (9) Punta Mita, Nayarit, México. (10) Isla Dominica. (11) Rada de Kraternaya y (12) isla Kunashir, islas Kuriles, Rusia. (13) Bahía de Kagoshima, (14) islas Tokora e Iwo y (15) isla Nishino, Japón. (16) Isla Kueishantao, Taiwán. (17) Volcán Esmeralda Bank, Islas Marianas. (18) Puerto de Matupi e islas de Ambitle y Lihir, Papua Nueva Guinea. (19) Bahía Plenty, Nueva Zelanda. (Tomado de Canet y Prol-Ledesma, 2006).



- Si se supone una ventila con un diámetro de 24" y una velocidad de 1 m/s, con un flujo de masa de 0.3 m<sup>3</sup>/s.
- Si se toma la profundidad de 2000 m, la temperatura de saturación es 365 °C.

Con estos valores, la energía térmica descargada sería de 450 MWt (MW térmicos). Suponiendo que se pudiera utilizar toda la energía térmica descargada en una turbina convencional, con una eficiencia de 4.4 %; entonces, cada ventila podría producir 20 MW, lo cual sería un valor alto, si tomamos en cuenta que 2 MW son suficiente electricidad para una planta desalinizadora de agua de mar que proporcione agua potable para una ciudad de 30,000 habitantes como Puerto Peñasco (Hiriart 2006). Como producto de las investigaciones realizadas en la UNAM, se ha desarrollado un sistema para utilizar ventilas submarinas para producir energía eléctrica, el cual se muestra en la figura 5 (Hiriart et al. 2010).

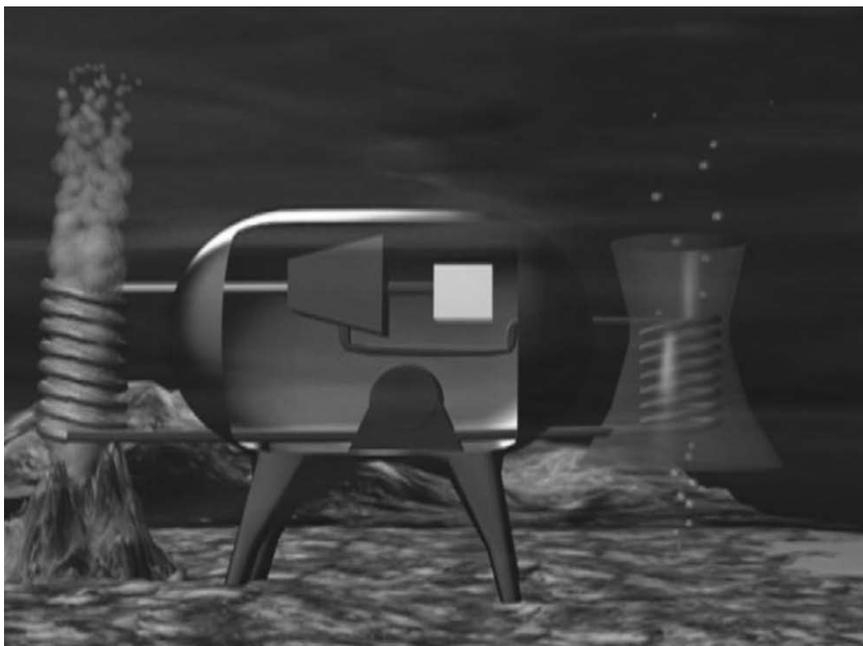
## EL SISTEMA MARSHALL

Actualmente en Internet (<http://marshallhydrothermal.com/>) se pueden hallar propuestas del llamado "*Marshall Hydrothermal Recovery System*", el cual es un sistema comercial para la generación de energía a partir de la actividad geotérmica de fondo marino. Su diseño se basa en el acoplamiento de tubos y embudos para llevar el fluido hidrotermal a la superficie, y una vez allí, el fluido sería procesado en una plataforma donde se instalarían las turbinas.

En la propuesta del sistema Marshall se incluye la evaluación preliminar y simplificada del sistema hidrotermal submarino en Juan de Fuca, que se encuentra a unos 300 km de Seattle, Washington, EUA (véase Fig. 1). El campo de ventilas submarinas tiene dimensiones aproximadas de 180 m por 350 m y contiene más de 15 ventilas activas con más de 3 m de diámetro y 20 m de altura.

El cálculo que proponen supone una profundidad de 2 500 m (presión de 250 bar), un diámetro de 3 m, un flujo de 3 m/s con una temperatura del fluido hidrotermal de 360° C y una temperatura ambiente en la superficie del mar de 20° C. Estos parámetros dan como resultado una producción estimada de más de 30,000 MJoule/s, con lo cual se generarían más de 83 MW eléctricos. Este cálculo se puede considerar como excesivamente optimista, ya que está basado

Figura 5. El proyecto IMPULSA-UNAM ha producido el diseño de plantas geotermoeléctricas submarinas para la generación de energía en ventilas someras y profundas, con un mínimo de afectación al ambiente y a los ecosistemas (tomado de Hiriart et al. 2010).



en una eficiencia de turbina del 50 % que está muy por encima de la eficiencia real de la tecnología actual, que es menor al 10 %. Por ejemplo, véase el cálculo efectuado por Hiriart (2006).

El sistema integral que se propone en la propuesta de Marshall incluye, además de la producción de energía geotermoeléctrica, la producción de agua potable a partir de una desalinizadora, e incluso la extracción de los metales disueltos, puesto que éstos serían más fáciles de procesar que los extraídos de las rocas en los yacimientos minerales convencionales que son explotados en los continentes. El esquema general del sistema se muestra en la figura 6.

Con base en los modelos de simulación efectuados por los proponentes del Sistema Marshall, se obtienen los siguientes resultados: 83 MW de energía pueden ser producidos por cada ventila, lo cual es  $\approx 3.3 \times 10^6$  veces más que la radiación solar. Se generarían 30 KT (vapor)/día (= 25 000 m<sup>3</sup>). Puesto que la

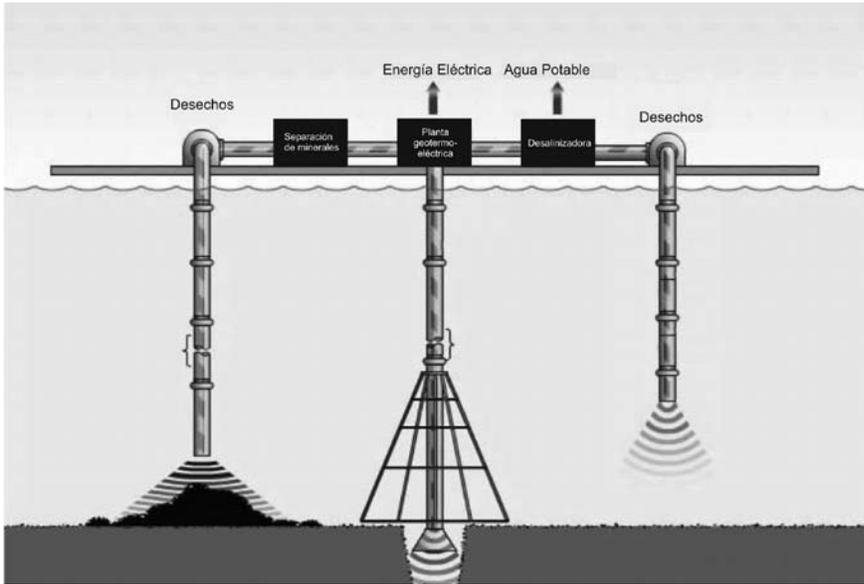
temperatura y presión del fluido en superficie serían de 340° C y 70 bar (1015 psi), se podrían obtener 25 000 ton/día con 25-35 kg de sólidos/ton, con estas concentraciones se tendrían entre 625 000 kg y 875 000 kg de sólidos por día como resultado de la extracción de minerales.

## **ESTIMACIÓN GLOBAL DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS SISTEMAS CONOCIDOS DE VENTILAS HIDROTERMALES SUBMARINAS**

Se han realizado estimaciones serias basadas en los parámetros conocidos de las ventilas hidrotermales profundas; de acuerdo con los estudios de Baker y German (2004) existen 67 000 km de dorsales oceánicas. Éstas representan el 30 % de todo el calor liberado por la Tierra y hasta ahora sólo se han estudiado 13,000 km, o sea un 20 % del total. Actualmente se han reportado 280 sitios de ventilas hidrotermales en las dorsales; la mayoría se encuentran a una profundidad de 2 000 a 2 500 m, y en promedio el ancho de una ventila es de 10 cm y la velocidad de flujo es de 1 m/s, con una temperatura de 250° C, aunque los yacimientos geotérmicos submarinos pueden alcanzar temperaturas mayores a 370° C. Con estos parámetros se obtiene un flujo de calor de 400 TWt, con 30° C como temperatura de referencia. Con estos valores Baker *et al.* (1998) calculan 350 MW por metro de dorsal para mega-ventilas.

Si se hace el cálculo para las ventilas en general, y no suponiendo sólo mega-ventilas, se obtienen 100 MW, que es el 25 % del valor calculado por Baker *et al.* (1998). Si se transforma esa energía con una eficiencia térmica conservativa del 4 %, se obtiene un potencial de energía eléctrica de 16,000 GW (16 millones MW eléctricos). Suponiendo que solamente el 1 % de las ventilas pueden ser utilizadas en aplicaciones prácticas se pueden generar 160,000 MW eléctricos. Como comparación se puede mencionar que la capacidad de producción de energía eléctrica en México en el año 2003 fue de 50,000 MWe. Esto nos da una idea de la magnitud de energía involucrada en los sistemas hidrotermales submarinos profundos y su potencial como fuente de energía renovable en el futuro. Estas estimaciones nos demuestran que la geotermia es una importante fuente potencial de energía para nuestro país, que cuenta con grandes recursos, tanto en su territorio continental como en los fondos marinos de su zona económica exclusiva.

Figura 6. Representación esquemática del Sistema Marshall, con la opción de un circuito cerrado de flujo para evitar contaminación. (<http://marshallhydrothermal.com/>)



## COMENTARIOS FINALES

Se estima que las reservas de combustibles fósiles están declinando y, además, el impacto global debido a su consumo. Esto ha provocado que, inclusive entre los gobiernos más reacios a aceptarlo, se esté planteando el cambio en los patrones energéticos de consumo de toda la humanidad hacia un desarrollo energético sustentable basado en fuentes renovables no contaminantes. Una de las posibilidades para satisfacer las necesidades mundiales de energéticos se encuentra en los sistemas geotérmicos submarinos. En este trabajo hemos presentado las características generales y los patrones de distribución de estos sistemas, así como una estimación simplificada de la cantidad de energía que podrían proporcionar si se desarrolla la tecnología necesaria para aprovechar este recurso. Solo nos queda recomendar que se estimule el desarrollo de esta fuente de energía tanto en el océano como en los continentes.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos IMPULSA IV “Desalación de agua de mar con energías renovables” y FONCICYT-94482.

## BIBLIOGRAFÍA

- Amend, J. P., Rogers, K. L., Shock, E. L., Gurrieri, S. y Inguaggiato, S. 2003. Energetics of chemolithoautotrophy in the hydrothermal system of Vulcano Island, southern Italy. *Geobiology* 1, 184 37–58.
- Awerbuch, L., Lindemuth, T. E., May, S. C. y Rogers, A. N. 1976. Geothermal energy recovery process. *Desalination*, 19, 325-336.
- Baker, E. y German, C. R. 2004. On the global distribution of hydrothermal vent fields. En: German, C.R., Lin, J., Parson, L.M. (Eds), Mid-ocean ridges; hydrothermal interactions between the lithosphere and oceans. *Geophysical Monograph*, 148, 245-266.
- Baker E. T., Massoth G. J., Feely R. A., Cannon G. A. y Thomson R. E. 1998. The rise and fall of the CoAxial hydrothermal site, 1993–1996. *J. Geophys. Res.* v. 103, p. 9791–9806.
- Barragán R, R. M., Birkle, P., Portugal M, E., Arellano G, V. M. y Alvarez R, J. 2001. Geochemical survey of medium temperature geothermal resources from the Baja California Peninsula and Sonora, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 110, 101-119.
- Barrat, J. A., Boulegue, J., Tiercelin, J. J. y Lesourd, M. 2000. Strontium isotopes and rare-earth element geochemistry of hydrothermal carbonate deposits from Lake Tanganyika, East Africa. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 287-298.
- Belessiotis, V. y Delyannis, E., 2000. The history of renewable energies for water desalination. *Desalination*, 128, 147-159.
- Benjamínsson, J. 1988. Jardhiti í sjó og flaedamáli vid Ísland. *Natturufrædingurinn*, 58, 153-169.
- Bischoff, J. L. y Rosenbauer, R. J. 1984, The critical point and phase boundary of seawater 200–500° C. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 68, p. 172–180, doi: 10.1016/0012-821X(84)90149-3.
- Botz, R., Winckler, G., Bayer, R., Schmitt, M., Schmitt, M., Garbe-Schonberg, D., Stoffers, P. y Kristjánsson, J. K., 1999. Origin of trace gases in submarine hydrothermal vents of the Kolbeinsey Ridge, north Iceland. *Earth Planet. Sci. Lett.* 171, 83–93.

- Botz, R., Wehner, H., Schmitt, M., Worthington, T. J., Schmitt, M., Stoffers, P. y Kristjansson, J. K., 2002. Thermogenic hydrocarbons from the offshore Calypso hydrothermal field, Bay of Plenty, New Zealand. *Chem. Geol.* 186, 235–248.
- Bright, M. 2004. Hydrothermal vent research. <http://www.univie.ac.at/marine-biology/hydrothermal>.
- Butterfield, A., Massoth, G. J., McDuff, R. E., Lupton, J. E. y Lilley, M.D. 1990. Geochemistry of hydrothermal fluids from Axial Seamount hydrothermal emissions study vent field, Juan de Fuca Ridge: Subseafloor boiling and subsequent fluid-rock interaction. *Journal of Geophysical Research*, v. 95, p. 12 895–12,921.
- Canet, C., Prol-Ledesma, R. M., Melgarejo, J. C. y Reyes, A. 2003. Methane-related carbonates formed at submarine hydrothermal springs: a new setting for microbially-derived carbonates? *Mar. Geol.*, 199, 245-261.
- Canet, C., Prol-Ledesma, R. M., Torres-Alvarado, I., Gilg, H. A., Villanueva, R. E. y Lozano-Santa Cruz, R. 2005a. Silica-carbonate stromatolites related to coastal hydrothermal venting in Bahía Concepción, Baja California Sur, Mexico. *Sediment. Geol.*, 174, 97-113.
- Canet, C., Prol-Ledesma, R.M., Proenza, J., Rubio-Ramos, M. A., Forrest, M., Torres-Vera, M.A. y Rodríguez-Díaz, A. A. 2005b. Mn-Ba-Hg Mineralization at shallow submarine hydrothermal vents in Bahía Concepción, Baja California Sur, Mexico. *Chem. Geol.*, 224, 96-112.
- Casarrubias-Unzueta, Z. y Leal-Hernandez, R., 1993. Reporte de la interpretación geológica regional del proyecto geotérmico, Bahía Concepción B.C.S., Comisión Federal de Electricidad. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Departamento de Exploración.
- Casarrubias-Unzueta, Z. y Romero-Rios, F., 1997. Propuesta para la localización de pozos de gradiente en El Centavito, Agua Caliente y Santispac, B. C. S., Comisión Federal de Electricidad. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Departamento de Exploración.
- Crane, K., Hecker, B. y Golubev, V. 1991. Hydrothermal vents in Lake Baikal. *Nature*, 350: 281.
- Dando, P. R. y Leahy, Y. 1993. Hydrothermal activity off Milos, Hellenic Volcanic Arc. *BRIDGE Newsletter* 5, 20-21.
- Dando, P. R., Stüben, D. y Varnavas, S. P. 1999. Hydrothermalism in the Mediterranean Sea. *Progress in Oceanography*, 44: 333-367.
- Dando, P. R., Aliani, S., Arab, H., Bianchi, C. N., Brehmer, M., Cocito, S., Fowler, S. W., Gundersen, J., Hooper, L. E., Kölbl, R., Kuever, J., Linke, P., Makropoulos, K. C., Meloni, R.,

- Miquel, J.-C., Morri, C., Müller, S., Robinson, C., Schlesner, H., Sievert, S., Stöhr, R., Stüben, D., Thomm, M., Varnavas, S. P., y Ziebis, W. 2000. Hydrothermal studies in the Aegean Sea. *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 25, 1-8.
- de Ronde, C. E. J., Baker, E. T., Massoth, G. J., Lupton, J. E., Wright, I. C., Feely, R. A. y Greene, R. G. 2001. Intra-oceanic subduction-related hydrothermal venting, Kermadec volcanic arc, New Zealand. *Earth Planet. Sci. Lett.* 193, 359-369.
- de Ronde, C. E. J., Stoffers, P., Garbe-Schönberg, D., Christenson, B. W., Jones, B., Manconi, R., Browne, P. R. L., Hissmann, K., Botz, R., Davy, B. W., Schmitt, M. y Battershill, C.N. 2002. Discovery of active hydrothermal venting in Lake Taupo, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 115: 257-275.
- Degens, E. y Ross, D. A.. 1969. *Hot brines and recent heavy metal deposits in the Red Sea*. Springer-Verlag, New York, EE.UU.
- Dymond, J., Collier, R. W. y Watwood, M. E. 1989. Bacterial mats from Crater Lake, Oregon and their relationship to possible deep lake hydrothermal venting. *Nature*, 342: 673-675.
- Farmer, J. D. 2000. Hydrothermal Systems: Doorways to Early Biosphere Evolution. *GSA Today*, 10, No. 7, 1-2.
- Fitzsimons, M. F., Dando, P. R., Hughes, J. A., Thiermann, F., Akoumianaki, I. y Pratt, S. M., 1997, Submarine hydrothermal brine seeps off Milos, Greece: Observations and geochemistry. *Marine Chemistry* 57, 325-340.
- Fricke, H., Giere, O., Stetter, K., Alfredsson, G. A., Kristjansson, J. K., Stoffers, P. y Svavars-son, J. 1989. Hydrothermal vent communities at the shallow subpolar Mid-Atlantic Ridge. *Marine Biology*, 102, 425-429.
- Geptner, A., Kristmannsdóttir, H., Kristiansson, J. y Marteinson, V. 2002. Biogenic sapo-nite from an active submarine hot spring, Iceland. *Clay and Clay Minerals* 50, 174-185.
- German, C. R. y Von Damm, K. L., 2004. Hydrothermal Processes. En: Elderfield H. (ed.), *The Oceans and Marine Geochemistry. Volumen 6 del Treatise on Geochemistry*, H.D. Holland y K.K. Turekian (eds.). Amsterdam, 646 pp.
- Hall-Spencer, J. M., Rodolfo-Metalpa, R., Martin, S., Ransome, E., Fine, M., Turner, S.M., Rowley, S. J., Tedesco, D. y Buia, M. C., 2008. Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification. *Nature*, v. 454, pp. 96-99.
- Hannington, M., Herzig, P., Stoffers, P., Scholten, J., Botz, R., Garbe-Schonberg, D., Jonason, I. R. y Woest, W., Shipboard Scientific Party. 2001. First observations of high-temperature submarine hydrothermal vents and massive anhydrite deposits off the north coast of Iceland. *Mar. Geol.*, 177, 199-220.

- Hein, J. R., Stamatakis, M. G. y Dowling, J. S., 1999. Trace metal-rich Quaternary hydrothermal manganese oxide and barite deposit, Milos Island, Greece. En: *Mineral Deposits: Processes to Processing*, B67-B76.
- Herzig, P. M. 1999. Economic potential of sea-floor massive sulphide deposits: ancient and modern. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.* 357, 861-875.
- Herzig, P. M. y Hannington, M. D. 1995. Polymetallic massive sulphides at the modern seafloor -A review: *Ore Geology Reviews*, v. 10, p. 95-115, doi: 10.1016/0169-1368(95)00009-7.
- Hiriart, G. 2006. Marine Energies in Mexico. IEA-OES Newsletter. Iss. 7, p. 1.
- . 2007. Ocean Energy Activities in Mexico. *IEA-OES Newsletter*. Iss. 9, p. 2.
- Hiriart, G., Prol-Ledesma, R. M., Alcocer, S. y Espíndola, S., 2010. Submarine Geothermics; Hydrothermal Vents and Electricity Generation. World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 25-29 de abril.
- Hoaki, T., Nishijima, M., Miyashita, H., Maruyama, T., 1995. Dense community of hyperthermophilic sulfur dependent heterotrophs in geothermally heated shallow submarine biotope at Kodakara-Jima Island, Kagoshima, Japan. *Appl. Environ. Microbiol.* 61, 1931-1937.
- Humphris, S. E., Herzig, P. M. y Miller, D. J. 1995. The internal structure of an active seafloor massive sulphide deposit. *Nature*, 377, 713-716.
- Laird, A. D. K. y Tleimat, B. W. 1976. Desalinating geothermal brines. *Desalination*, 19, 309-316.
- López-Sánchez, A., Báncora-Alsina, C. Prol-Ledesma, R. M. y Hiriart, G. 2006. A new geothermal resource in Los Cabos, Baja California Sur, Mexico. *Proceedings 28th New Zealand Geothermal Workshop*. (S3- 6 pp.).
- Macdonald, K. C., Becker, K., Spiess, F. N. y Ballard, R. D. 1980. Hydrothermal heat flux of the "black smoker" vents on the East Pacific Rise. *Earth and Planetary Science Letters* 48, 1-7.
- Missack, E., Stoffers, P., El Goresy, A., 1989. Mineralogy, parageneses, and phase relations of copper-iron sulfides in the Atlantis II Deep, Red Sea. *Mineralium Deposita* 24, 82-91.
- O'Hara, S. C. M., Dando, P. R., Schuster, U., Bennis, A., Boyle, J. D., Chiu, F. T. W., Hatherell, T. V. J., Niven, S. J. y Taylor, L. J. 1995. Gas seep induced interstitial water circulation: observations and environmental implications. *Cont. Shelf Res.* v. 15, p. 931-948.
- Pichler T., Veizer J. y Hall G. E. M. 1999a. The chemical composition of shallow-water hydrothermal fluids in Tutum Bay, Ambitle Island, Papua New Guinea and their effect on ambient seawater. *Mar. Chem.* 64, 229-252.

- Pichler, T., Giggenbach, W. F., McInnes, B. I. A., Buhl, D., y Duck, B. 1999b, Fe sulfide formation due to seawater-gas-sediment interaction in a shallow water hydrothermal system at Lihir Island, Papua New Guinea. *Economic Geology* 94, 281-287.
- Portugal, E., Birkle, P., Barragan R, R. M., Arellano G, V. M., Tello, E. y Tello, M. 2000. Hydrochemical-isotopic and hydrogeological conceptual model of the Las Tres Virgenes geothermal field, Baja California Sur, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 101, 223-244.
- Prol-Ledesma, R. M., Canet, C., Melgarejo, J. C., Tolson, G., Rubio-Ramos, M. A., Cruz-Ocampo, J. C., Ortega-Osorio, A., Torres-Vera, M. A. y Reyes, A. 2002. Cinnabar deposition in submarine coastal hydrothermal vents, Pacific Margin of central Mexico. *Economic Geology*, 97: 1331-1340.
- Prol-Ledesma, R. M., Canet, C., Tolson, G., García-Palomo, A., Miller, R., Rubio-Ramos, M.A., Torres-de León, R. y Huicochea-Alejo, J.S. 2003. Basaltic volcanism and submarine hydrothermal activity in Punta Mita, Nayarit, Mexico. En: *Geologic transects across Cordilleran Mexico, Guidebook for the field trips of the 99th Geological Society of America Cordilleran Section Annual Meeting, Puerto Vallarta, Jalisco, Mexico*, March 30–31, 2003: Mexico, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Publicación Especial 1, Field trip 7, p. 169–182.
- Prol-Ledesma, R. M., Canet, C., Torres-Vera, M.A., Forrest, M.J. y Armienta, M. A. 2004. Vent fluid chemistry in Bahía Concepción coastal submarine hydrothermal system, Baja California Sur, Mexico. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 137, 311-328.
- Prol-Ledesma, R. M., Canet, C., Dando, P. y Hiriart, G. 2008. A new nascent spreading centre at the Wagner Basin in the northern Gulf of California: a possible geothermal resource? *Proceedings 30th New Zealand Geothermal Workshop*. (191- 195).
- Quijano, J.L. 1985. Evaluación geoquímica de las zonas termales del Estado de Baja California Sur, Comisión Federal de Electricidad. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Departamento de Exploración.
- Renaut, R .W., Jones, B., Tiercelin, J. J. y Tarits, C. 2002. Sublacustrine precipitation of hydrothermal silica in rift lakes: evidence from Baringo, central Kenya Rift Valley. *Sedimentary Geology*, 148: 235-257.
- Rodríguez-Gironés, M., Rodríguez, M., Pérez, J. y Veza, J. 1996. A systematic approach to desalination powered by solar, wind and geothermal energy sources. En: *Proceedings of the Mediterranean Conference on Renewable Energy Sources for Water Production*. European Commission, EUORED Network, CRES, EDS, Santorini, Greece, pp. 20-25.
- Savelli, C., Marani, M. y Gamberi, F. 1999. Geochemistry of metalliferous, hydrothermal deposits in the Aeolian arc Tyrrhenian Sea. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 88, 305-323.

- Schwarz-Schampera, U., Herzig, P.M., Hannington, M.D. y Stoffers, P. 2001. Shallow submarine epithermal-style As-Sb-Hg-Au mineralisation in the active Kermadec Arc, New Zealand. En: Piestrzynski, A. et al. (eds.). *Mineral deposits at the beginning of the 21<sup>st</sup> century*. Balkema, Rotterdam, pp. 333-335.
- Scott, S.D. 1997. Submarine hydrothermal systems and deposits. En: H. L. Barnes (ed.), *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, New York: John Wiley & Sons. pp. 797-935.
- Sedwick, P. y Stuben, D. 1996, Chemistry of shallow submarine warm springs in an arc-volcanic setting: Vulcano Island, Aeolian Archipelago, Italy. *Mar. Chem.* 53, 147-161.
- Stoffers, P., Hannington, M., Wright, I., Herzig, P., De Ronde, C., the Shipboard Scientific Party. 1999. Elemental mercury at submarine hydrothermal vents in the Bay of Plenty, Taupo volcanic zone, New Zealand. *Geology*, v. 27, p. 931– 934
- Tarasov, V. G., Propp, M. V., Propp, L. N., Kamenev, G. M. y Blinov, S. V. 1985. *Hydrothermal Venting and Specific Water Ecosystem in Kraternaya Caldera (Kuriles)*. DVNTc AN USSR Press, Vladivostok. 30 pp. (en ruso).
- Tarasov, V. G., Propp, M. V., Propp, L. N., Zhirmunsky, A. V., Namsaraev, B. B., Gorlenko, V. M. y Starynin, D. A., 1990. Shallow-water gasohydrothermal vents of Ushishir Volcano and the ecosystem of Kraternaya Bight (The Kurile Islands). *Mar. Ecol.*, 11, 1-23.
- Tarasov, V. G., Gebruk, A. V., Shulkin, V. M., Kamenev, G. M., Fadeev, V. I., Kosmynin, V. N., Malakhov, V. V., Starynin, D. A. y Obzhirov, A. I., 1999. Effect of shallow-water hydrothermal venting on the biota of Matupi Harbor (Rabaul Caldera, New Britain Island, Papua-New Guinea). *Cont. Shelf Res.*, 19, 79-116.
- Tarasov, V. G., Gebruk, A. V., Mironov, A. N. y Moskalev, L. I., 2005. Deep-sea and shallow-water hydrothermal vent communities: two different phenomena? *Chem. Geol.*, 224, 1-3: 5-39.
- Torres, R. J., Martínez-Estrella, J. I. y Iglesias E. R. 2005. Database of Mexican medium-to low-temperature geothermal resources. *Proceedings World Geothermal Congress 2005*, paper 1 724.
- Vidal, V.M.V., Vidal, F.V. y Isaacs, J.D. 1978, Coastal submarine hydrothermal activity off northern Baja California, *Journal of Geophysical Research*, 83-B, 1757-1774.
- Villanueva-Estrada, R.E., Prol-Ledesma, R.M., Torres-Alvarado, I. y Canet, C. 2005a. Geochemical Modeling of a Shallow Submarine Hydrothermal System at Bahía Concepción, Baja California Sur, México. *Proceedings World Geothermal Congress*. Paper 0892.

# NÓDULOS POLIMETÁLICOS

Marlene Olivares Cruz,<sup>1</sup> Mayumy Amparo Cabrera Ramírez,<sup>1, 2</sup>

Leticia Rosales Hoz,<sup>3</sup> Arturo Carranza Edwards<sup>3</sup>

## RESUMEN

Los nódulos polimetálicos, son sedimentos autigénicos formados por capas concéntricas de hidróxidos de hierro y manganeso que crecen a partir de un núcleo, el cual generalmente es microscópico. Si se le observa a simple vista puede ser por restos fósiles de dientes de tiburón, fragmentos de basalto, pómez, e incluso puede ser un fragmento de nódulo previamente formado. El tamaño de los nódulos puede variar desde partículas microscópicas llamadas micronódulos, hasta nódulos mayores que 20 cm, alcanzando con frecuencia entre los 5 y 10 cm de diámetro. La existencia y abundancia de los nódulos polimetálicos en el océano es muy variable ya que su formación depende de diversos factores, tales como bajas tasas de sedimentación, disponibilidad de núcleos, zonas de alta productividad, la topografía del fondo marino y la proximidad a fuentes de suministro de metales. Los nódulos se ubican generalmente en cuencas oceánicas profundas pues en ellas se tienen las condiciones necesarias para su crecimiento. Las fuentes que suministran metales que forman los nódulos pueden ser: 1) hidrogénicas, cuando los

<sup>1</sup> Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México D. F. 04510, México.

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México D. F. 04510, México.

<sup>3</sup> Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México D. F. 04510, México.

elementos químicos se suministran por el agua de mar; 2) diagenéticas, sí el aporte de elementos se lleva a cabo a través de la columna sedimentaria; 3) hidrotermales, a través de chimeneas hidrotermales y fisuras en dorsales oceánicas, y 4) microbiológicas, por componentes químicos contenidos en organismos marinos, cuyos restos llegan al fondo oceánico. Entre los principales minerales de manganeso que se han identificado y los cuales se asocian con diferentes procesos de formación, principalmente todorokita, vernadita y birnessita. Los nódulos polimetálicos han sido reconocidos como un recurso marino estratégico debido a sus contenidos en metales como Co, Ni, Cu, y elementos de tierras raras.

*Palabras clave:* nódulos polimetálicos, micronódulos, océano, metales estratégicos.

#### ABSTRACT

Polymetallic nodules are authigenic sediments formed by concentric layers of iron and manganese hydroxides that grow from a nucleus which is usually microscopic. If observed with the naked eye may be a fossil like shark teeth, fragments of basalt, pumice, and even may be a nodule fragment previously formed. The size of the nodules may range from microscopic micronodules to nodules greater than 20 cm, often reaching between 5 and 10 cm in diameter. The existence and abundance of polymetallic nodules in the ocean is highly variable and its formation depends on several factors, such as low sedimentation rates, availability of nucleus, areas of high productivity, seabed topography and proximity to sources of supply of metals. The nodules are usually located in deep ocean basins because there are conditions necessary for their growth. Sources that provide metals forming the nodules may be 1) hydrogenic, when the chemical elements are supplied by seawater, 2) diagenetic, if the contribution of elements takes place through the sediment column, 3) hydrothermal, through fissures in hydrothermal vents and seafloor spreading, and 4) microbiological, by chemical components contained in marine organisms, whose remains fall to the ocean bottom. Among the major manganese minerals identified are mainly todorokita, vernadite and birnessita and they are associated with different processes of formation, Polymetallic nodules have been recognized as a strategic marine resource due to its content in metals such as Co, Ni, Cu, and rare earth elements.

*Keywords:* polymetallic nodules, micronodules, ocean, strategic metals.

## INTRODUCCIÓN

Los nódulos polimetálicos, anteriormente conocidos como nódulos de manganeso, precisamente por la abundancia mayoritaria de este metal en su composición, son concreciones de roca formadas por capas concéntricas de hidróxidos de hierro y manganeso que crecen a partir de un núcleo (Fig. 1), el cual puede ser algún tipo de fragmento de roca volcánica, (como basalto o pómez), algún resto de origen biogénico como dientes de tiburón o radiolarios (microfósiles silíceos) e incluso un fragmento de nódulo formado previamente.

El grosor y la regularidad de las capas concéntricas están determinados por etapas sucesivas de crecimiento. La formación de estas capas de óxidos reflejan las condiciones fisicoquímicas del ambiente de depósito (Hein *et al.* 1992; Abouchami *et al.* 1999), como cuando los nódulos presentan variaciones en el espesor de los anillos de crecimiento. El tamaño de los nódulos puede variar desde partículas microscópicas llamadas micronódulos (Fig. 2), hasta nódulos mayores que 20 cm, alcanzando con frecuencia entre 5 y 10 cm de diámetro. Su superficie es generalmente suave, algunas veces rugosa y de formas mamilares o globulares, pudiendo ser también irregulares (Morgan 2000).

En su composición química (tabla 1) tienen metales estratégicos como níquel, cobalto y cobre y más recientemente se ha observado que también tierras raras, metales tan utilizados en la actualidad para el desarrollo tecnológico y económico de los países industrializados.

Figura 1. Sección transversal pulida de dos nódulos colectados en la Campaña MIMAR VI. El núcleo es un fragmento de roca volcánica de forma triangular (izquierda) y núcleo de un nódulo antiguo (derecha).



Figura 2. Fotomicrografía con MEB de un micromódulo en sedimento colectado en la Campaña MIMAR VI.

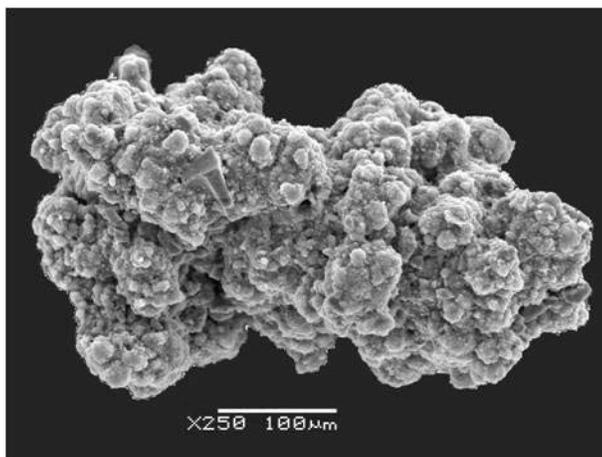


Tabla 1. Promedio de abundancia (porcentaje en peso) de algunos metales presentes en nódulos de óxidos de hierro y manganeso en los océanos Atlántico, Pacífico e Índico (Modificada de Rona 2002).

Elemento	Atlántico	Pacífico	Índico
Mn %	13,25	20,10	15,25
Fe%	16,97	11,40	14,23
Ni%	0,32	0,76	0,43
Cu%	0,13	0,54	0,25
Co%	0,27	0,27	0,21
Zn%	0,12	0,16	0,15
Pb%	0,14	0,08	0,10

Aunque generalmente a los nódulos de manganeso se les asociaba con sedimentos pelágicos denominados anteriormente como arcillas rojas o pardas, actualmente se les relaciona también con sedimentos silíceos biogénicos y con bajas tasas de sedimentación (entre 1 y 3 mm cada mil años).

La tasa de crecimiento de los nódulos puede ser determinada por métodos radiogénicos mediante la medición de las diferencias de edad entre

las distintas capas concéntricas que los forman. La mayoría de las técnicas de datación radiométrica indican una lenta tasa de crecimiento de los nódulos, de solo algunos cuantos milímetros por millón de años. No obstante aunque el crecimiento de los nódulos es muy lento, este puede ser variable con periodos de rápida acumulación separadas por periodos de lento o muy poco o ningún crecimiento. Por lo que la tasa de crecimiento de los nódulos depende en gran medida de la velocidad con la que fluyen los suministros de elementos (Cronan 2010).

## ANTECEDENTES

Los nódulos polimetálicos fueron descubiertos a finales del siglo XIX (1868) en el mar de Kara durante la expedición científica del buque M.S. Challenger (1872 a 1876) se encontraron distribuidos ampliamente alrededor de muchos sitios en el fondo de los océanos del mundo (Murray 1878, Murray e Irvine 1895, Murray y Renard 1891). Estos recursos ya son conocidos desde hace más de un siglo; sin embargo, su localización en profundidades del orden de cinco mil metros, impedía suponer en la posibilidad de recuperarlos. A partir de los años 60's el avance tecnológico permite que la exploración y la explotación de los nódulos se estén convirtiendo en una realidad. Sin embargo, la disminución en los precios de los metales a nivel mundial a finales de la década de los setenta, provocó una drástica disminución en la exploración de los nódulos de manganeso, por parte de las compañías mineras. A pesar de ello, el interés científico por el origen y evolución de los campos de nódulos y de futuros recursos potencialmente económicos logró grandes avances en los años siguientes (Von Stackelberg 1991) y a finales de la década de los setenta, investigaciones del fondo marino identifican otros recursos con gran potencial económico, entre los que destacan los sulfuros polimetálicos (Francheteau *et al.* 1979), formados alrededor de ventilas hidrotermales en áreas volcánicamente activas y las costras enriquecidas en cobalto, delgadas capas de manganeso y níquel encontradas cubriendo montes volcánicos submarinos (Rona 2002, 2008).

Al mismo tiempo que se llevaban a cabo estos descubrimientos, muchas personas e instituciones consideraron que los beneficios económicos de la extracción de los recursos submarinos, no deberían ser únicamente para los países con el capital suficiente para extraerlos, ya que el recurso también se encuentra en aguas internacionales, por lo que existe la inquietud mundial sobre la adminis-

tracción de estos recursos, la cual se ve mitigada con la creación de la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos, fundada en 1970 por la Asamblea General de las Naciones Unidas, que es el organismo responsable de regular las actividades de exploración y explotación en aguas internacionales. Esto incrementó el interés científico por los minerales del mar, centrándose la atención en los nódulos polimetálicos cuya amplia distribución en el océano permite que se conviertan en un recurso mundial tan atractivo. En las últimas décadas se han intensificado las investigaciones en torno a este recurso debido a su utilidad en estudios paleoceanográficos y paleoclimáticos (Hein 2001, Claude *et al.* 2005).

Se han identificado tres áreas donde se encuentran los nódulos polimetálicos de mayor interés científico y económico: 1) Océano Índico, 2) la Cuenca de Perú y 3) la Zona de Fractura Clarión Clipperton. Se destaca la importancia de esta última ya que en las investigaciones realizadas por diversos autores (Cronan y Tooms 1969, Banakar *et al.* 1989, Knoop *et al.* 1998), se observan resultados con un mayor potencial económico que en las otras dos áreas. Parte de esta zona se encuentra dentro de la Zona Económica Exclusiva del Pacífico Mexicano; las investigaciones en torno a los nódulos en esta zona han corrido a cargo de proyectos institucionales y de investigación en la UNAM, el primero de ellos se realizó durante la campaña oceanográfica Mimar II en 1986 a bordo del buque oceanográfico "El Puma", dentro del proyecto "Investigación sobre el origen, procesos y distribución de minerales del piso oceánico del Pacífico en la Zona Económica Exclusiva de México" (Carranza-Edwards *et al.* 1987). Dentro de este proyecto se realizaron estudios sobre el origen, los procesos y distribución de los nódulos polimetálicos, encontrando que son varios los procesos que dan origen a los nódulos, siendo la diagénesis uno de los principales mecanismos de aporte de elementos hacia los nódulos. Los procesos hidrotermales que se llevan en las inmediaciones de la Dorsal del Pacífico Oriental en 21° N contribuyen con aportes de elementos metálicos hacia los nódulos y los sedimentos, sobre todo en las regiones cercanas a la dorsal, ya que hacia el oeste se observa una mayor influencia de procesos hidrogenéticos (Rosales-Hoz y Carranza-Edwards 1990). Actualmente se continúa el estudio de los nódulos polimetálicos en la ZEE del Pacífico Mexicano, con la realización de la campaña oceanográfica MIMAR VI, realizada en el 2009 a cargo del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, y cuyos resultados ayudarán a comprender los procesos de ocurrencia y génesis de nódulos en el fondo de la zona económica exclusiva del Pacífico Mexicano.

## OCURRENCIA

La presencia y abundancia de nódulos polimetálicos en el océano es muy variable, aun en escalas de un kilómetro o menos, ya que su formación depende de diversos factores entre los que se encuentran la tasa de sedimentación, controladas por el suministro de sedimentos y las corrientes de fondo, la disponibilidad de núcleos, zonas de alta productividad, así como de la topografía del fondo marino y la proximidad a las fuentes de suministro de metales.

Se sabe que las altas tasas de sedimentación marina inhiben el crecimiento de los nódulos debido a que son enterrados en la columna de sedimentos impidiendo su crecimiento (Cronan 2010), así mismo esto permite que la disponibilidad de núcleos para su formación sea menor debido a que son enterrados antes de que la formación de nódulos exista; por lo contrario bajas tasas de sedimentación marinas favorecen el crecimiento de los nódulos, ya que éstos se mantienen en la superficie del fondo marino. La topografía del fondo también es un factor importante dado que controla la trayectoria de la corriente submarina lo que va a permitir el aporte de metales desde la zona de suministro. Lo anterior explica la ubicación de los nódulos de manganeso generalmente en las cuencas oceánicas profundas alejados de los continentes y aunque es posible rara vez se encuentran cerca de los continentes debido a que en estas zonas se tiene condiciones óptimas de baja sedimentación.

Como se ha mencionado, la presencia de núcleos potenciales para la deposición de óxidos de ferromanganeso es muy importante para la formación de los nódulos, estos núcleos son muy diversos respecto a su origen y composición. De esta forma se pueden encontrar núcleos constituidos por fragmentos volcánicos o tefra relacionados con la actividad volcánica submarina, biógenos silíceos o dientes de tiburón, detritos de rocas, aglomerados arcillosos, o incluso fragmentos de nódulos preexistentes. Los núcleos pueden ser reemplazados con el tiempo, debido a que frecuentemente los nódulos de mayor edad, reemplazan completamente a sus núcleos y se fracturan proporcionando abundantes fragmentos de nódulos, los cuales servirán como nuevos núcleos para la formación de futuros nódulos (Cronan 2010). De esta forma los diversos tamaños existentes en los nódulos probablemente tengan relación con el tipo y tamaño del núcleo así como con el proceso genético que influye en su crecimiento.

Las zonas de alta productividad marina favorecen la existencia de campos de nódulos debido a que una gran cantidad de materia orgánica es depositada sobre los sedimentos marinos estimulando la bioturbación que es ejercida por organismos bentónicos los cuales realizan un proceso de elevación de los nódulos manteniéndolos en la superficie de los sedimentos (Von Stackelberg y Beiesdorf 1991).

En términos generales las fuentes de suministro de metales que forman los nódulos, son provenientes de fuentes hidrotermales (Carranza-Edwards *et al.* 1986; Carranza-Edwards *et al.* 1990) a lo largo de las dorsales oceánicas, de los aportes de elementos químicos provenientes de aguas y vientos continentales, precipitación de minerales contenidos en el agua marina (hidrogénicos), del aporte de elementos en la columna sedimentaria (diagenéticos) y de componentes químicos contenidos en organismos marinos los cuales se precipitan al fondo oceánico con la muerte y descomposición de estos (Fig. 3).

## TEXTURA

La textura superficial de los nódulos de manganeso es variable, ya que estas pueden ser lisas, rugosas y mixtas (Fig. 4 y Fig. 5), lo que implica que la superficie en contacto con el agua es lisa y la que se encuentra en contacto con el sedimento es rugosa. La morfología de los nódulos puede ser esferoidal, discooidal, cilíndrica o irregular. Ambas dependen de la génesis del nódulo y de la forma del núcleo, así como de las fracturas que presentan durante su formación.

## MINERALOGÍA

Dentro de las fases de óxidos de Mn que se han encontrado se tienen los representados en la tabla 2, se muestran los principales picos de difracción de rayos X para estos minerales, así como los nombres más comunes para ellos.

Los minerales de manganeso que se han identificado y los cuales se asocian con diferentes procesos de formación, se encuentran: la Todorokita ( $\text{Mn}^{2+}, \text{Ca}, \text{Mg} \text{Mn}_3^{4+} \text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) formada por diagénesis óxica, Vernadita por precipitación hidrogénica y Birnesita ( $\text{Na}, \text{Ca} \text{Mn}_3^{4+} \text{Mn}^{3+} \text{O}_4 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}$ ) por diagénesis subóxica y a partir de Todorokita por deshidratación; los minerales de hierro que se han reportado en costras y nódulos polimetálicos son Goethita ( $\text{FeOOH}$ ), Lepidocrocita (González *et al.* 2010), Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y Ferroxyhita (Canet

Figura 3. Modelo hidrogenético de los nódulos de ferromanganeso con fuente magmática de metales (Modificado de Martínez y Lunar 1992).

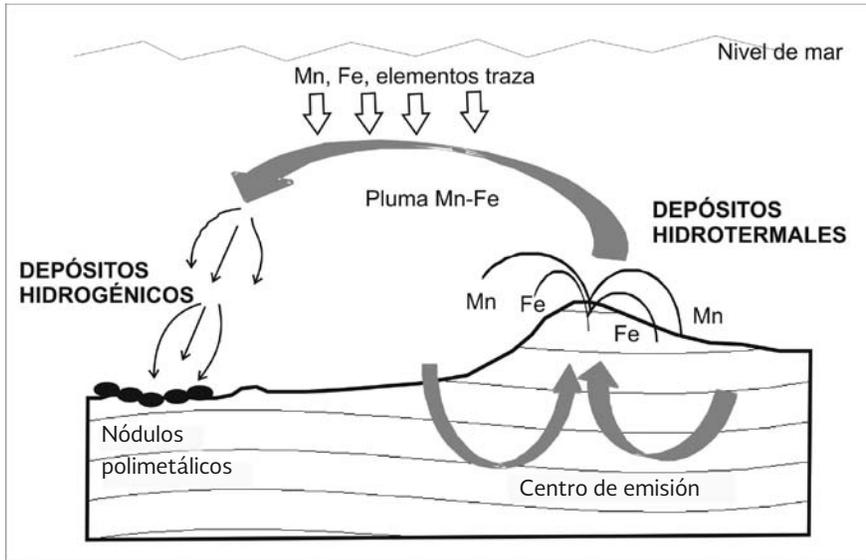
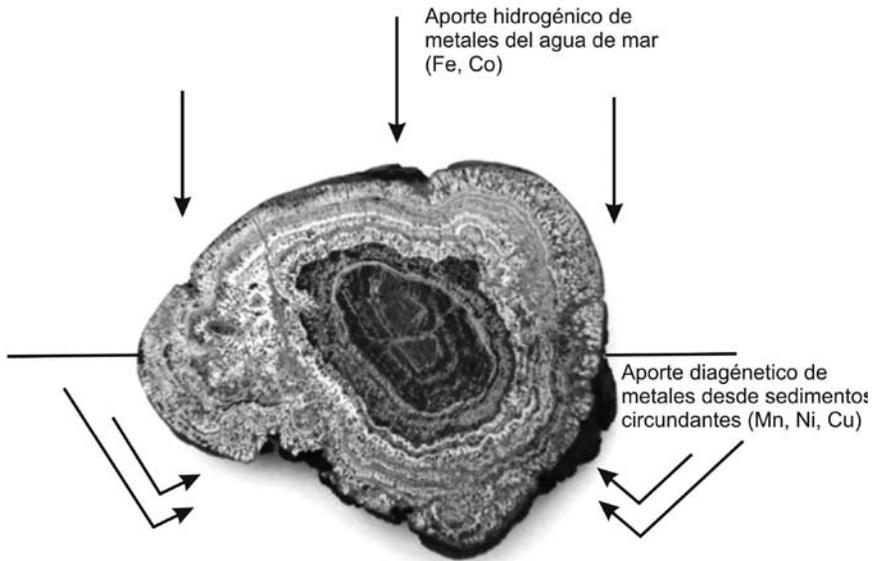


Figura 4. Textura lisa (izquierda), rugosa (derecha) en nódulos MIMAR VI.



et al. 2008).

Figura 5. Nódulo de Mn con textura mixta (lisa-rugosa) y composición diferente en la parte superior e inferior (nódulo de MIMAR VI en esquema propuesto por Cronan 2010).



## GEOQUÍMICA

El estudio de elementos mayores, traza y tierras raras ha sido indispensable para obtener clasificaciones genéticas de los yacimientos marinos de manganeso, las primeras clasificaciones (Fig. 6 y Fig. 7) fueron propuestas por Bonatti *et al.* (1972), y posteriormente aplicadas y modificadas por Toth (1980), Crerar *et al.* (1982) y Nath *et al.* (1997). Estas clasificaciones toman en cuenta el origen de los depósitos marinos de manganeso y los divide en tres tipos genéticos: hidrotermal, hidrogénico y diagenético, los criterios con los que se obtienen los diversos campos dentro de los diagramas de clasificación se basan en las concentraciones de elementos mayores, traza y tierras raras.

La geoquímica de sedimentos próximos a la Isla Clarión permite establecer grupos en función de procesos hidrotermales, que presentan una alta densidad de nódulos con nódulos ricos en Fe y Co y de nódulos con altas concentraciones de Mn, Ni y Cu (Rosales-Hoz y Carranza-Edwards, 1993).

Tabla 2. Mineralogía de nódulos polimetálicos (tomada de Schulz y Zabel 2006).

Óxidos de Mn	Picos DRX				Mineral
10 Å manganato	9.7 Å	4.8 Å	2.4 Å	1.4 Å	Todorokita, Buserita, 10 Å Manganita, Birnesita.
7 Å manganato	7.3 Å	3.6 Å	2.4 Å	1.4 Å	7 Å Manganita.
$\delta\text{MnO}_2$			2.4 Å	1.4 Å	Vernadita

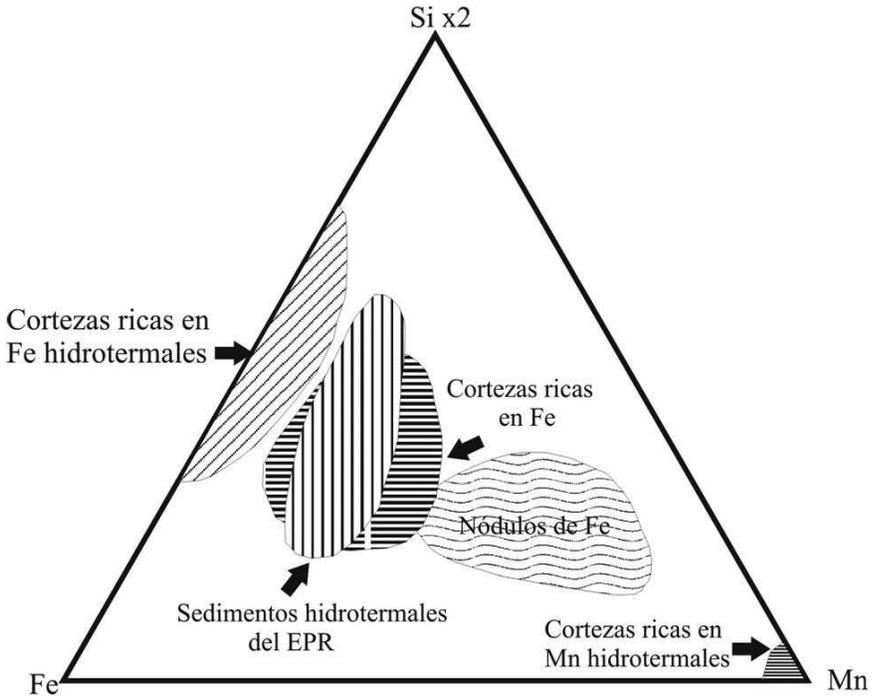
El estudio de las tierras raras ha sido de gran utilidad para establecer las condiciones redox en los ambientes de depósito de los nódulos polimetálicos, el principal indicador de estas condiciones es la relación Ce/La utilizada incluso para trazar la trayectoria de las masas de agua de fondo en los Océanos Pacífico y Atlántico (Glasby 1987, Kasten *et al.* 1998).

La composición química de los nódulos polimetálicos está relacionada con diversos factores entre los que se encuentran la productividad en aguas superficiales, en donde se ha observado la abundancia en Sc, Cr, Fe, Co, As, Hf, Th, REE y Ce/La en zonas de baja productividad y de Mn, Ni, Cu, Zn y Ba en zonas de alta productividad en el Pacífico (Glasby 1987).

## CRECIMIENTO DE NÓDULOS

De acuerdo con Glasby (2006) los nódulos polimetálicos, presentan una tasa de crecimiento de alrededor de 0.8 mm/M.a. Los primeros métodos utilizados en la datación de los nódulos incluyen métodos paleontológicos y más recientemente radiométricos. Uno de los primeros métodos radiométricos utilizados fue el de K/Ar datando los núcleos volcánicos de nódulos refiriéndose a datación con métodos paleontológicos, se han establecido bajas tasas de crecimiento para las capas superficiales (1.0-6.7 mm /M.a.) pero altas tasas de crecimiento para las capas interiores ( 39 mm/M.a.). En el Pacífico central mediante el uso de radiolarios se infiere que el crecimiento de los nódulos inició entre el Oligoceno Tardío y el Mioceno Temprano cerca de 23.7 M.a. y que las mayores tasas de crecimiento de los nódulos (2.5-3.7 mm/M.a.) ocurrieron durante el Pleistoceno-Holoceno (1.8-0 M.a.). Mediante los métodos  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ ,  $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$  se pueden datar muestras de edades entre 300 000

Figura 6. Diagrama ternario para diferenciar los depósitos marinos de manganeso basados en su concentración de Mn-Fe y Si x 2 (Toth 1980, modificado por Nath et al. 1997).



y 125 000 años, respectivamente que es equivalente a la superficie de 1-2 mm del nódulo. Por otro lado, el método <sup>10</sup>Be permite datar hasta 10 M.a. que es equivalente a la profundidad de algunos centímetros en muchas muestras.

## CONCLUSIONES

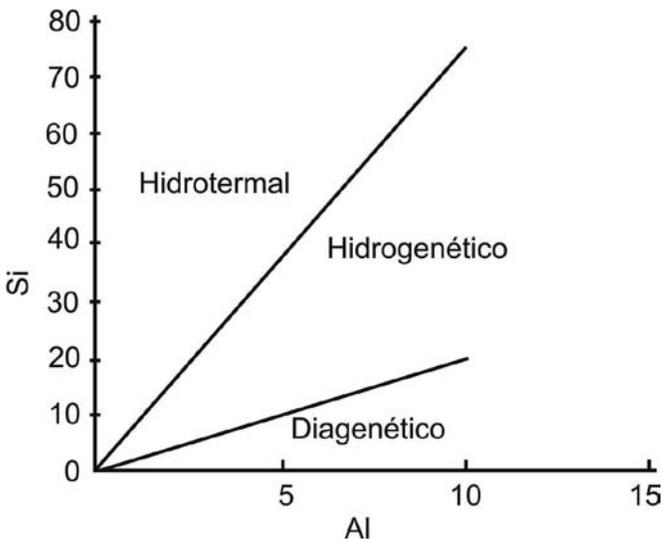
Los nódulos polimetálicos debido a su composición de óxidos de ferromanganeso, níquel, cobre, cobalto y otros metales son considerados un recurso importante de minerales para el futuro, ya que aun no es posible su explotación. No obstante desde la década de los 80's, existen consorcios mineros de países como Francia, Japón, Rusia y Estos Unidos de América, los cuales tienen ya denuncias para explotar las zonas consideradas mas ricas en nódulos de

interés económico; una de las cuales está en la región de la Fractura Clarión Clipperton, y la otra en la porción central del Océano Índico.

Sobre los efectos ambientales que podrían ocasionar las actividades de exploración y explotación de los recursos minerales de los fondos marinos, son inciertos debido a que no hay suficiente información sobre las posibles afectaciones a la biodiversidad marina. No obstante, es de esperarse que la explotación a escala industrial, produzca grandes alteraciones en el medio marino, debido a que la remoción de los nódulos removería a los sedimentos y a las comunidades bentónicas asociadas con estos. Es por ello prioritario el seguimiento de la investigación de los fondos marinos de la Zona Económica Exclusiva de México.

Es importante tener en cuenta que aunque los recursos minerales ubicados en la ZEE del Pacífico, son muy atractivos y es importante evaluar los costos de remediación por su extracción, los cuales pueden ser mayores al ingreso generado.

Figura 7. Diagrama geoquímico de Al



## AGRADECIMIENTOS

A las autoridades del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de México por las facilidades brindadas para la realización de este trabajo. A la Mtra. Yolanda Hornelas Orozco por la microfotografía de la figura 2. A la DGAPA de la UNAM por su apoyo parcial con el proyecto PAPIIT IN105710 titulado “Investigación sobre el origen de nódulos polimetálicos y la composición de sedimentos asociados en el Pacífico Mexicano”.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abouchami, W., Galer, S.J.G. y Koschinsky, A. 1999. Pb and Nd isotopes in NE Atlantic Fe–Mn crusts: proxies for trace metal paleosources and paleocean circulation. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63, 1489–1505.
- Banakar, V.K., Pattan J.N., y Jauhari P., 1989. Size, surface texture, Chemicals composition and mineralogy interrelations in ferromanganese nodules of Central Indian Ocean, *Indian. Jour. Mar. Sci.* 18 (3), 201.
- Bonatti, E.; Kraemer T. y Rydell, H. 1972. Classification and genesis of submarine iron-manganese deposits. En Horn, D.R. (eds.), *Ferromanganese deposits on the ocean: Harriman, Aren House*, pp. 149–166.
- Canet, C., Prol-Ledesma, R.M., Bandy, W.L., Schaaf, P., Linares, C., Camprubí, A., Tauler, E. y Mortera-Gutiérrez, C. (2008): Mineralogical and geochemical constraints on the origin of ferromanganese crusts from the Rivera Plate (western margin of Mexico). *Marine Geology*. 251, pp. 47–59.
- Carranza-Edwards, A., Rosales-Hoz, L., Villaseñor M.G., R. Lozano S.C. y Y. H. O., 1986. Sulfuros metálicos submarinos al sur de la Península de Baja California, México. *An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol., Univ. Nal. Autón. México*, 13(1):287-296.
- Carranza Edwards, A., Márquez A.Z. y Morales E.A., 1987. Distribución y características físicas externas de nódulos polimetálicos en el sector central del Pacífico Mexicano. *Bol. Mineral.*, 3(1):78-94.
- Carranza Edwards A., Rosales Hoz, L., Aguayo J.E., Hornelas Y. y Lozano, R. 1990. Geochemical study of hydrothermal core sediments and rocks from the Guaymas Basin, Gulf of California. *Applied Geochemistry*, 5:77-82.
- Claude, C., Suhr, G., Hofmann, A.W. y Koschinsky, A., 2005. U–Th chronology and paleoceanographic record in Fe–Mn crusts from the NE Atlantic over the last 700 ka. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69, 4845–4854.

- Crerar, D.A.; Namson, J.; Chyi, M.S.; Williams, L. y Feigenson, M.D. 1982. Manganiferous cherts of the Franciscan assemblage: I. General geology, ancient and modern analogues, and implications for hydrothermal convections at ocean spreading centers. *Economic Geology*. Vol. 77, pp. 519-540.
- Cronan D.S. 2010. Manganese Nodules; En: *Marine Chemistry and Geochemistry*, Kart K. Turekian (eds.), *Encyclopedia of ocean sciences*, 2nd Edición, 631 pp.
- Cronan, D.S. y Tooms J.S. 1969. The geochemistry of manganese nodules and associated pelagic deposits from the Pacific and Indian oceans. *Deep Sea Res.* 16:335-359.
- Francheteau, J., Needham, H.D.; Choukroune, P. Juteau, T. Seguret, M. Ballard, R.D. Fox, P.J. Normark, W. Carranza-Edwards, A., Córdoba, D. Guerrero, J. Rangin, C. Bougault, H. Cambon, P. y Hekinian, R. 1979. Massive deep-sea sulphide ore deposits discovered on the East Pacific Rise. *Nature*, 277:523-528.
- Glasby, G.P., Gwozdz, R., Kunzendorf, H., Friedrich, G. y Thijssen, T. 1987. The distribution of rare earth and minor elements in manganese nodules and sediments from the equatorial and SW Pacific. *Lithos* 20, 97-113.
- Glasby G.P. 2006. Manganese: Predominant Role of Nodules and Crusts. In: *Marine Geochemistry* Schulz Horst D. y Zabel Matthias (ed). 2nd revised, updated and extended edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Germany. 574p.
- González F.J., Somoza L., Lunar R., Martínez-Frías J., Martín Rubí J.A., Torres T., Ortiz J.E., Díaz-del-Río, V. 2010. Internal features, mineralogy and geochemistry of ferromanganese nodules from the Gulf of Cadiz: The role of the Mediterranean Outflow Water undercurrent. *Journal of Marine Systems* 80. P. 203-218.
- Hein, J.R., Bohrson, W.A., Schulz, M.S., Noble, M., Clague, D.A., 1992. Variations in the fine-scale composition of a central Pacific ferro-manganese crust: paleoceanographic implications. *Paleoceanography* 7, 63-77.
- Hein, J.R. 2001. Cobalt-rich ferromanganese crusts: global distribution, composition, origin and research activities. In: ISA (Ed) *Minerals other than polymetallic nodules of the International Seabed Area*. Workshop Report, Kingston, Jamaica: 188-272.
- Kasten S.; Glasby G.P. ; Schulz H.D. ; Friedrich G. y Andreev S.I. 1998. Rare earth elements in manganese nodules from the South Atlantic Ocean as indicators of oceanic bottom water flow. *Marine Geology* 146. pp 33-52.
- Knoop, P.A., Owen, R.M. y Morgan, C.L., 1998. Geochemical analysis of manganese nodules from the Clarion-Clipperton Zone of the north eastern Tropical Pacific Ocean, *Marine Geology*, 147, 1-12.
- Martínez Frías, J. y Lunar, R. 1992. Mineralizaciones hidrotermales submarinas. *Mundo Científico*, 128(12): 808- 815.

- Morgan Charles L. 2000. Resource Estimates of the Clarion –Clipperton Manganese Nodule Deposits., In: Handbook of Marine Mineral Deposits. Cronan David (Editor), 145-170 pp.
- Murray, J. 1878. On the distribution of volcanic debris over the seafloor of the oceans, its character, source and some of the products of its desintegration and decomposition. Proceeding Royal Society of Edinburgh, 9, 247-261.
- Murray, J. y Renard A.F., 1891. Deep sea deposits.HMSO. Rep.Sci.Results Explor. Voyage HMS Challenger, 1873-1876, 525pp.
- Murray, J. y Irvine, R. 1895. On the manganese oxide and manganese nodules in marine deposits. Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 37, 721-742.
- Murray, J. y Renard, A.F. 1891. Report on the deep sea deposits. In: Thompson, C.W. (ed) Report of the voyage of the HMS Challenger, Eyre and Spottiswood, London, 525 pp.
- Nath, B.B., Pluger W.L. y Roelandts I.1997. Geochemical constraints on the hydrothermal origin of ferromanganese incrustations from the Rodriguez triple junction, Indian Ocean. In: Nicholson, K., Hein, J.R., Buchan, B., Dasgupta, S. (Eds.), Manganese Mineralization: Geochemistry and Mineralogy of Terrestrial and Marine Deposits. Geological Society, London, ( Special Publication 119), pp: 199-21.
- Rona, P.A. 2002. Marine minerals for the 21st century. Episodes, vol. 25, no. 1, 2-12.
- Rona P. A., 2008. The changing vision of marine minerals. Ore Geology Reviews 33, 618–666.
- Rosales Hoz, L. y Carranza Edwards A. 1990. Polymetallic Nodule Study from the Oceanic Area near Clarion Island Mexico. Marine Mining. Volume 5, pp. 355-364.
- Rosales-Hoz, L. and A. Carranza-Edwards., 1993. Geochemistry of deep-sea surface sediments from the Pacific manganese nodule province near Clarion Island, Mexico. Marine Georesources & Geotechnology, 11:201-211.
- Toth, J.R. 1980. Deposition of submarine crust rich in manganese and iron. Geological Society. American Bulletin. I, Vol. 91, pp. 44-54.
- Von Stackelberg U. y Beiesrdorf H. 1991. The formation of manganese nodules between the Clarion and Clipperton fracture zones southeast of Hawaii. Marine Geology, 98. 411-423.

# PROCEDENCIA DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS EN LOS SISTEMAS MARINOS Y SU INFLUENCIA EN LA COMPOSICIÓN DE LOS SEDIMENTOS

Viridiana Vázquez-Figueroa, Carles Canet,  
Rosa María Prol-Ledesma, Ruth Esther Villanueva-Estrada<sup>1</sup>

## RESUMEN

El intercambio de materiales entre la tierra sólida y el océano sigue ciclos bien definidos. Los sedimentos marinos constituyen un reservorio fundamental dentro de dichos ciclos. Los elementos químicos son incorporados al fondo del mar principalmente en forma de materia particulada, que sobrevive a la destrucción durante su transporte y hundimiento. Por su origen, la materia particulada puede ser: (a) procedente de fuentes externas, es decir, producto de la erosión de los continentes, y/o (b) generada dentro de la propia cuenca marina, principalmente como consecuencia de la productividad biológica primaria pero también debido a procesos hidrogenéticos y de autigénesis. Los sistemas hidrotermales submarinos constituyen un aporte adicional muy relevante en las zonas de dorsal oceánica, siendo responsables de la liberación al océano de elementos que son producto del intercambio entre la corteza oceánica y el manto.

La composición elemental de los sedimentos está determinada por los minerales que integran los mismos. Los sedimentos absorben y liberan simultáneamente elementos al agua marina. La abundancia y distribución de los elementos traza en los sedimentos refleja diversos procesos físicos, químicos y biológicos. La materia orgánica controla la dis-

<sup>1</sup> Departamento de Recursos Naturales, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 México D.F., México.

tribución e incorporación de muchos elementos traza en los sedimentos, e influye en los procesos diagénéticos.

El destino final de los sedimentos marinos y los elementos que los constituyen es su incorporación al ciclo orogénico, ya sea dando lugar a rocas sedimentarias que acaban formando parte de los continentes, o bien por procesos de subducción, mediante los cuales la corteza oceánica y los sedimentos acumulados sobre ella son metamorfozados y finalmente asimilados por el manto. Parte de los componentes acarreados por los sedimentos en zonas de subducción son reincorporados a la corteza a través de la formación y emplazamiento de magmas en zonas de arco.

*Palabras clave:* ciclos geoquímicos; sedimentos; elementos traza; materia particulada; materia orgánica.

#### ABSTRACT

The exchange of elements between the solid Earth and the oceans follows well defined cycles. Marine sediments act as a relevant reservoir in these cycles. Chemical elements are incorporated to marine basins for the most part as particulate matter, which can be generated (a) from external sources, i.e. by the weathering and erosion of the continents, or (b) in the basin, chiefly as a consequence of the biological primary production (but also due to hydrogenetic and authigenic processes). Hydrothermal vent systems represent a relevant external source of elements in ocean spreading settings, releasing to the ocean several compounds that come from the oceanic crust and the upper mantle.

The mineral contents of the sediments is reflected by their major element composition. Sediments both release and incorporate elements to/from seawater. The abundances and distribution of trace elements in the sediments reflect complex chemical, physical and biological processes. So that, organic matter controls the incorporation of many trace elements to the sediments and affects diagenetic processes.

The fate of marine sediments and their chemical constituents is the integration to the orogenic cycle, both forming sedimentary rocks, or, throughout subduction, being assimilated to the mantle. Part of the components that are carried by the subducting plate are reincorporated to the Earth's crust by the formation and ascent of magmas in arc zones.

*Keywords:* Geochemical cycles; sediments; trace elements; particulate matter; organic matter.

## INTRODUCCIÓN

El intercambio de materiales entre la tierra sólida y el océano sigue ciclos bien definidos (Fig. 1). De este modo, los materiales que se incorporan a los océanos tienen diversos orígenes y experimentan procesos de transporte y transformación: (a) Proceden de la corteza continental, la corteza oceánica y la atmósfera, principalmente, (b) son adicionados (tanto disueltos como sólidos) a los océanos, donde sufren transformaciones diversas, pues los océanos actúan como un "reactor", y (c) son finalmente extraídos de ellos.

La movilidad y el fraccionamiento de los compuestos entre las distintas partes del sistema terrestre están condicionados principalmente por los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en las diferentes interfaces. Las costas y las zonas de plataforma continental son la interfaz entre los océanos y los continentes, de manera que el conocimiento de los procesos que ahí tienen lugar permite estimar el flujo de los elementos hacia (y desde) los océanos, así como el rol de éstos en los ciclos geoquímicos globales. Los sedimentos marinos constituyen un reservorio fundamental dentro de dichos ciclos, lo que justifica el interés de su estudio físico, químico y biológico.

## ORIGEN Y TRANSPORTE DE COMPONENTES HACIA LOS OCÉANOS

En una elevada proporción, los elementos en los sistemas marinos son transportados hacia el fondo del mar y a los sedimentos que lo cubren en forma de *materia particulada* (MP). La MP, cuya naturaleza y origen son muy variados, se caracteriza por sobrevivir a la destrucción durante su transporte y hundimiento. En la columna de agua la MP tiende a decantar por gravedad, de manera que la velocidad de caída de una partícula depende principalmente de su masa, tamaño y forma, y, en menor grado, de otros factores como la interacción de su superficie reactiva con soluciones electrolíticas y sustancias orgánicas disueltas (Salomon y Förstner, 1984).

La MP en general es una mezcla de materiales que, por su origen, pueden ser: (a) procedentes de fuentes externas, y/o (b) generados internamente (dentro de la propia cuenca marina), principalmente como consecuencia de la productividad biológica primaria. Los primeros tienen su origen en los continentes, son producto de la meteorización y erosión de los materiales continentales por procesos químicos y físicos, y son transportados hacia los océanos por los

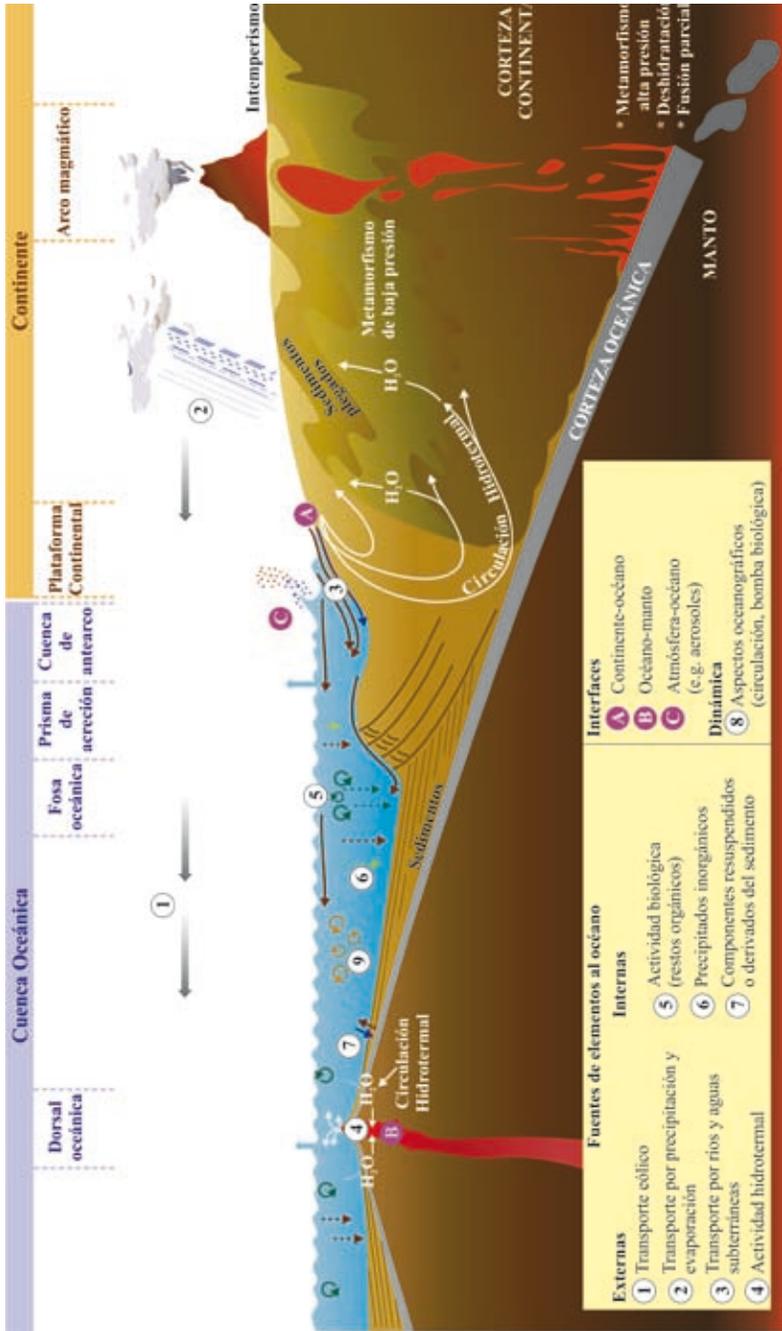
ríos, las aguas subterráneas y los glaciares (en las regiones polares). Además, aunque en menor grado, también son transportados en disolución, y por la atmósfera en forma gaseosa y particulada (transporte eólico) (SCOR, 2006).

Los productos derivados de la meteorización de los continentes están compuestos principalmente por aluminosilicatos (arcillas y feldespatos) y cuarzo. También incluyen, aunque en menor proporción, coloides metalorgánicos floculados, y oxihidróxidos de Fe y Mn formados en ambientes fluviales y estuarinos (Chester, 2000).

En las zonas de expansión del piso oceánico (dorsales oceánicas) y, en menor grado en las cuencas de tras-arco (asociadas a zonas de subducción), adquiere relevancia otro aporte externo de elementos: los *sistemas hidrotermales submarinos*. Éstos liberan al océano elementos que son producto del intercambio entre la corteza oceánica y el manto, formando depósitos de precipitados minerales en el fondo marino ricos en barita y sulfuros metálicos, y “plumas” hidrotermales que se extienden cientos de km y que se detectan como anomalías (en el agua de mar) de manganeso, bario, metano y helio, principalmente.

Los componentes de la MP formados en la propia cuenca pueden ser: (a) biogénicos o de origen orgánico, (b) no biogénicos, y (c) material resuspendido o de-

Figura 1 (página siguiente). Representación esquemática de las fuentes, procesos internos, depósitos (reservorios), y salidas de los elementos químicos en los océanos (a partir de Degens y Mopper, 1976 y James 2005). Los materiales son acarreados desde los continentes hacia los océanos en forma particulada o disuelta, siendo incorporados a los sedimentos principalmente en forma particulada. Los materiales disueltos también son transportados, pero su incorporación al sedimento requiere su transformación a la fase particulada. La materia particulada es una mezcla de materiales que pueden provenir de fuentes externas o bien ser generados *in situ* en la cuenca. Los componentes externos son producto de la erosión de la corteza; estos materiales son transportados hacia el océano por los ríos, el viento y las aguas subterráneas, principalmente (1 – 3). En zonas de dorsal oceánica tiene lugar la adición de elementos a través de los sistemas hidrotermales submarinos (4). Los componentes internos incluyen restos orgánicos (5) e inorgánicos (6), y también materiales resuspendidos y derivados de los propios sedimentos (7). Los procesos oceánicos internos, relacionados con la circulación y la bomba biológica, también afectan a la distribución y transporte de los elementos en el océano (8). Se muestran, además, los grandes rasgos tectónicos y fisiográficos en un margen de subducción océano-continente (tipo Andino) con desarrollo de un prisma de acreción.



rivado del sedimento. A su vez, los componentes biogénicos incluyen (a) detritus, es decir, restos de organismos muertos y desechos fecales, y (b) fragmentos esqueléticos compuestos de carbonato de calcio (calcita o aragonita), sílice amorfa (ópalo), o fosfato de calcio (hidroxiapatita).

Los componentes no biogénicos pueden precipitar directamente a partir de compuestos disueltos en el agua de mar. Este proceso, conocido como precipitación *hidrogenética*, puede producir barita, algunos carbonatos, y oxihidróxidos de Fe y Mn en forma de nódulos polimetálicos (Chester, 2000). Además, dentro del propio sedimento y como consecuencia de la interacción de los componentes de éste con el agua intersticial (o agua de poro), tiene lugar la disolución de algunos minerales primarios y la subsiguiente reprecipitación de nuevos minerales (secundarios) (Price, 1976). Este proceso se denomina *autigénesis* y es responsable de la formación de cementos silícicos y aragoníticos, así como de la precipitación de glauconita, entre otros.

Actualmente, el ciclo natural de ciertos elementos en el mar (e.g. As, Pb, Se y Hg) está siendo perturbado por la actividad humana, debido a la adición de sustancias como los pesticidas, a las descargas residuales, y a los desechos nucleares, entre otros.

## PROCESOS GEOQUÍMICOS DEL FONDO MARINO

El lecho marino consiste, en su mayor parte, en depósitos de partículas sin consolidar recubriendo un basamento rocoso. Estos depósitos sedimentarios muestran una enorme variabilidad en parámetros como la composición química y mineralógica, el tamaño de grano, la tasa de sedimentación y el contexto geográfico y tectónico, entre otros. Todos los componentes de los sedimentos absorben y liberan simultáneamente elementos al agua marina.

Las cuencas oceánicas se dividen en una serie de provincias geológicas definidas principalmente por los procesos tectónicos (determinados a su vez por el tipo de límite de placas) y sedimentarios (erosión y depósito) predominantes. Los patrones de distribución de los sedimentos reflejarán estos procesos, además de las condiciones climáticas y los patrones de circulación propios de cada provincia.

La composición de los sedimentos marinos es heterogénea y refleja la composición y abundancia relativa de los distintos minerales que alcanzan el depósito sedimentario. De manera general, la composición de los depósitos

sedimentarios varía horizontal y verticalmente. Los cambios en la horizontal son efecto de fenómenos como la producción de partículas, su transporte y preservación. Por otro lado, los cambios en la vertical reflejan variaciones en el tiempo de las características del aporte sedimentario, así como los efectos de la diagénesis.

La composición elemental de los sedimentos está determinada por los minerales que los integran (e.g. cuarzo, arcillas, carbonatos y ópalo), los cuales presentan elevados contenidos en *elementos mayores* (cuya abundancia cortical es típicamente > 1.0 % en peso) como Si, Al, Ca, Na, K, Fe y Mg, según sea el caso. En cuanto a los *elementos traza* (< 0.1 % en peso), su abundancia y distribución en los sedimentos refleja diversos procesos físicos, químicos y biológicos particulares (disolución, adsorción/desorción en la superficie de los minerales, especiación química, y una amplio rango de procesos biológicos). Gracias a ello, los elementos traza en los sedimentos son trazadores eficientes de las características y procesos de los diferentes ambientes sedimentarios (lagos, estuarios, regiones costeras y mares), puesto que son muy sensibles a las condiciones ambientales (Chester, 2000). Aunque los elementos traza en los sedimentos se presentan como impurezas en la red cristalina de los *minerales esenciales* (o como constituyentes principales de algunos *minerales accesorios*), principalmente se hallan adsorbidos en partículas de oxihidróxidos de Fe y Mn y en la materia orgánica. Por lo tanto, estos elementos no suelen estar fijados permanentemente en los sedimentos y bajo determinadas condiciones, son liberados a la columna de agua.

Otro factor determinante en la geoquímica de los sedimentos marinos es el contenido de materia orgánica. La materia orgánica juega un papel muy importante en el transporte de los elementos en los sistemas marinos, controlando su distribución e incorporación en los sedimentos y además, influyendo en los procesos diagénéticos. Los mecanismos principales de transporte de muchos elementos traza (e.g. Ni, Cr, V, Co, U) se basan en su adsorción por partículas orgánicas, dependiendo de la reactividad química y características moleculares de la materia orgánica (Salomon y Förstner, 1984; Libes, 1992).

La materia orgánica que encontramos en los sedimentos puede tener un origen terrestre, marino o artropogénico. Sin embargo, la mayoría de la materia orgánica en el océano es generada *in situ* por productores primarios como el fitoplancton. Alrededor del 90 % de la materia orgánica se deposita en la plataforma continental, principalmente en ambientes costeros y deltaicos.

Los principales elementos constituyentes de la materia orgánica son el oxígeno, el hidrógeno, el carbono, el nitrógeno y el fósforo. Particularmente en los ambientes marinos profundos, el fósforo y el nitrógeno no siempre se encuentran disponibles en formas biológicamente utilizables, por lo que actúan como biolimitantes (Price, 1976; James 2005).

## DESTINO DE LOS SEDIMENTOS MARINOS

El destino final de los sedimentos está determinado por la dinámica de la corteza oceánica. Ésta, a su vez, obedece a otro ciclo, el *Ciclo de Wilson*, el cual explica de forma ordenada el proceso continuo de apertura y cierre de los océanos. Como etapa final de la residencia de los elementos en los océanos, los sedimentos marinos terminan integrándose al ciclo de las rocas, ya sea (a) formando rocas sedimentarias por compactación y litificación y, debido a procesos de orogénesis, incorporándose a los continentes, o (b) por procesos de subducción, cuando la corteza oceánica, junto con los sedimentos acumulados sobre ella, es metamorfozada y finalmente asimilada por el manto (Degens y Mopper, 1976; Chester, 2000). Parte de los componentes acarreados por los sedimentos en zonas de subducción, principalmente el agua y otros volátiles pero también muchos metales, son reincorporados a la corteza a través de la formación, ascenso y evolución de magmas en la zona de supra-subducción (Fig. 1). Con este proceso, responsable de la formación de los arcos magmáticos (incluidos los arcos de islas), se completa el ciclo de los elementos, reiniciando con la meteorización y erosión de las rocas así formadas.

## AGRADECIMIENTOS

Estos trabajos han sido financiados en parte por los proyectos IN-106907-2 y IN-103211 (PAPIIT, UNAM). Agradecemos a A. Low Pfeng su interés en este trabajo, así como sus valiosos comentarios del manuscrito.

## BIBLIOGRAFÍA

Chester, R. 2000. *Marine geochemistry*. Blackwell Science. Londres, Reino Unido, 506 pp.

- Degens, E.T. y Mopper, K. 1976. Factor controlling the distribution and early diagenesis of organic material in marine sediments. En: Riley, J.P., Chester, R., (Eds), *Chemical Oceanography* Vol 6. Academic Press. pp 59-113
- James, R. 2005. *Marine biogeochemical cycles*. The Open University-Elsevier. 130 pp.
- Libes, S. M. 1992. *An Introduction Marine Biogeochemistry*. John Wiley & Sons, Inc. Estados Unidos, 734 pp.
- Price, N. B. 1976. Chemical diagenesis in sediments, en: Riley, J.P., Chester, R. (eds), *Chemical Oceanography* Vol 6. Academic Press. pp 1-58.
- Salomons, W. y Förstner, U. 1984. *Metals in the Hydrocycle*. Springer-Verlag. Berlín, Alemania, 349 pp.
- SCOR. 2006. *GEOTRACES. An International Study of Marine Biogeochemical Cycles of Trace Elements and Their Isotopes*. Science Plan, International Council for Science, Scientific Committee on Oceanographic Research. Plymouth, Reino Unido, 79 pp.



# SEDIMENTACIÓN CARBONATADA, SILÍCICA Y OTROS SEDIMENTOS QUÍMICOS EN LOS AMBIENTES MARINOS PROFUNDOS

Fernando Núñez-Useche,<sup>1</sup> Ricardo Barragán,<sup>1</sup> Carles Canet<sup>2</sup>

## RESUMEN

Se consideran en este capítulo las propiedades generales de algunos de los sedimentos que son depositados en los ambientes marinos profundos, localizados por debajo del límite externo de la plataforma continental. La presentación de la información se acompaña con una breve descripción de las fuentes principales de los sedimentos marinos, a saber: (a) litogénico, (b) biogénico, (c) hidrogénico y (d) cosmogénico. Adicionalmente, se describen de manera general los rasgos fisiográficos de las dos regiones básicas de las cuencas oceánicas, el *margen continental* y la *cuenca oceánica profunda*, regiones que por su topografía y procesos químicos, oceanográficos y sedimentarios, inciden en la naturaleza y texturas de los sedimentos en ellas acumulados. Especial énfasis se ha dado a los sistemas y procesos sedimentarios asociados a la generación de carbonatos, pedernales, y otros sedimentos químicos (barita y óxidos de manganeso) en ambientes marinos profundos. Además, se describen algunos ejemplos actuales y pasados de di-

<sup>1</sup> Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, C.P. 04510, México, D.F. fernandonunezu@comunidad.unam.mx, ricardor@geologia.unam.mx.

<sup>2</sup> Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, C.P. 04510, México, D.F. ccanet@geofisica.unam.mx.

chos sistemas y procesos sedimentarios en los mares mexicanos, y para algunos casos, se explica su importancia económica.

Palabras clave: océano profundo, sedimentación, carbonatos, pedernales, nódulos de manganeso, cold seeps.

#### ABSTRACT

This chapter deals with the general properties of some of the sediments that are settled down on the deep marine environments, from below the outer boundary of the continental shelf. The information is presented along with a brief description of the main sources of the marine sediments, namely: (a) lithogenic, (b) biogenic, (c) hydrogenic, and (d) cosmogenic. In addition, the chapter describes, in a broad sense, the physiographic features of the two basic regions of the ocean basins, the continental margin and the deep-ocean basin, traits that by how its topography, chemical, oceanographic and sedimentary processes impact on the nature and textures of the sediments there accumulated. Special emphasis has been given to the systems and sedimentary processes associated with the generation of carbonates and cherts, manganese oxides, and sediments related to cold seepage in such deep-ocean marine environments. In addition, examples are given of some current and ancient of these systems and sedimentary processes in the Mexican seas, and in some cases, their economic importance is described.

*Keywords:* Deep-ocean, Sedimentation, Carbonates, Cherts, Manganese nodules, Cold seeps.

## INTRODUCCIÓN

Una gran parte del volumen de rocas expuestas en la superficie de los continentes, por arriba de la línea de costa actual, se formó por la litificación de muy diversas partículas sedimentarias depositadas en ambientes oceánicos del pasado. La clasificación de dichas partículas sedimentarias en los ambientes marinos, tiene su fundamento en el origen de las partículas mismas. Las cuatro fuentes principales de generación de sedimento marino son: (a) rocas pre-existentes (origen litógeno), (b) materia orgánica (origen biógeno), (c) compuestos disueltos en el agua (origen hidrógeno), y (d) material proveniente del espacio exterior (origen cosmogénico).

El entendimiento de los procesos de formación de dichos sedimentos demanda una apreciación general de los rasgos principales del piso oceánico, los cuales influyen en sus texturas y composición.

La mayor parte de nuestro conocimiento acerca de la naturaleza del piso oceánico ha sido obtenida por diversas técnicas geofísicas y exploratorias desarrolladas en las últimas décadas. A medida que el entendimiento de los rasgos batimétricos de los océanos ha ido en aumento, ha quedado de manifiesto que las cuencas oceánicas pueden ser divididas en dos regiones básicas, mismas que por sus características fisiográficas y procesos químicos, oceanográficos y sedimentarios, son claramente distinguibles: (a) los márgenes continentales, y (b) las cuencas oceánicas profundas. Adicionalmente, con base en rasgos de *profundidad* y de *pendiente*, la superficie del margen continental es dividida en *plataforma continental*, *talud continental* y *elevación continental*, conforme dicho margen progresa desde la línea de costa hacia la cuenca oceánica profunda. El desarrollo de *cañones submarinos* es un rasgo distintivo del margen continental. Más allá del talud continental, donde las profundidades generalmente exceden los 4000 m, se extienden los ambientes de la cuenca oceánica profunda, la cual se encuentra totalmente subyacida por corteza oceánica basáltica. A lo largo de los márgenes tectónicamente pasivos, el talud continental desciende de manera muy gradual hacia una *llanura abisal* ampliamente extendida, mientras que en aquellos tectónicamente activos, los taludes pueden descender de manera abrupta hacia profundas *trincheras* o *fosas abisales*. Dos rasgos fisiográficos importantes de los ambientes de la cuenca oceánica profunda son las *dorsales centro-oceánicas* y los *montes submarinos*. Cerca de los ejes de dichas dorsales y elevaciones submarinas, donde las cámaras magmáticas pueden estar localizadas a menos de un kilómetro por debajo del piso oceánico, el agua marina se infiltra a través de fracturas hacia la corteza oceánica en donde es calentada por el magma subyacente. Posteriormente, el fluido (*hidrotermal*) caliente asciende hacia la superficie y es expulsado hacia el océano a través de sistemas de *ventilalas* o *chimeneas*, en lo que se conoce como circulación hidrotermal. La actividad hidrotermal en las dorsales oceánicas se encuentra directamente asociada a procesos de divergencia de placas litosféricas, aunque en algunos casos son el resultado del movimiento de dichas placas sobre *puntos calientes*.

En este capítulo consideraremos las propiedades generales de algunos de los sedimentos generados en los ambientes marinos profundos, es decir, por debajo del límite externo de la plataforma continental. Especial énfasis se ha

dado a los depósitos sedimentarios de carbonatos, sílex, óxidos de manganeso y barita en dichos ambientes marinos profundos.

## SISTEMAS Y PROCESOS SEDIMENTARIOS ASOCIADOS AL DEPÓSITO DE CARBONATOS Y SÍLEX

La sedimentación carbonatada en ambientes marinos profundos tiene lugar preferentemente en: (a) el talud continental y el pie de talud, (b) la elevación continental, (c) los cañones submarinos, (d) la llanura abisal, (e) las dorsales centro-oceánicas, (f) los montes submarinos, y (g) las trincheras o fosas abisales (Fig. 1). La composición de los sedimentos y su distribución en estas zonas son controladas por dos importantes factores relacionados entre sí: la profundidad y la temperatura. El incremento en la profundidad está acompañado por un descenso en la temperatura y un aumento en la concentración de  $\text{CO}_2$  en el agua marina, hecho que favorece la disolución de las conchas de calcita y aragonita depositadas en el fondo marino. Como consecuencia, en los océanos modernos se definen diferentes niveles de profundidad que regulan la preservación/disolución de los carbonatos de calcio (Fig. 2). El primer nivel es conocido como el nivel de compensación de la aragonita y corresponde a la profundidad a la cual dicho mineral es disuelto. En las bajas latitudes este nivel se presenta a una profundidad promedio de 1.5 km, y en el océano Atlántico varía en general entre 2 y 3 km. La calcita se preserva a profundidades mayores, comenzando a disolverse significativamente por debajo del nivel definido como la lisoclina (3000 a 5000 m), y alcanzando su disolución total a partir del nivel de compensación de la calcita

Figura 1. Perfil del fondo oceánico mostrando los principales ambientes de sedimentación profunda. a = Talud Continental, b = Elevación Continental, c = Cañones Submarinos, d = Llanura Abisal, e = Dorsal Centro-Oceánica, f = Montes Submarinos, g = Trincheras o Fosa abisal.

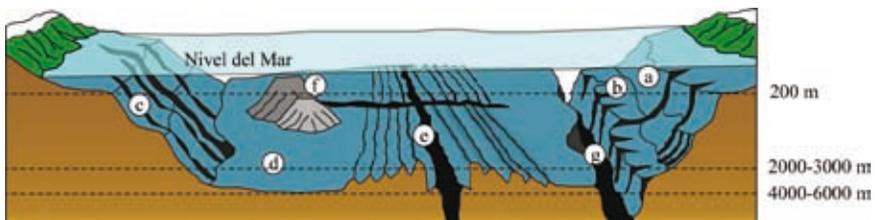
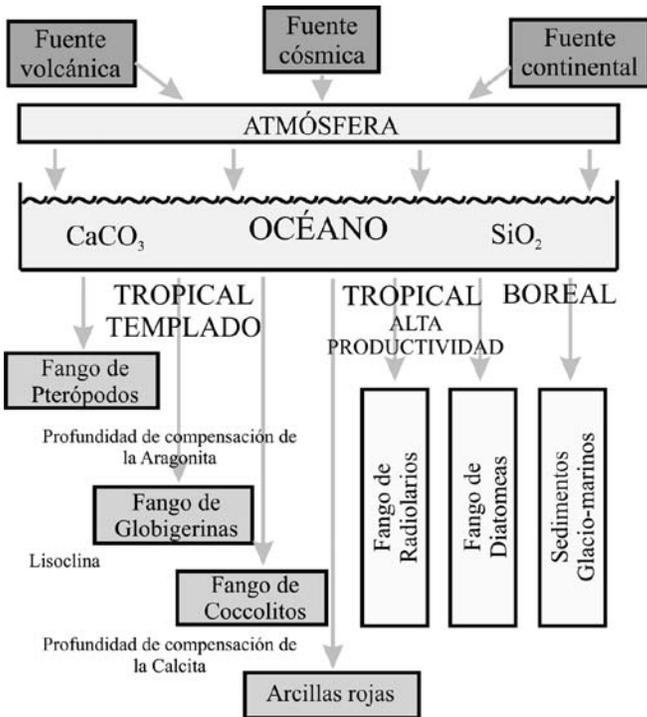


Figura 2. Principales fuentes y patrones de transporte de los sedimentos marinos profundos actuales (modificado de Hay, 1974).



(CCD, por sus siglas en inglés). Aunque la profundidad de la CCD ha variado con el tiempo (Berger y Winterer 1974, Ramsay 1977, van Andel et al. 1977), en los océanos modernos se sitúa entre 4200 y 5400 m.

La naturaleza de la sedimentación carbonatada en ambientes marinos profundos es diversa; no obstante, puede agruparse según los procesos sedimentarios bajo los cuales tiene lugar (Cook y Mullins 1983, Cook et al. 1983, Enos y Moore 1983, Pickering et al. 1986, Stow 1986), y que se detallan a continuación.

### Deposición de material pelágico

Los sedimentos que cubren el piso oceánico en cuencas marinas profundas se componen mayoritariamente de partículas de origen biogénico, las

cuales consisten en fragmentos microesqueléticos o restos de organismos planctónicos que han sido decantados a partir de la columna de agua. Este proceso de depósito es conocido como lluvia pelágica y da lugar a los diferentes tipos de fangos pelágicos que cubren los fondos marinos. Otros componentes menos importantes son los de procedencia volcánica (cenizas), cósmica, continental y glaciario (Fig. 2).

Los fangos pelágicos fueron descubiertos durante las expediciones del *Challenger* (1872-1876). Su descubrimiento abrió un nuevo panorama para las investigaciones sobre el clima y los océanos, ya que estos depósitos son un buen registro de las condiciones oceanográficas, bióticas y atmosféricas del pasado.

La distribución de los fangos pelágicos está influenciada por la temperatura, la salinidad y el patrón de circulación de las masas de agua, que a su vez controlan la tasa de disolución de los carbonatos y la productividad biológica superficial (Wooster 1978). Dichos fangos se acumulan en cuencas oceánicas profundas, pequeñas cuencas oceánicas, márgenes continentales y, en menor proporción, en la zona axial de las dorsales oceánicas y en edificios volcánicos inactivos (Jenkyns 1986).

La composición química de los fangos pelágicos es función no solo de la profundidad sino también de la latitud. En latitudes bajas, por ejemplo, las aguas están sobresaturadas de carbonato de calcio, habiendo así una mayor disponibilidad de este material para que los organismos construyan conchas calcáreas.

Aproximadamente el 50 % de los fondos oceánicos actuales se hallan cubiertos por fangos calcáreos compuestos fundamentalmente por testas de foraminíferos, nanofósiles y pterópodos. Estos fangos se acumulan fundamentalmente entre las latitudes de 45° al norte y sur de la línea del ecuador, siendo especialmente abundantes en el océano Atlántico. Sobre la zona axial de la Dorsal Atlántica hay una fina capa de sedimentos pelágicos carbonatados (fango de foraminíferos), justo por encima del CCD. A medida que nos alejamos del eje de la dorsal y aumenta así la profundidad, se observa un predominio de los fangos silíceos y arcillas rojas. Estas últimas están compuestas por cuarzo muy fino, diferentes tipos de arcillas, minerales autigénicos, residuos de partículas biogénicas, y material volcánico y meteorítico. Son sedimentos de grano muy fino, y su color café-rojizo es causado por la cristalización de oxihidróxidos de hierro sobre las partículas que las conforman.

En el Océano Índico cerca del 54 % del fondo está cubierto por lodos calcáreos de globigerinas, hallándose la mayor parte de estos lodos en el sector occidental de dicho océano, en tanto que la mitad oriental está cubierta mayoritariamente por arcillas rojas (Mero, 1965). Los fangos calcáreos también abundan en cuencas profundas restringidas como el Mar Rojo y el Mediterráneo, donde la escasa circulación limita la productividad superficial. En el Mediterráneo, Milliman y Müller (1973) describieron la precipitación abiótica de calcita magnesiana depositada en forma de nódulos micríticos dentro de un fango calcáreo biogénico. Los fangos calcáreos de pterópodos son abundantes en los flancos de las dorsales oceánicas y en los taludes de la Plataforma de Bahamas (Emiliani y Milliman 1966).

Los fangos silíceos, por otro lado, están compuestos mayoritariamente por radiolarios y diatomeas, y en menor grado, por organismos silicoflagelados y espículas de esponjas. En general estos fangos se depositan en las costas orientales de los continentes y en los océanos polares, es decir, en zonas que se hallan bajo la influencia de corrientes de surgencia (que arrastran el agua profunda rica en nutrientes hasta la superficie) o de aguas frías. Mientras que los fangos enriquecidos en radiolarios predominan en el Pacífico Ecuatorial y en el Océano Índico, los fangos de diatomeas se acumulan principalmente en las cuencas del cinturón meridional de altas latitudes y en el Pacífico Norte (Tucker y Wright 1990).

## 2.2. Resedimentación y flujos de fondo transportados por gravedad

En las zonas de talud tienen lugar diferentes procesos de resedimentación que causan el transporte de grandes cantidades de sedimentos desde las partes más someras hacia zonas profundas. Estos procesos están promovidos por la gravedad e incluyen fenómenos como caída de bloques (olistolitos), deslizamiento de sedimentos, *slumping*, y distintos tipos de flujos gravitacionales como los flujos de detritos y las corrientes turbidíticas (Fig. 3). Aunque pueden ser generados por tormentas o por la sismicidad (Seed 1968, Bea *et al.* 1983, Hansen y Franks 1991), dichos procesos dependen en gran medida de la geometría del talud, de las variaciones del nivel del mar y de la acción de las corrientes de fondo.

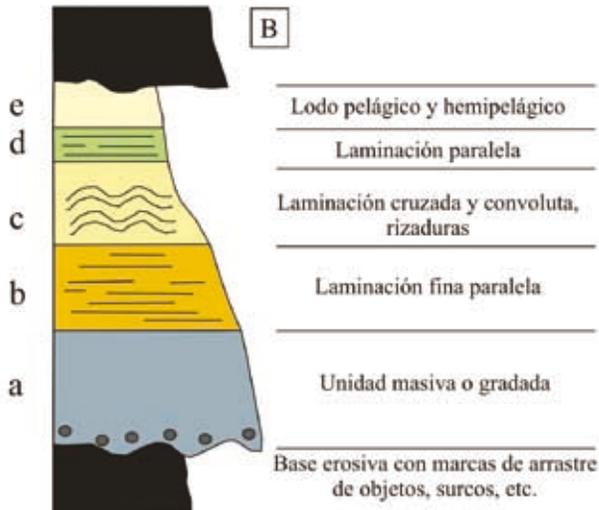
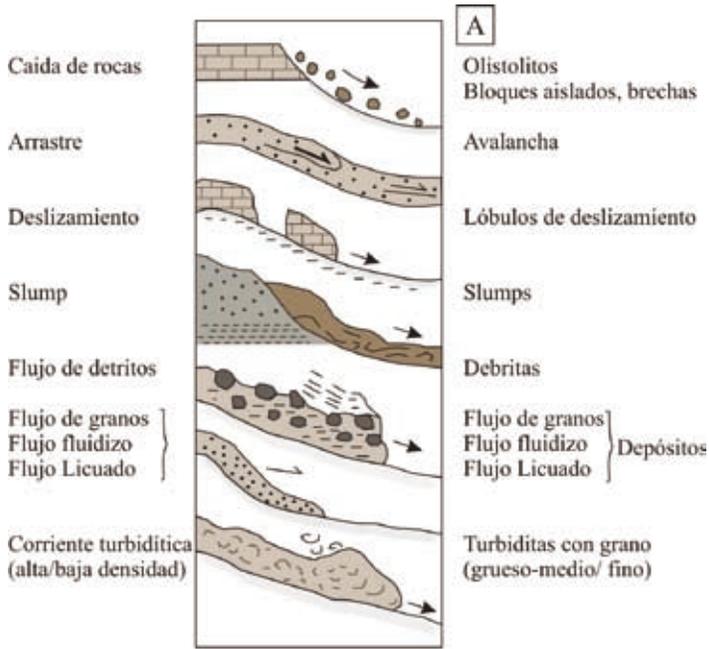
Según Wilson (1974) existen tres tipos de perfiles fundamentales de la transición margen de plataforma-talud. Cuando la plataforma presenta un borde arrecifal (tipos I y III), generalmente existe una pendiente inclinada con

acantilados y salientes que favorece el *slumping* y la formación de flujos de detritos. Mientras las facies redepositadas en plataformas con un margen tipo I se caracterizan por acumulaciones de lodo calcáreo formando montículos en el frente arrecifal, en las plataformas con un margen tipo III dichas acumulaciones están constituidas por bloques con fragmentos esqueléticos del arrecife orgánico original. Los márgenes suaves de rampas homoclinales (tipo II) son más propicios para la deposición de calciturbiditas de grano fino, bajo la acción de corrientes de fondo y de sedimentos pelágicos (Stow 1992).

Mientras que los sedimentos siliciclásticos removilizados por procesos gravitacionales han sido ampliamente estudiados, aún se desconocen muchos aspectos relacionados con los depósitos redepositados de carbonatos. El interés creciente por estos últimos radica en su potencial como roca almacén de hidrocarburos o como conductos para su migración debido a su elevada porosidad. En México, el 80 % de las reservas de hidrocarburos se encuentran asociadas a márgenes de plataformas cretácicas con flujos gravitacionales de talud (Nehring 1991). En el campo petrolero de Poza Rica, por ejemplo, gran parte del petróleo está almacenado en depósitos que han sido interpretados como brechas carbonatadas “gigantes” del frente arrecifal (Enos 1977, Minero *et al.* 1983).

La formación de depósitos carbonatados resedimentados es más común durante los periodos de ascenso del nivel del mar, ya que la alta producción de carbonatos someros en el interior de la plataforma favorece la resedimentación en la zona de talud (Mullins 1983). Sin embargo, el descenso del nivel del mar puede causar la exposición sub-aérea del margen de la plataforma, y de esta manera aumentar la inestabilidad del talud y generarse así turbiditas y megabrechas (Hunt y Tucker 1992). En el talud, estos depósitos están constituidos por: (a) granos provenientes de las plataformas someras (granos esqueléticos, peloides, ooides), (b) bloques caóticos (olistostromas) de carbonatos depositados sobre el talud o pie de talud, procedentes del margen de la plataforma o de partes superiores del talud, (c) litoclastos derivados de las partes superiores endurecidas, y (d) material somero de grano fino y granos siliciclásticos hemipelágicos de tamaño limo-arcilla (Flügel 2004). Todos estos materiales pueden aparecer junto con los sedimentos originales del talud (que usualmente consisten en montículos de lodo o arrecifes) o estar intercalados con los fangos de periplataforma. En los taludes de la Plataforma de Bahamas, dichos fangos consisten en material derivado de la plataforma somera mez-

Figura 3. Sedimentación carbonatada asociada a procesos gravitacionales. (A) Representación esquemática de los principales procesos de resedimentación por flujos de masa (Stow 1994). (B) Secuencia turbidítica ideal de Bouma (1962). En las turbiditas calcáreas es rara la existencia de una secuencia completa.



clados con fangos pelágicos de foraminíferos y nanofósiles (Schlager y James 1978, Mullins *et al.* 1984).

### 2.3. Resedimentación por corrientes de contorno

Las corrientes de contorno son corrientes del fondo marino que corren paralelamente al contorno batimétrico de los márgenes continentales. Estas corrientes son producidas por diferencias en el gradiente térmico y de salinidad de las masas de agua oceánica (circulación termohalina), y están condicionadas por el movimiento de rotación de la tierra (origen geostrofico). Además, están influenciadas por la circulación del viento sobre la superficie oceánica (Hollister y Nowell, 1991). Su circulación inicia con el hundimiento de masas de agua bien oxigenadas en latitudes altas de los océanos Atlántico y Pacífico (Stow *et al.* 1996, Salon *et al.* 2008; Shanmugam 2008), las cuales se desplazan hacia el ecuador como masas de agua profunda. Aunque estas corrientes presentan bajas velocidades (10 a 30 cm/s), son un factor muy importante en el movimiento de nutrientes alrededor del globo. Los pulsos de alta energía, con velocidades de hasta 70 cm/s, son capaces de ocasionar rizaduras y estructuras sedimentarias de erosión en el fondo marino (Richardson *et al.* 1981).

Las corrientes de contorno suponen un importante control de la topografía del talud de las plataformas carbonatadas, pues pueden moldear bordes erosionados cortados por grandes bloques colapsados (Freeman-Lynde y Ryan 1985, Mullins *et al.* 1986). Los depósitos asociados a estas corrientes son denominados “contornitas” y se hallan a profundidades mayores a 300 m (Stow *et al.* 2002). La composición de estos depósitos depende del tipo de material transportado. Las contornitas calcáreas y silíceas tienen lugar en regiones con un importante arribo de material pelágico, en zonas marinas abiertas y bajo las zonas de surgencia oceánica. En la mayoría de los casos estos depósitos carecen de estructuras sedimentarias primarias (o bien las tienen pobremente desarrolladas), y están constituidos granulométricamente por arcillas y limos pobremente clasificados. Las partículas que componen las contornitas usualmente son granos biogénicos fragmentados y teñidos por oxihidróxidos de hierro y/o de manganeso. También pueden contener, en menor grado, material terrígeno y volcanoclástico.

Es común que estos depósitos se intercalen con sedimentos depositados por corrientes de turbidez en la zona del talud. Un ejemplo espectacular de

sedimentación carbonatada actual asociada a corrientes de contorno es el que se ha descrito en el Estrecho de la Florida (Mullins 1983). Se calcula que ahí la corriente del Atlántico Norte ha causado un retroceso del margen de la plataforma de más de 30 km y, como consecuencia, se han acumulado lóbulos de arena carbonatada derivada de las partes someras adyacentes de la plataforma hacia el norte y oeste de ella (donde el flujo de las corrientes converge). Además, en estas zonas ocurre una extensa cementación submarina, y la subsecuente formación de nódulos y fondos endurecidos (cf. *hardgrounds*).

### 3. EJEMPLOS ACTUALES EN LOS MARES MEXICANOS

#### 3.1. Golfo de México

El Golfo de México es un mar marginal localizado entre las zonas tropical y subtropical del oeste del Océano Atlántico. En esta cuenca oceánica de casi 1.5 millones de km<sup>2</sup> dos terceras partes de la sedimentación tiene lugar en el talud y en la llanura abisal (Galloway *et al.* 2009). Las primeras perforaciones realizadas en el centro de esta cuenca revelaron que el horizonte superior que cubre el fondo marino (5-50 cm) es mayoritariamente un lodo de globigerinas rico en carbonato de calcio, subyacente por una alternancia de capas de arcilla y limo pobres en carbonato de calcio (Trask *et al.* 1947). Posteriormente, Balsam y Beeson (2003) observaron que la cantidad de carbonato de calcio en los sedimentos aumenta del noroeste al sureste (con contenidos de CaCO<sub>3</sub> >75 % en las plataformas de Florida y de Yucatán), distribución que está fuertemente influenciada por el aporte de material terrígeno de los ríos Grande y Misisipi (Fig. 4). En los taludes de estas plataformas carbonatadas existe también un gradiente en el contenido de carbonato, que va desde 60 % en la zona superior hasta un 25 % en la llanura abisal de Sigsbee, una de las partes más profundas (3900 m) del golfo. Aunque en las zonas someras del talud el mayor aporte a la sedimentación carbonatada corresponde a macro-invertebrados, a medida que aumenta la profundidad la microbiota pelágica pasa a tener un papel fundamental, especialmente los foraminíferos planctónicos y los cocolitos. Sobre la llanura abisal, los sedimentos carbonatados están dominados por margas compuestas por una mezcla de material pelágico y arcillas provenientes del río Misisipi.

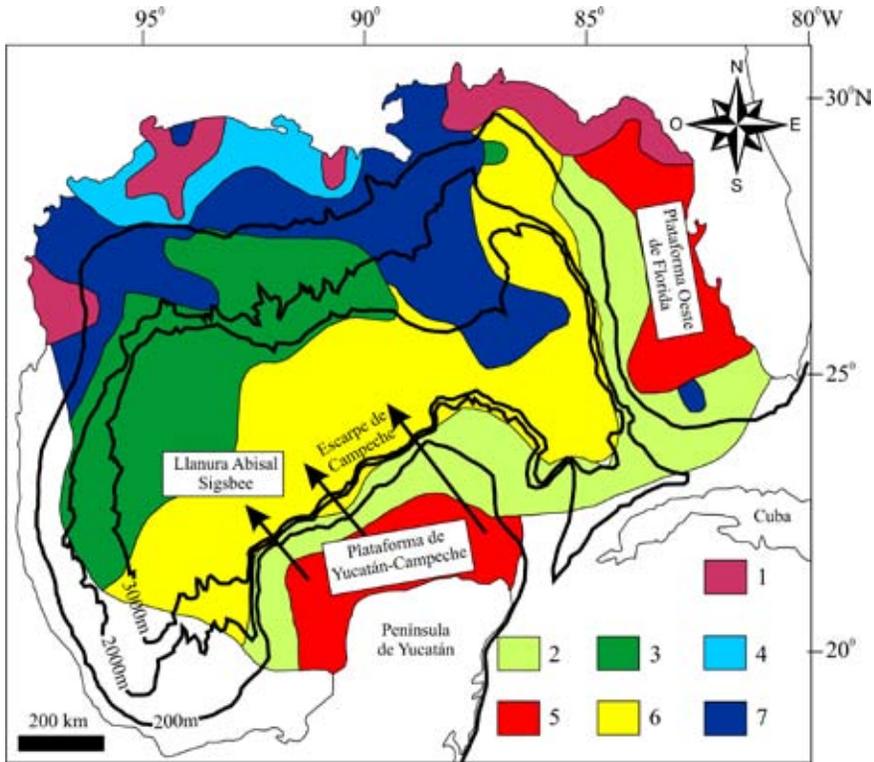
El Escarpe de Campeche, al sur del Golfo de México, se cuenta entre los mayores acantilados del mundo, pues tiene un desnivel aproximado de 2000

m. Dicho escarpe bordea el margen este y norte de la Plataforma de Yucatán y, aunque localmente tiene paredes verticales, presenta una inclinación promedio de 20° (Jordan y Stewart 1959, Paull *et al.* 1990). La base del escarpe se encuentra por encima de la lisoclina, por lo que no existe una importante disolución del material carbonatado.

Este escarpe se originó por el crecimiento de arrecifes y bancos carbonatados en el margen de la plataforma, y ha sido moldeado por diferentes procesos erosivos, pues así lo sugiere la presencia de carbonatos resedimentados a lo largo de su base (Halley y Schlager 1983). La erosión que el margen de la plataforma carbonatada ha sufrido desde su formación ha provocado que las facies lagunares afloren en las paredes de los acantilados (Freeman-Lynde 1983, Paull *et al.* 1990). Mediante métodos sísmicos, en la base del escarpe se ha identificado un cuerpo de brechas depositado antes del Cretácico medio (Buffler *et al.* 1980, Locker y Buffler 1984, Schlager y Buffler 1984, Faust 1990), que resultó probablemente de la caída de bloques desde las paredes del escarpe (Fig. 5A).

En la llanura abisal frente al Escarpe de Campeche existe actualmente una importante contribución de sedimentos carbonatados provenientes de la plataforma (Fig. 4). Estos sedimentos se restringen a ocasionales capas de color claro cuyo origen ha sido relacionado con una fuerte erosión de la zona continental y de la plataforma, que se incrementó especialmente durante el periodo glacial del Pleistoceno (Greenman y Leblanc 1956). Ewing *et al.* (1958), por otro lado, sugiere que estos depósitos son el resultado de la acción de corrientes turbidíticas. Algunos sondeos realizados en el extremo sur de la llanura abisal mostraron que estos niveles calcáreos están constituidos por tres miembros (de base a techo): (a) calcilitas de color claro con abundante fauna de ambientes someros, (b) calcilitas con escasa fauna somera mezclada con organismos planctónicos, y (c) lutitas arcillosas de color claro con abundante fauna planctónica. Según Davies (1968), dadas las características texturales y estratigráficas de dichos horizontes, no existe duda alguna sobre su origen turbidítico. El modelo propuesto por este autor explica que la fricción entre flujos de alta densidad de sedimentos provenientes de la plataforma y la llanura abisal ocasionó la reducción de la velocidad de la corriente de turbidez y favoreció el rápido depósito del miembro inferior de la secuencia. Cuando la velocidad de la corriente disminuyó, los sedimentos carbonatados de la lluvia pelágica fueron incorporados a los sedimentos arrastrados y tuvo lugar la formación del miembro intermedio. El miembro supe-

Figura 4. Distribución actual de los sedimentos primarios en el Golfo de México. Las líneas negras gruesas indican la batimetría en metros. 1 = Arena Cuarzosa, 2 = Fango Calcáreo, 3 = Arcilla Calcárea, 4 = Limo, 5 = Arena Calcárea, 6 = Marga, 7 = Arcilla (Balsam y Beeson 2003). Las flechas señalan la contribución de material carbonatado somero procedente de la Plataforma de Yucatán-Campeche a la llanura abisal, a través del Escarpe de Campeche.



rrior representa el cese del flujo y el retorno a la deposición arcillosa de la llanura abisal durante condiciones normales. Se han contabilizado al menos ocho repeticiones de este tipo de secuencia, con límites erosivos. Estas turbiditas logran desarrollarse hasta una distancia de 30 km del Escarpe de Campeche.

Paull *et al.* (1991) y Twichell *et al.* (1996) han reportado el hallazgo de bloques de hasta 5 m y de escombros de material carbonatado, distribuidos localmente en la base de los escarpes de Florida y Campeche, que al parecer

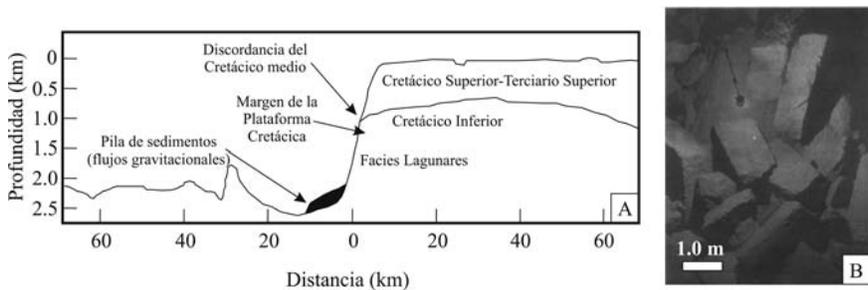
están originados recientemente por desprendimiento y caída de bloques (Fig. 5B). De hecho, Brink *et al.* (2009) incluyen estos escarpes dentro de provincias geológicas en las cuales los deslizamientos de bloques podrían tener cierto potencial tsunamigénico.

### 3.2. Golfo de California

El Golfo de California es una cuenca oceánica semi-cerrada cuyas profundidades alcanzan los 3600 m en su entrada. Esta cuenca constituye un *rift* oblicuo, cuyo origen se remonta al Mioceno Medio (16-12 Ma), período en el que tuvo lugar un cambio progresivo del régimen tectónico, de subducción a rifting continental (Angelier *et al.* 1981).

En ambos márgenes continentales del golfo ocurren procesos de surgencia oceánica que ocasionan una de las más altas tasas de sedimentación de sílice biogénico en el mundo. La surgencia estacional es responsable de las condiciones eutróficas superficiales y del enorme crecimiento del plancton, especialmente de diatomeas y radiolarios, que se registran en esta zona (Fig. 6A). La distribución de radiolarios en la cuenca refleja una compleja interacción entre las aguas superficiales de la Corriente de California, las aguas cálidas del Pacífico Tropical Oriental y el agua originada en el interior del Golfo de California (Álvarez-Arellano y Molina-Cruz 1984). La intersección de la zona de mínimo

Figura 5. Depósitos gravitacionales en los escarpes de Campeche y Florida. (A) Perfil longitudinal del Escarpe de Campeche. Los depósitos y estructuras tienen una localización aproximada basada en perfiles sísmicos realizados por Buffler *et al.* (1980) y Faust (1990). (B) Bloques angulosos sobre la llanura abisal asociados a zonas de slumping del Escarpe de Florida. Fotografía submarina tomada de Paull *et al.* (1991).



de oxígeno, que subyace a la zona eutrófica superficial, con el talud continental favorece el depósito de fangos lodosos de diatomeas ricos en materia orgánica (entre los 120 y 300 m), particularmente en los taludes de la parte central del golfo (Fig. 6B). Estos sedimentos están finamente laminados y consisten en sedimentos blancos ricos en diatomeas, intercalados con sedimentos oscuros y arcillosos (Van Andel 1963). Según De Diego y Douglas (1999), la presencia de la zona de mínimo de oxígeno es responsable de la acumulación de lutitas negras en las zonas abiertas del talud. Estas investigaciones muestran que dicha zona ha variado en espesor e intensidad durante los últimos sesenta años. Las concentraciones de oxígeno en general han aumentado y han permitido el desarrollo de macrobentos y un cambio en el patrón de sedimentación. En el interior de los sedimentos anóxicos tiene lugar la formación de dolomita, en relación con la sulfatoreducción provocada por la diagénesis temprana de la materia orgánica (Kelts y McKenzie 1982).

## **OTROS PROCESOS DE SEDIMENTACIÓN QUÍMICA EN AMBIENTES MARINOS PROFUNDOS**

### Depósitos submarinos de costras y nódulos de óxidos de manganeso

Los depósitos submarinos de óxidos de manganeso ( $\pm$  hierro) han sido descritos en todas las cuencas oceánicas y en muy diversos ambientes tectónicos. A nivel mundial, la mayor acumulación de dichos óxidos (en forma de nódulos) se halla en un área de océano profundo comprendida entre las zonas de fractura de Clipperton y de Clarión, al oeste del margen pacífico mexicano.

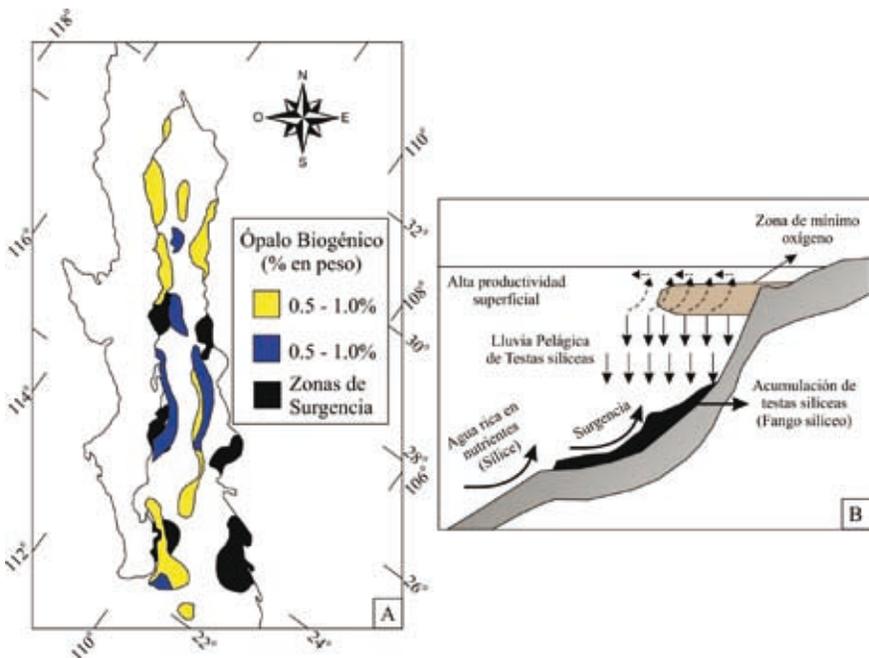
Además de contener óxidos de manganeso y hierro en proporciones variables, estos depósitos, también denominados de nódulos y costras polimetálicos, pueden estar altamente enriquecidos en cobalto, cobre, níquel e, inclusive, en platino (*i.e.* Wen *et al.* 1997, Glasby 2002). Precisamente por contener dichos metales de alto valor económico, estos depósitos submarinos ya son considerados como recursos minerales potencialmente estratégicos. Concretamente, los depósitos cobaltíferos (los que contienen más del 0.5 % en peso de Co) resultan particularmente atractivos, a tal punto que en algunas zonas ya se han delimitado concesiones mineras submarinas.

En el fondo marino, los óxidos de manganeso y hierro desarrollan depósitos de textura y morfología variable, pudiendo formar, además de nódulos y

costras, cementos y vetillas en rocas volcánicas y sedimentos, e incluso montículos y chimeneas en zonas con actividad hidrotermal. Estos distintos estilos de mineralización difieren entre sí en composición mineral y elemental, especialmente en la proporción Fe/Mn, los contenidos en elementos traza, y en la velocidad de crecimiento, y reflejan diferentes mecanismos de depósito o la combinación de ellos en diversos grados. De acuerdo con el mecanismo predominante de depósito, las mineralizaciones submarinas de óxidos de manganeso se clasifican, a grandes rasgos, en hidrogenéticas e hidrotermales (Hein *et al.* 1997).

Los procesos hidrogenéticos son responsables, en buena medida, de la formación de la mayoría de los depósitos en costras y en nódulos del Océano Pacífico. La precipitación mineral hidrogenética tiene lugar a baja temperatura y ocurre directamente a partir del agua de mar “ambiental”, implicando velo-

Figura 6. Sedimentación silíceo en el Golfo de California. (A) Distribución regional del ópalo biogénico (Van Andel 1963) y principales zonas de surgencia (Álvarez-Arellano y Molina-Cruz 1984). (B) Modelo de corrientes de surgencia y acumulación de fangos silíceos (modificado de Meyers 2006).



idades de crecimiento extremadamente bajas, del orden de unos milímetros por millón de años. Por otro lado, los procesos hidrotermales involucran fluidos acuosos calientes que han circulado en profundidad a través de las rocas y los sedimentos, y que son descargados en zonas específicas del fondo marino. Alrededor de dichas descargas tiene lugar la precipitación mineral, debido fundamentalmente al enfriamiento de las soluciones y a cambios en el estado de oxidación/reducción. Estos mecanismos de precipitación son mucho más rápidos que los hidrogenéticos, siendo el origen de algunos yacimientos “gigantes” de manganeso hospedados en terrenos geológicos formados en cuencas marinas, los cuales, si alcanzan gran volumen y alta ley, son objeto de explotación minera. El yacimiento de Molango, en Hidalgo (México) es el más grande de manganeso en Norteamérica, y se formó en el Jurásico a partir de un sistema hidrotermal submarino (Okita 1992). Sin embargo, el efecto de los sistemas hidrotermales sobre los depósitos actuales de nódulos y costras suele ser parcial y depende de la distancia de éstos respecto a las zonas influenciadas por dichos sistemas (principalmente: arcos de islas, dorsales oceánicas y puntos calientes; Glasby 1988, Hein *et al.* 1997, Canet *et al.* 2008).

La principal condición para el desarrollo de nódulos y costras de óxidos de manganeso es que la tasa de sedimentación sea extremadamente baja. Además, debe de haber un aporte “regional” de manganeso a la columna de agua, el cual puede estar ligado a hidrotermalismo submarino, y el ambiente de depósito debe ser moderadamente oxidante (Banakar *et al.* 1997). Mientras que los nódulos se forman en las llanuras abisales, las costras se pueden hallar a menor profundidad (a partir de 700 m bajo el nivel del mar), tanto en cuencas oceánicas como en márgenes continentales, recubriendo sustratos rocosos en taludes y montes submarinos (Fig. 7; Bau *et al.* 1996, Hein *et al.* 1997).

Los depósitos submarinos de óxidos de manganeso consisten esencialmente en mezclas de óxidos e hidróxidos pobremente cristalizados o incluso amorfos, comúnmente vernadita y feroxihita (Fig. 8). Ocasionalmente presentan otros óxidos como goethita, birnessita, pirolusita, todorokita y asbolana, y filosilicatos como nontronita e hisingerita (Hein *et al.* 1997, Varentsov *et al.* 1991). Además, contienen cantidades variables de fases biogénicas, como ópalo, aragonita y apatito, y de granos detríticos de cuarzo y feldespatos, principalmente. Los minerales de manganeso y hierro se originan a partir de óxidos coloidales hidratados, los cuales tienen la capacidad de extraer y adsorber metales traza de su entorno (del agua de mar y/o los sedimentos), concentrando

de manera eficiente algunos iones metálicos como el cobalto y el níquel (Fig. 7; Bau *et al.* 1996). Este proceso es más eficiente cuanto más lenta es la tasa de crecimiento de los depósitos, de manera que los depósitos hidrogenéticos “puros” son los que presentan contenidos más elevados en dichos metales.

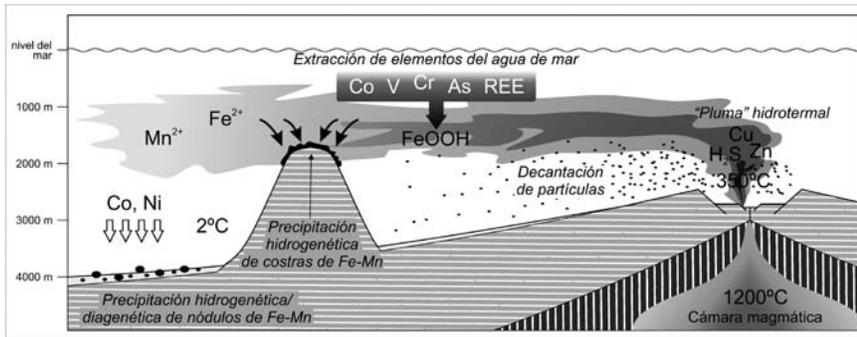
## Depósitos submarinos de barita

La barita ( $\text{BaSO}_4$ ) es un mineral abundante en los sedimentos marinos actuales, hallándose principalmente (a) en los sistemas hidrotermales, (b) en algunos sedimentos pelágicos, y (c) en zonas de expulsión de fluidos sedimentarios “fríos” en márgenes continentales (Torres *et al.* 2003). En los sistemas hidrotermales que se hallan distribuidos principalmente a lo largo de las dorsales oceánicas, la barita precipita junto con anhidrita y sulfuros metálicos alrededor de las zonas de emisión de fluidos o “ventilas”, y llega a formar estructuras de tipo chimenea y pequeños montículos. Por otro lado, en zonas de alta productividad primaria ocurre la precipitación biogénica de barita, en forma de partículas que se acumulan en los sedimentos pelágicos. Por último, la infiltración y expulsión de fluidos sedimentarios en el fondo marino puede causar la precipitación de barita autigénica en los sedimentos superficiales (Canet y Prol-Ledesma 2010). Torres *et al.* (2003) atribuyeron a este último proceso la génesis de los depósitos estratiformes de barita, basándose en comparaciones morfológicas y estructurales, texturales y geoquímicas, así como en el estudio de faunas fósiles halladas en los yacimientos, la mayor parte de las cuales son del Paleozoico. Dichos depósitos son, a nivel mundial, los más grandes y económicamente más importantes de barita.

El modelo de depósito de Torres *et al.* (2003) explicaría por actualismo la formación de aquellos yacimientos de barita que son singenéticos en un encajonante sedimentario (sinsedimentarios) y que no presentan sulfuros de metales base asociados. Anteriormente, estos yacimientos solían considerarse de origen hidrotermal y se agrupaban, bajo la categoría de los depósitos sedimentario-exhalativos (o SEDEX), con los sulfuros masivos de metales base.

Los yacimientos de Mazatán y Cobachi, en Sonora (México), considerados actualmente los más importantes de barita en todo el país, constituyen un ejemplo de mineralizaciones estratiformes de barita. Dichos yacimientos consisten en varios lechos masivos de barita micro- a fanero-cristalina, de hasta 20 m de espesor y 500 m de longitud, que se hallan concordantemente inter-

Figura 7. Modelo conceptual de formación de depósitos submarinos de óxidos de manganeso ( $\pm$  hierro). Los procesos hidrotermales de precipitación predominan en las zonas de dorsal oceánica (derecha), a lo largo de las cuales se distribuyen los mayores sistemas de “ventilas” submarinas. Por otro lado, los procesos hidrogenéticos son responsables de la formación de los depósitos en las llanuras abisales y en montes submarinos (izquierda), en forma de nódulos y costras, respectivamente. Los óxidos de manganeso y hierro tienen la capacidad de extraer metales de su entorno (agua de mar y/o sedimentos), principalmente cobalto y níquel.

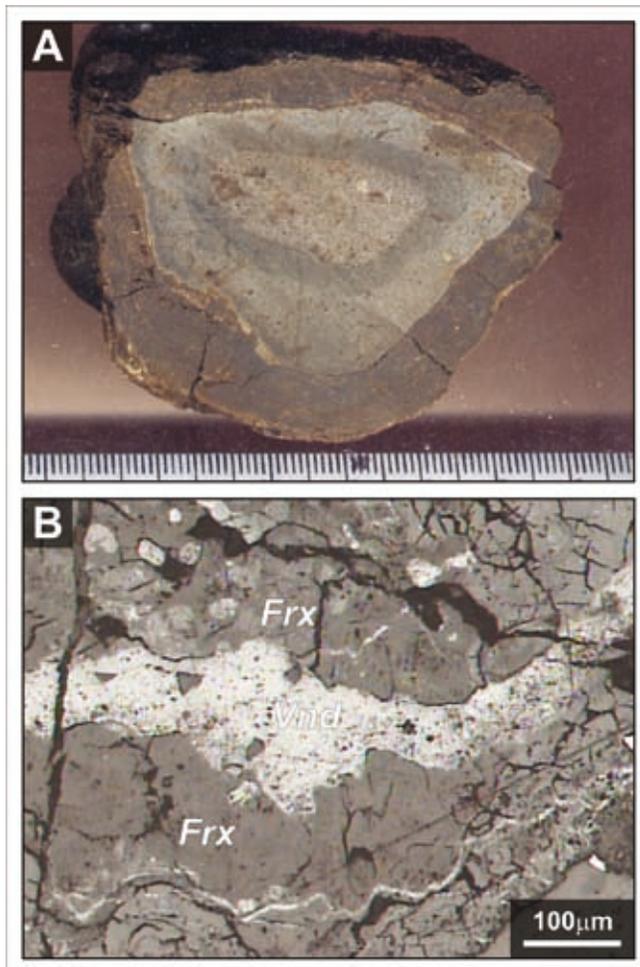


calados en series sedimentarias del Carbonífero Superior y del Devónico (Fig. 9). La secuencia que los contiene representa el extremo occidental del orógeno Ouachita-Marathon-Sonora, el cual fue el resultado de la colisión entre el margen continental meridional del cratón de Laurentia y el arco de islas de Gondwana (Poole et al. 2005).

En el fondo marino, la descarga de fluidos sedimentarios (*i.e.* gas, salmueras, petróleo y lodo fluidizado) tiene lugar en áreas discretas conocidas como *cold seeps*, donde se pueden hallar montículos y pavimentos cementados por carbonatos autigénicos y barita, charcas de salmueras, depósitos de hidratos de metano, volcanes de lodo, *pockmarks* y complejas comunidades bióticas quimiosintéticas. Este fenómeno tiene lugar tanto en márgenes pasivos, incluyendo plataformas continentales, taludes y llanuras abisales de mares epicontinentales, como en márgenes activos, especialmente en prismas de acreción y en márgenes afectados por *rifting*.

Los fluidos de los *cold seeps* son fríos, reducidos (carecen del ión sulfato) y ricos en hidrocarburos, y tienen la capacidad de lixiviar bario a partir de sedimentos enriquecidos en este elemento (Fig. 10). Un enriquecimiento en bario

Figura 8. Muestras de óxidos de Fe–Mn en costras y nódulos de la Placa de Rivera, obtenidas por medio de dragado a una profundidad de 2700–2800 m, en un área situada ~175 km al suroeste de Manzanillo, Colima (México) (Canet et al. 2008). (A) Fotografía de la sección de un nódulo cuyo núcleo es un bloque de basalto oceánico que presenta una costra de oxihidróxidos de Fe–Mn de hasta 2.5 cm de espesor. (B) Fotomicrografía (microscopio óptico de polarización, luz reflejada) de la costra de oxihidróxidos de Fe–Mn. El nivel de mayor reflectividad corresponde a vernadita (Vnd), y se halla encajonado en un agregado de oxihidróxidos de Fe (principalmente feroxihiita; Frx) con granos detríticos diseminados.



en los sedimentos marinos puede atribuirse a la sedimentación pelágica de partículas biogénicas de barita.

La precipitación de barita tiene lugar como consecuencia de la reacción entre fluidos de *cold seeps*, ricos en bario, y el agua de mar, rica en ión sulfato, a medida que ésta se infiltra en los sedimentos más superficiales (Fig. 10). En muchos fondos marinos con *cold seeps* se ha descrito barita autigénica originada por este mecanismo; por ejemplo, en el Golfo de México (Canet *et al.*, 2006) y en el norte del Golfo de California (Canet *et al.* 2010).

## AGRADECIMIENTOS

Estos trabajos han sido financiados en parte por los proyectos IN-106907, IN-103211 e IN-108709 (PAPIIT, UNAM). Agradecemos al Mtro. A. Low Pfeng su interés en nuestro trabajo de investigación, así como sus comentarios constructivos del manuscrito. E. González Partida, P. Schaaf y E. Escobar Briones (UNAM) proporcionaron amablemente algunas de las muestras que se presentan en las figuras.

## BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez-Arellano, A. y Molina-Cruz, A. 1984. Aspectos paleoceanográficos cuaternarios del Golfo de California, evidenciados por conjuntos de radiolarios: *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*, contribución 475.
- Angelier, J., Colletta, B., Chorowicz, J., Orlieb, L. y Rangin, C. 1981. Fault tectonics of the Baja California Peninsula and the opening of the Sea of Cortez, Mexico: *Journal of Structural Geology*, 3, 347–357.
- Balsam, W.L. y Beeson, J.P. 2003. Sea-floor sediment distribution in the Gulf of Mexico: *Deep-Sea Research*, 50, 1421–1444.
- Banakar, V.K., Pattan, J.N. y Mudholkar, A.V. 1997. Paleooceanographic conditions during the formation of a ferromanganese crust from the Afanasiy–Nikitin seamount, North Central Indian Ocean: geochemical evidence: *Marine Geology*, 136, 299–315.
- Bau, M., Koschinsky, A., Dulski, P. y Hein, J.R. 1996. Comparison of the partitioning behaviors of yttrium, rare earth elements, and titanium between hydrogenetic marine ferromanganese crusts and seawater: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 1709–1725.
- Bea, R.G., Wright S. G., Sicar, P. y Niedoroda, A. W. 1983. Wave induced slides in South Pass Block 70, Mississippi delta: *Journal of Geotechnical Engineering*, 109, 619–644.

- Berger, W.H. y Winterer, E.L. 1974. Plate stratigraphy and the fluctuating carbonate line. En: Hsü, K.J., Jenkyns, H.C. (eds.). *Pelagic Sediments: on Land and under the Sea: Special Publication of The International Association of Sedimentologists*, 1, 11-48.
- Bouma, A.H. 1962. *Sedimentology of some flysch deposits. A graphic approach to facies pattern*: Amsterdam, Elsevier, 168 p.
- Brink, U.T., Twichell, D., Lynett, P., Geist, E., Chaytor, J., Lee, H., Buczkowski, B. y Flores, C. 2009. Regional Assessment of Tsunami Potential in the Gulf of Mexico: Report to the National Tsunami Hazard Mitigation Program, United States Geological Service.
- Buffler, R.T., Locker, S. D., Bryant, W. R., Hall, S. T. y Pilger Jr., R. H., 1980. *Atlas No. 6 Gulf of Mexico*, Ocean Margin Drilling Program: Marine Science International Woods Hole.
- Canet, C., Prol-Ledesma, R.M., Escobar-Briones, E., Mortera-Gutiérrez, C., Lozano-Santa Cruz, R., Linares, C., Cienfuegos, E. y Morales-Puente, P. 2006. Mineralogical and geochemical characterization of hydrocarbon seep sediments from the Gulf of Mexico: *Marine and Petroleum Geology*, 23, 605–619.
- Canet, C., Prol-Ledesma, R.M., Bandy, W.L., Schaaf, P., Linares, C., Camprubí, A., Tauler, E. y Mortera-Gutiérrez, C. 2008. Mineralogical and geochemical constraints on the origin of ferromanganese crusts from the Rivera Plate (western margin of Mexico): *Marine Geology*, 251, 47–59.
- Canet, C. y Prol-Ledesma, R.M. 2010. Infiltración y escape de fluidos sedimentarios en el fondo marino: estructuras y procesos de mineralización: *Macla, Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, 12, 04–09.
- Canet, C., Prol-Ledesma, R.M., Dando, P.R., Vázquez-Figueroa, V., Shumilin, E., Birosta, E., Sánchez, A., Robinson, C.J., Camprubí, A. y Tauler, E. 2010. Discovery of massive gas seepage along the Wagner Fault, Northern Gulf of California: *Sedimentary Geology*, 228, 292–303.
- Cook, H.E., Hine, A.C. y Mullins, H.T. 1983. Platform margin and deep-water carbonates: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Short Course 12, 573 p.
- Cook, H.E. y Mullins, H.T. 1983. Basin margin environment, in Scholle, P.A., Bebout, D.G., Mooreeds, C.H. (eds.), *Carbonate depositional environments*: American Association of Petroleum Geologists, Memoir, 33, 540–617.
- Davies, D.K. 1968. Carbonate Turbidites, Gulf of Mexico: *Journal of Sedimentary Petrology*, 38, (4), 1100–1109.
- De Diego, T. y Douglas, R.G. 1999. Oxygen-related sediment microfabrics in modern “black shales”, Gulf of California, Mexico: *The Journal of Foraminiferal Research*, 29 (4), 453–464.

- Emiliani, C. y Milliman, J.D. 1966. Deep-sea sediments and their geological record: *Earth-Science Reviews*, 1 (2-3), 105–132.
- Enos, P. 1977. Tamabra Limestone of the Poza Rica trend, Cretaceous, Mexico. En: Cook, H.E., Enos, P. (eds.). *Deep-water carbonates environments*: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication, 25, 273–314.
- Enos, P. y Moore, C.H. 1983. Fore-reef slope. En: Scholle, P.A., Bebout, D.G., Moore, C.H. (eds.). *Carbonate Depositional Environments*: American Association of Petroleum Geologists, *Memoir*, 33, 507–538.
- Ewing, M., Ericson, D.B. y Heezen, B.C. 1958. Sediments and topography of the Gulf of Mexico, En: Weeks, L. G. (ed.), *Habitat of oil-A symposium*: American Association of Petroleum Geologists, 995–1053.
- Faust, M.J. 1990. Seismic stratigraphy of the mid-Cretaceous unconformity (MCU) in the central Gulf of Mexico basin: *Geophysics*, 55 (7), 868–884.
- Flügel, E. 2004. *Microfacies of Carbonate Rocks, Analysis, Interpretation and Application*: Germany, Springer-Verlag, 976 p.
- Freeman-Lynde, R.P. 1983. Cretaceous and Tertiary samples dredged from the Florida Escarpment, eastern Gulf of Mexico: *Gulf Coast Association of Geological Societies*, 33, 91–99.
- Freeman-Lynde, R.P. y Ryan, W.B.F. 1985. Erosional modification of the Bahama Escarpment: *Geological Society of the America Bulletin*, 96, 481–494.
- Galloway, W.E., Ganey-Curry, P. y Whiteaker, T.L. 2009. Regional Controls from Temporal and Spatial Distribution of Continental Slope and Abyssal Plain Reservoir Systems of the Gulf of Mexico Basin: Search and Discovery Article, 50226, Adapted from poster presentation at American Association of Petroleum Geologists, Annual Convention, Denver, Colorado, 2009.
- Glasby, G.P. 1988. Hydrothermal manganese deposits in island arcs and related to subduction processes: a possible model for genesis: *Ore Geology Reviews* 4, 145–153.
- Glasby, G.P. 2002. Deep seabed mining: past failures and future prospects: *Marine Georesources and Geotechnology* 20, 161–176.
- Greenman, N.N. y Leblanc, R. J. 1956. Recent marine sediments and environments of northwest Gulf of Mexico: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 40, 812–847.
- Halley, B.J. y Schlager, W. 1983. Alternative diagenetic models for Cretaceous talus deposits, Initial reports of the Deep Sea Drilling Project Site 536, Gulf of Mexico. En: Buffler, R.T, Schlager, W. (eds.), Initial Reports, Deep Sea Drilling Project Leg 77: Washington, Government printing office, 397–408.

- Hansen, A. y Franks, C.A.M. 1991. Characterization and mapping of earthquake triggered landslides for seismic zonation, in *Proceedings of the 4th International Conference on Seismic Zonation*: Stanford, California, 1, 149–195.
- Hay, W.W. 1974. *Studies in paleo-oceanography*: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication, 20, 218 p.
- Hein, J.R., Koschinsky, A., Halbach, P., Manheim, F.T., Bau, M., Jung-Keuk, K. y Lubick, N. 1997. Iron and manganese oxide mineralization in the Pacific. En: Nicholson, K., Hein, J.R., Bühn, B., Dasgupta, S. (eds.), *Manganese mineralization: geochemistry and mineralogy of terrestrial and marine deposits*. Geological Society Special Publication No. 119, pp. 123–138.
- Hollister, C.D. y Nowel, A.R.M. 1991. High Energy Benthic Boundary Layer Experiment, epilogue: *Marine Geology*, 99, 445–460.
- Hunt, D. y Tucker, M.E. 1992. Stranded parasequence and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base-level fall: *Sedimentary Geology*, 81, 1–9.
- Jenkyns, H.C. 1986. Pelagic environments, En: Reading, H.G. (ed.), *Sedimentary environments and Facies*: Oxford, Blackwell Scientific Publications, 343–397.
- Jordan, G.F. y Stewart, H.B. 1959. Continental slope off south-west Florida: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 43, 974–991.
- Kelts, K. y McKenzie, J. 1982. Diagenetic dolomite formation in Quaternary anoxic diatomaceous muds of Leg 44, Gulf of California, Initial Reports, Deep Sea Drilling Project: Washington, Government printing office, 64, 397–408.
- Locker, S.D. y Buffler, R.T. 1984. Comparison of Lower Cretaceous carbonate shelf margins, northern Campeche Escarpment and northern Florida Escarpment, Gulf of Mexico, En: Bally, P.W. (ed.), *Seismic Expression of Structural Styles – A Picture and Work Atlas*: American Association of Petroleum Geologists, *Studies in Geology Series*, 15 (2), 123–128.
- Mero, J.L. 1965. *Mineral Resources of the Sea*: Amsterdam, Elsevier, 312 p.
- Meyers, P.A. 2006. Paleooceanographic and paleoclimatic similarities between Mediterranean sapropels and Cretaceous black shales: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 235, 305–320.
- Milliman, J.D. y Müller, J. 1973. Precipitation and lithification of magnesian calcite in the deep-sea sediments of the eastern Mediterranean sea: *Sedimentology*, 20, 29–45.
- Minero, C.J., Enos, P. y Aguayo, J.E. 1983. *Sedimentation and diagenesis of mid-Cretaceous platform margin, east-central Mexico*: The Dallas Geological Society, 168 pp.
- Mullins, H.T. 1983. Modern carbonate slopes and basins of the Bahamas, En: Cook, H.E., Hine, A.C., Mullins, H.T. (eds.), *Platform Margin and Deepwater Carbonates*: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Short Course 12, Chapter 4.

- Mullins, H.T., Heat, K.C., Van Buren, H.M. y Newton, C.R. 1984. Anatomy of a modern open-ocean carbonate slope: Northern Little Bahama Bank: *Sedimentology*, 31, 141–168.
- Mullins, H.T., Gardulski, A.F. y Hine, A.C. 1986. Catastrophic collapse of the west Florida carbonate platform margin: *Geology*, 14, 167–170.
- Nehring, R. 1991. Oil and gas resources, En: Salvador, A. (Ed.), *The Gulf of Mexico Basin: Geological Society of America, The Geology of North America*, J, 445–494.
- Okita, P.M. 1992. Manganese carbonate mineralization in the Molango District, Mexico. *Economic Geology* 87, 1345–1366.
- Paull, C.K., Spiess, F.N., Curray, J.R. y Twichell, D.C. 1990. Origin of Florida Canyon and the role of spring sapping on the formation of submarine box canyons: *Geological Society of America Bulletin*, 102, 502–515.
- Paull, C.K., Twichell, D.C., Spiess, F.N. y Curray, J.R. 1991. Morphological development of the Florida Escarpment: Observations on the generation of time transgressive unconformities in carbonate terrains: *Marine Geology*, 101, 181–201.
- Pickering, K.T., Stow, D.A.V., Watson, M. y Hiscott, R.N. 1986. Deep water facies, processes and models: A review and classification scheme for modern and ancient sediments: *Earth Science Reviews*, 22, 75–174.
- Poole, F.G., Perry, W.J. Jr., Madrid, R.J. y Amaya Martínez, R. 2005. Tectonic synthesis of the Ouachita-Marathon-Sonora orogenic margin of southern Laurentia: Stratigraphic and structural implications for timing of deformational events and plate-tectonic model, in Anderson, T.H., Nourse, J.A., McKee, J.W., Steiner, M.B., (eds.), *The Mojave-Sonora megashear hypothesis: Development, assessment, and alternatives: Geological Society of America Special Paper*, 393, 543–596.
- Ramsay, A.T.S. 1977. Sedimentological clues to paleo-oceanography, in Ramsay, A.T.S. (ed.), *Oceanic Micropaleontology*: London, Academic Press, 1371–1453.
- Richardson, M.J., Wimbush, M. y Mayer, L. 1981. Exceptionally strong near-bottom flows on the continental rise of Nova Scotia: *Science*, 213, 887–888.
- Salon, S., Crise, A. y Van Loon, A.J. 2008. Dynamics of the bottom boundary layer, in Rebesco, M., Camerlenghi, A. (eds.), *Contourites: Developments in Sedimentology*, 60, 83–98.
- Schlager, W. y Buffler, R.T., Scientific Party of DSDP Leg 7. 1984. Early history of the Gulf of Mexico, Deep Sea Drilling Project Leg 77: *Geological Society of America Bulletin*, 95, 226–236.
- Schlager, W. y James, N.P. 1978. Low-magnesian calcite limestones forming at the deep-sea floor, Tongue of the Ocean, Bahamas: *Sedimentology*, 25, 657–702.

- Seed, H.B. 1968. Landslides during earthquakes due to soil liquefaction: American Society of Civil Engineers, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 94, 1053–1122.
- Shanmugam, G. 2008. Deep-water bottom currents and their deposits, En: Rebesco, M., Camerlenghi, A. (Eds.), *Contourites: Developments in Sedimentology*, 59–81.
- Stow, D.A.V. 1986. Deep Clastic Seas, En: Reading, H.G. (Ed.), *Sedimentary Environments and Facies*: Oxford, Blackwell Scientific Publications, Second edition, 399–444.
- Stow, D.A.V. 1992. *Deep-Water Turbidites Systems*: Oxford, the International Association of Sedimentologists, Blackwell Scientific Publications, 473 p.
- Stow, D.A.V. 1994. Deep-sea processes of sediment transport and deposition, in Pye, K. (ed.), *Sediment Transport and Depositional Processes*: Oxford, Blackwell Science, 257–291.
- Stow, D.A.V, Reading, H.G. y Collinson, J.D. 1996. Deep Seas, in Reading, H.G. (ed.), *Sedimentary environments: Processes, Facies and Stratigraphy*: Oxford, Blackwell Scientific Publications, 395–453.
- Stow, D.A.V., Faugères, J.-C., Howe, J.A., Pudsey, C.J. y Viana, A.R. 2002. Bottom currents, contourites and deep-sea sediments: current state of the art, En: Stow, D.A.V, Pudsey, C.J., Howe, J.A., Faugères, J.-C., Viana, A.R. (Eds.), *Deep-Water Contourites Systems: Modern Drifts and Ancient Series, Seismic and Sedimentary Characteristics*: Geological Society of London, Memoir 22, 7-20.
- Torres, M.E., Bohrmann, G., Dubé, T.E. y Poole, F.G. 2003. Formation of modern and Paleozoic stratiform barite at cold methane seeps on continental margins: *Geology*, 31, 897–900.
- Trask, P.D., Phleger Jr., F.B. y Stetson, H.C. 1947. Recent Changes in Sedimentation in the Gulf of Mexico: *Science*, 14, 460–461.
- Tucker, M.E. y Wright, V.P. 1990. *Carbonate Sedimentology*: Oxford, Blackwell Scientific Publications, 482 p.
- Twichell, D.C., Dillon, W.P., Paull, C.K. y Kenyon, N.H. 1996. Morphology of carbonate escarpments as an indicator of erosional processes, En: Gardner, J. V. Field, M.E., Twichell, D.C. (eds.), *Geology of the United States' Seafloor: The view from GLORIA: USA*, Cambridge University Press, 97–107.
- van Andel, T.H. 1963. Algunos aspectos de la sedimentación reciente en el Golfo de California: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 27(2), 85–94.
- van Andel, T.H., Thiede, J., Sclater, J.G. y Hay, W.W. 1977. Depositional history of the South Atlantic Ocean during the last 125 million years: *The Journal of Geology*, 85, 651–698.

- Varentsov, I.M., Drits, V.A., Gorshkov, A.I., Sivtsov, A.V. y Sakharov, B.A. 1991. Me-Fe oxyhydroxide crusts from Krylov Seamount (Eastern Atlantic): mineralogy, geochemistry and genesis: *Marine Geology*, 96, 53–70.
- Wen, X., De Carlo, E.H. y Li, Y.H. 1997. Interelement relationships in ferromanganese crusts from the central Pacific ocean: their implications for crust genesis: *Marine Geology*, 136, 277–297.
- Wilson, J.L. 1974. Characteristics of carbonate platform margins: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 5815, 810–824.
- Wooster, W.S. 1978. Upwelling Research and Ocean Affairs, En: Bojey, R., Tomczak, M. (Eds.), *Upwelling Ecosystems*: Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 291–300.



# LA EXPLORACIÓN EN EL MAR PROFUNDO DE AMBIENTES EXTREMOS: SISTEMAS HIDROTÉRMICOS

Luis A. Soto<sup>1</sup> y Alejandro Estradas Romero<sup>2</sup>

## RESUMEN

La exploración del mar profundo ha constituido en las cuatro últimas décadas uno de los mayores desafíos para la ciencia y la tecnología modernas. En este ambiente inhóspito se han realizado los descubrimientos de formas de vida y adaptaciones fisiológicas más significativas durante el siglo XX en las llamadas ventilas hidrotermales. Gracias al desarrollo de sistemas robóticos y de sumergibles de investigación, los secretos del mar profundo están siendo paulatinamente desentrañados.

En México la exploración del mar profundo y de los ambientes extremos es aún incipiente. Su estudio requiere de costosa instrumentación oceanográfica y personal altamente capacitado. No obstante nuestra severa dependencia tecnológica, se ha conseguido a través de la cooperación científica internacional, contribuir al conocimiento de uno de los sistemas hidrotermales profundos considerado mundialmente como único: la Cuenca de Guaymas, en el Golfo de California. Mediante estudios interdisciplinarios de ecología, microbiología y geoquímica, se han logrado estimar la diversidad de elementos de la megafauna, su estructura trófica, la identificación de las posibles fuentes de carbono orgánico (autigénico-metanogénico-autotrófico-fósil) así como las diferentes

<sup>1</sup> Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México.

<sup>2</sup> Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. lasg@cmarl.unam.mx, estradas@geofisica.unam.mx.

estrategias tróficas adoptadas por la fauna asociada al sistema hidrotermal. Asimismo, se ha analizado la heterogeneidad de la materia orgánica sedimentaria en torno a sitios activos, originada por los procesos de diagénesis-catagénesis promovidos por condiciones reductoras extremas, la activa biodegradación microbiana, y por fenómenos de bioturbación.

*Palabras clave:* mar profundo, ventilas hidrotermales, cuenca de Guaymas.

## ABSTRACT

In the last fourth decades the exploration of the deep-sea has represented a major challenge to modern science and technology. In this hostile environment some of the most intriguing forms of life and physiological adaptations have been discovered in the past century. Advanced technology applied to underwater remote operated vehicles has progressively unveiled secrets of the deep-sea. In Mexico the progress of deep water research is still limited. The international scientific cooperation programs has allowed the employment of costly and sophisticated underwater instrumentation to study the hydrothermal vent system of the Guaymas Basin in the Gulf of California. Through this effort, significant contributions have been made to the functional ecology of the vent megafauna, its trophic structure and feeding strategies, and the possible organic carbon sources supporting this system. Similarly, light has been shed on the geochemistry of sedimentary organic matter influenced by diagenesis-catagenesis processes at venting sites promoted by microbial degradation, extreme reducing ambient conditions, and bioturbation phenomena.

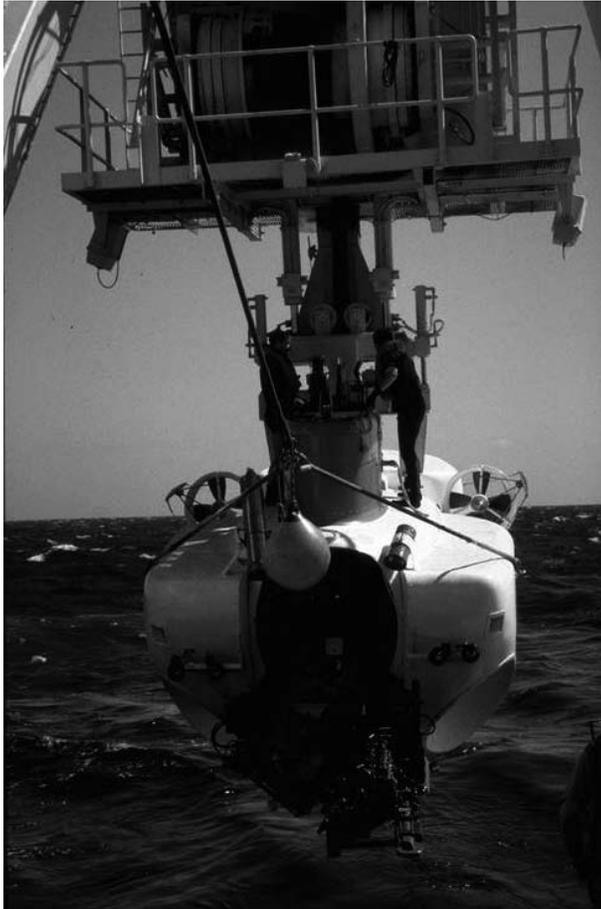
*Keywords:* deep-sea, hydrothermal vents, Guaymas Basin.

## INTRODUCCIÓN

Como un fruto de la cooperación científica internacional enfocada al estudio del océano mundial, México ha logrado participar activamente en la exploración oceanográfica de sus grandes espacios abisales comprendidos en la Zona Económica Exclusiva de ambos litorales (Soto, 2003). Estos espacios abisales corresponden al llamado mar profundo (2000-3000 m). Este ambiente inhospitalario, caracterizado por sus condiciones de obscuridad permanente, temperaturas cerca al punto de congelación, y una presión hidrostática que excede

a las 200 atmósferas, ha representado en las últimas cuatro décadas uno de los mayores desafíos para la ciencia y la tecnología modernas. Sin duda, el acelerado progreso registrado en la ingeniería electrónica combinado con el uso de materiales ligeros y resistentes a altas presiones hidrostáticas, hicieron posible el desarrollo de sofisticadas herramientas de exploración submarina tales como, los sumergibles autónomos y los vehículos robóticos de operación remota (Fig. 1). Gracias al empleo de estas valiosas herramientas, los secretos del mar profundo paulatinamente se han venido develando. En este ambiente único, la oceanografía moderna ha intentado encontrar las respuestas a fenómenos que suceden como consecuencia de la dinámica de la corteza terrestre, como el desplazamiento de las grandes placas tectónicas, los centros de emisión de calor del interior de la corteza, la formación de nuevo piso oceánico y el depósito de minerales estratégicos de alta pureza. Indudablemente, una de las preguntas más intrigantes de este ambiente misterioso es quizás la posibilidad de encontrar el primordio de la vida a partir del cual evolucionaron formas de vida más complejas sobre el planeta Tierra. En las vastas planicies de las Cuencas oceánicas- reconocidas tempranamente como zonas abisales por los exploradores pioneros del siglo XIX- , tuvo lugar en 1977 un descubrimiento crucial de un complejo sistema de vida cerca de las Islas Galápagos, habitado por nuevas formas de vida marina (Corliss et al. 1979; Ballard 1977). Estos habitantes abisales presentaban tan insólitas adaptaciones morfo-fisiológicas, que su estudio requirió la reevaluación de conceptos teóricos sobre la evolución de la vida en los mares, de los mecanismos de especiación hasta ahora conocidos y de la distribución de la vida marina a través del tiempo (Soto y Molina 1986). Actualmente, el progreso de la investigación oceanográfica de mar profundo y la aplicación de modernos enfoques de biología molecular han renovado el debate sobre la búsqueda del ancestro universal de las primeras formas de vida del planeta Tierra en los llamados ambientes extremos. Este nombre deriva de sus condiciones químicas altamente reductoras, de temperaturas superiores a los 300° C, y de la disponibilidad de energía química secuestrada en compuestos minerales contenidos en la corteza terrestre, utilizable en la producción de compuestos orgánicos a través de la quimiosíntesis. Únicamente los microorganismos hipertermofílicos que habitan manantiales geotérmicos (géiseres) y las ventilas hidrotermales en el mar profundo, pueden subsistir con éxito en estos ambientes críticos. Una de las implicaciones principales de este importante fenómeno adaptativo, reside en la proximidad genética de

Figura. 1. Vehículos Submarinos de Investigación ALVIN, NAUTILE, TURTLE y el Robot de Operación Remota TIBURON, empleados en la exploración de la Cuenca de Guaymas, Golfo de California (Soto, L.A.)



estos microorganismos hipertermofílicos con un posible ancestro universal (Baross y Hoffman 1985; Pace 1991) a partir del cual, pudieron haber surgido las tres ramas filogenéticas primarias: Archaea, Bacteria, y Eucarya.

El primer autor, conjuntamente con otros colegas, ha encabezado la exploración del sistema hidrotermal de la Cuenca de Guaymas, Golfo de California, empleando diversos sumergibles autónomos de investigación (ALVIN, NADIR, TORTUGA) y robot de operación remota (TIBURON) (Fig. 1) con el propósito de

Figura. 1. Continúa

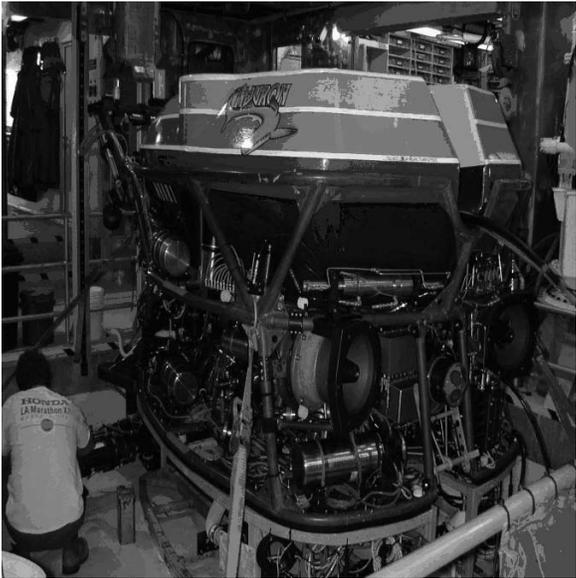
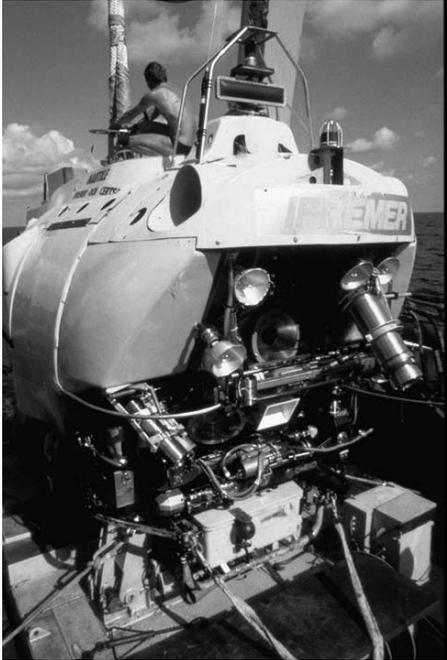


Figura 1. Continúa



estudiar la ecología y biogeoquímica de uno de sistemas biológicos más fascinantes del mar profundo: las ventilas hidrotermales. Por más de dos décadas, el sistema hidrotermal de la Cuenca de Guaymas (Fig. 2) ha sido el foco de estudio de varias expediciones multidisciplinarias (Lonsdale *et al.* 1980; Grassle 1982, 1985; Von Damm *et al.* 1985; Simoneit *et al.* 1992; de la Lanza y Soto 1999; Soto 2009). A continuación se ofrece una breve reseña de la importancia de dicho sistema basada en nuestra propia experiencia.

## CARACTERÍSTICAS DEL MAR PROFUNDO

El mar profundo presenta condiciones físicas de mayor estabilidad que los ambientes someros, expuestos a complejos procesos hidrodinámicos que les confieren una alta variabilidad. En consecuencia, la biodiversidad de la macrofauna del mar profundo, se presume que es reducida y que las variables bióticas, tales como la exclusión competitiva, la división de recursos y la depredación, constituyen factores esenciales que definen la estructura y funcionamiento de las comunidades bénticas, en virtud al limitado aporte de nutrientes. Sin embargo, la exploración reciente de zonas batiales y abisales (> 200m) revela que fenómenos locales originados por el hidrotermalismo, la emanación natural de gas e hidrocarburos del lecho marino, influyen sobre la diversidad y biomasa de componentes faunísticos.

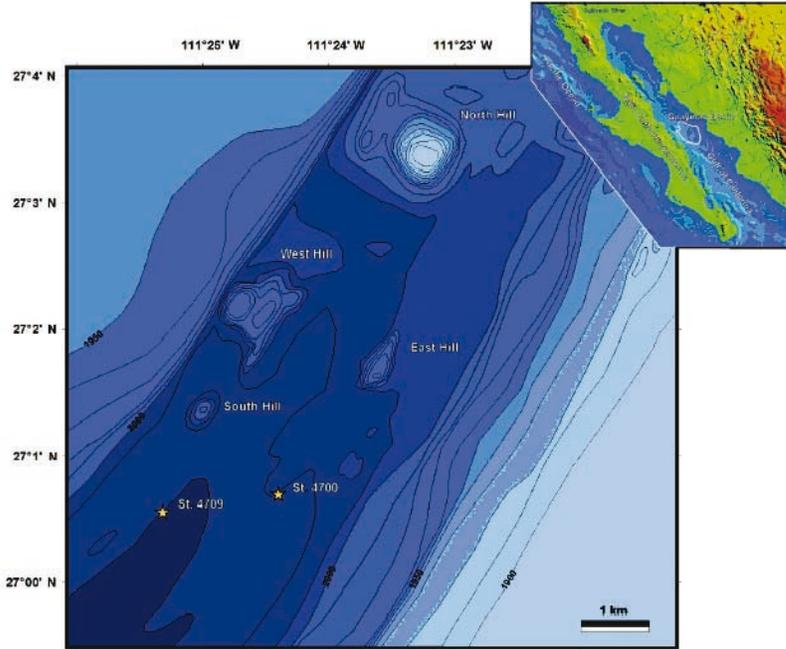
El fenómeno de hidrotermalismo en la Cuenca de Guaymas, está enmarcado por la rica productividad primaria de las aguas superficiales del Golfo de California y una significativa tasa sedimentaria; adicionalmente existe en el lecho marino, un flujo hidrotermal el cual aporta los elementos básicos para la quimiosíntesis por parte de un complejo consorcio microbiano de bacterias sulfo-oxidativas-sulfo-reductoras y metanogénicas.

## SISTEMAS HIDROTERMALES PROFUNDOS

Las ventilas hidrotermales marinas de tipo profundo, se localizan entre los 500 y 4000m y sus fluidos presentan temperaturas de 350 a 405 °C como las reconocidas en zonas de expansión oceánica en las cordilleras centro-oceánicas. También, a diversas profundidades, se encuentran las ventilas frías (*cold-seeps*), que se localizan a lo largo de la plataforma continental; sus emanaciones (principalmente de metano) son de baja temperatura y están asociadas a yacimientos de petróleo. Las características geoquímicas de los fluidos descargados por estas ventilas frías generan la presencia de un ecosistema quimiosintético similar al de las ventilas hidrotermales.

Tarasov et al. (2005), con base en un criterio faunístico a nivel de familias y géneros, dividieron a los sistemas hidrotermales en dos tipos: profundos y someros. Los autores observaron que el cambio brusco de la fauna obligada a un tipo de sistema hidrotermal se da a los 200 m de profundidad. Esta pro-

Figura 2. Localización de la Cuenca de Guaymas en el sector central del Golfo California y registro batimétrico de los sitios hidrotermales activos en el sector sur de la Cuenca.



fundidad, en general, coincide con el cambio brusco de la pendiente de la curva de ebullición del agua de mar, registrada a una presión de 20 bares (Bischoff y Rosenbauer 1984), con el límite entre la plataforma y talud continental, y con las diferencias en la estructura y composición de las comunidades de organismos.

## DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LOS SISTEMAS HIDROTERMALES PROFUNDOS

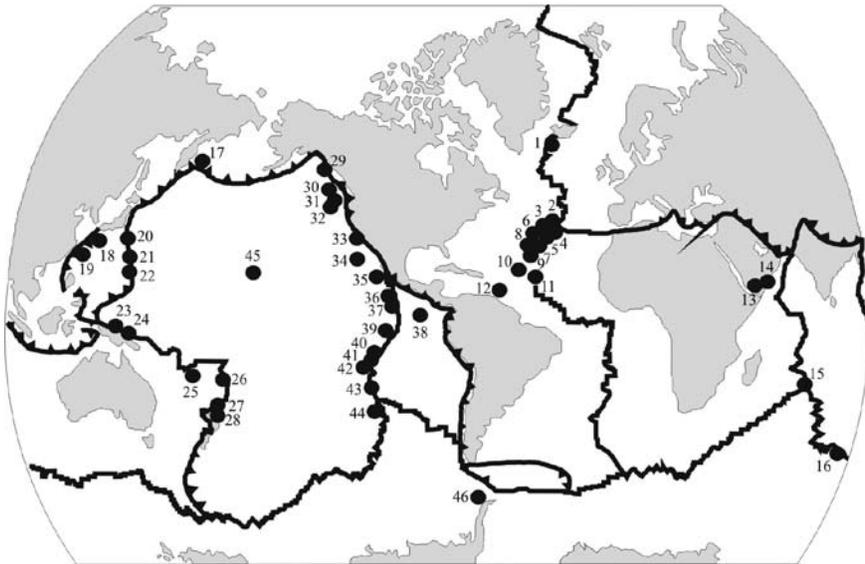
La mayoría de las ventilas hidrotermales de temperatura alta, se encuentran asociadas con los límites de placas activas como son: los centros de dispersión, zonas de fractura y en los centros de dispersión trasarco. También se registran ventilas de temperatura baja asociadas a montes submarinos como en las islas

Hawai e Islas Society. La mayoría de estos sitios están distribuidos en los océanos Pacífico y Atlántico (Fig. 3). Sin embargo, también se encuentran en el océano Índico y el Mar Rojo. Algunas ventilas, como las de la Cuenca de Guaymas en el extremo norte de la Dorsal del Pacífico Norte y en las de la Dorsal Gorda en la parte oriental del Pacífico fluyen a través de los sedimentos, la mayoría de las ventilas oceánicas brotan a través de las rocas basálticas descubiertas.

### ORIGEN Y CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS HIDROTERMALES PROFUNDOS

Una ventila hidrotermal se forma a partir de la interacción entre una fuente de calor, un cuerpo rocoso permeable y un fluido, en donde se establece una celda convectiva que consta de un sistema de recarga, circulación y descarga (Fig. 4). La zona de recarga, es una zona difusa y dispersa. El agua de mar desciende a través de ésta zona. Se calienta a temperaturas de 250° a 450° C y reacciona cada vez más en su descenso en virtud del aumento de las condiciones de temperatura. En la zona de reacción, o de máximo calentamiento del agua de

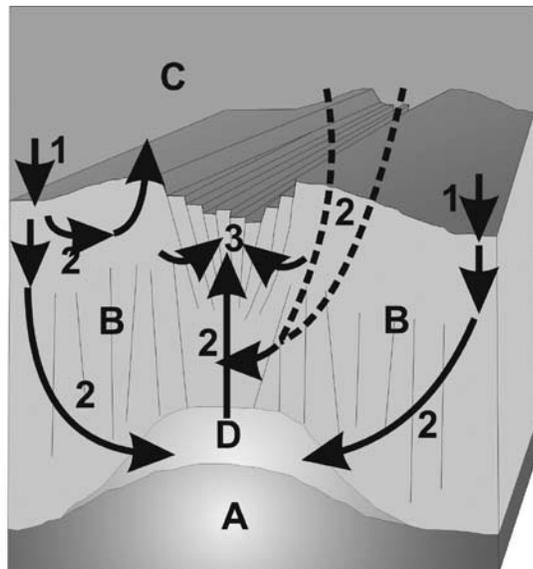
Figura. 3. Mapa representativo de las principales Dorsales centro-oceánicas y sitios de manantiales hidrotermales activos (Tarasov et al. 2005).



mar (>350° C), los fluidos adquieren la composición química característica de “miembro final”, y es en la zona de descarga en donde los fluidos son expulsados a través de fallas o fracturas.

Los sistemas hidrotermales se clasifican de acuerdo con su ambiente tectónico, en seis tipos: 1)- Sistemas libres de sedimento cercanos a los ejes de dispersión en las placas tectónicas, 2) Sistemas cubiertos de sedimentos en centros de dispersión, 3) Sistemas lejanos del eje en los flancos de los centros de dispersión y dentro de las cuencas oceánicas, 4) Sistemas asociados con cuencas de trasarco y centros de dispersión de trasarco, 5) Sistemas en puntos calientes y 6) Sistemas asociados a zonas de subducción.

Figura. 4. Ilustración esquemática de las tres principales etapas de la circulación hidrotermal submarina a través de la corteza oceánica recién formada (modificada de Alt 1995).



- |                            |                     |
|----------------------------|---------------------|
| Sistema hidrotermal        | Celda convectiva    |
| A. Fuente de calor         | 1. Zona de recarga  |
| B. Cuerpo rocoso permeable | 2. Circulación      |
| C. Fluido acuoso           | 3. Zona de descarga |
| D. Zona de reacción        |                     |

En los sistemas libres de sedimento se encuentran los humeros negros (Black Smokers) que son ventilas con temperaturas elevadas ( $350^{\circ}\text{C}$ ) enriquecidos con sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), manganeso (Mn) y otros metales de transición como el hierro, el zinc, el cobre, el plomo, el cobalto y el aluminio. Estos compuestos dan el característico color negro al fluido (Figura 5a). Los llamados humeros blancos (White Smokers) presentan chimeneas más pequeñas con fluidos de menor intensidad que la de los humeros negros. Estas chimeneas emiten fluidos con temperaturas intermedias ( $250^{\circ}$  a  $300^{\circ}\text{C}$ ). A estas temperaturas, la sílice, la anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) y la barita ( $\text{BaSO}_4$ ) precipitan como partículas blancas (Figura 5b).

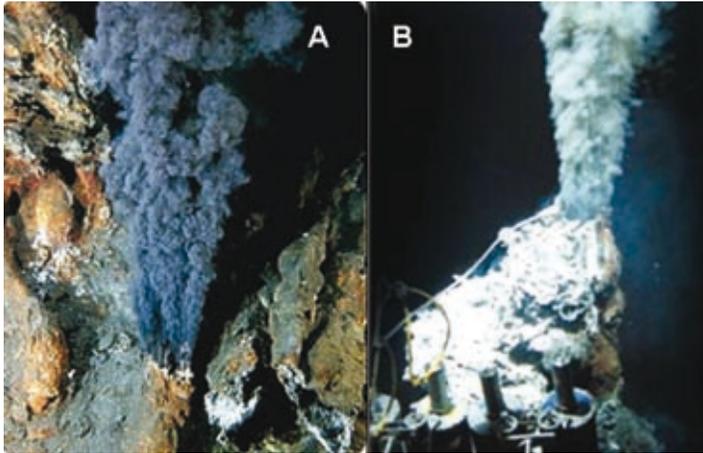
## PROPIEDADES QUÍMICAS DEL FLUJO HIDROTHERMAL

Los sistemas hidrotermales de mar profundo están formados por agua de mar (alcalina, oxidante, rica en sulfatos ( $\text{SO}_4^{=}$ ) y magnesio, con concentraciones de metales del orden de  $10^2$  o  $10^3\ \mu\text{M}$ ). Todas las ventilas hidrotermales tienen una composición química diferente cuya persistencia en tiempo se considera efímera (de minutos a años). La alcalinidad en muchos casos resulta en una "alcalinidad negativa" o con exceso de protones, mientras que en sitios sedimentados que producen amoníaco y la disolución del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) debido a la descomposición térmica de la materia orgánica, dan lugar a alcalinidades elevadas con relación al agua de mar; por lo tanto, los valores de pH son bajos (2 a 5.9) debido a la precipitación de los sulfuros de diferentes metales y a las reacciones de formación de minerales en la zona de alta temperatura. Los fluidos hidrotermales están enriquecidos con nutrientes y metales pesados como son: hierro, manganeso, cobre, zinc, plomo, cobalto, aluminio, cadmio, plata, litio disuelto, potasio, cesio, berilio, calcio, boro, arsénico, selenio, bario, y rubidio.

## GASES

Los fluidos de las ventilas hidrotermales contienen gases disueltos en concentraciones más elevadas que las del agua de mar (Tabla 1). Con frecuencia los manantiales están enriquecidos con gas metano ( $\text{CH}_4$ ) e hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), que es el gas más abundante. Algunos fluidos tienen niveles de  $\text{CO}_2$  menor o igual a los presentes en el agua de mar ( $\sim 2.5\ \text{mmol kg}^{-1}$ ). Sin em-

Figura 5. Ventiladas hidrotermales con flujos de color negro (A) y blanco (B) causados por la alta concentración de sulfuro de hidrógeno, manganeso y metano en el primer caso, y sulfatos de calcio y de barita en el segundo. (<http://www.who.edu>; <http://astrobiología.astroseti.org/astrobio>).



bargo, muchos fluidos tienen concentraciones tan elevadas como 18 mmol/kg. El sulfuro de hidrógeno es el más abundante de las especies del azufre presente en los fluidos hidrotermales y supera al  $\text{CO}_2$ . El amonio se encuentra en cantidades elevadas, particularmente en sedimentos de manantiales de temperatura alta como los localizados en la Cuenca de Guaymas, con concentraciones superiores a 15.6 mM. El amonio se origina debido a la descomposición de la materia orgánica.

Los gases tienen un origen magmático. Sin embargo, estos gases pueden ser el resultado de: la interacción agua-roca durante la filtración inicial del agua en la corteza, la reacción con los sedimentos, o procesos biogénicos.

## DEPÓSITOS MINERALES

La formación de depósitos en el fondo marino es mineralógicamente compleja y se clasifican en: 1) sulfuros, divididos en sulfuro-sulfato, sulfato-sílice y sulfuro-carbonato (como en la Cuenca de Guaymas, donde la calcita es un mineral dominante) y 2) diferentes tipos de óxidos de hierro-manganeso-sílice.

La formación de una chimenea comienza cuando los fluidos hidrotermales que contienen concentraciones elevadas de metales (hierro, cobre y zinc) y ricos en sulfuros de alta temperatura, se mezclan con el agua fría y alcalina de alrededor y causa la precipitación de los sulfuros de metal y estos son oxidados rápidamente en forma de partículas.

Haymon *et al.* (1993) propusieron el primer modelo de cono de la formación de las chimeneas en los humeros negros (Fig. 6). La primera etapa del crecimiento de la chimenea se da por la precipitación de una anhidrita (sulfato de calcio,  $\text{CaSO}_4$ ) quebradiza y porosa alrededor de la salida de los fluidos. La anhidrita precipita debido a la presencia del calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) en los fluidos termales y a los sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) del agua de mar circundante con una temperatura mayor a  $150^\circ\text{C}$ . Las paredes aislantes de anhidrita y los fluidos hidrotermales aislados del agua de mar circundante, dan como resultado, en la zona interna de la chimenea, la deposición de la calcopirita ( $\text{CaFeS}_2$ ) en temperatura alta. En algunos modelos descriptivos del crecimiento de las chimeneas en los humeros negros, involucran un ensamble anticipado de calcopirita, pirrotita (escasa en los humeros blancos) y anhidrita a temperaturas elevadas seguidas de la piritita y esfalerita a temperaturas más bajas. El flujo horizontal de los fluidos a través de las paredes de la chimenea, se mantiene en esta etapa hasta que los espacios de los poros se llenan de anhidrita de cobre y de otros minerales de sulfuro de hierro. Cuando las paredes externas

**Tabla 1. Características físicas del fluido hidrotermal de algunas ventilas profundas.**

Gases (mM)	Agua de mar	Sureste de DJF	Segmento Axial, Centro DJF	Endeavour, DJF	Dorsal del Atlántico	Cuenca de Guaymas
$\text{CO}_2$	2.3	3.9-4.5	50-285	11.6-18.2	n. d.	16-24
$\text{NH}_4$	<0.01	n. d.	n. d.	1.64-0.95	n. d.	10-16
$\text{H}_2\text{S}$	0	3.5	7.0	3.2-608	5.9	3.8-6.0
$\text{CH}_4$	0.0003	82-118	25-45	1,800-3,400	n. d.	2,000-6,800
$\text{H}_2\text{O}$ mar	0.0003	335	25-80	160-420	n. d.	n. d.

n. d. = no determinado, DJF = Dorsal de Juan de Fuca.

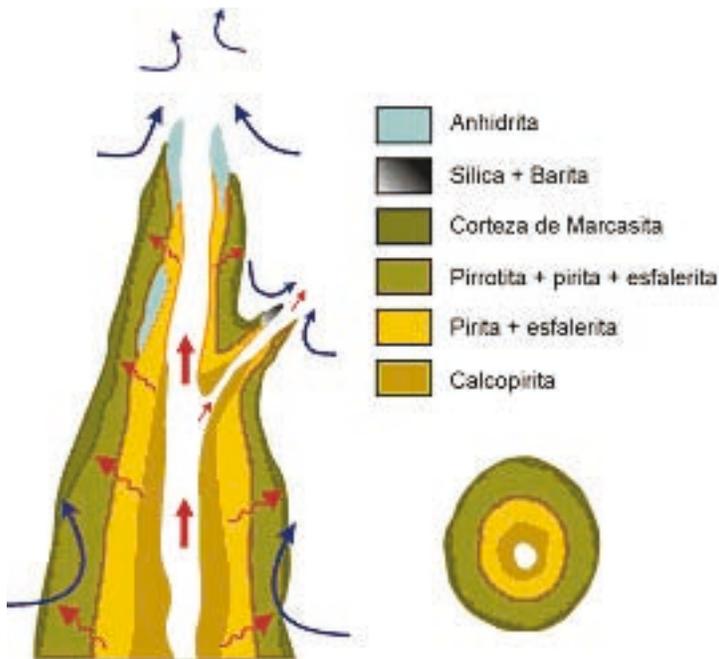
de anhidrita se enfrían a temperaturas inferiores a 150° C, la anhidrita comienza a disolverse de nuevo en el agua de mar.

Algunas chimeneas de los humeros blancos están formadas casi exclusivamente de esfarelita y parecen haber tenido una historia de crecimiento más abrupta, con un inicio en temperaturas elevadas (250° C) que son las típicas chimeneas de sílice-sulfato-sulfuro. Muchas chimeneas también contienen una serie de trazas (galena, anglesita y sulfosales de plomo, plata, arsénico y antimonio), minerales que son característicamente asociados con manantiales de temperatura baja.

### SISTEMA HIDROTHERMAL DE LA CUENCA DE GUAYMAS

La Cuenca de Guaymas representa uno de los segmentos del centro de dispersión del piso oceánico situado a lo largo de la codillera meso-oceánica del océa-

Figura 6. Diagrama esquemático de la zonación mineral en una sección transversal de una chimenea típica de un humero negro. Las flechas indican la dirección inferida del flujo del fluido (Haymon et al. 1993).



no Pacífico Oriental, que se extiende de norte a sur siguiendo el borde Este de la placa tectónica del Pacífico. A lo largo de esta cordillera, por lo menos 7 sitios se han descubierto con actividad hidrotermal en profundidades promedio de 2500 m. La Cuenca de Guaymas, situada en el centro del Golfo de California, acumula una rica carga de sedimentos biogénicos derivados esencialmente de detritus terrígeno (Calvert 1966; Shraeder 1982), cuyo espesor se estima en 500 m. La Cuenca de Guaymas representa un rasgo topográfico producido por la dinámica de un intenso proceso tectónico asociado a mecanismos de separación del piso oceánico, que ocasionan un desplazamiento anual de 6.3 cm de la península de Baja California con dirección noroeste (Klitgord *et al.*, 1974). En este escenario geológico se origina una compleja comunidad biótica caracterizada por flujos hidrotermales de alta temperatura (> 300 ° C) ricos en compuestos reducidos de azufre, y una cadena trófica sustentada por la quimiosíntesis microbiana. Dicha comunidad estructurada por exuberantes colonias de gusanos vestimentíferos (*Riftia pachyptyla*), almejas gigantes (*Vesycomya gigas*), y tapetes bacterianos (Beggiatoa) (Soto y Grassle 1988), se establece sobre la superficie de depósitos polimetálicos o en las zonas próximas al flujo hidrotermal (ver Fig. 6); estos depósitos una vez consolidados, adoptan formas caprichosas de domos, pilares, o pagodas de más de 10 m de altura sobre el fondo marino (Fig. 7). Otra característica destacable en la Cuenca de Guaymas, es la presencia en sus sedimentos de petróleo de origen termogénico. La mezcla compleja de hidrocarburos alifáticos y aromáticos es formada por la alteración hidrotermal de la gruesa capa de materia orgánica sedimentaria (Simoneit y Lonsdale 1982; Simoneit *et al.* 1992).

Varios años tuvieron que transcurrir para responder la paradoja de conciliar la considerable biodiversidad y biomasa hidrotermal, en ambientes profundos inhóspitos, pobres en nutrientes, con concentraciones altas de compuestos tóxicos capaces de bloquear instantáneamente el metabolismo respiratorio de especies marinas, y sobre todo, temperaturas extremas, que dislocan la replicación del ADN. La respuesta a tal paradoja surgió a partir del reconocimiento de la quimiosíntesis como una ruta alterna en la elaboración de productos orgánicos en ausencia de luz, a partir de la energía química contenida en elementos como el S<sub>2</sub>, Fe y el Mn. Solo las bacteria quimiolitotróficas e hipertermofílicas son capaces de tornar en su beneficio condiciones extremadamente adversas como las descritas. Estos microorganismos utilizan como substrato para la fijación del carbón y la asimilación del nitrógeno inorgánico, elementos acepto-

res de electrones como  $H_2S$ ,  $Fe$ ,  $S_2O_3$ ,  $S^0$  en sus formas libres,  $NH_4$ , e incluso metano. Es a través de la quimiosíntesis, que la energía necesaria para soporta el metabolismo basal y el crecimiento bacteriano, se obtiene de la oxidación enzimática de los elementos antes citados. Como resultado de este importante proceso, los microorganismos constituyen los productores primarios de la cadena trófica (Jannash y Wirsen 1979) que sostienen formas exuberantes de vida en el mar profundo, análogas al de un oasis en una zona desértica.

En términos evolutivos, las bacterias quimiosintéticas han desarrollado complejas estrategias adaptativas que les han permitido prosperar exitosamente ya sea como formas de vida libre en la columna del agua, como costras o tapetes adheridos a la candente superficie externa de los depósitos hidrotermales o sobre los sedimentos. También se les conoce como endosimbiontes alojados en los tejidos (trofosoma o branquias) de los gusanos y almejas

**Figura 7.** Depósito polimetalico hidrotermal en forma de pagoda compuesto principalmente de anhidrita, con racimos coloniales del gusano tubícola *Riftia pachyptila* en su base.(Soto. L.A.. DSRV/ALVIN .WHOI)



gigantes. En esta relación simbiótica, las bacterias sulfo-oxidativas sintetizan compuestos orgánicos útiles para el metabolismo del huésped, en tanto que éste, cede los elementos inorgánicos altamente reducidos que absorbe del medio externo (flujo hidrotermal).

## ESTUDIO ECOLÓGICO DE LA CUENCA DE GUAYMAS

Nuestra más reciente investigación en el sistema hidrotermal de la Cuenca de Guaymas se ha centrado en torno a cuatro temas: 1. La composición de la comunidad de la macrofauna asociada directamente al sistema, así como de los componentes abisales que mantienen interacción con esta comunidad. 2. La estructura de la trama trófica que se establece entre los diferentes componentes faunísticos. 3. La naturaleza de la materia orgánica que se deposita en los sitios hidrotermales activos y 4. La bioacumulación de metales e hidrocarburos en tejidos de las especies centinelas.

La comunidad hidrotermal que se establece sobre los depósitos polimetálicos es dominada espacialmente por las densas ( $> 50 \text{ ind/m}^2$ ) colonias de *Riftia pachyptila* cuyos tubos pueden alcanzar hasta 2 m de longitud. Las grietas y superficies de las estructuras por las que fluye el flujo hidrotermal es sumamente competido por bacterias y gusanos poliquetos termofílicos cuya diversidad supera las 20 especies. En los sedimentos adyacentes a las chimeneas o ventilas, el flujo es más difuso y de menor temperatura. Sobre estos sedimentos se establecen colonias de gusanos vestimentíferos menos exuberantes compuestas por las especies *Escarpia spicata* y *Lamellibranchia barhami*. Ambas especies, al igual que *R. pachyptila*, también alojan en sus tejidos bacterias sulfo-oxidativas cuya densidad alcanza hasta  $3.7 \times 10^9$  procariontes/g. En estos substratos lodosos es frecuente el hallazgo de almejas de *Vesicomya gigas* y *Solemya reidi*, que destacan por su talla ( $\sim 30$  cm de longitud) y que alojan preferentemente en sus branquias, endosimbiontes metanogénicos.

Existen otros elementos faunísticos que por su reducido tamaño o elusivo comportamiento, han sido sólo detectados en imágenes videográficas o de fotografía fija. Tal es el caso de criaturas abisopelágicas como los camarones nematocarinidos, peces zoarcidos, y los habitantes del fondo marino como los cefalópodos *Graneledone* sp, y el cangrejo *Neolithodes diomedea*. Todos estos habitantes forman parte de una fauna abisal que no es estrictamente

dependiente del proceso hidrotermal, pero que mantiene cierta interacción que requiere ser examinada.

En la trama trófica de la comunidad hidrotermal se han reconocido cuatro diferentes categorías de nutrición: 1. Endosimbiontes. 2. Filtradores. 3. Raspadores. 4. Carroñeros. La relación funcional entre estos eslabones tróficos puede ser dilucidada a través de la identificación de las fuentes de carbono orgánico que sostiene al sistema hidrotermal y la forma que éste es transferido progresivamente desde los productores primarios hasta los heterótrofos.

En la Cuenca de Guaymas existen cuatro fuentes potenciales de carbono orgánico. La fuente esencial es el carbono autigénico producto del proceso quimiosintético. De igual forma no se pueden descartar fuentes alternas como el carbono de origen metanogénico y el contenido en las moléculas de hidrocarburos fósiles. De la rica producción de carbono fotosintetizado por el fitoplancton en la capa eufótica del Golfo de California, se estima que solo una reducida proporción de 4 a un 10 % es transferida hacia el fondo marino (Suess 1980; Jahnke et al. 1982). Mediante el empleo de biotrazadores de carbono y nitrógeno isotópicos ( $\delta_{13}\text{C}$  y  $\delta_{15}\text{N}$ ) ha sido posible determinar el flujo de carbono a través de los distintos componentes faunísticos del sistema hidrotermal de la Cuenca de Guaymas (Soto 2009).

En virtud a la complejidad de las fuentes de carbono orgánico presentes en la Cuenca de Guaymas se considera imperativo analizar también la distribución, concentración y la alteración de la materia orgánica sedimentaria en relación a la actividad hidrotermal. Nuestra estimación de la proporción de C:N:P (Número de Redfield) de los sedimentos obtenidos en la proximidad de sitios activos ( $> 29^\circ\text{C}$ ) revela una notable capacidad del sistema hidrotermal de exportar carbono quimiosintético hacia el ambiente abisal (de la Lanza y Soto 1999).

El sistema hidrotermal de la Cuenca de Guaymas es un sitio idóneo para emprender estudios interdisciplinarios de ecología, biogeoquímica y geofísica que nos permitirá ampliar nuestro conocimiento sobre los procesos que tienen lugar en los centros de dispersión del piso oceánico (Ayala-Castañares y Knox 2000). Recientemente en el 2009 se incluyó a la Cuenca de Guaymas dentro de las Áreas Naturales Protegidas de México, lo cual confiere a nuestra comunidad científica, un compromiso de mayor participación en el estudio sobre cómo evoluciona el sistema y una atención especial para prevenir cualquier perturbación en su equilibrio natural, causada por la extracción indiscriminada de sus componentes vivos o minerales.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los líderes científicos de las expediciones realizadas a bordo de los B/Os ATLANTIS, NADIR, LANEY CHOUEST y HORIZON a través de los cuales se obtuvo valiosos materiales biológicos, sedimentarios y videográficos de la Cuenca de Guaymas en el Golfo de California. Se agradece también a C. Illescas la revisión editorial de este manuscrito.

## REFERENCIAS

- Alt, J. C. 1995. Subseafloor processes in Mid-Ocean Ridge hydrothermal systems. In: Humphris, S., R. Zierenberg, L. Mullineaux & R. Thomson (Eds.). *Seafloor Hydrothermal Systems: Physical, Chemical, Biological, and Geological Interactions*. Geophysical Monograph 91, American Geophysical Union, Washington, D.C.: 85-114.
- Ayala-Castañares, A. y R. Knox. 2000. Opportunities and challenges for Mexico-U.S. cooperation in the ocean sciences. *Oceanography* vol. 13 (3): 79-82.
- Ballard, R. D. 1977. Notes on a major oceanographic find. *Oceanus* 20 (3): 35-44.
- Baross, J. A. y S. E. Hoffman. 1985. Submarine hydrothermal vents and associated gradient environments as sites for the origin of life. *Origins of Life*. 15:327-345.
- Bischoff, J. L. y R. J. Rosenbauer. 1984. The critical point and two-phase boundary of seawater, 200–500° C. *Earth Planetary Science Letters* 68: 172–180.
- Calvert, S. E. 1966. Origin of diatom-rich varved sediments from the Gulf of California. *Journal of Geology* V: 546-565.
- Corliss, J. B., J. Dymond, L. I. Gordon, J. M. Edmond, R.P. Von Herzen, R. D. Ballard, K. D. Green, A. Williams, K. Bainbridge, K. Crane y T. H. van Handel. 1979. Submarine thermal springs on the Galapagos Rift. *Science* 203: 1073-1083.
- de la Lanza-Espino, G. y L. A. Soto. 1999. Sedimentary geochemistry of hydrothermal vents in Guaymas Basin, Gulf of California, Mexico. *Applied Geochemistry* 14: 499-510.
- Grassle J. F. 1982. The biology of hydrothermal vents: A short summary of recent findings. *Marine Technology Society*. J. 16: 33-38.
- . 1985. Hydrothermal vents animals: Distribution and biology. *Science* 229: 713-717.
- Haymon, R. M., D. J. Fornari, K. L. Von Damm, M. D. Lilley, M. R. Perfit, J. M. Edmond, W. C. Shank, R.L. Lutz, J.M. Grebmeier, S. Carbotte, D. Wright, E. MacLaughlin, M. Smith,

- N. Beedle y E. Olson. 1993. Volcanic eruption of the mid-ocean ridge along the East Pacific Rise crest at 9° 45-52' N: direct submersible observations of subsuelo marino phenomena associated with an eruption event in April, 1991. *Earth and Planetary Science Letters* 119: 85-101.
- Jahnke, R. A, S. T. Emerson, y J. W. Murray. 1982, A model of oxygen reduction, denitrification, and organic matter mineralization in marine sediments. *Limnology and Oceanography* 27: 610-623
- Jannash, H. W y C. O. Wirsen. 1979. Chemosynthetic primary production at East Pacific seafloor spreading centers. *BioScience* 29: 592-598
- Klitgord K. D., J. D., J. L. Mudie, Bischoff y T. L. Henyey. 1974. Magnetic anomalies in the northern and central Gulf of California. *Geological Society of America Bulletin* 85: 815-820.
- Lonsdale P. J., J. L. Bischoff, V. M. Burns, M. Kastner y R.E. Sweeney. 1980. A high-temperature thermal deposit on the seabed at a Gulf of California spreading center. *Earth Planet Science Letter* 49: 4-20.
- Pace, N. R. 1991. Origin of life-facing up to the physical setting. *Cell* 65: 531-533
- Schraeder, H. 1982. Diatom biostratigraphy and laminated diatomaceous sediments from the Gulf of California, Deep-sea Drilling Project Leg 64, In Curray, J.R, et al. *Initial Reports of the Deep-sea Drilling Project* vol. 64: 973-98.
- Simoneit, B. R. T. y P. F. Lonsdale. 1982. Hydrothermal petroleum in mineral mounds at the seabed of Guaymas Basin. *Nature* 295: 198-202.
- Simoneit B. R. T., R. N. Leif, A. A. Sturz, A. E. Sturdivant y J. M. Gieskes. 1992. Geochemistry of shallow sediments in Guaymas Basin, Gulf of California: Hydrothermal gas and oil migration and effects of mineralogy. *Organic Geochemistry* 18 (6): 765-784.
- Soto, L. A. y J. F. Grassle. 1988. Megafauna of hydrothermal vents in Guaymas Basin, Gulf of California, Joint Oceanographic Assembly (Abstract 488. IABO): 105.
- Soto, L. A. y A. Molina Cruz. 1986. Exploración submarina de ventilas hidrotermales en la Basin de Guaymas. *Ciencia y Desarrollo* 67 (XII): 17-26.
- Soto, Luis. A. 2003. Research of Extreme Environments in the Deep- Sea. In: *Agustín Ayala Castañares: universitario, impulsor de la investigación científica* (Ed. Luis A. Soto). Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Univ. Nal. Autónoma de México.: 311-318.
- Soto, Luis A. 2009. Stable carbon and nitrogen isotopic signatures of megafauna associated with the deep-sea hydrothermal vent system of Guaymas Basin, Gulf of California. *Deep-Sea Research II* 56: 1675-1682.
- Suess, E., 1980. Particulate organic carbon flux in the oceans-surface productivity and oxygen utilization. *Nature* 288: 260-263.

- Tarasov, V. G., A. V. Gebruk, A. N. Mironov y L. I. Moskalev. 2005. Deep-sea and shallow-water hydrothermal vent communities: two different phenomena? *Chemical Geology* 224: 5-39.
- Von Damn, K.L, J.M. Edmond, C.J. Measures, B. Grant. 1985. Chemistry of submarine hydrothermal solutions at Guaymas Basin, Gulf of California. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 49: 2221-2237.



# LA EXPLORACIÓN DE LAS AGUAS PROFUNDAS DEL PACÍFICO MEXICANO: EL PROYECTO TALUD

Pablo Zamorano,<sup>1</sup> Michel E. Hendrickx,<sup>2</sup> Nuria Méndez,<sup>2</sup>  
Samuel Gómez,<sup>2</sup> David Serrano,<sup>3</sup> Hugo Aguirre,<sup>4</sup> Juan Madrid,<sup>5</sup>  
Francisco Neptalí Morales-Serna<sup>6</sup>

## RESUMEN

El proyecto TALUD tiene como objetivo estudiar las comunidades de invertebrados y de peces asociadas con el talud continental del Pacífico mexicano. Desde 1989 y has-

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Ecología, Periférico Sur 5000, Col. Insurgentes Cuicuilco, Delegación Coyoacán, 04530, México, D.F. Correo electrónico: pzamora@ine.gob.mx.

<sup>2</sup> Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Unidad Académica Mazatlán, Universidad Nacional Autónoma de México, Joel Montes Camarena s/n, Mazatlán 82040, Sinaloa, México. Correo electrónico: michel@ola.icmyl.unam.mx; nuri@ola.icmyl.unam.mx; samuelgomez@ola.icmyl.unam.mx.

<sup>3</sup> Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Autónoma de Sinaloa, Paseo Claussen s/n, Mazatlán 82000, Sinaloa, México. Correo electrónico: davidse65@yahoo.com.

<sup>4</sup> Instituto Nacional de la Pesca, Centro Regional de Investigación Pesquera-Veracruz, Ejército Mexicano 106, Col. Ex Hacienda Ylang Ylang, Boca del Río, Veracruz, C.P. 94298. Correo electrónico: haguirre@ola.icmyl.unam.mx.

<sup>5</sup> Instituto Nacional de la Pesca, Centro Regional de Investigación Pesquera-Mazatlán, Calzada Sábalo-Cerritos s/n, Apartado postal 1177, Mazatlán, Sinaloa, México. Correo electrónico: juanchomevera@yahoo.com.mx.

<sup>6</sup> Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Unidad Académica Mazatlán, Universidad Nacional Autónoma de México, Joel Montes Camarena s/n, Mazatlán 82040, Sinaloa, México. Correo electrónico: neptalims@hotmail.com.

ta la fecha se han realizado 13 campañas oceanográficas a bordo del B/O "El Puma", recorriendo las aguas del Golfo de California y de la porción suroeste del Pacífico de México, entre Jalisco y Guerrero. Durante las campañas se muestreó fauna epibentónica, endobentónica y pelágica. Se recolectaron datos y muestras en la columna de agua y en los sedimentos. Entre los resultados del proyecto, se cuenta con 63 publicaciones para las cuales se ha tomado parcial o totalmente información de las campañas y se han logrado identificar 344 especies de varios grupos taxonómicos que se presentan en el manuscrito, con amplias posibilidades de que este número aumente en la medida que se vayan analizando todas las muestras. Hoy por hoy, estas muestras y los datos asociados representan el mayor conjunto de datos ambientales y faunísticos jamás obtenido en aguas profundas en la Zona Económica Exclusiva (ZEE) del Pacífico mexicano. En conjunto, los resultados de esta aportación justifican la importancia de continuar con el desarrollo de los cruceros oceanográficos del proyecto, ya que esto es sólo una pequeña parte del conocimiento que tenemos que conseguir en el contexto del estudio de las aguas profundas en México, pues su conocimiento adecuado puede reposicionar a México como un país megadiverso. Este proyecto ha sido, es y seguirá siendo una fuente importante de información que permitirá incrementar nuestro conocimiento acerca de los ecosistemas profundos de la ZEE de México. Sin embargo, considerando que la zona marina con profundidades mayores a 1000 m equivale aproximadamente a 87 % de esta ZEE, la labor restante es gigantesca y requerirá de una política decidida en materia de exploración del mar profundo.

Palabras clave: meiofauna, macrofauna, peces, mar profundo, zona del mínimo de oxígeno, Golfo de California, Pacífico mexicano, proyecto TALUD

## ABSTRACT

The objective of the TALUD is to study the communities of invertebrates and fishes inhabiting the Mexican Pacific continental slope. Since 1989 and to date 13 oceanographic cruises have been organized aboard the R/V "El Puma", to sample the Gulf of California and the southwestern portion of the Pacific coast of Mexico, from Jalisco to Guerrero. During the oceanographic cruises, specimens of the epibenthic, endobenthic and pelagic fauna were collected, together with sediments samples. Parameters were also measured in the water column. Up to now, 63 published or in process contributions containing partial or total results from the cruises have been performed. The chapter contains 344 species belonging to different taxonomic groups. This number will increase after processing more. The series of samples obtained during the project is by far the largest data set ever obtained dealing with the deep-water environment and fauna in the Exclusive

Economic Zone (EEZ) of the Mexican Pacific. Overall, the results of the present contribution fully justifies the need for continuing the development of oceanographic cruises within the TALUD project, since as this represents only is just a small part of the knowledge we need to gather as far as Mexico deep-water ecosystems are concerned. Only through the full knowledge of this habitat will be repositioned to Mexico as a megadiverse country. This project has been, is and will remain an important source of information that will increase our knowledge of deep ecosystems of Mexico EEZ. However, considering that the marine area deeper than 1000 m accounts for approximately 87% of the EEZ, the remaining amount of work is challenging and will require a vigorous policy in the matter of deep sea exploration.

Keywords: meiofauna, macrofauna, fishes, deep-sea, minimum oxygen zone, Gulf of California, Mexican Pacific, TALUD project.

## INTRODUCCIÓN

### El mundo de las aguas profundas

A pesar de representar más del 92 % de la superficie de los océanos, las zonas profundas han sido las menos exploradas. La mayoría de las actividades humanas relacionadas con el mar se realizan en la franja costera, generalmente en la plataforma continental (0-200 m de profundidad) y las grandes extensiones oceánicas sólo se usan para el transporte marítimo y la pesca comercial de grandes especies pelágicas (p.ej., los atunes, el pez espada y los mamíferos marinos). La carencia de estudios en las aguas profundas se debe esencialmente a las dificultades y al costo para muestrear y operar equipos de trabajo o de pesca a estas profundidades. A 2000 m la presión es 200 veces superior a la de la atmósfera, la luz natural está totalmente ausente y se requiere, por ejemplo, de un cable de cuando menos 4000 m de longitud para operar una red de arrastre, lo cual implica maniobras largas y peligrosas con embarcaciones mayores. Aunado a estas dificultades, en el mundo marino existen barreras físicas y químicas que limitan la dispersión de los organismos. Entre 100 y 200 m, dependiendo del grado de turbidez, la desaparición progresiva de la luz impide el florecimiento de algas pequeñas (el fitoplancton) que son la base de todas las redes alimenticias marinas. Esta falta de materia orgánica producida

por el fitoplancton, combinada con el aumento progresivo de la presión del agua (una atmósfera más cada 10 m) y la disminución de la temperatura ambiental (5 °C a 1000 m; 2 °C a 2000 m; casi 0 °C a 5000 m) son elementos muy adversos para el desarrollo y el mantenimiento de la vida. Por otra parte, la ausencia de luz complica la búsqueda de alimentos y las relaciones presas-depredadores, las cuales dependen esencialmente de otros sentidos (p. ej., el olfato, la sensibilidad a las corrientes y a las ondas de presión), salvo excepciones como en el caso de algunas especies de peces y calamares que utilizan la bioluminiscencia como medio de reconocimiento durante el cortejo o como señuelo para atraer a sus presas.

Sin embargo, existe un fenómeno todavía más interesante y generalmente poco conocido: la disminución drástica, hasta su desaparición, del oxígeno en aguas profundas en algunas partes del mundo. El oxígeno (O<sub>2</sub>) es, sin lugar a dudas, el elemento más importante en nuestro planeta. Tanto en la tierra como en el agua, los animales utilizan (en su vasta mayoría) el O<sub>2</sub> en su metabolismo (metabolismo aeróbico). Al igual que en la tierra, el O<sub>2</sub> es producido por las plantas a través de la fotosíntesis. Las algas costeras y el fitoplancton captan el bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) disuelto en el agua y liberan O<sub>2</sub> que se disuelve en el agua marina. En la superficie, el movimiento del oleaje favorece también la disolución de oxígeno atmosférico en el mar a través de un proceso de mezcla. Sin embargo, en ciertas regiones del globo la producción primaria frente a los continentes, puede alcanzar niveles extremadamente elevados, debido esencialmente a la abundancia de nutrientes que consume el fitoplancton. Consecuentemente, estas enormes masas de microalgas llegan a agotar los recursos nutritivos, mueren y se hunden progresivamente en las zonas costeras, provocando una alta demanda de O<sub>2</sub> durante el proceso de degradación bacteriana a lo largo de la columna de agua. La repetición de este proceso durante periodos a escala geológica ha conducido a la presencia de lo que se conoce como la Zona del Mínimo de Oxígeno (ZMO), una amplia capa de la cobertura oceánica donde el O<sub>2</sub> ha sido consumido por el citado proceso de degradación, y que se ha vuelto inhóspito para la vida aeróbica.

La ZMO ha sido detectada en diversos lugares del mundo (p. ej., océano Índico, Golfo de México, mar Báltico); sin embargo, es en el Pacífico Oriental (costa oeste de América) en donde se observa -y por mucho- su mayor extensión. Las aguas del Pacífico mexicano no escapan a este fenómeno. La ZMO representa un problema ecológico y económico de gran magnitud, particular-

mente en el Golfo de California y a lo largo de la costa del suroeste de México (Hendrickx y Serrano 2010). La presencia de este fenómeno, aunado al casi total desconocimiento de las comunidades que viven en las aguas profundas de la Zona Económica Exclusiva (ZEE) de México, han motivado nuestro interés por explorar lo que algunos consideran como la última frontera en la Tierra: el mar profundo.

Es en 1892 que el buque de investigación “Albatross” recorrió por primera vez parte de la región oceánica de México. Este buque de vapor logró efectuar muestreos hasta más de 4000 m de profundidad. La tecnología ha cambiado mucho desde entonces, pero los problemas ligados a la operación de equipos de muestreo a estas profundidades siguen siendo los mismos: los largos tiempos necesarios para bajar y recuperar los equipos, la longitud de cable necesario y el peso de los equipos que deben ser suficientemente resistentes y grandes para garantizar su llegada al fondo y su integridad estructural durante los muestreos. En las investigaciones modernas se han utilizado principalmente tres tipos de equipos para muestrear la fauna de aguas profundas: las redes de patines y los trineos “bentónicos” (del término “bentos”, o fauna y flora que vive sobre o dentro del sedimento) (Fig. 1), los nucleadores múltiples (Fig. 2) y de caja (Fig. 3) y dragas de arrastre, como la draga tipo Karling modificada (Fig. 4). Además, en la columna de agua o ambiente pelágico (“pélagos”, constituido por organismos que flotan o nadan entre las aguas) se utilizan grandes redes que se desplazan horizontalmente y llevan una malla más fina que las tradicionales redes de fondo; ejemplos de éstas son las redes del tipo Isaacs Kidd (Fig. 5) o de micronecton (Fig. 6). Simultáneamente con los muestreos biológicos, los barcos oceanográficos modernos miden variables físicas y químicas a lo largo de la columna de agua, desde la superficie hasta el fondo, mediante aparatos con sensores automáticos (los llamados CTD, “Conductivity, Temperature, Density”), a veces equipados con sensores para medir la concentración de oxígeno o de nutrientes (Fig. 7). Estos equipos permiten reconstituir los perfiles de los parámetros fisicoquímicos (p. ej., temperatura, salinidad, oxígeno), lo que permite detectar pequeñas variaciones ambientales en el área de estudio.

## **El Proyecto TALUD**

En 1990 el Laboratorio de Invertebrados Bentónicos de la Unidad Académica Mazatlán (Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM) inició el pro-

Figura 1. Trineo bentónico utilizado durante las campañas oceanográficas del proyecto TALUD.



yecto TALUD con el objetivo de estudiar las comunidades de invertebrados y de peces asociadas con el talud continental del Pacífico mexicano, el cual alcanzó su mayor importancia durante la primera década del siglo XXI con el apoyo decidido del CONACYT y posteriormente de la Dirección General de Apoyo al Personal Académico (DGAPA) de la UNAM. También, en este segundo periodo (2000–2008), el proyecto contó con la participación de investigadores del Instituto Nacional de la Pesca y de la Universidad Autónoma de Sinaloa, además de numerosos estudiantes procedentes de diversas universidades del país quienes realizaron su tesis de Licenciatura, de Maestría o de Doctorado. El proyecto TALUD fue el primer esfuerzo sostenido realizado por instituciones mexicanas en el Pacífico oriental para estudiar la biocenosis en aguas profundas, y constituye, sin lugar a dudas, una investigación de frontera. Con un total de 13 cruces efectuados a bordo del B/O “El Puma” (Fig. 8) entre 1989 y 2008 (aprox. 142 arrastres, 167 hidrocalas, 144 muestreos de sedimentos y 36 muestras de media agua), se recorrieron

Figura 2. Nucleador múltiple de gravedad utilizado para muestrear la meiofauna durante las campañas oceanográficas TALUD.



Figura 3. Nucleador de caja tipo Reineck de 102 litros de capacidad utilizado para muestrear los sedimentos durante las campañas oceanográficas del proyecto TALUD.



Figura 4. Draga tipo Karling modificada con capacidad de 80 litros utilizada para el muestreo de los sedimentos durante las campañas oceanográficas del proyecto TALUD.



las zonas profundas del Golfo de California (desde las cercanías de las islas Marías hasta isla Tiburón) y del Pacífico tropical mexicano (frente a Jalisco, Colima, Michoacán y Guerrero) (Fig. 9). A pesar de las dificultades inherentes al manejo de equipos de muestreo en aguas profundas, las operaciones fueron muy exitosas y la cantidad de información y muestras obtenidas resultó sobresaliente. Estas representan en la actualidad el mayor conjunto de datos ambientales y faunísticos jamás obtenido en aguas profundas en la ZEE del Pacífico mexicano.

### **La Zona del Mínimo de Oxígeno (ZMO)**

La Zona del Mínimo de Oxígeno se define como las regiones oceánicas en donde la concentración de oxígeno disuelto es menor a  $0.5 \text{ ml l}^{-1}$  (Levin 2003). La ZMO del Pacífico oriental es la más extensa del mundo, ya que comprende des-

Figura 5. Red de media agua tipo Isaacs Kidd recuperada después de un lance y utilizada para el muestreo del ambiente pelágico durante las campañas oceanográficas TALUD.



Figura 6. Red de media agua para micronecton recuperada después de un lance con apertura de malla de 1 mm y boca de 1 m<sup>2</sup> utilizada durante las campañas oceanográficas TALUD.

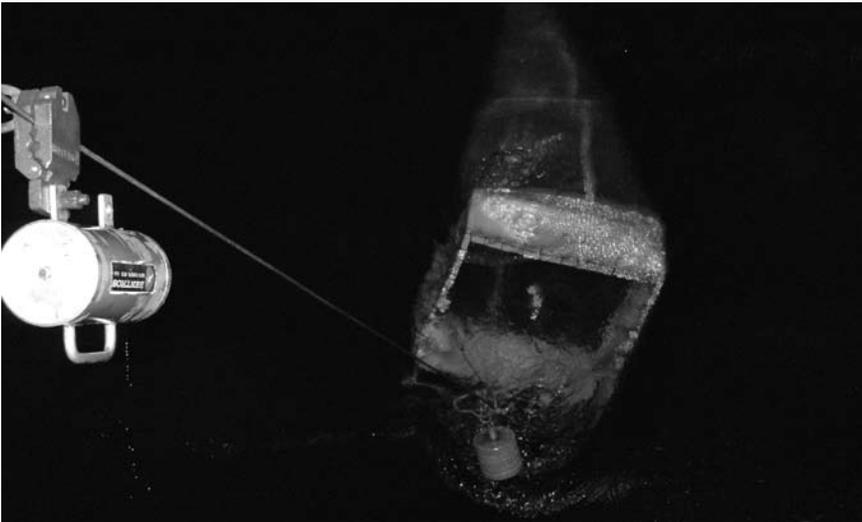
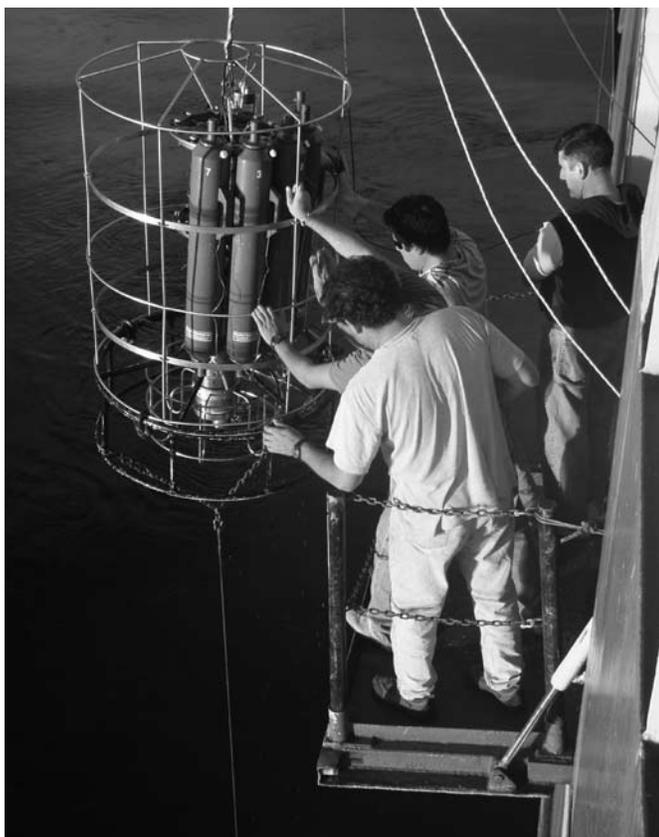


Figura 7. Rosette con botellas de muestreo de agua y CTD con sensor de oxígeno empleados durante las campañas oceanográficas TALUD.



de los  $\sim 45^\circ$  latitud N hasta los  $\sim 30^\circ$  latitud S, abarcando, casi por completo, la costa occidental de América, cubriendo un área estimada de  $15 \times 10^6$  km<sup>2</sup>. En México, exceptuando el alto Golfo de California, la ZMO abarca la totalidad de la ZEE (Díaz y Rosenberg 1995; Helly y Levin 2004). La ZMO es extremadamente amplia al sur de Golfo de California y a lo largo de la costa sureste de México (Hendrickx y Serrano 2007, 2010).

En el Pacífico mexicano, las profundidades en las que se encuentran concentraciones menores a  $0.5 \text{ ml l}^{-1}$  de oxígeno disuelto varían según la latitud. En la zona central del Golfo de California ( $28^\circ 16' \text{ N}$ - $26^\circ 40' \text{ N}$ ) se encuentra  $\sim 250$  m de profundidad; hacia el sur, frente a las costas de Sonora, Sinaloa

(principalmente) y Nayarit (26°6' N-22°0' N), se encuentra  $\approx 75$  m y, en la franja costera de los estados de Jalisco, Colima, Michoacán y Guerrero (19°17' N- 16°50' N), se encuentra  $\approx 50$  m (Hendrickx y Serrano 2010).

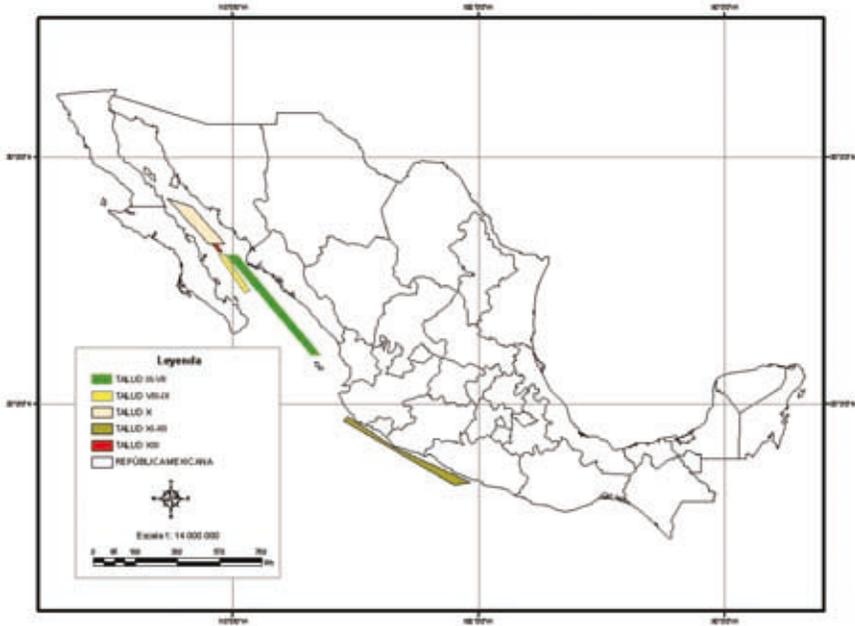
El espesor de la ZMO en el Pacífico oriental varía de acuerdo con la circulación y el tiempo de residencia que presentan las aguas intermedias; sin embargo, a lo largo del Pacífico mexicano, el espesor de la ZMO permanece casi constante y fluctúa entre 1100 y 1200 m. Por otra parte, la profundidad a partir de la cual se encuentra la ZMO se reduce hacia las bajas latitudes de la ZEE, lo que implica un mayor gradiente en la vertical para la oxiclina.

Por arriba de la ZMO, el incremento de oxígeno disuelto se debe al intercambio de gases que se da en la interfase océano-atmósfera. Por debajo de la ZMO, el aporte de oxígeno se debe a la presencia de masas de agua con baja temperatura y mayor densidad, las cuales se originaron en los alrededores de los polos y en la cercanía de la superficie del mar, llevando consigo, debido a procesos convectivos, importantes cantidades de oxígeno disuelto a profundidades considerables (Hendrickx y Serrano 2010).

**Figura 8.** Buque Oceanográfico "El Puma" de la Universidad Nacional Autónoma de México.



Figura 9. Ubicación de los polígonos correspondientes a las áreas recorridas durante las 13 campañas oceanográficas realizadas como parte del proyecto TALUD.



Por debajo de la concentración de  $0.5 \text{ ml l}^{-1}$  (alrededor de los 1200 m), entre los  $26^{\circ}6' \text{ N}$  y  $16^{\circ}50' \text{ N}$ , el oxígeno disuelto se incrementa monótonicamente, a una tasa media de  $0.153 \text{ ml l}^{-1} \times 100 \text{ m}$  de profundidad. En la zona central del Golfo de California, la tasa media hasta los 1600 m es de  $0.085 \text{ ml l}^{-1} \times 100 \text{ m}$  de profundidad; por debajo de 1600 m, la tasa presenta variaciones, próximas a cero e incluso ligeramente negativa. Lo constante que resulta la concentración de oxígeno por debajo de los 1600 m en la zona central del Golfo de California, posiblemente se debe a que los perfiles fueron registrados dentro de la cuenca de Guaymas, sitio semi-cerrado y en el que suponemos que el tiempo de residencia se incrementa y en el que los aportes y consumo de oxígeno se encuentran en equilibrio (Fig. 10).

## LAS COMUNIDADES BIOLÓGICAS

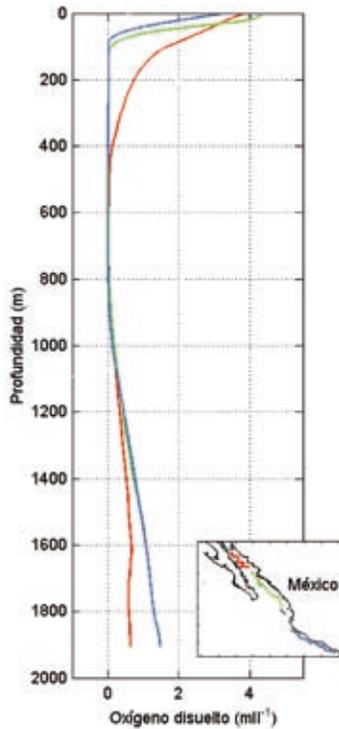
### Copéodos bentónicos (meiofauna)

El meiobentos se define como aquellos organismos que viven sobre el sedimento marino o entre los granos de arena o lodo, y que miden entre 36 y 63  $\mu\text{m}$ , dependiendo del ecosistema marino bajo estudio. Actualmente se reconocen 20 phyla del reino Animalia y dos phyla del reino Protoctista dentro de la meiofauna. Estos son: Cnidaria, Platyhelminthes, Nemertea, Gnathostomulida, Kinorhyncha, Loricifera, Nematoda, Rotifera, Gastrotricha, Priapulida, Sipuncula, Annelida, Arthropoda (Copepoda, Halacaroidea, Ostracoda, Mystacocarida, Tantulocarida), Tardigrada, Mollusca, Bryozoa, Brachiopoda, Echinodermata, Chordata, Sarcomastigophora y Ciliophora.

Hasta la fecha se conocen relativamente bien los factores bióticos y abióticos que regulan a la meiofauna y a los diversos grupos que la conforman. Se ha visto que estos animales son buenos indicadores de contaminación debido a sus altas densidades en muestras relativamente pequeñas, a su alta asociación con el sedimento, poca capacidad de dispersión y ausencia de estadios larvales planctónicos. Por otro lado, el conocimiento que se tiene de estas comunidades en el mar profundo es relativamente escaso y no cobró importancia sino hasta finales de la segunda mitad del siglo XX con estudios llevados a cabo en los océanos Atlántico, Pacífico, Índico, en el Mediterráneo, en el Golfo de México y en los océanos Ártico y Antártico.

Por lo general, la densidad de la meiofauna del mar profundo va desde 2731 ind  $10\text{ cm}^{-2}$  a 2290 m de profundidad, hasta 75 ind  $10\text{ cm}^{-2}$  a 3597 m de profundidad, aunque se han registrado densidades aún menores que van desde 4-40 ind  $10\text{ cm}^{-2}$  a 2883 m y 987 m de profundidad, respectivamente. Por lo general, los grupos más frecuentes y abundantes son Nematoda (84-94%) y Copepoda (2-8%), seguidos de Kinorhyncha, Loricifera, Tantulocarida, Ostracoda y Tardigrada. La importancia de la meiofauna radica principalmente en que es uno de los primeros eslabones de la cadena trófica. Esta fauna se alimenta principalmente de bacterias y microalgas presentes en los detritos depositados en el fondo del mar y así permiten que organismos de mayores tallas como peces y crustáceos, algunos de ellos de importancia comercial, aprovechen fuentes de alimento que de otra forma no estarían disponibles. Por otra parte, gracias a su limitada capacidad de dispersión y al hecho de que carecen

Figura 10. Perfiles de concentraciones medias de oxígeno disuelto registrados durante las campañas TALUD VII, X y XI.



de larvas planctónicas y por lo tanto están íntimamente asociados al ambiente bentónico, la meiofauna, y en este caso en particular, los copépodos bentónicos, son sujetos de estudio ideales para analizar los factores biológicos y ambientales que afectan, ya sea de manera positiva o negativa, la presencia o ausencia, así como la mayor o menor abundancia de estas comunidades tanto en aguas costeras como en el mar profundo. De la misma forma, la meiofauna es un sujeto de estudio ideal para comprender los mecanismos por los cuales las comunidades bentónicas han llegado a tener las distribuciones geográfica y batimétrica que observamos en la actualidad.

A pesar de la importancia de la meiofauna, y en este caso, de los copépodos bentónicos del mar profundo, el conocimiento de sus especies y su distribución es aún muy limitado. En las muestras de sedimento recolectadas en una serie de estaciones en el sur del Golfo de California durante el crucero oceanográfico

TALUD IV, en agosto del año 2000, se registraron densidades de copépodos bentónicos desde 0 ind 10 cm<sup>-2</sup> hasta 2 ind 10 cm<sup>-2</sup> en profundidades desde 500 m hasta 745 m y desde 0 ind 10 cm<sup>-2</sup> hasta valores máximos de 47 ind 10 cm<sup>-2</sup> a profundidades desde 800 m hasta 2120 m. También se observó que la densidad y el número de especies, géneros y familias de éstos copépodos en el Golfo de California se incrementa conforme aumenta la profundidad (Fig. 11 A, B). Sin embargo, se sabe poco acerca de los factores que regulan la densidad y la riqueza de estas especies. Se sabe que la concentración de materia orgánica y la concentración de oxígeno disuelto no juegan un papel importante en estos procesos. Por lo tanto, deben ser otros los factores, como la concentración de limos en el sedimento, los que regulan la distribución, la abundancia y la diversidad de estas comunidades.

### **Copépodos parásitos de aguas profundas**

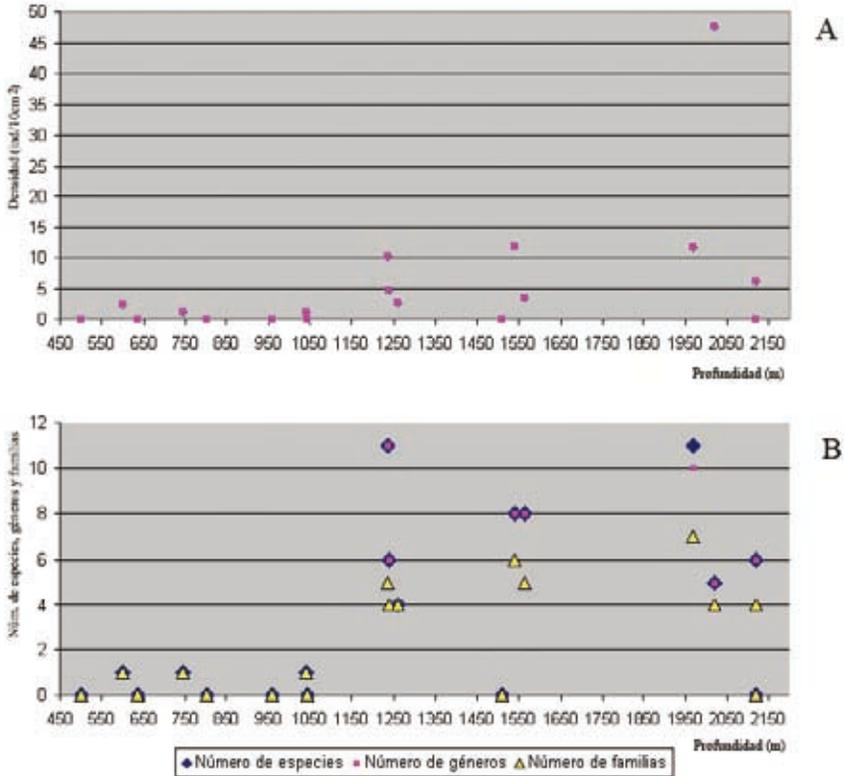
A pesar de que el parasitismo regula la abundancia o la densidad de las poblaciones hospederas y estabiliza la red alimentaria, se sabe poco sobre este estilo de vida en aguas profundas, particularmente en el caso de los copépodos. Gracias al material recolectado durante el proyecto TALUD es posible brindar un acercamiento a los copépodos parásitos de aguas profundas del Golfo de California y del Pacífico mexicano y motivar su inclusión en los listados faunísticos y estudios de conservación, ya que de las aproximadamente 11500 especies conocidas de copépodos hasta ahora, cerca de la mitad viven en otros animales que les sirven de hospederos.

Un copépodo parásito puede ser fácil de reconocer si su cuerpo es parecido a los copépodos de vida libre, como en las familias Caligidae (Fig. 12 A) y Bomolochidae (Fig. 12 B), pero puede pasar desapercibido si su cuerpo está muy modificado, sin segmentación evidente y con extremidades reducidas o carentes de ellas como en la familia Lernaepodidae (Fig. 12 C y D ).

En varias familias las hembras son más grandes que los machos, tienen cuerpos más modificados y mecanismos de sujeción más robustos. Por el contrario, los machos tienen al menos un par de extremidades (anténulas o maxilípedos) adaptadas para agarrarse al segmento genital de la hembra, donde usualmente son encontrados (Fig. 13).

La infección generalmente ocurre en la superficie externa del hospedero donde los copépodos se sostienen mediante su par de antenas y algunos apén-

Figura 11. Variación de la densidad de copépodos bentónicos (A) y número de especies, géneros y familias (B) con respecto a la profundidad registrados en la meiofauna durante la campaña oceanográfica TALUD IV realizada en el sur del golfo de California.



dices bucales o mediante estructuras más especializadas, como “la bulla” (Fig. 12 E), órgano de sujeción característico de la familia Lernaepodidae.

En general, los copépodos parásitos han sido pobremente estudiados. Hasta ahora tan sólo se tiene el registro de copépodos viviendo en el 1.3% de los invertebrados acuáticos y en el 16% de los peces, valores ínfimos si se considera que cada animal acuático es un hospedero potencial para un copépodo (Ho 2001). Los copépodos parásitos registrados frecuentemente en peces del mar profundo pertenecen a dos órdenes, Siphonostomatoida y Poecilostomatoida (transferido recientemente a Cyclopoida). Las familias

más comúnmente encontradas son Chondracanthidae, Lernaepodidae y Sphyriidae, aunque ocasionalmente también se puede encontrar en aguas profundas miembros de otras cuatro familias (Hatschekiidae, Pennellidae, Philichthyidae e Hyponeoidae).

En la familia Sphyriidae, el género *Lophoura* es el más diverso en aguas profundas (Boxshall 1998). Por ello, no fue raro que durante una de las campañas oceanográficas del proyecto se encontraron copépodos de este género parasitando peces macrúridos (*Nezumia liolepis*) recolectados a profundidades de 1270 m y 1295 m en las costas de Sinaloa. Al analizar detalladamente esos especímenes se llegó a la conclusión de que se trataba de la especie nueva, *Lophoura brevicollum* (Gómez et al. 2010) (Fig. 14), la cual se agregó a las 18 especies de *Lophoura* registradas previamente en diferentes partes del mundo.

Los especímenes de *L. brevicollum* fueron capturados a más de 1000 de profundidad donde se presenta en el límite inferior de la ZMO. Para sobrevivir en estos ambientes, se cree que los apéndices posteriores de *L. brevicollum*

Figura 12. A) hembra de *Lepeophtheirus simplex* (Siphonostomatoidea: Caligidae), vista dorsal (tomado de Ho et al. 2001); B) hembra de *Acantholochus zairae* (Cyclopoida: Bomolochidae), vista dorsal (tomado de Morales-Sena y Gómez 2010); C) hembra de *Parabrachiella* sp. (Siphonostomatoidea: Lernaepodidae), vista lateral (observ. pers. Morales-Serna); D) la misma, vista ventral; E) extremo de las maxilas de *Parabrachiella* sp. en el que se señala la bulla incrustada en el tejido del hospedero.

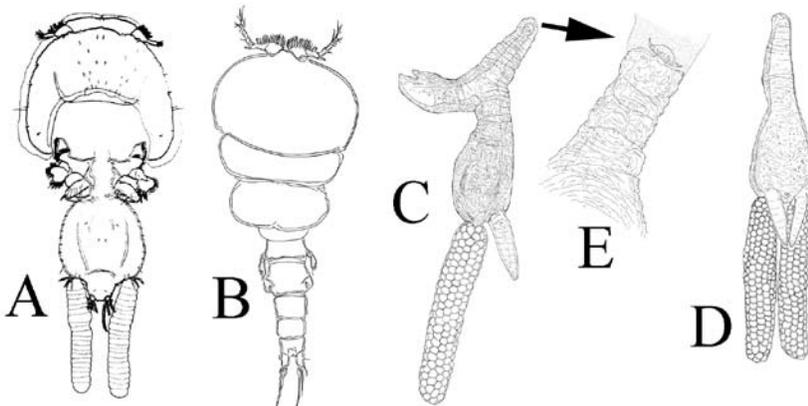
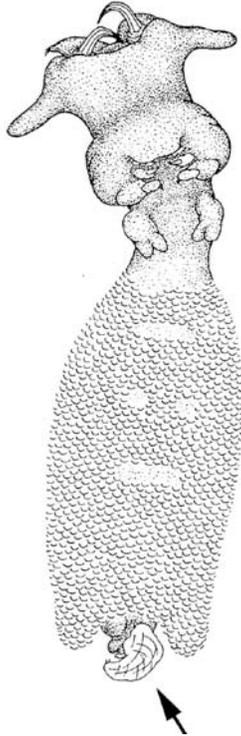


Figura 13. Hembra de *Pseudochondracanthus diceraus*. La flecha señala al macho adherido a la parte posterior (genito-abdomen) del cuerpo de la hembra (tomado de Ho 1970).



son una adaptación para la presión hidráulica alta y las aguas pobremente oxigenadas. Esos apéndices posteriores incrementan la superficie corporal del copépodo, resultando en una mayor captación de oxígeno.

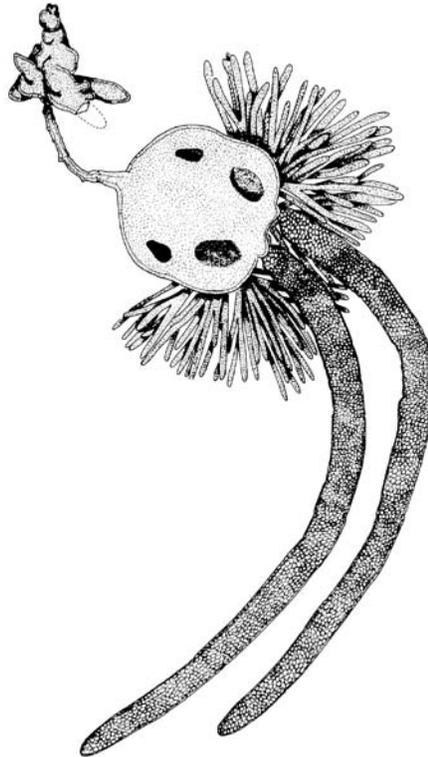
## Los poliquetos

Los poliquetos son gusanos segmentados, muy cercanos a las lombrices de tierra, que viven en aguas marinas (la mayoría), salobres o dulces, en todas las latitudes y profundidades del planeta. Generalmente viven en el fondo, ya sea excavando en la arena o en el lodo o sobre superficies duras como rocas, corales, conchas, madera, metal, etc. Algunas familias viven libremente en la columna de agua y muy pocas especies son parásitas de peces o crustáceos.

Estos organismos pueden presentar una reproducción sexual y/o asexual y se pueden alimentar de plantas (herbívoros), de otros animales (carnívoros), o de sedimento del que extraen la materia orgánica adherida (detritívoros). Pueden filtrar animales microscópicos que viven en la columna de agua (filtradores) o pueden ser carroñeros, y algunas especies pueden alimentarse de cualquier cosa (omnívoros). Son un grupo muy importante porque son el alimento de muchos animales y, además, constituyen cerca del 40% del número de especies y del número de individuos que viven en los fondos marinos.

Hasta la fecha, se han realizado aproximadamente 20 estudios acerca de los poliquetos del sur de California, en Estados Unidos, y seis en el Golfo de California, en áreas poco profundas. Sin embargo, existen escasos estudios de poliquetos de mar profundo del Golfo de California y sus zonas adyacentes. En

Figura 14. Hembra de *Lophoura brevicollum*.



cambio, ocho se han realizado en aguas profundas frente a la costa del Pacífico de los Estados Unidos entre los años 1919 y 2000. Los únicos trabajos de poliquetos de aguas profundas mexicanas se realizaron en las ventilas hidrotermales, frente a las costas de Guaymas, entre 1985 y 1994. Recientemente, las muestras obtenidas durante el proyecto TALUD, han permitido conocer los poliquetos de mar profundo del sureste del Golfo de California. De momento, contamos con un listado de las especies recolectadas durante las campañas IV a VII (de 2000 a 2001), en fondos lodosos y arenosos, entre los 732 y 2250 m de profundidad.

Sobre la base del material recolectado durante estos cuatro cruceros, se identificaron 34 familias, con un total de 107 especies, de las cuales 11 fueron identificadas únicamente a nivel de género y 21 a nivel de familia. La única especie que antes no había sido registrada en el mar profundo de zonas cercanas al Golfo de California es *Ancistrosyllis hartmanae*, perteneciente a la familia Pilargidae. Las familias con la mayor riqueza de especies fueron Ampharetidae, Maldanidae, Cirratulidae y Phyllodocidae, las cuales son detritívoras, a excepción de la última que es preferentemente carnívora (Tabla 1; Méndez 2006). La presencia de todas estas familias en mar profundo no es rara, ya que todas las familias de poliquetos están bien representadas en todas las profundidades, latitudes y climas en el planeta.

Las especies más representativas del área de estudio, de acuerdo con el número de veces que aparecieron en las diferentes localidades muestreadas durante los cuatro cruceros indicados, fueron *Melinna exilia*, *Melinnampharete gracilis*, *Mexamage corrugat* (Ampharetidae), *Thelepus hamatus* (Terebellidae), *Terebellides stroemi* (Trichobranchidae), *Fauveliopsis rugosa* (Fauveliopsidae), *Nothria iridiscens* (Onuphidae), *Califia calida* (Orbiniidae), *Neoheteromastus lineus* (Capitellidae) y *Maldane cristata* (Maldanidae).

Durante el proyecto se encontró que las especies de poliquetos en el mar profundo de la zona de estudio no se distribuyen de acuerdo con un determinado parámetro ambiental, sino con varios de éstos (Méndez 2007). Los principales responsables son la profundidad, el oxígeno disuelto y la temperatura del agua, cuya combinación produce efectos variables en las diferentes regiones del mundo, como ha sido documentado con anterioridad por Wishner *et al.* (1995), Levin *et al.* (2000, 2001) y Narayanaswamy *et al.* (2005), entre otros.

La zona comprendida entre los 1100 y 1600 m de profundidad presentó el mayor número de especies, así como el mayor número de individuos por metro

cuadrado y la diversidad más alta, comparado con las demás profundidades estudiadas durante este proyecto. Esta zona presentó un valor medio de oxígeno disuelto de  $0.87 \text{ ml l}^{-1}$ , el cual es considerado como típico de zonas de hipoxia moderada (Méndez 2007). A pesar de que parece imposible que estos organismos puedan vivir con tan poco oxígeno, este fenómeno también fue observado por Hendrixck (2001) en crustáceos decápodos y por Zamorano *et al.* (2007a) en moluscos durante las mismas campañas oceanográficas.

En general, la zona de estudio tiene sedimentos lodosos con un alto contenido de materia orgánica (de 8.26 a 18.78 %), lo cual no resultó ser un factor limitante para la distribución de los poliquetos en esta zona, a pesar de que las familias mejor representadas tienen hábitos detritívoros. Esta situación es diferente de las áreas someras, en las que generalmente el contenido de materia orgánica es el factor más importante, ya que representa la principal fuente de alimento de muchos gusanos detritívoros.

El tamaño de grano y la consistencia del sedimento son también muy importantes para los gusanos que viven en fondos blandos, debido a que muchas familias construyen tubos de arena o lodo como protección o, incluso, para incubar a los huevecillos fecundados. En muchas ocasiones, construyen los tubos, los abandonan y posteriormente construyen tubos nuevos y este proceso se continúa durante toda su vida. Por ejemplo, en una estación del crucero TALUD IV, localizada a unos 800 m de profundidad, la red llegó al barco completamente cubierta de tubos del anfinómido *Melinnampharete gracilis*. Este gusano construye tubos de lodo muy delgados y largos. Se estimó que en esa localidad se recolectaron alrededor de 31 000 tubos, de los cuales se calculó que la mitad estaban vacíos, mientras que la otra mitad contenía un gusano por tubo (Méndez 2009, 2010). Este ejemplo demuestra que el mar profundo constituye un ambiente con una fauna rica y abundante, por lo que es recomendable continuar con este tipo de proyectos en diferentes áreas, con el fin de conocer a la biodiversidad de las aguas mexicanas.

## Los moluscos

Después de los artrópodos, los moluscos son el grupo taxonómico con mayor riqueza de especies descritas. Los moluscos han logrado colonizar los ambientes terrestres, acuáticos y marinos. Por su historia evolutiva, han logrado

**Tabla 1. Familias de poliquetos y número de especies recolectadas durante las campañas TALUD IV a VII.**

Familias	Número de especies	Familias	Número de especies
Orbiniidae	3	Nereidae	4
Paraonidae	3	Glyceridae	1
Spionidae	4	Goniadidae	1
Poecilochaetidae	1	Nephtyidae	2
Heterospionidae	1	Amphinomidae	2
Chaetopteridae	1	Onuphidae	4
Cirratulidae	9	Eunicidae	1
Capitellidae	2	Lumbrineridae	6
Maldanidae	11	Oeonidae	1
Scalibregmidae	1	Sternaspidae	1
Opheliidae	3	Flabelligeridae	3
Phyllodoceidae	8	Fauvelopsidae	1
Aphroditidae	2	Ampharetidae	13
Polynoidae	4	Terebellidae	4
Sigalionidae	2	Trichobranchidae	1
Pilargidae	2	Sabellidae	3
Sylliidae	1	Serpulidae	1

adaptarse a los ambientes más extremos como las ventilas hidrotermales o las zonas con deficiencia de oxígeno, las conocidas ZMO. Su morfología es diversa, al igual que sus hábitos alimenticios y locomotores.

Dentro de los hábitats en los que se desarrolla este taxón, se encuentran el bentos y el necton del mar profundo, donde la naturaleza del fondo oceánico (lodos, condiciones ambientales estables y detritus como principal fuente de alimento) ha permitido que, junto con los poliquetos, dominen el ecosistema.

Actualmente existen muchos trabajos científicos de distinta índole que tratan a los moluscos de aguas profundas en todo el mundo. Estos estudios han sido realizados a diferentes escalas espaciales y han permitido establecer hipótesis sobre su distribución, su diversidad y su abundancia, entre las que destacan las tendencias de estos parámetros comunitarios en relación a la la-

titud y la batimetría. Por ejemplo, se ha planteado que la diversidad y la riqueza de especies de moluscos en aguas profundas decrecen conforme la latitud y la profundidad aumentan. Este criterio tiene sus excepciones en algunas áreas debido a la presencia de la ZMO entre los 300 y 1000 m, como sucede frente a Perú o en el Golfo de California, lo que causa que en esta franja batimétrica se observe una fuerte reducción en la abundancia, la diversidad y la riqueza de especies, que se recuperan en aguas más profundas.

En México, los primeros estudios sobre los moluscos de aguas profundas en el Pacífico mexicano datan de finales del siglo XIX y se basan, esencialmente, en los muestreos realizados por el buque de vapor "Albatross" de la Comisión de Pesca de los Estados Unidos. Posteriormente, diversas instituciones extranjeras llevaron a cabo campañas oceanográficas a partir de las cuales se han publicado trabajos taxonómicos sobre la malacofauna presente a profundidades mayores a 200 m; sin embargo, los estudios ecológicos son escasos, lo que ha limitado el conocimiento en el Pacífico mexicano.

Con el material obtenido durante los cruceros TALUD se obtuvo un listado taxonómico de 56 especies (33 bivalvos, 11 gasterópodos, cinco escafópodos, cinco cefalópodos y dos aplacóforos) (ver Tabla 2), de las cuales al menos cinco son nuevas especies en proceso de descripción y otras 16 representan nuevos registros geográficos y/o batimétricos para el Golfo de California (Zamorano *et al.* 2007b).

Durante las campañas oceanográficas comentadas, se midieron parámetros fisicoquímicos en la columna de agua y a nivel del fondo marino. Estas variables ambientales fueron relacionadas con los parámetros comunitarios (diversidad, riqueza de especies y abundancia) y poblacionales (densidad), resultando que la concentración de oxígeno fue la variable que incide con mayor fuerza sobre la comunidad de moluscos (Zamorano *et al.* 2007a); incluso, se observó cierta afinidad de las especies de bivalvos dominantes durante los muestreos, como *Lucinoma heroica*, en condiciones de hipoxia severa (menor a 0.1 ml l<sup>-1</sup>O<sub>2</sub>) e hipoxia moderada (0.1-0.5 ml l<sup>-1</sup>O<sub>2</sub>) (Zamorano y Hendrickx, 2012). En el caso de los escafópodos, se observó un pico de abundancia en profundidades donde se inicia la recuperación de la concentración de oxígeno, la cual alcanza valores intermedios (0.51-1 ml l<sup>-1</sup>O<sub>2</sub>) entre los 1000 y 1200 m (Zamorano 2006).

Con la información generada por el proyecto, los registros disponibles en la bibliografía sobre moluscos de aguas profundas (>200 m de profundidad) en

el Pacífico mexicano, los datos de la colección del Laboratorio de Invertebrados Bentónicos del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, Unidad académica Mazatlán, y el análisis de la base de datos de la colección de moluscos del SCRIPPS Institution of Oceanography (SIO), se construyó una hoja única de registros con información relacionada con su taxonomía y sistemática, donde se incluyen las sinonimias, la localidad tipo, la distribución geográfica y batimétrica, y su distribución en México. Esta información se obtuvo de una revisión intensiva de la literatura conformada por más de 50 fuentes, entre ellas algunas fechadas en el siglo XIX. Como resultado de este ejercicio, se obtuvo un listado taxonómico con 388 especies y 1085 registros puntuales. Este listado incluye: un aplacóforo, dos monoplacóforos, 16 polioplacóforos, 17 escafópodos, 29 cefalópodos, 137 pelicipodos y 185 gastrópodos (Zamorano y Hendrickx 2007).

Con la finalidad de corroborar las tendencias latitudinales y batimétricas planteadas en diversos trabajos de escalas regionales amplias, se procedió a analizar los patrones de distribución y la composición de los registros de las 388 especies mencionadas. Así, se encontró que la riqueza específica es diferente en el norte, el centro y el sur del Golfo de California. Estas diferencias se relacionan con diversas características geográficas y ambientales como la presencia de grandes islas y/o los patrones de circulación de las masas de agua de fondo. Se observó un endemismo mayor en la parte norte del golfo (30 %) y una disminución de la riqueza específica con el incremento de la profundidad. La riqueza máxima observada fue de 152 especies y se presentó en la zona de confluencia entre la plataforma y el talud continental. De estas especies, solamente el 12 % ha sido registrado más allá de los 500 m de profundidad, lo que sugiere que la ZMO está funcionando como una barrera física que evita la incursión en aguas profundas de la fauna de la plataforma continental. Por otro lado, considerando todas las especies presentes en el Golfo de California, de acuerdo con su distribución en el Pacífico oriental, el 34.5 % de éstas presentó una afinidad con la fauna presente al sur del Golfo de California, el 20.4 % con la fauna de aguas templadas, el 21.3 % son especies conocidas tanto al sur como al norte del golfo y el 23.8 % restante ha sido registrado, hasta la fecha, solamente en el Golfo de California (Zamorano y Hendrickx 2009).

El mismo análisis se pretendió elaborar con las 388 especies de moluscos registradas a lo largo de la costa SO del Pacífico mexicano; sin embargo, con la información con la que se cuenta, no se logró identificar algún patrón de dis-

tribución latitudinal y/o longitudinal de estas especies, debido posiblemente a que la mayoría de los registros corresponden al área del Golfo de California o a la zona de influencia de la corriente de California (costa occidental de la Península de Baja California). Esto permite resaltar la necesidad de continuar con el esfuerzo exploratorio del proyecto, a fin de extender y mejorar el conocimiento científico de las aguas profundas del Pacífico mexicano, particularmente en el Golfo de Tehuantepec y en la zona de la corriente de California.

Por otra parte, se comparó la composición de especies de moluscos de aguas profundas en ambos lados de la península de Baja California. Para ello, se consideraron bandas latitudinales distribuidas entre 23 y 31°N, además de considerar en la comparación también intervalos batimétricos. Los resultados de este ejercicio muestran que la composición de la comunidad de moluscos en ambos lados de la península es notablemente diferente, compartiendo únicamente 39 especies, encontrándose la mayor similitud en los 23°N en donde se encuentra un área de confluencia entre la fauna típica de aguas templadas (extendiéndose hacia el norte), de aguas subtropicales (hacia el Golfo de California) y de aguas tropicales (hacia el sur), y se pudo reconocer la zona de Cabo San Lucas como un área con alta tasa de recambio de especies. En relación con la batimetría, se observó que la franja de 200 a 699 m de profundidad es la que comparte la mayor similitud de especies en ambos lados de la península (Zamorano y Hendrickx 2011). Con estos resultados, y a reserva de enfocarnos en estudios más concretos sobre los patrones de dispersión larval y los esquemas generales de macroevolución, se puede considerar que la península de Baja California funciona como una barrera física que ha favorecido la especiación diferenciada de los géneros presentes en aguas profundas, ya que sí existe cierta similitud entre géneros (33 %) pero no así entre especies (19 %).

Con los datos disponibles, se pudo comprobar que la riqueza de este grupo decrece conforme la profundidad se incrementa, observándose la mayor riqueza entre los 200 y 400 m. En aguas más profundas, la riqueza disminuye paulatinamente hasta los 1100 m, profundidad en donde comienza la recuperación de oxígeno en el Pacífico mexicano y, por consiguiente, la riqueza se incrementa nuevamente. Este patrón se pudo comprobar en una curva de acumulación de especies, misma que se sometió a comprobación utilizando distintos modelos ya descritos en la bibliografía. Se concluyó que la distribución de la riqueza de especies de moluscos en relación con la profundidad presenta cuatro máximos:

**Tabla 2. Listado de las especies de moluscos recolectados durante las campañas TALUD IV-IX en el golfo de California.**

<b>Bivalvos</b>	<i>Lucinoma heroica</i>	<i>Thracia</i> sp.	<i>Caudinia uncinata</i>
<i>Acharax johnsoni</i>	<i>Lyonsiella quylei</i>	<i>Tindaria</i> sp.	<b>Escafópodos</b>
<i>Cardiomya planetica</i>	<i>Malletia alata</i>	<i>Vesicomya</i> sp.	<i>Gadila fusiformis</i>
<i>Conchocele excavata</i>	<i>Myonera</i> sp.	<i>Yoldia</i> sp.	<i>Dentalium agassizi</i>
<i>Cuspidaria</i> sp.	<i>Neilonella ritteri</i>	Gasterópodos	<i>Fissidentalium megathyris</i>
<i>Cyclopecten pernomus</i>	<i>Nucula carlottensis</i>	<i>Astyris permdesta</i>	<i>Rhabdus dalli</i>
<i>Cyclopecten</i> sp.	<i>Nuculana pernula</i>	<i>Acteon</i> sp.	<i>Cadulus californicus</i>
<i>Cymatioa</i> sp.	<i>Nuculana pontonia</i>	<i>Architectonia</i> sp.	<b>Cefalópodos</b>
<i>Dacrydium pacificum</i>	<i>Nuculana</i> sp.	<i>Bathybembix bairdii</i>	<i>Abrialiopsis</i> sp.
<i>Ennucula cardara</i>	<i>Periploma carpenteri</i>	<i>Buccinum</i> sp.	<i>Octopus</i> sp.
<i>Ennucula colombiana</i>	<i>Periploma</i> sp.	Indeterminado	<i>Japetella</i> sp.
<i>Ennucula tenuis</i>	<i>Policardia</i> sp.	<i>Microglyphis</i> sp.	<i>Gonatus berryi</i>
<i>Limatula saturna</i>	<i>Poromya mactroides</i>	<i>Philine</i> sp.	Indeterminado
<i>Limatula similaris</i>	<i>Solemya agassizi</i>	<i>Solariella nuda</i>	Aplacóforos

uno a 200-400 m, otro entre 1000 y 1200 m, un tercero entre 2500 y 2600 m y el último de 3400 a 3600 m. De acuerdo con el comportamiento de los datos y a las características específicas de cada uno de los modelos, se puede predecir una riqueza máxima de hasta 465 especies (Zamorano 2006).

## Los crustáceos decápodos

Junto con los moluscos, los crustáceos decápodos son seguramente los mejor conocidos dentro de los invertebrados marinos, pues incluyen animales tales

como los camarones, las langostas y los cangrejos. Algunos representantes de estos grupos (p.ej. el camarón azul, la langosta espinosa, las jaibas) tienen una importancia económica considerable. Sin embargo, a pesar de que se encuentran virtualmente en todos los hábitat marinos, a veces en forma muy abundante, el público en general desconoce la enorme mayoría de las especies de crustáceos decápodos.

La obra de base para el estudio de los crustáceos decápodos de aguas profundas del Pacífico de México fue escrita por Walter Faxon en 1895, utilizando el abundante material recolectado por el “Albatross” algunos años antes (Faxon 1895). Si bien desde entonces se ha agregado un número significativo de nuevas especies a la fauna de crustáceos decápodos de aguas profundas, esta obra sigue siendo la guía para el reconocimiento de la mayoría de las especies. De hecho, el 50 % de las especies recolectadas durante las campañas TALUD fueron descritas por W. Faxon hace casi 120 años.

En total se recolectaron 53 especies de crustáceos decápodos durante este estudio, 14 especies estrictamente pelágicas y 34 especies estrictamente bentónicas, además de cinco especies que poseen un comportamiento batipelágico no bien definido (Tabla 3). Las comunidades de crustáceos decápodos que se encuentran por debajo de la ZMO en el Pacífico mexicano son dominadas por tres grupos de organismos, ya sea debido a su abundancia, su frecuencia o ambos parámetros. El primero, y quizás el más llamativo, es aquél de los camarones, los cuales, por lo general, poseen un color rojo intenso relacionado con sus pigmentos respiratorios. Estos comprenden especies tales como *Heterocarpus affinis* (Fig. 15), *Benthescymus tanneri* y *Acanthephyra brevicarinata*, que pueden alcanzar hasta 16 cm de longitud (Hendrickx 2004). La primera, *H. affinis*, pertenece a un género de importancia económica considerable a nivel mundial (p. ej., *H. reedi*, el camarón nylon, en Chile, que sostiene una pesquería del orden de 5000 toneladas al año) y puede ser capturado por arrastre o en trampas, un método de pesca mucho menos invasivo y más selectivo. Desde el punto de vista taxonómico, el segundo grupo forma también parte de los “camarones”, pero su morfología lo distingue del típico camarón que conocemos. Contiene las especies del género *Glyphocrangon* (Fig. 15), con tres especies encontradas durante este estudio. La especie dominante, *G. spinulosa*, de color rojo a naranja, mide hasta 13 cm de longitud; sin embargo es otra la que más llamó la atención, pues se trató de una especie nueva (*G. taludensis*) que apareció frente a las costas de Guerrero y de Sinaloa, entre 780

**Tabla 3. Especies de crustáceos decápodos (53) recolectadas durante los cruceros TALUD. El estatuto de las especies batipelágicas es incierto.**

	<i>Polycheles pacificus</i>
<i>Sergestes halia</i>	<i>Nephropsis occidentalis</i>
<i>Sergestes similis</i>	<i>Calocarides quinqueseriatus</i>
<i>Sergia filicta</i>	<i>Callianopsis goniophthalma</i>
<i>Sergia maxima</i>	<i>Parapagurus foraminosus</i>
<i>Sergia phorca</i>	<i>Neolithodes diomedea</i>
<i>Hymenodora glacialis</i>	<i>Munida bapensis</i>
<i>Gennadas sordidus</i>	<i>Munidopsis depressa</i>
<i>Gennadas incertus</i>	<i>Munidopsis hystrix</i>
<i>Systelaspis braueri paucispinosa</i>	<i>Munidopsis hendersoniana</i>
<i>AcanthePHYra brevirrostris</i>	<i>Munidopsis palmatus</i>
<i>Pasiphaea emarginata</i>	<i>Munidopsis quadrata</i>
<i>Pasiphaea americana</i>	<i>Munidopsis ciliata</i>
<i>Pasiphaea pacifica</i>	<i>Munidopsis cf. lignaria</i>
<i>Plesionika sanctaetatalinae</i>	<i>Munidopsis cf. nitida</i>
<i>Processa pippinae</i>	<i>Munidopsis scabra</i>
	<i>Galathea diomedea</i>
	<i>Uroptychus pubescens</i>
<i>Lebbeus scrippsi</i>	<i>Ethusa gracilis</i>
<i>Heterocarpus vicarius</i>	<i>Trachycarcinus corallinus</i>
<i>Heterocarpus affinis</i>	<i>Cancer johngarthi</i>
<i>Pandalopsis ampla</i>	
<i>Glyphocrangon taludensis</i>	
<i>Glyphocrangon spinulosa</i>	<i>Benthescymus tanneri</i>
<i>Glyphocrangon sicaria</i>	<i>Hymenopenaeus doris</i>
<i>Parapontophilus occidentalis</i>	<i>AcanthePHYra brevicarinata</i>
<i>Metacragon procax</i>	<i>Pasiphaea magna</i>
<i>Paracragon aerolata</i>	<i>Plesionika trispinus</i>
<i>Sclerocrangon atrox</i>	

Figura 15. Principales especies de crustáceos recolectados durante los cruceros TALUD. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se observan: un lofogástrida, dos *Heterocarpus*, tres *Glyphocrangon* y una vista dorsal de *Nephropsis*.



y 1879 m de profundidad (Hendrickx 2010). El tercer grupo dominante contiene las especies de *Munidopsis*, afín a los cangrejos ermitaños, muy cercano al langostino rojo (“red crab”), pero típico de aguas profundas. Contrariamente a los camarones, son generalmente de color blanco y algunas especies son ciegas (poseen ojos pero sin pigmentos), pues han perdido el sentido de la visión en un mundo sin luz. La especie dominante es *M. depressa*, muy abundante pero que no rebasa unos 3 cm de longitud. Se recolectaron nueve especies de *Munidopsis*, incluso algunas no registradas en aguas mexicanas (p. ej., *M. palmatus* de Chile). Los muestreos en la porción norte del golfo central revelaron también la presencia de abundantes poblaciones de *Munida bapensis* previamente descrita por Hendrickx (2000) hace 10 años basado en tan solo tres especímenes recolectados por el B/O “El Puma” en una muestra de sedimentos. El material recolectado no reveló la presencia masiva de Lithodidae,

como ocurre en latitudes más elevadas. Si bien algunos ejemplares salieron en los muestreos más profundos (*Neolithodes diomedea*; en 1400 m), fue algo excepcional. Algunas especies afines a *N. diomedea* que se distribuyen desde California hasta Alaska y que representan un potencial comercial muy grande en esta región (los llamados “king crabs”), quizás se encuentran en aguas más profundas del Golfo de California, y muy probablemente en la porción mexicana de la corriente de California.

Las aguas profundas del Pacífico mexicano se caracterizan por la casi ausencia de cangrejos. Solamente dos especies, *Trizocarcinus corallinus* y *Ethusina gracilipess*, han sido recolectadas de manera muy escasa. En cambio, una pequeña langosta, *Nephropsis occidentalis* (Fig. 15), aparece con frecuencia en las muestras. Aliado de *Nephrops norvegicus*, el langostino del mar del Norte, sujeto a una intensa pesca comercial, esta pequeña langosta (longitud máxima, 14 cm) se distribuye en el Pacífico este entre el Golfo de California central y Chile (Hendrickx 2003). En las campañas TALUD se capturó entre 1105 y 1295 m de profundidad, en una zona donde la concentración de O<sub>2</sub> es todavía muy baja. Considerando que suele acompañar a *Heterocarpus affinis* en las muestras por arrastre, estas dos especies podrían constituir un recurso explotable comercialmente.

Entre las especies más curiosas encontradas, tenemos las langostas de aguas profundas de la familia Polychelidae. Su insólita forma y su fragilidad sorprenden al mirarlas por primera vez. Escasamente capturadas en el Pacífico este, son verdaderas curiosidades de museo. De las seis especies conocidas para el Pacífico este (dos con registros en aguas mexicanas), sólo se logró capturar una: *Polycheles pacificus*. Contrariamente a sus hermanas las langostas espinosas, no presentan ningún interés comercial debido a su pequeña talla y su delgado cuerpo. En el Pacífico mexicano, los Pylochelidae se encuentran más bien por debajo de los 2000 m de profundidad, zona donde el oxígeno disuelto inicia una franca recuperación (Hendrickx y Serrano 2010). Otra sorpresa fue la captura de una nueva especie de “camarón” (*Odontozoa foresti*; Hendrickx 2002), de la familia Stenopodidae, la cual contiene especies de aguas profundas pero también especies asociadas con los arrecifes coralinos.

El ámbito pelágico profundo frente a las costas de México también forma parte de la ZMO, pues esta zona de deficiencia en oxígeno cubre casi la totalidad de los estratos meso y batipelágicos. Allí, por debajo y por encima de la ZMO,

se encuentra una amplia serie de camarones pertenecientes esencialmente a los géneros *Gennadas*, *Sergestes* y *Sergia* dentro de los Dendrobranchiata, y a los géneros *Pasiphaea* y *Acanthephyra* dentro de los Caridea. Son nadadores potentes, capaces de desplazarse en las corrientes marinas y forman parte del micronecton. Desafortunadamente, durante los cruceros, no se contó con un equipo que permitiera realizar muestreos discretos (p. ej., en horizontes batimétricos diferentes) y las muestras de las que se dispone fueron obtenidas mediante arrastres oblicuos entre 0 y 1500 m de profundidad. Por lo anterior, es poco lo que se puede concluir acerca de la distribución vertical de las especies encontradas. En el Golfo de California, existen evidencias de la presencia de algunas especies (p. ej., *Sergestes similis*, *Pasiphaea americana*) por encima de la ZMO (Hendrickx y Estrada-Navarrete 1996). Algunas especies efectúan amplias migraciones verticales (día-noche) en la zona de la corriente de California, donde la ZMO es mucho menos marcada. En el Golfo de California se desconoce cómo es que estas especies solucionaron el problema de una hipotética migración vertical dentro de la ZMO. Hasta donde se sabe, solo una especie de camarones micronectónicos, *Gennadas sordidus*, presenta un fuerte desarrollo de sus branquias, característica que le permite sobrevivir en zonas poco oxigenadas, pues el aumento de la superficie branquial mejora la captación neta de oxígeno.

## Los Lophogastrida

Un grupo de crustáceos típicamente batipelágicos son los lofogástridos o mysidáceos, conocidos comúnmente como camarones zarigüeya. Este grupo es uno de los menos estudiados en el Golfo de California y en el Pacífico tropical mexicano. Por el contrario, es muy conocido en la región de la corriente de California donde se cuenta con mucha información basada en los muestreos realizados por buques norte-americanos en el pasado. Frente a México se cuenta con cinco especies: *Gnathophausia gracilis*, *G. scapularis*, *G. zoea*, *Neognathophausia ingens* (que llega a medir hasta 350 mm de longitud) y *N. gigas* (Ibarra-Rivera y Hendrickx 2008). Al igual que algunos camarones de profundidades, estas especies son de color rojo intenso a naranja (Fig. 15). Pueden ser muy abundantes y son consumidores de zooplancton, lo que los transforma en un eslabón esencial de la cadena trófica a grandes profundidades. Su presencia en zonas pobres en oxígeno está facilitada por una enzima que les permite fijar el oxígeno aún en muy baja concentración.

Al igual que en el caso del micronecton, poco se sabe acerca de la distribución vertical de las especies de *Gnathophausia* y *Neognathophausia* en el Pacífico mexicano debido a la escasez de muestreos efectuados con equipos que permitan muestrear de manera discreta un horizonte batimétrico determinado.

## Los Equinodermos

Los equinodermos están entre las especies marinas más llamativas y conocidas. ¿Quién no conoce una estrella de mar? Sin embargo, el grupo incluye una variedad extraordinaria de especies y de formas, desde los típicos erizos hasta los enigmáticos crinoideos, verdaderos fósiles vivos. Al igual que en los otros grupos, la fauna de equinodermos de las aguas profundas del Pacífico mexicano está muy mal conocida. La taxonomía del grupo también es complicada y se requiere mucha experiencia y contar con la bibliografía adecuada, por lo general difícil de conseguir ya que data en su mayoría del principio del siglo XX. Cuatro grupos de equinodermos fueron obtenidos durante los cruceros: los Asteroidea (estrellas de mar), los Echinoidea (erizos), los Ophiuroidea (estrellas quebradizas) y los Holothuroidea (pepinos de mar).

Los erizos estuvieron pobremente representados (cuatro especies), pero destacando la extraordinaria abundancia de dos especies ocasionalmente simpátricas, *Briaster towsendi* y *Briopsis pacifica*, que alcanzaron densidades estimadas de más de 2000 especímenes por hectárea en algunos muestreos en la porción SO del Golfo de California, entre 900 y 1150 m. En ambas especies, estas muy altas densidades fueron alcanzadas en condiciones de oxigenación muy bajas (menores de  $0.3 \text{ O}_2 \text{ ml l}^{-1}$ ). Las estrellas alcanzaron una diversidad mucho mayor, con 18 especies, incluyendo una especie no descrita del género *Radiaster*. Eso representa el 30 % de todas las especies conocidas para el Pacífico de México por debajo de los 500 m de profundidad. El conjunto de estrellas de aguas profundas obtenido durante el proyecto es también el más importante recolectado desde el crucero exploratorio del "Velero IV", en 1940. Todas las especies fueron recolectadas por debajo de la ZMO que se extiende por la zona centro y sur del Golfo de California, o en el umbral de la zona donde prevalecen condiciones de hipoxia moderada hasta severa. Las concentraciones de oxígeno disuelto epibentónicas asociadas con la captura de los ejemplares indica una fuerte tolerancia a condiciones de hipoxia severa (menores a  $1 \text{ ml l}^{-1}$

O<sub>2</sub>) para la mayoría de las especies, y de hipoxia moderada para *Ctenodiscus crispatus* y *Nymphaster diomedea* (Hendrickx et al., 2011).

En el caso de los pepinos de mar, la colección obtenida incluyó representantes de cinco de los seis órdenes de Holothuroidea: tres especies de Dendrochirotida, dos Dactylochirotida, dos Aspidochirotida, cuatro Elaspodida y dos Molpadiida. Los Apodida no estuvieron representados en las muestras obtenidas, pero probablemente se encuentran en aguas todavía más profundas. De estas 13 especies, capturadas por debajo de los 350 m de profundidad (377-2200 m), 11 fueron identificadas a nivel de especies y dos, pertenecientes a los géneros *Ypsilocucumis* y *Mitsukuriella*, son nuevas para la ciencia (Massin y Hendrickx 2011). Además, previamente se había reconocido ya otra especie nueva, *Synallactes virgulosolida* (Massin y Hendrickx 2010), recolectada frente a Baja California Sur, a 1030 m de profundidad, y que constituye el primer registro de este género para el Golfo de California. Comparativamente con otras áreas del mundo donde las holoturias de aguas profundas suelen ser muy abundantes, el número reducido de especímenes recolectados durante las campañas podría estar relacionado con la presencia de la ZMO a lo largo del Pacífico mexicano. Con 13 especies identificadas o reconocidas como nuevas, el material recolectado durante los cruceros del proyecto TALUD representa el 42% de todas las especies (31 en total) de holoturias conocidas para el Pacífico mexicano por debajo de los 350 m de profundidad, con una mayor diversidad en el Golfo de California (20 especies).

El cuarto grupo de equinodermos recolectados en las campañas, las ofiuras, es probablemente el más complejo desde un punto de vista taxonómico. Una revisión preliminar del material recolectado indica la presencia de por lo menos 30 especies, de las cuales sólo cuatro han sido identificadas hasta la fecha. Las ofiuras revisten una importancia ecológica fundamental, pues pueden ser extremadamente abundantes y son filtradores de partículas en suspensión. Las mayores capturas obtenidas durante los cruceros corresponden a estaciones localizadas en el Golfo de California central, entre 1200 y 1400 m de profundidad (varios cientos de especímenes por arrastre).

## Peces

Los peces que habitan ambientes por debajo del límite de la zona fótica (<200 m) son considerados peces de profundidad (Marshall 1971). Los pe-

ces de ambientes profundos están representados en el Golfo de California y en Pacífico central mexicano por al menos 195 especies repartidas en 143 géneros y 83 familias (Castro-Aguirre y Balart 1996). La primera expedición en el Pacífico mexicano, a bordo del vapor "Albatross", se realizó en 1885 y 1889, y los peces recolectados fueron estudiados por Gilbert (1890, 1892), Garman (1899) y Townsend y Nichols (1925). Otros informes se han basado en organismos de ambientes profundos varados en superficie, por ejemplo la quimera narizona *Harriota raleighiana* (Castro-Aguirre et al. 2007) y el granadero *Coryphaenoides oreinos* (González-Acosta et al. 2007) o especies que presentan migraciones eventuales de lo profundo hacia aguas someras como el tiburón espinoso *Echinorhinus cookie* (Aguirre et al. 2002). Lo anterior refleja una exploración inadecuada y no sistemática, en mayor parte ligada a que estos recursos son de difícil acceso a los artes convencionales.

Un factor limitante para la investigación de especies de mares profundos, es la disponibilidad de ejemplares para realizar estudios comparados. Debido a esto, la posición sistemática de algunos grupos dista mucho de estar plenamente determinada. Durante los cruceros del proyecto se capturó una quimera (Chimaeridae) del género *Hydrolagus* (Fig. 16 A) y un pez cabeza gorda (Psychrolutidae) del género *Psychrolutes* (Fig. 16 B) que no han sido registradas para el país. La sistemática de estos grupos no está bien conocida. A nivel mundial, a medida que se obtienen más muestras, se han ido describiendo nuevas especies, lo que complica su determinación.

Entre el material recolectado durante el proyecto, la especie más abundante fue la brótola negra, *Cherublemma emmelas*. Su distribución batimétrica va desde aguas superficiales en el caso de los huevos y los estadios larvales, hasta 1010 m de profundidad, para el caso de los juveniles y los adultos. El límite más profundo se incrementó en 260 m a partir de los datos registrados en el proyecto (Aguirre-Villaseñor y Castillo-Velázquez 2011).

La familia Macruridae presentó cuatro de las ocho especies registradas para el Pacífico mexicano. La especie más abundante fue *Nezumia liolepis* con 99 organismos, seguido de *Coryphaenoides capito* con 40 organismos, *C. anguliceps* con siete organismos y *N. convergens* con dos organismos (Moreno-Flores 2009). El registro de mayor profundidad para *Coryphaenoides capito* era de 1000 m; sin embargo, en este proyecto se han recolectado 23 organismos a profundidades de hasta 1750 m. Analizando la estructura de tallas se observa la presencia de tres grupos: el grupo 1 fue más abundante en el estrato menor

a 1000 m, mientras que los grupos 2 y 3 fueron más abundantes en el estrato mayor a 1001 m. Esto parece indicar una tendencia de que los organismos más grandes habitan mayores profundidades (Aguirre et al. 2010a).

La familia Ogocephalidae (pez vampiro) se encuentra representada, en aguas someras (<200 m) y en aguas profundas (>200 m), por diferentes especies. La más abundante fue *Dibranchius spinosus*; su registro batimétrico mayor era de 1439 m y en el TALUD se recolectaron cuatro organismos entre 1526 y 1750 m. Este nuevo registro incrementa el intervalo en 311 m. Analizando la estructura de tallas se observó la presencia de tres grupos: el grupo 1 con organismos menores a 5 cm, el grupo 2 con organismos entre 6 y 13 cm y el grupo 3 entre 12 y 18.3 cm. Respecto a la profundidad, se observó que los organismos de menor tamaño habitan aguas menos profundas. Respecto a la concentración de oxígeno disuelto, los organismos pequeños se presentaron en intervalos con menor concentración (de 0.04 a 0.38 ml l<sup>-1</sup>), mientras que los de los grupos 2 y 3 fueron encontrados en un intervalo más amplio (0.04 a 0.72 ml l<sup>-1</sup>) (Salas y Aguirre 2010).

Dentro de un mismo lance, en ocasiones se capturaron organismos adultos y embriones fuera de sus posibles madres. El tiburón renacuajo *Cephalurus cephalus* (Scyliorhinidae) es una especie aplacentaria vivípara u ovovivípara. En un mismo lance se capturaron 13 crías y tres adultos (dos hembras y un macho) y, además en otro lance, se recolectó un segundo macho. Los resultados de las técnicas genéticas de paternidad empleadas parecen indicar que los 13 embriones son hermanos e hijos de una misma hembra (Aguirre et al. 2010b).

Como ya se mencionó, la escasa disponibilidad de material que sirva para estudios comparativos es una limitante para la investigación. A menudo ocurre que en la búsqueda de especímenes, algunos museos poseen escasos ejemplares de una determinada especie o ninguno. De esta manera, los estudios de anatomía basados en osteología, miología, etc., no pueden realizarse, impidiendo obtener importante información. Un caso curioso es el tiburón renacuajo *Cephalurus cephalus* (Fig. 17): Kato et al. (1967) señalaron que las relaciones mirísticas de los especímenes del Pacífico mexicano y del Golfo de California difieren sustancialmente de las de los organismos procedentes de Chile y Perú y a la fecha la discusión sigue sin resolverse.

Basándose en la experiencia adquirida durante el proyecto TALUD, es evidente que se requiere de un esfuerzo mancomunado de los ictiólogos actuales,

junto a otros especialistas, en especial del área de la biología molecular, para realizar estudios basados en técnicas electroforéticas o en análisis de ADN y, para ello se requieren especímenes recolectados bajo condiciones especiales.

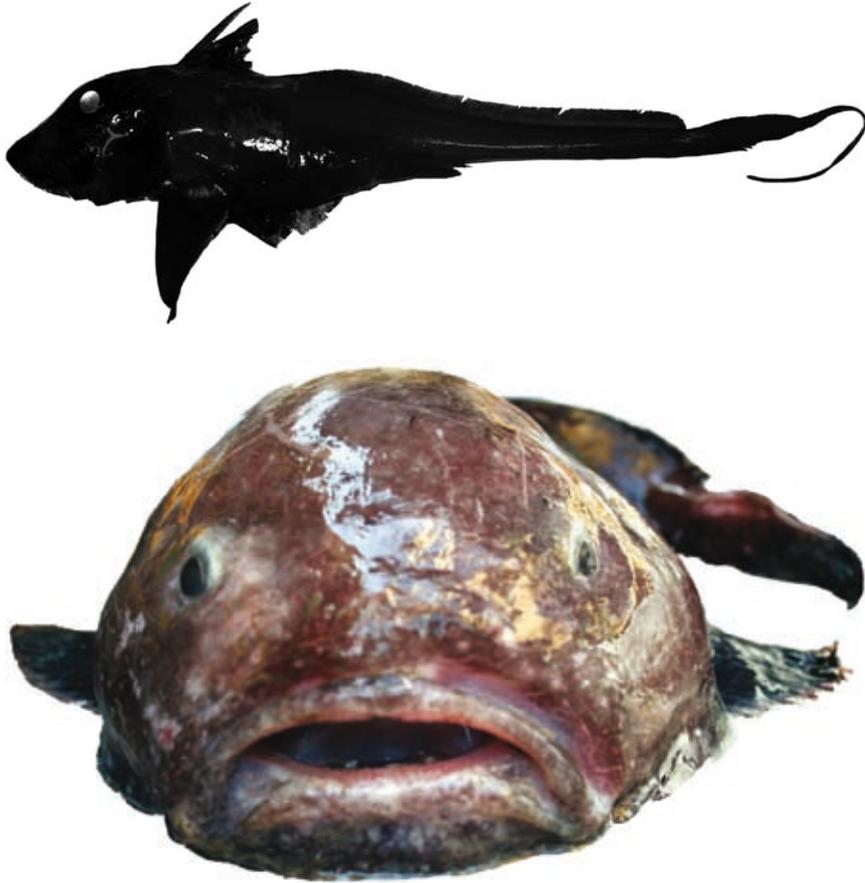
## CONCLUSIONES

La situación crítica de los ecosistemas de la plataforma continental y de las comunidades animales que allí habitan ha sido reconocida a nivel mundial. Esta situación ha sido provocada, entre otras cosas por la sobreexplotación de los recursos. Esto ha obligado a dirigir la atención a la explotación de recursos naturales a mayores profundidades y es esta tendencia la que en el futuro, afectará a la biodiversidad de estos ecosistemas. Es por esto que diversos actores tienen el compromiso de contribuir con su conservación. Desde la academia, es pertinente adelantarse al hecho y contribuir a su conocimiento, y así sentar una línea base que facilitará la toma de decisiones y el desarrollo de políticas públicas en la materia. Por su parte, los manejadores de los recursos naturales, tienen la obligación de diseñar un sistema de evaluación y control de la ejecución de las actividades del programa de planeación del sector pesquero, basado en información científica y técnica que oriente y apoye el desarrollo del sector. Conservar y ampliar el acervo de las colecciones taxonómicas es parte fundamental para lograr este objetivo, y el proyecto TALUD, que aquí presentamos, ha adoptado estos lineamientos desde sus inicios.

En general, la fauna encontrada durante el proyecto fue muy diversa, y se comprobó la presencia de especies no registradas anteriormente para la región o especies nuevas para la ciencia. A la fecha y, de acuerdo con el material obtenido durante las campañas, se han logrado identificar 344 especies (107 de poliquetos, 1 de copépodo parásito, 47 de copépodos bentónicos, 6 de lofogástridos, 53 de crustáceos decápodos, 56 de moluscos, 65 de equinodermos y 9 de peces). Sin embargo, es muy probable que este número aumente de manera significativa una vez completada la revisión de la totalidad del material recolectado durante los cruceros TALUD, en particular en el caso de los copépodos y de los poliquetos.

Los resultados permiten reconocer la importancia ecológica y económica de la ZMO en la distribución de las especies y comunidades a lo largo del Pacífico mexicano. Por un lado, la disminución drástica y la desaparición del oxígeno en esta zona genera una barrera química que impide los intercambios entre la

Figura 16. Especímen de: A) una quimera *Hydrolagus* sp. de 40 cm de longitud total y B) un pez cabeza gorda *Psychrolutes* sp. de 35 cm de longitud total.



fauna que habita por encima y por debajo de la misma e incluso este fenómeno puede ser un factor importante en los procesos de especiación. La información disponible hasta la fecha indica que las relaciones biológicas entre estas dos faunas son inexistentes en la mayor parte de las zonas donde predomina este fenómeno, y ambas comunidades están formadas por especies distintas. En la plataforma continental, en la franja que se encuentra por encima de la ZMO, macrocrustáceos tales como la galera o esquila *Squilla bigelowi* (una especie de estomatópodos), la langostilla *Pleuroncodes planipes* y el camarón *Solenocera*

*mutator* toleran concentraciones de oxígeno en ocasiones inferiores a 0.5 ml l<sup>-1</sup>. Previo a nuestro estudio, se contaba con muy poca información acerca de la tolerancia de las especies que habitan por debajo de la ZMO, pues las capturas en esta zona han sido más bien ocasionales y raramente se medía el oxígeno al nivel del fondo. El conjunto de datos obtenidos durante los cruceros permite constatar que algunas especies pueden vivir en concentraciones de oxígeno extremadamente bajas y ocupan una franja ubicada directamente por debajo de la ZMO, aproximadamente entre 700 y 1000 m. Otro ejemplo es el bivalvo *Lucinoma heroica*, cuya población abunda bajo estas condiciones de oxigenación y rara vez la encontramos en zonas con mayor concentración de oxígeno. En otros términos, la comunidad profunda y aquella de la plataforma presentan un comportamiento simétrico, justo por encima de la ZMO y justo por debajo, pero las especies son diferentes.

La franja batimétrica correspondiente a la ZMO representa una zona donde solamente algunas especies lograron establecerse debido a una serie de adaptaciones que les permiten tolerar concentraciones de oxígeno muy bajas. Esta franja, muy extensa en algunas secciones de la costa del Pacífico mexicano, determina una zona de “no vida”, donde las actividades pesqueras no pueden desarrollarse. Esto también tiene implicaciones muy serias para la pesca, pues es fundamental analizar con cuidado la dinámica de las poblaciones profundas explotables así como definir los stocks disponibles antes de planear cualquier tipo de explotación.

En conjunto, los resultados de esta aportación justifican la importancia de continuar con el desarrollo de los cruceros oceanográficos del proyecto. Pese a

**Figura 17. Hembra de tiburón renacuajo, *Cephalurus cephalus* de 243 mm de longitud total.**



la limitación de los recursos tanto presupuestales como de personal, los logros son importantes y se ha generado información novedosa. Esto es sólo una pequeña muestra del desconocimiento que tenemos de este bioma que, por sus características únicas, lo hace crucial en la conservación y riqueza científica que alberga y su conocimiento pleno puede reposicionar a México como un país megadiverso.

La fuerte heterogeneidad de las comunidades de aguas profundas ha sido demostrada en varias ocasiones. Este fenómeno, conocido como distribución en parches (“patchiness” en inglés), es el reflejo de la influencia de diversos factores, no siempre los mismos, que rigen la distribución y la abundancia de las comunidades. Se ha documentado que existe cierta tendencia de las comunidades a sufrir cambios en sus abundancias y diversidad en relación con la profundidad, el contenido de materia orgánica del sedimento, los niveles de oxigenación y la temperatura del agua, así como probablemente otros factores más difíciles de cuantificar a pequeña escala (p. ej., las corrientes profundas, las fuentes de alimentos, los ciclos reproductivos y los niveles de depredación). Estos temas son puertas abiertas para otros tipos de investigaciones y es una oportunidad interdisciplinaria única para colaboración con otras instituciones con experiencia en aguas profundas.

A nivel mundial, apenas se están revelando los secretos de las comunidades oceánicas que se distribuyen por debajo de los 1000 m de profundidad. En algunas regiones ya se ha trabajado con equipos que permiten efectuar arrastres a más de 4000 m, descubriendo un gran número de especies nuevas y comunidades con una riqueza insospechada. Hoy en día, el proyecto TALUD representa el mayor esfuerzo a cargo de instituciones mexicanas para el estudio de las comunidades de aguas profundas del Pacífico de México. Con más de 60 trabajos publicados, en prensa o remitidos a publicaciones, este proyecto ha sido, es y seguirá siendo una fuente importante de información que permitirá incrementar nuestro conocimiento acerca de los ecosistemas profundos de la ZEE de México. Sin embargo, considerando que la zona marina con profundidades mayores a 1000 m equivale aproximadamente a 87 % de esta ZEE, la labor restante es gigantesca y requerirá de una política decidida en materia de exploración, pues en el Pacífico mexicano queda mucho por hacer, en particular en la porción mexicana de la región de la corriente de California y en la parte marginal del Golfo de Tehuantepec. También quedan por resolver asuntos cruciales, tales como la influencia de las corrientes profundas sobre la distribución

y la dispersión de las especies, la posibilidad de que en zonas donde la ZMO está menos extendida existen intercambios entre la fauna somera y la fauna profunda, y el comportamiento de la ZMO en las aguas oceánicas de la ZEE que se extienden más allá del área explorada durante las campañas TALUD. Solamente así, se logrará elucidar y entender todos los aspectos biológicos y fisiológicos ligados a las comunidades naturales que allí viven. Para ello, se requiere de un enorme esfuerzo tanto en tiempo como en infraestructura, pues esta “última frontera” en nuestra Tierra ¡no se dejará franquear fácilmente!

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo del CONACYT (proyecto 31805-N) y de la DGAPA-UNAM (proyecto IN217306-3), México. El tiempo de buque fue concedido por la UNAM a través de la Coordinación Técnica de la Investigación Científica. Se agradece particularmente a A. Núñez Pasten, J. Salgado Barragán, A. Galavíz Solís, H. Bojórquez Leyva, A. Castro del Río, A. C. Ruíz Fernández, J. Ruelas, C. F. Flores Cabrera, S. Rendón Rodríguez, A. Toledano Granados por la ayuda especializada proporcionada en los cruceros para la toma de muestras, el manejo de equipo y el análisis de diversos parámetros ambientales; a J. Gómez-Gutiérrez del CICIMAR por proporcionarnos la foto de la figura 5 y a L. Álvarez del INE por el mapa de la figura 8. Se agradece también por la ayuda proporcionada a alumnos y ayudantes durante la realización de los 13 cruceros que conforman el proyecto TALUD y en especial a aquellos que realizaron su tesis de grado utilizando material recolectado en los cruceros: J.S. Ibarra Rivera, C.M. Zarate Montes, K.F. Rodríguez Soberanes, D.J. Moreno Flores. Finalmente, agradecemos a toda la tripulación del B/O El Puma por la ayuda proporcionada.

## REFERENCIAS

- Aguirre, H., J. Madrid y J. A. Virgen. 2002. Presence of *Echinorhinus cookei* off central Pacific Mexico. *Journal of Fish Biology* 61:1403-1409.
- Aguirre, H., D. Moreno, J. Madrid. y C. Salas. 2010a. New depth record of *Coryphaenoides capito* (Garman, 1899) Bighead grenadier (Gadiformes: Macrouridae) from the Gulf of California, Mexico. En: *12th Deep-sea Biology Symposium*, Reikiavik, Islandia, del 7 al 11 junio de 2010. P. 94.

- Aguirre, H., S. A. García, J. Madrid y C. Salas. 2010b. Genetic paternity test of *Cephalurus cephalus*, lollipop catshark (Scyliorhinidae), by random amplified polymorphic DNA techniques. En: *12th Deep-sea Biology Symposium*, Reikiavik, Islandia, del 7 al 11 junio de 2010. P. 93.
- Aguirre, H. y R. Castillo-Velázquez. 2011. New depth record of *Cherublemma emmelas*, black brotula (Ophidiiformes: Ophidiidae) from the Gulf of California, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 82: 713-715.
- Boxshall, G. A. 1998. Host specificity in copepod parasites of deep-sea fishes. *Journal of Marine Systems* 15: 215-223.
- Castro-Aguirre, J. L. y E. F. Balart. 1996. Contribución al conocimiento del origen y relaciones de la ictiofauna de aguas profundas del Golfo de California, México. *Hidrobiológica* 6(1-2): 67-76.
- Castro-Aguirre, J. L., H. Santana-Hernández, E. Espino-Barr y M. C. Jiménez-Quiroz. 2007. Primer registro de *Harriota raleighiana* (Chondrichthyes: Holocephali: Rhinochimaeridae) en la costa del Pacífico central de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 78: 489- 492.
- Díaz, R. J. y Y. Rosenberg. 1995. Marine benthic hypoxia: A review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review* 33: 245-303.
- Faxon, W. 1895. Reports on an exploration off the west coast of Mexico, Central and South America, and off the Galapagos Islands, in charge of Alexander Agassiz, carried on by the U.S. Fish Commission steamer "Albatross", during 1891, lieut. Commander Z.L. Tanner, U.S.N., commanding. XV. The stalk-eyed Crustacea. *Memoirs of the Museum of Comparative Zoology at Harvard College* 18, 1-292.
- Garman, S. 1899. Deep sea fishes. Reports on the exploration off the west coast of Mexico, Central and South America and off Galapagos Islands in charge of Alexander Agassiz, by the U.S. Fish Commission Steamer "Albatross" during 1891. *Memoirs of the Museum of Comparative Zoology at Harvard College* 24: 1-431.
- Gilbert, C. H. 1890. A preliminary report of the fishes collected by the steamer "Albatross" on the Pacific coast of North America during the year 1889. *Proceedings of the United States National Museum* 13:49-126.
- Gilbert, C. H. 1892. Descriptions of thirty-four new species of fishes collected in 1888 and 1889, principally among the Santa Barbara Island and in the Gulf of California. *Proceedings of the United States National Museum* 14:539-566.

- Gómez, S., G. B. Deets, J. E. Kalman y F. N. Morales-Serna. 2010. *Lophoura brevicollum* n. sp. (Copepoda: Siphonostomatoida: Sphyrriidae), a parasite of the smooth granadier *Nezumia liolepis* (Gilbert, 1890) (Pisces: Macrouridae) from the Eastern Pacific, and a new record and new host of *Lophoura unilobulata* Castro R. and Gonzalez. *Journal of Crustacean Biology* 30(1):129-140.
- González-Acosta, A. F., N. Álvarez-Pliego, M. C. Jiménez-Quiróz, J. L. Castro-Aguirre, E. Espino-Barr y H. Santana-Hernández. 2007. Nuevo registro de *Coryphaenoides oreinos* (Teleostei: Gadiformes: Macrouridae) en el Pacífico central mexicano. *Hidrobiológica* 17(2):189-192.
- Helly J. J. y L. A. Levin. 2004. Global distribution of naturally occurring marine hypoxia on continental margins. *Deep-Sea Research I* 51:1159-1168.
- Hendrickx, M. E. 2000. The genus *Munida* Leach (Crustacea, Decapoda, Galatheididae) in the eastern tropical Pacific, with description of two new species. *Bulletin de l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique* 70:163-192.
- Hendrickx M. E. 2001. Occurrence of a continental slope decapod crustacean community along the edge of the minimum oxygen zone in the southeastern Gulf of California, Mexico. *Belgian Journal of Zoology* 131(Suppl. 2):95-109.
- Hendrickx M. E. 2002. A new deep water species of *Odontozona* Holthuis (Decapoda, Stenopodidae) from the Southern Gulf of California, Mexico. *Crustaceana* 75(3-4): 405-412.
- Hendrickx, M. E. 2003. Distribution and size of the Pacific deep water lobsterette, *Nephropsis occidentalis* Faxon, 1898 (Decapoda: Astacidea: Nephropidae) in the S. E. Gulf of California, Mexico. *Crustaceana* 76(2):207-216.
- Hendrickx, M. E. 2004. Distribution and estimation of body size and weight of four species of deep water shrimps in the SE Gulf of California, Mexico. *Crustaceana* 76(9):1025-1036.
- Hendrickx, M. E. 2010. A new species of *Glyphocrangon* (Decapoda: Caridea: Glyphocrangonidae) from off the coast of western Mexico. *Zootaxa* 2372:358-366.
- Hendrickx, M. E. y F. D. Estrada-Navarrete. 1996. *Los camarones pelágicos (Crustacea: Dendrobranchiata y Caridea) del Pacífico mexicano*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de México, México. 157 pp.
- Hendrickx, M. E. y D. Serrano. 2007. Efecto de la zona de mínimo oxígeno sobre los corredores pesqueros a lo largo del Pacífico mexicano. En: *Memorias del XIV Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología del Mar*. Nuevo Vallarta, Nayarit, México, del 29 al 31 de octubre de 2007. Pp. 1-2.

- Hendrickx, M. E. y D. Serrano. 2010. Impacto de la zona de mínimo de oxígeno sobre los corredores pesqueros en el Pacífico mexicano. *Interciencia* 35(1):12-18.
- Hendrickx, M. E., C. Mah y C. M. Zárate-Montes. 2011. Deep water Asteroidea (Echinodermata) collected during the TALUD cruises in the Gulf of California, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 82: 798-824.
- Ho, J. S. 1970. Revision of the genera of the Chondracanthidae, a copepod family parasitic on marine fishes. *Beaufortia* 229(17):105-218.
- Ho, J. S. 2001. Why do symbiotic copepods matter? *Hydrobiologia* 453/454:1-7.
- Ho, J. S., S. Gómez y E. Fajer-Ávila. 2001. *Lepeophtheirus simplex* sp. n., a caligid copepod (Siphonostomatoida) parasitic on "botete" (bullseye puffer, *Sphoeroides annulatus*) in Sinaloa, Mexico. *Folia Parasitologica* 48:240-248.
- Ibarra-Rivera, J. S. y M. E. Hendrickx. 2008. Los géneros *Gnathophausia* y *Neognathophausia* (Malacostraca: Lophogastrida) en el Pacífico mexicano. *Contributions to the Study of East Pacific Crustaceans*. [Contribuciones al Estudio de los Crustáceos del Pacífico Este] Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. 5(1):55-93.
- Kato, S., S. Springer y M. H. Wagner. 1967. *Field guide to Eastern Pacific and Hawaiian sharks*. United States Fish and Wildlife Service, Circular 271:1-47.
- Levin, L. A. 2003. Oxygen minimum zone benthos: adaptation and community response to hypoxia. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review* 41:1-45.
- Levin, L.A., J.D. Gage, C. Martin y P.A. Lamont. 2000. Macrobenthic community structure within and beneath the oxygen minimum zone, NW Arabian Sea. *Deep-Sea Research Part II*, 47:189-226.
- Levin, L.A., J.E. Etter, M.A. Rex, A.J. Gooday, C.R. Smith, J. Pineda, C.T. Stuart, R.R. Hessler y D. Pawson. 2001. Environmental influences on regional deep-sea species diversity. *Annual Review of Ecology and Systematics* 32:51-93.
- Marshall, N.B. 1971. *Explorations in the life of fishes*. Cambridge: Harvard University Press.
- Massin, C. y M. E. Hendrickx. 2010. A new species of deep-water Holothuroidea (Echinodermata) of the genus *Synallactes* from off western Mexico. *Scientia Marina* 74(3):599-603.
- Massin, C. y M. E. Hendrickx. 2011. Deep-water Holothuroidea (Echinodermata) collected during the TALUD cruises off the Pacific coast of Mexico, with the description of two new species. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 82: 413-443..
- Méndez, N. 2006. Deep-water polychaetes (Annelida) from the southeastern Gulf of California, Mexico. *Revista de Biología Tropical* 54(3):773-785.

- Méndez, N. 2007. Relationships between deep-water polychaete fauna and environmental factors in the southeastern Gulf of California, Mexico. *Scientia Marina* 71(3): 605-622.
- Méndez, N. 2009. Distribution and extraordinary abundance of the deep-sea *Melinnampharete gracilis* Hartman, 1969 (Polychaeta: Ampharetidae) in the Gulf of California, Mexico. *Cahiers de Biologie Marine* 50:273-276.
- Méndez, N. 2010. Collection and quantification of deep-sea macrobenthos: a case study of the polychaete *Melinnampharete gracilis*. En: *12th Deep-sea Biology Symposium, Reikiavik, Islandia*, del 7 al 11 junio de 2010. P. 54.
- Morales-Serna, F. N. y S. Gómez. 2010. A new bomolochid copepod parasitic on bullseye puffer *Spherooides annulatus* (Jenyns) from Mexico, with reassignment of some species of *Acantholochus* Cressey and *Hamaticolax* Ho & Lin. *Zootaxa* 2336:36-50.
- Moreno-Flores, D. J. 2009. Distribución de la familia Macruridae Gilbert y Hubbs, 1916 en el centro-sur del Golfo de California. Tesis de maestría, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Narayanaswamy, B.E., B.J. Bett y J.D. Gage. 2005. Ecology of bathyal polychaete fauna at an Arctic-Atlantic boundary (Faroe-Shetland Channel, North-east Atlantic). *Marine Biology Research* 1:20-32.
- Salas, C. y H. Aguirre. 2010. *Dibranchus spinosus* (Garman, 1899) distribution in the Mexican central Pacific. En: *12th Deep-sea Biology Symposium, Reikiavik, Islandia*, del 7 al 11 junio de 2010. P. 95.
- Townsend, C. M. y J. T. Nichols. 1925. Deep-sea fishes of the Albatross lower California expedition. *Bulletin of the American Museum of Natural History* 52:1-20.
- Wishner, K.F., C.J. Ashjian, C. Gelfman, M.M. Gowing, L. Kann, L.A. Levin, L.S. Mulineaux y J. Saltzman. 1995. Pelagic and benthic ecology of the lower interface of the Eastern Tropical Pacific oxygen minimum zone. *Deep-Sea Research Part I* 42: 93-115.
- Zamorano, P. 2006. Biocenosis y distribución de los moluscos asociados al talud continental del Pacífico mexicano. Tesis de maestría, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Zamorano, P. y M. E. Hendrickx. 2007. Biocenosis y distribución de los moluscos de aguas profundas: Una evaluación de los avances. En: E. Ríos-Jara, M.C. Esqueda-González y C.M. Galván-Villa (comps.). *Estudios sobre la Malacología y Conquiliología en México*. Universidad de Guadalajara, México. Pp. 48-49.
- Zamorano, P. y M. E. Hendrickx. 2009. Análisis latitudinal y batimétrico de la comunidad de moluscos de mar profundo en el Golfo de California, México. *Brenesia* 71-72: 41-54.

- Zamorano, P. y M. E. Hendrickx. 2011. State of knowledge about the community of mollusks on both sides of the Baja California Peninsula, Mexico: A comparative analysis. *Cahiers de Biologie Marine* 52: 13-22.
- Zamorano, P., M. E. Hendrickx y A. Toledano-Granados. 2007a. Distribution and ecology of deep water mollusks from the continental slope, southeastern Gulf of California, Mexico. *Marine Biology* 150(5):883-892.
- Zamorano, P., M. E. Hendrickx y A. Toledano-Granados. 2007b. New geographic and depth records for deep-water mollusks in the Gulf of California. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 78:311-318.
- Zamorano, P. y M. E. Hendrickx. 2012. Distribution of *Lucinoma heroica* (Mollusca: Bivalvia: Lucinidae) in the minimum oxygen zone in the Gulf of California, Mexico. *Marine Biodiversity Records* 5, e80 doi:10.1017/S1755267212000644.



# FORAMINÍFEROS Y OSTRÁCODOS RECIENTES DE LA ZONA BATIAL Y ABISAL DEL SUR DEL GOLFO DE MÉXICO

María Luisa Machain-Castillo,<sup>1</sup> Frank Raúl Gío-Argáez,<sup>1</sup> Elva Escobar-Briones<sup>1</sup>

## RESUMEN

El presente trabajo contribuye con información de las características y distribución de las microfaunas de foraminíferos bentónicos y ostrácodos de profundidades mayores de 1 000 m en el sur del Golfo de México, incluyendo aquellas de ambientes quimiosintéticos. Ambos grupos son componentes dominantes del sedimento del fondo marino y poseen indicadores ecológicos importantes. La distribución tanto de foraminíferos bentónicos como de ostrácodos se encuentra relacionada con las masas de agua de fondo.

En ambientes quimiosintéticos las poblaciones de foraminíferos son abundantes y están constituidas de especies similares a las de los ambientes aledaños, sugiriendo que las especies encontradas poseen la capacidad de adaptarse a condiciones extremas, ya que pueden ser anaerobios facultativos. El estudio reconoce diferencias entre las poblaciones vivas y la tanatocenosis. Aunque la composición taxonómica pueda ser similar, la composición geoquímica de los caparazones de estas dos (en particular su  $\delta^{13}\text{C}$ ) refleja las condiciones químicas del ambiente, por lo que ésta puede ser utilizada en el reconocimiento de ambientes quimiosintéticos pasados.

Por otro lado, se han reconocido ostrácodos viviendo en ambientes quimiosintéticos, sus poblaciones no son tan diversas ni abundantes como las de los foraminíferos.

<sup>1</sup> Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, México D. F., México.

Generalmente, las comunidades presentan valvas poco calcificadas, siendo la composición taxonómica similar a la de los ambientes a profundidades equivalentes, encontrándose géneros (e. g. *Xylocythere*) comunes tanto en ventilas hidrotermales como en infiltraciones frías que sugieren un patrón oportunista y gran adaptabilidad.

Palabras clave: foraminíferos, ostrácodos, microfauna bentónica, mar profundo, ambientes quimiosintéticos.

#### ABSTRACT

This report contributes with basic information on the uniqueness and occurrence of the benthic foraminifera and ostracod microfauna in the southern Gulf of Mexico at depths greater than 1000m, including the chemosynthetic environments. Both groups are dominant faunal components of the sea floor and have been considered important ecological indicators. In both cases, their occurrences are related to the deep water masses.

The foraminifera are abundant components in chemosynthetic environments in spite of co-occurring in background abyssal habitats, suggesting the capability to adapt to extreme conditions by their anaerobic facultative condition. This report differentiates the living (rose Bengal stained) foraminiferal assemblages from the thanatocoenosis. Although the taxonomic composition can be similar between the two assemblages their shell geochemical composition allows to separate them apart. Differences in their  $\delta^{13}\text{C}$  isotopic composition characterize the preferential environmental composition linking its occurrence to past chemosynthetic environments.

On the other hand the ostracods have been recorded in chemosynthetic habitats. Their assemblages are not as diverse or abundant as those of the foraminifera. These are similar to assemblages from background abyssal environments including both hydrothermal vents and cold seeps (e. g. *Xylocythere*). Their individuals are characterized by having their valves poorly calcified. The above suggest highly adaptable species with an opportunistic distribution pattern.

Keywords: Foraminifera, ostracods, benthic microfauna, deep-sea, chemosynthetic environments.

## INTRODUCCIÓN

Los foraminíferos (Orden Foraminiferida) y ostrácodos podocópidos (Clase Crustacea, Orden Podocopida), son dos de los grupos más abundantes del microbentos calcáreo marino. Éstos ocurren desde la línea de costa hasta los ambientes batiales y abisales en donde son abundantes (SenGupta *et al.* 2009, Maddocks *et al.* 2009). Ambos grupos incluyen especies que describen características de los hábitats y son utilizados como índices ecológicos debido a su especificidad ambiental, son importantes componentes del sedimento marino, por lo cual son útiles tanto en reconstrucciones ambientales actuales como en el registro geológico.

Los foraminíferos dominan en términos de biomasa y densidad las zonas batiales y abisales (e.g., Coull *et al.* 1977). Los valores de densidad superan los de otros grupos de la meiofauna y macrofauna (e.g., Snider *et al.* 1984, Gooday 1986, Smith 1992, Gooday *et al.* 2000, Cornelius y Gooday 2004) en diferentes partes del océano. En el norte del Golfo de México, Bernhard *et al.* (2008) han reconocido que la biomasa de foraminíferos supera a la de otros grupos de la meiofauna (metazoos) en al menos la mitad de las estaciones estudiadas. En los ecosistemas de mar profundo con condiciones hipóxicas y con presencia de sulfuros los foraminíferos son una componente importante de los ensamblajes allí encontrados (Bernhard *et al.* 2000, Robinson *et al.* 2004).

Los ostrácodos no son tan abundantes en aguas profundas, ya que su abundancia y diversidad decrecen rápidamente mas allá de la plataforma continental; sin embargo, este grupo es un constituyente común en los sedimentos carbonatados a todas las profundidades.

Ambos grupos han sido estudiados por diversos autores (Maddocks *et al.* 2009, Sen Gupta *et al.* 2009 y referencias allí citadas) en el Golfo de México. Los estudios citados se centran en el sector norte del golfo. En este capítulo se presenta un panorama general de las especies y/o asociaciones características de la zona batial y abisal del sur del Golfo de México así como los patrones de distribución de ambos grupos incluyendo las asociaciones encontradas en el volcán de asfalto Chapopote de la zona abisal del sur del Golfo de México que se caracteriza por tener condiciones quimiosintéticas.

## OSTRÁCODOS

En el sur del Golfo de México estos microcrustáceos se encuentran desde la línea de costa hasta más de 3000m de profundidad. La diversidad de este grupo en la zona batial y abisal es baja. En todo el golfo sólo se han reportado 18 especies formalmente descritas en estas zonas batimétricas (Machain-Castillo 1989, Maddocks *et al.* 2009), más 8 en nomenclatura abierta. Todas ellas pertenecen a 3 Subórdenes, 4 Superfamilias, 7 Familias, 6 Subfamilias, 4 Tribus y 15 Géneros (Tabla 1). En contraste 227 especies se han reportado para las diferentes profundidades (Maddocks *et al.* 2009).

**Tabla 1. Especies de ostrácodos reportadas para profundidades mayores de 1000m en el sur del Golfo de México.**

Suborden Cypridocopina
Superfamilia Macrocypridoidea
Familia Macrocyprididae
<i>Macrosarisa bensoni</i>
Superfamilia Pontocypridoidea
Familia Pontocyprididae
<i>Argilloecia posterotruncata</i> Bold
Suborden Bairdiocopina
Superfamilia Bairdioidea
Familia Bairdiidae
Subfamilia Bairdiinae
<i>Bairdoppilata? hirsuta</i> (Brady, 1880)
<i>Paranesidea? albatrossa</i> Maddocks 1969
Familia Bythocyprididae
<i>Bythocypris affinis</i>
<i>Bythocypris reniformis</i> Brady, 1880
<i>Zabythocypris helicina</i> Maddocks, 1969
<i>Z. hetedoxa</i> (Chapman, 1910)
Suborden Cytherocopina
Superfamilia Cytheroidea

Tabla 1. Continúa.

Subfamilia Krithinae
<i>Parakrithe alta</i> Bold, 1988
Familia Cytheruridae
Subfamilia Cytheropteroninae
<i>Cytheropteron morgani</i> Kontrovitz, 1976
Familia Trachyleberididae
Subfamilia Buntoniinae
Tribu Buntoniini
<i>Ambocythere caudata</i> Bold, 1965
Subfamilia Hemicytherinae
Tribu Echinocythereidini
<i>Henryhowella digitalis</i> Levinson, 1974
<i>Thalassocythere acanthoderma</i> (Brady, 1880)
Tribu Thaerocytherini
<i>Bradleya dyction</i> (Brady, 1880)
Subfamilia Trachyleberidinae
Tribu Trachyleberidini
<i>Agrenocythere americana</i> Benson, 1972

En el sur del Golfo de México, la ostracofauna a profundidades mayores de 1000m está compuesta por 15 especies características de zonas batiales y abisales (Tabla 1) más un menor número de especies desplazadas de zonas más someras. Esta zona se caracteriza por la presencia del Agua Profunda del Atlántico Norte con una salinidad promedio de 34.9 y los fondos son sedimentos limo-arcillosos. La comunidad de ostrácodos está típicamente caracterizada por alta abundancia de especies del género *Krithe* (hasta en un 85% de la población total), y en menor abundancia *Ambocythere caudata*, *Argilloecia* spp, *Bradleya dyction* y *Echinocythereis* sp. (Machain-Castillo 1989). En un transecto con dirección E-W a los 21°N y un intervalo de profundidad de 100 y 3500m, la autora reporta que junto con las especies anteriores se encuentran organismos de aguas más someras transportados por turbiditas de los márgenes continentales al este de la plataforma de Yucatán

(o Banco de Campeche) y de la plataforma y talud continentales de Veracruz al oeste.

## FORAMINÍFEROS

Los foraminíferos del Golfo de México han sido estudiados por diversos autores que describen la distribución geográfica y batimétrica en la región (Phleger y Parker 1951, Parker, 1954, Pflum y Frerichs 1976, Culver y Buzas 1981, 1983, Poag 1981, 1984, Sen Gupta *et al.*, 2009). En los últimos 20 años se ha hecho mayor énfasis en su relación con masas de agua y su significancia paleoceanográfica (Denne y Sen Gupta, 1991, 1993, Jones y Sen Gupta, 1995, Machain-Castillo *et al.* 1998, Osterman, 2003, Machain-Castillo *et al.* 2010).

Las asociaciones de foraminíferos bentónicos características de la zona batial y abisal del sur del Golfo de México (poblaciones totales que incluyen tanto organismos vivos como muertos) fueron estudiadas y descritas por Machain-Castillo *et al.* (2010). Dichos autores reconocieron una ocurrencia total de 70 especies de foraminíferos bentónicos en un intervalo de profundidad de 960 a 3250m, las cuales (delimitadas mediante un análisis de factores modo Q) se agruparon en dos asociaciones:

La asociación 1, caracterizada por *Bolivina lowmani*, *Bulimina aculeata*, *Alabaminella turgida*, *Globocassidulina subglobosa*, *Epistominella exigua* y *E. vitrea*, se distribuye a profundidades de 960 a ~ 1700 m en los sedimentos que subyacen al Agua Antártica Intermedia AAIW, (el Agua Intermedia del Caribe y el Agua Profunda Noratlántica (APNA) (Vidal *et al.* 1994, Rivas *et al.* 2005). A profundidades mayores de 1000m el APNA llena toda la cuenca del Golfo de México; sin embargo, la parte superior de la misma se encuentra mezclada con el Agua Intermedia del Caribe y contiene una salinidad ligeramente menor y un mayor contenido de silicatos que la típica APNA (salinidad < 35, ~4 °C) (Morrison *et al.* 1983, Metcalf 1976, Vidal *et al.* 1994). Aunque la temperatura y salinidad son uniformes por debajo de los 1500m (McLellan y Nowlin 1963), el contenido de oxígeno disuelto es mayor cerca del Canal de Yucatán y disminuye hacia el oeste (Rivas *et al.* 2005), lo cual parece influir en la distribución de las asociaciones a través del tiempo (Machain-Castillo *et al.* 2010).

En general, la mayoría de las especies características de esta asociación son una mezcla de especies de intervalo batimétrico amplio (*A. turgida*, *Bolivina lowmani* y *Globocassidulina subglobosa*, que se han encontrado hasta profun-

didades mayores a 3500m) (Sen Gupta et al. 2009), con especies similares a las que se encuentran en el sector norte del golfo, alrededor de los límites entre el AAIW y el AIC (Denne y SenGupta 1991, Osterman, 2003).

La segunda asociación dominada por *Nuttallides decorata*, *Alabaminella turrida*, *Ioanella tumidula* y *Globocassidulina subglobosa* se distribuye a profundidades mayores de ~2000 m en las zonas de intersección del APNA. Las especies *Ioanella tumidula* y *Nuttallides decorata*, aunque poseen un intervalo batimétrico amplio (155 a 3850 m en el Golfo de México), se consideran generalmente típicas de la zona batial y abisal (Phleger y Parker, 1951, Phleger 1960, Pflum y Frerichs 1976, Sen Gupta et al. 2009). En particular, *I. tumidula* presenta abundancia mayor en el sector norte del golfo por debajo de los 2000 m (Phleger y Parker 1951, Pflum y Frerichs 1976).

## ECOSISTEMAS QUIMIOSINTÉTICOS ABISALES

De interés particular en el Golfo de México son las zonas de infiltración frías (chapopoterías, volcán de asfalto, infiltraciones de metano, hidratos de metano, etc.) que se encuentran puntualmente localizados en asociación de diapiros en varias zonas de la planicie abisal.

En el norte del golfo, Sen Gupta y Aharon (1994), Sen Gupta et al. (1997) y Robinson et al (2004) han estudiado la fauna de foraminíferos bentónicos relacionada con emanaciones de hidrocarburos. Los foraminíferos en dichas zonas presentan tanto diversidad como abundancia relativamente bajas y no se caracterizan por la presencia de especies endémicas, sino que generalmente las especies dominantes son miembros de las comunidades de profundidades similares no afectadas por la quimiosíntesis. Lo anterior sugiere que estas especies fueron capaces de adaptarse a los diferentes microhábitats resultado de las emanaciones de hidrocarburos. Esto se atribuye a la capacidad de tolerar condiciones de hipoxia y anoxia, al menos por períodos cortos de tiempo, y ser anaerobios facultativos (Moodley y Hess 1992, Bernhard 1993, Sen Gupta y Machain-Castillo 1993).

Sen Gupta y Aharon (1994) reportan 35 especies, de las cuales las especies más abundantes en localidades entre 584 y 695m fueron, *Bolivina ordinaria*, *Gavelinopsis translucens*, y *Cassidulina neocarinata* (constituyendo más de la mitad de la fauna total), mientras que a 216 m las especies dominantes fueron *Bolivina subaenariensis* y *Uvigerina laevis*.

En los sitios de infiltraciones de metano a profundidades entre 700 y 2220m Robinson *et al.* (2004) reportan que las asociaciones están dominadas por las especies *Epistominella exigua*, *Nodellum membranaceum*, *Cyclogyra* sp, *Cibicidoides* spp y *Reophax nodulosus*, la mayoría encontradas también en sitios sin actividad quimiosintética a profundidades similares.

Un aspecto de relevancia en la diferenciación entre las poblaciones vivas de ambientes quimiosintéticos es la composición geoquímica del caparazón de los foraminíferos, en particular, su composición isotópica de  $\delta^{13}\text{C}$ . Diversos estudios han intentado determinar una señal típica del  $\delta^{13}\text{C}$  para los foraminíferos asociados a infiltraciones de metano; sin embargo, los resultados hasta la fecha, son variables (Sen Gupta y Aharon 1994, Sen Gupta *et al.* 1997, Hill *et al.* 2003, Rathburn *et al.* 2003, Martin *et al.* 2004, Levin 2005) y su uso como un índice para reconocer estos ambientes en el pasado es aún controversial (Cannariato y Stott 2004). Levin (2005) sugiere que los foraminíferos puedan poseer algún mecanismo regulatorio en su fisiología que modifique dicha señal. Parte del problema puede ser también que las poblaciones de foraminíferos estudiadas generalmente, al muestrearse en sedimentos, ya forman parte de una tanatocenosis (organismos vivos + muertos que se han acumulado a lo largo de un cierto tiempo) y que presenten una mezcla de especies que realmente viven asociadas a las zonas de infiltraciones, más especies que pueden venir transportadas de otras partes. Sen Gupta *et al.* (2007) reportan la presencia de algunas especies de foraminíferos (e. g. *Cibicides* spp., poco tolerantes a la hipoxia) adheridos a los tubos de gusanos (Vestimentifera) viviendo unos cuantos centímetros por encima de las condiciones anóxicas y/o reductoras ( $\text{H}_2\text{S}$ ) del sustrato. Al morir estos organismos caen al sedimento formando parte de la tanatocenosis del sitio; sin embargo su señal de  $\delta^{13}\text{C}$  será diferente, a la de la columna de agua. Es necesario por lo tanto, hacer estudios más finos diferenciando el microhábitat y las señales isotópicas de cada especie, antes de que la señal isotópica del  $\delta^{13}\text{C}$  *per se*, pueda ser utilizada como un indicador de antiguos ambientes de infiltraciones de metano.

Los ostrácodos también se han encontrado en ambientes quimiosintéticos abisales (van Harten 1992, Robinson 2004, Levin, 2005) aunque son mucho menos abundantes y diversos que otros grupos de la meiofauna. De acuerdo con el grupo de trabajo sobre biogeografía de ecosistemas quimiosintéticos del mar profundo (Chess 2010) a la fecha solamente se han descrito formalmente 9 especies.

El primer reporte de ostrácodos de ventilas hidrotermales es el de van Harten (1992), quien reporta a las especies *Xylocythere*, *Propontocypris* y una especie de la subfamilia Eucytherurinae, además de numerosas valvas juveniles frágiles no identificadas. Esta fauna es similar, tanto en su composición taxonómica como su densidad poblacional a la reportada por Maddocks y Steineck (1987) y Steineck *et al.* (1990) en parcelas de madera depositadas en el fondo del mar y recolectadas posteriormente (Turner 1977) y diferente de la que se encuentra en las zonas abisales no afectadas, lo cual indicaría que se trata de una fauna de gran adaptabilidad ecológica.

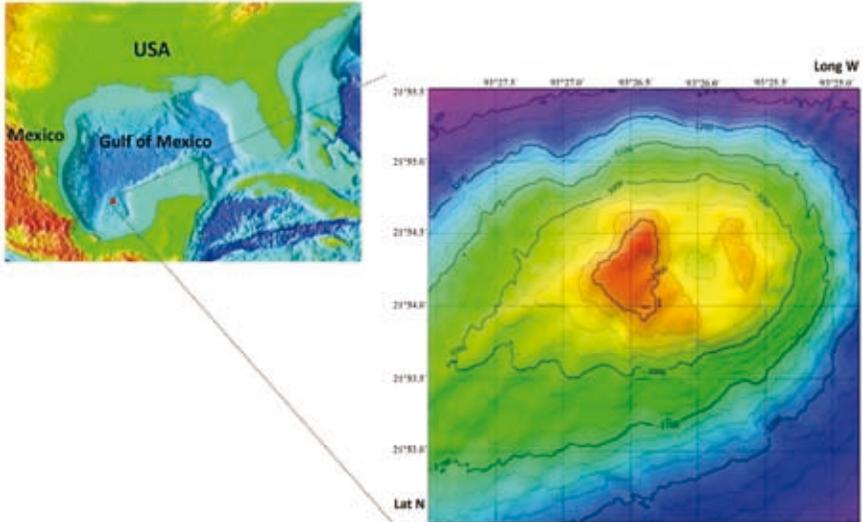
Robinson (2004) reporta baja diversidad de ostrácodos en la dorsal de Blake y en el norte del Golfo de México (Green Canyon) en la periferia de agregaciones de mejillones y tapetes bacterianos. En estos sitios se encontraron principalmente valvas juveniles de especies no identificadas y adultos de *Xylocythere* sp., similar a lo encontrado por van Harten (1992).

## METODOLOGÍA

Este estudio se abocó a estudiar las asociaciones de foraminíferos y ostrácodos en el volcán de asfalto Chapopote en la zona abisal del sur del Golfo de México (Fig. 1) con el fin de reconocer si en esta localidad se encuentran especies y/o asociaciones de foraminíferos y ostrácodos que fueran indicativas de tales condiciones y que puedan ser utilizadas en el reconocimiento de ambientes pasados con influencia de hidratos de metano. Para este fin se colectó un total de 6 muestras de núcleos superficiales y 4 núcleos profundos (Tabla 2) por la Dra. Elva Escobar Briones y colaboradores durante la campaña oceanográfica OTEGA 67 realizada a bordo del buque oceanográfico Meteor de Alemania en colaboración con El Dr. Gerhard Bohrman, Universidad de Bremen. Para el estudio de foraminíferos y ostrácodos recientes se tomaron muestras superficiales de 1cc de cada núcleo a las cuales se les agregó formaldehído al 10% y una solución buffer de Rosa de Bengala para teñir el protoplasma de los organismos vivos al momento de la colecta. Las muestras se guardaron en tubos de centrifuga de 50mL y se transportaron al laboratorio.

El procesamiento de las muestras en el laboratorio consistió en lavar el sedimento a través de un tamiz de apertura de malla de 63 micras con agua corriente, para separar la fracción arenosa de los lodos, de la cual se separaron ostrácodos y foraminíferos bajo un microscopio estereoscópico.

Figura 1. Localización del volcán de asfalto, Chapopote, en el sector sur del Golfo de México. Tomado y modificado de Brüning *et al.* (2010).



En el presente trabajo se reportan únicamente las muestras recientes (superficiales) de la Zona Económica Exclusiva de México.

### Estación 133 (MUC 16B)

La estación MUC 16B se colectó en una loma de asfalto ( $21^{\circ} 23.6'N$ ,  $93^{\circ} 23.1'W$ , 2470m de profundidad) en las inmediaciones de una zona de sedimento de color café en un área con abundantes huellas de moluscos (*Lebenspuren*), algunos carbonatos irregulares y unas pocas conchas en ausencia de tapetes microbianos. El sedimento en los 5cm superficiales era de color café claro, sin presencia de asfalto, sin embargo al procesar la muestra en la fracción de arena fina se encontraron algunos fragmentos de asfalto.

Los foraminíferos bentónicos vivos (teñidos con rosa de bengala) fueron escasos, por lo que se reporta la fauna total (organismos teñidos + no teñidos).

El número total encontrado fue de 90 testas de foraminíferos bentónicos pertenecientes a 30 especies, de las cuales 21 especies fueron hialinas

**Tabla 2. Estaciones de colecta (foraminíferos) de la campaña oceanográfica OTEGA 67.**

Muestra	Localidad	Profundidad (m)
TGC-3	Green Canyon	953
TVG-11	Green Canyon	950
TGC-150	Green Canyon	951
TVG-12	Green Canyon	1041
MUC-16B	Campeche	2470
MUC-139	Campeche	2929

(39 individuos), 9 aglutinadas (49 individuos) y 2 porcelanáceas (2 individuos). Las especies más comunes son *Bolivina lowmani*, *Glomospira gordialis* y *Sarcophiza* spp (Tabla 3, Fig. 2). La abundancia y diversidad de especies aglutinadas concuerda con lo encontrado por Bernhard *et al.* (2008) quienes reportan que la mayor cantidad de especies vivas pertenecen a organismos aglutinados. Esto también concuerda con datos no publicados de los autores en dónde el porcentaje de foraminíferos aglutinados en la zona batial y abisal de la Bahía de Campeche es alto. La densidad de 90 individuos/cm<sup>3</sup> es mayor a la reportada por Robinson *et al.* (2004) de 7.4 a 97.9 individuos/10cm<sup>3</sup> para el norte del Golfo de México y el número de especies (30) similar al de las 35 especies encontradas por Sen Gupta y Aharon (1994) en el norte del Golfo de México.

El número de caparazones de ostrácodos fue de 10 valvas incluyendo tanto juveniles como adultos. Algunos de ellos contenían aún las partes blandas del organismo preservadas en el interior, por lo que es posible asumir que estos organismos también se presentan en estos ambientes extremos. El género más abundante fue *Krithe*, del cual se recuperaron principalmente mudas. (Tabla 3, Fig. 2).

### **Estación 139 Chapopote, MUC 17**

La estación 139, MUC 17 se localizó en las coordenadas 21° 54.37'N, 93°25.75W, a 2929m profundidad. El sedimento es hemipelágico, con un ligero aroma a azufre. Similar en color, café claro, a la muestra anterior.

**Tabla 3. Foraminíferos y ostrácodos encontrados en la muestra MUC 16 B.**

Especie foraminíferos	No. de organismos
<i>Angulogerina carinata</i>	1
<i>Bolivina lowmani</i>	7
<i>Bolivina plicata</i>	3
<i>Bolivina subaenarensis</i>	2
<i>Bolivina vaughani</i>	2
<i>Buliminella</i> aff. <i>B. curta</i>	1
<i>Cassidulina corbyi</i>	1
<i>Cancris</i> sp.	1
<i>Epistominella</i> sp	1
<i>Fissurina</i> spp	2
<i>Glomospira gordialis</i>	22
<i>Gyroidina soldani</i>	2
<i>Gyroidina</i> sp	3
<i>Hoeglundina elegans</i>	5
<i>Lagena</i> sp	1
<i>Lagenammina</i> atlántica	2
<i>Lagenammina</i> sp	3
<i>Laticarinina pauperata</i>	1
<i>Nodosaria</i> sp	1
<i>Oridorsalis tener</i>	2
<i>Penenoplis carinatus</i>	1
<i>Pyrgo</i> sp. A	1
<i>Rhizammina algaeformis</i>	2
<i>Sacammina sphaerica</i>	2
<i>Saccorhiza</i> spp	14
<i>Saracenaria</i> sp	1
<i>Suggrunda eckisi</i>	1
<i>Unvigerina excellens</i>	1
<i>Trochammina inflata</i>	2
<i>Trochammina globigeriniformis</i>	1
<i>Trochammina</i> sp A	1

Tabla 3. Continúa.

Especie ostrácodos	No. de organismos
Eucythere (?) sp	2
Henryhowella digitalis	1
Krithe spp (juveniles)	7

La muestra se colectó adyacente a un posible tapete microbiano de color blanco. El sedimento superficial contenía pequeños filamentos de color gris blanquecino.

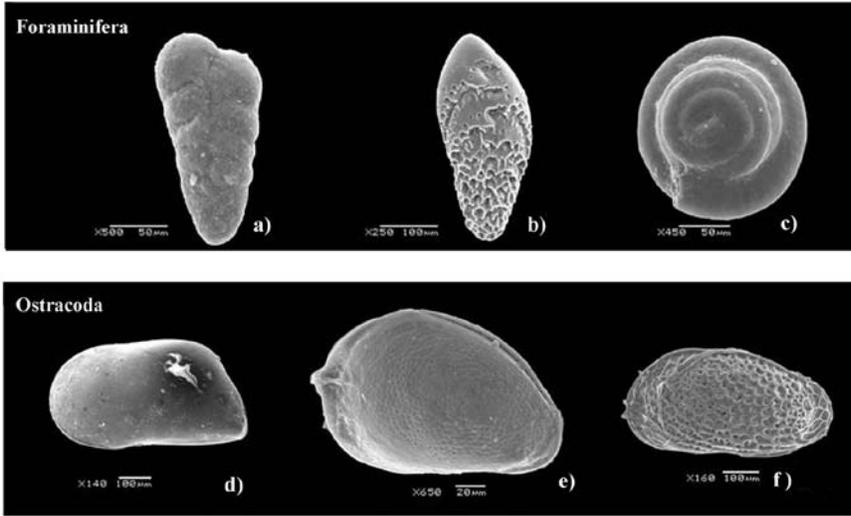
En la muestra se encontraron abundantes foraminíferos planctónicos y 89 individuos pertenecientes a 37 especies de foraminíferos bentónicos. A diferencia de la muestra anterior, aquí no se presentaron foraminíferos aglutinados, sólo 3 especies de miliólidos (3 individuos) y el resto de hialinos, en general, muy bien preservados. Las especies con mayor abundancia fueron *Bolivina lowmani* (33 individuos), *B. albatrossi* (13) y *Epistominella* spp (11) tres de las especies más abundantes a profundidades mayores de 1000 m en el sur del Golfo de México (Machain-Castillo et al. 2010) (véase Tabla 4.Fig. 2. El número de caparazones de ostrácodos fue de 19 incluyendo adultos y juveniles de *Krithe*, *Argilloecia*, *Echinocythereis* y *Xylocythere*. Al igual que en la muestra anterior, las densidades de foraminíferos en esta localidad son mayores que las reportadas para el norte del Golfo de México por Robinson (2004).

## DISCUSIÓN Y CONSIDERACIONES FINALES

Como en el caso de las asociaciones de foraminíferos reportados para ambientes quimiosintéticos en el norte del Golfo de México, las asociaciones encontradas en el presente estudio consisten de especies que se encuentran en ambientes óxicos a profundidades similares.

Los estudios en infiltraciones frías que han descrito los ensambles de Foraminifera reconocen que estos representan hasta un 20% de la comunidad de infiltraciones que ocurren tanto en tapetes microbianos y agregaciones de almejas, lo cual es proporcionalmente comparable a las comunidades abisales adyacentes, siendo los principales componentes de los géneros *Bolivina* y *Fursenkoina*, ambos de amplia distribución en el Golfo de México. En el presente

Fig. 2. Especies representativas de los ambientes quimiosintéticos del Golfo de Campeche. a) *Bolivina lowmani*, b) *B. albatrossi*, c) *Glomospira gordialis*, d) *Krithe* sp. e) *Eucythere?* sp. f) *Xylocythere* sp.



estudio *Bolivina lowmani* y *B. albatrossi* son las especies con mayor número de individuos (33 y 11 respectivamente) en la estación MUC 17 y como reportan Machain-Castillo *et al.* (2010) son dos de las especies más abundantes en la zona batial y abisal del sur del Golfo de México.

Entre infiltraciones se han reconocido variaciones significativas de la composición de especies y abundancia entre localidades geográficas. Estas diferencias se atribuyen a valores elevados de abundancia de un grupo de especies. Como ejemplo en el talud del Golfo de México se ha visto que las especies *Epistominella exigua*, *Reophax nodulosus*, *Nodellum membranaceum*, *Hoeglundina elegans* y *Cibicoides* spp. llegan a predominar en contraste con las infiltraciones de metano en la dorsal de Blake donde domina *Fursenkoina complanata* que pueden deberse al grosor del tapete microbiano en los sedimentos que generan una heterogeneidad variable en escala pequeña del hábitat preferencial de este tipo de especies de Foraminifera. Por lo anterior se puede sugerir que los ensambles de Foraminifera son diversos debido a sus densidades bajas.

Sin embargo, hay que tener en cuenta si la población en estudio representa a una población viva o sí se trata de una tanatocenosis que pudiera conte-

Tabla 4. Foraminíferos y ostrácodos encontrados en la muestra MUC 17.

Especie foraminíferos	No. de organismos
<i>Bolivina albatrossi</i>	13
<i>Bolivina lowmani</i>	33
<i>Bolivina plicata</i>	1
<i>Bolivina sp</i>	2
<i>Bulimina marginata</i>	1
<i>Cellanthus sp</i>	1
<i>Cibicides sp</i>	2
<i>Epistominella spp</i>	11
<i>Eponides sp</i>	2
<i>Fissurina kerguelenensis</i>	1
<i>Fissurina marginata</i>	1
<i>Globobulimina sp</i>	1
<i>Globocassidulina subglobosa</i>	1
<i>Hoeglundina elegans</i>	2
<i>Lagena spp</i>	5
<i>Laticarinina pauperata</i>	2
<i>Pyrgo sphaerica</i>	1
<i>Quinqueloculina spp</i>	2
<i>Rectobolivina pacifica</i>	1
<i>Suggrunda eckisi</i>	3
<i>Uvigerina excellens</i>	1
<i>Virgulina sp</i>	2
Especie ostrácodos	No. de organismos
<i>Agrenocythere sp</i>	1
<i>Argilloecia posterotruncata</i>	2
<i>Echinocythereis sp</i>	1
<i>Henryhowella digitalis</i>	1
<i>Krithe spp</i>	12
<i>Xylocythere sp</i>	2

ner una mezcla de especies de diferente ambientes aledaños. A este respecto el trabajo de Bernhard *et al.* (2008) indica que en diferentes zonas del talud del norte del Golfo de México como de la planicie de Sigsbee, la fauna viva de foraminíferos bentónicos consiste predominantemente de organismos aglutinados.

En la muestra MUC 16B se encontró una gran abundancia de organismos aglutinados, la mayoría teñidos con rosa de bengala y presumiblemente vivos, junto con especímenes de *Bolivina lowmani* y otras especies similares a las de los ambientes óxicos de profundidades equivalentes. Lo anterior podría sugerir una tanatocenosis compuesta en un alto porcentaje por especies autóctonas. Para determinar con precisión cuáles de dichas especies son alóctonas y cuáles no, es necesario realizar estudios más detallados con un mayor número y volumen de muestras que permitan obtener suficientes organismos vivos.

En el caso de los ostrácodos asociados a infiltraciones de metano la literatura reconoce que éstos ocurren en baja diversidad. Un factor característico es la variabilidad de su abundancia como se ejemplifica en la dorsal Blake en el Atlántico y lo cañones Green y Alaminos en el Golfo de México. En el caso de estas dos localidades del talud continental del golfo la problemática radicó en la identificación en virtud a que la gran mayoría de los ejemplares eran juveniles a diferencia de la dorsal Blake donde los ostrácodos eran adultos identificando la presencia de *Xylocythere* sp. asociado a la periferia de agregaciones de mejillones y tapetes bacterianos. Esta gran variabilidad se ha atribuido a la baja abundancia de ostrácodos recuperados, ya que la gran mayoría de los estudios solamente reportan resultados de 2 ó 3 núcleos de diámetro pequeño por cada localidad, lo cual da escasos elementos para poder interpretar las causas que la determinan (Robinson 2004).

En el presente estudio también se encontró que las poblaciones de ostrácodos presentan baja abundancia y diversidad, aunque taxonómicamente son muy similares no sólo a las reportadas en el Golfo de México y la dorsal de Blake, sino a las de las ventilas hidrotermales del Pacífico ecuatorial (van Harten 1992). En particular es de hacer notar la presencia de *Xylocythere* sp, que no es considerada como una especie de aguas profundas y que en un principio se pensó que era una especie oportunista colonizando los ambientes profundos por medio de “balsas flotantes” (parcelas experimentales de madera depositadas artificialmente en el fondo del mar, ver Maddocks y Steineck 1987; Steineck *et al.* 1990) pero que es reportada para casi todos los

ambientes quimiosintéticos (van Harten 1993, Robinson 2004). Al igual que los foraminíferos, las asociaciones de ostrácodos sugieren una tanatocenosis compuesta de especies alóctonas características de ambientes quimiosintéticos y especies comunes de las zonas óxicas aledañas. Sin embargo, el escaso número de ostrácodos no permite hacer conclusiones más precisas.

No obstante, las asociaciones de foraminíferos y ostrácodos poseen gran potencial como indicadores ambientales en las aguas profundas del océano, al igual que en aguas someras, en particular, en el Golfo de México. A pesar de que los foraminíferos bentónicos han sido ampliamente estudiados por más de dos siglos y los ostrácodos por casi un siglo, aún queda mucho por aprender de sus adaptaciones no sólo morfológicas, sino fisiológicas y geoquímicas, a los diferentes ambientes, incluyendo ambientes extremos tales como aquellos modificados por emanaciones de hidrocarburos y otros compuestos que serían tóxicos para muchos de los organismos vivos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la tripulación y personal científico del B/O Justo Sierra y B/O Meteor por su ayuda en la colecta de los materiales y a la UNAM por el financiamiento otorgado para el tiempo de barco y la realización de este trabajo. Así mismo agradecen a Gabriela Diego-Casimiro y a Bárbara Cuesta-Castillo por su ayuda en el procesamiento de las muestras.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bernhard J. M. 1993. Experimental and field evidence of Antarctic foraminiferal tolerance to anoxia and hydrogen sulfide. *Marine Micropaleontology* 20: 203-213.
- Bernhard, J.M. 2000. Distinguishing live from dead foraminifera: methods review and proper applications. *Micropaleontology* 46 (Suppl. 1), 38–46.
- Bernhard, J. M., Sen Gupta, B. K. y Baguley, J. G., 2008. Benthic foraminifera living in Gulf of Mexico bathyal and abyssal sediments: Community analysis and comparison to metazoan meiofaunal biomass and density. *Deep-Sea Research II* 55 (2008) 2617–2626.
- Brüning, M., Sahling, H., MacDonald, I. R., Ding, F. y Bohrmann, G. 2010. Origin, distribution, and alteration of asphalts at Chapopote Knoll, Southern Gulf of Mexico. *Marine and Petroleum Geology* 27, 1093–1106.

- Cannariato, K. G. y Stott, L.D. 2004. Evidence against clathrate-derived methane release to Santa Barbara Basin surface waters? *Geochemistry Geophysics Geosystems* 5, (Q05007, doi:10.1029/2003GC000600).
- ChEss. 2010. Meiofauna from chemosynthetic deep-sea environments. Report of the ChEss workshop, 17, July, 2010. Ghent University, Bélgica. Disponible en: <http://www.hydrothermalvent.com/php/files/ChEssMeioReport2010.pdf>.
- Cornelius, N. y Gooday, A.J. 2004. "Live" (stained) deep-sea benthic foraminiferans in the western Weddell Sea: trends in abundance, diversity and taxonomic composition along a depth transect. *Deep-Sea Research II* 51, 1571–1602.
- Higgins, R. P., Hope, W. D., Hummon, W. D., Rieger, R. M. Sterrer, W. E., Thiel, H. y Tietjen, J. H., 1977. Quantitative estimates of meiofauna from the deep-sea off North Carolina, USA. *Mar. Biol.*, 39: 233–240.
- Culver, S.J. y Buzas, M.A. 1981. Distribution of Recent benthic foraminifera in the Gulf of Mexico: *Smithsonian Contributions to the Marine Sciences*, 8, 1–898.
- Culver, S.J. y Buzas, M.A. 1983. Recent benthic foraminiferal provinces in the Gulf of Mexico: *The Journal of Foraminiferal Research*, 13, 21–31.
- Denne, R.A. y Sen Gupta, B.K. 1991. Association of bathyal foraminifera with water masses in the northwestern Gulf of Mexico: *Marine Micropaleontology*, 17, 173–193.
- Denne, R.A. y Sen Gupta, B.K. 1993. Matching of benthic foraminiferal depth limits and water-mass boundaries in the northwestern Gulf of Mexico: an investigation of species occurrences: *Journal of Foraminiferal Research*, 23: 108–117.
- Gooday, A.J. 1986. Meiofaunal foraminiferans from the bathyal Porcupine Seabight (northeast Atlantic): size, structure, standing stock, taxonomic composition, species diversity and vertical distribution in the sediments. *Deep-Sea Research* 33 (10), 1345–1373.
- Gooday, A.J., Bernhard, J.M., Levin, L.A. y Suhr, S. 2000. Foraminifera in the Arabian Sea oxygen minimum zone and other oxygen-deficient settings: taxonomic composition, diversity, and relation to metazoan faunas. *Deep-Sea Research II* 47 (1–2), 25–54.
- Hill, T.M., Kennett, J.P. y Spero, H.J. 2003. Foraminifera as indicators of methane-rich environments: a study of modern methane seeps in Santa Barbara Channel, California. *Marine Micropaleontology* 49, 123–138.
- Jones, M.H. y Sen Gupta, B.K. 1995. Holocene benthic foraminiferal diversity and abundance variations in lower bathyal and abyssal environments, northwestern Gulf of Mexico: *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 45, 304–311.
- Levin, L.A. 2005. Ecology of cold seep sediments. Interactions of fauna with flow chemistry and microbes. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 2005: 1–46.

- Machain-Castillo, M. L. 1989. Ostracode assemblages in the southern Gulf of Mexico: An overview. *An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol. Univ. Nal. Autón. México*, 16 (1): 119-134.
- Machain-Castillo, M.L., Sen Gupta, B.K. y Alcalá-Herrera, J.A. 1998 Late Quaternary change in deep-bathyal and abyssal waters of the Gulf of Mexico; preservation record of the foraminifer *Biloculinella irregularis*: *Journal of Foraminiferal Research*, 28, 95-101.
- Machain-Castillo, M.L. Gío-Argáez, F. R., Cuesta-Castillo, L. B., Alcalá-Herrera, J. A. y Sen Gupta, B. K. 2010. Last Glacial Maximum deep water masses in southwestern Gulf of Mexico: Clues from benthic foraminifera. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(3): 453-467
- Maddocks R. F. Steineck, P. L., 1987. Ostracoda from experimental wood-island habitats in the deep sea. *Micropaleontology*, 33: 318-355.
- Maddocks, R. F., Machain-Castillo, M.L. y Gío-Argáez, F. R. 2009. Podocopan ostracoda (Crustacea) of the Gulf of Mexico, En: Tunnell Jr, J.W., Felder, D.L. y Earle, S.A.(eds.), *Gulf of Mexico origin, waters, and biota*: College Station, Texas, U.S.A., A&M University Press: 877-894.
- Martin, J. B., Day, S. A., Rathburn, A., Perez, M. E., Mahn, C. y Gieskes, J. 2004. Relationships between the stable isotopic signatures of living and fossil foraminifera in Monterey Bay, California. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 5, 25 pages (Q04004, doi:10.1029/2003GC000629).
- Metcalfe, W. G. 1976. Caribbean-Atlantic Water Exchange Through the Anegada-Jungfern Passage: *Journal of Geophysical Research*, 81: 6401-6409.
- McLellan, H. J., Nowlin, W. D.Jr. 1963. Some features of the deep water in the Gulf of Mexico: *Journal of Marine Research*, 21: 233-245.
- Morrison, J. M., Merrell, W. J., Jr, Key, R. M., Key, T. C. 1983. Property distributions and deep chemical measurements within the Western Gulf of Mexico: *Journal of Geophysical Research*, 88: 2601-2608.
- Moodley L. y Hess, C. 1992. Tolerance of infaunal benthic foraminifera for low and high oxygen concentrations. *Biological Bulletin* 183:94-98
- Osterman, L. E. 2003. Benthic foraminifera from the continental shelf and slope of the Gulf of Mexico: an indicator of shelf hypoxia: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 58: 17-35.
- Parker, F. L. 1954. Distribution of the foraminifera in the northeastern Gulf of Mexico: *Bulletin of the Museum of Comparative Zoology-Harvard University*, 111: 451-588.
- Pflum, C. E. y Frerichs, W. E. 1976. *Gulf of Mexico deep-water foraminifera*: Cushman Foundation for Foraminiferal Research Special Publication, 14: 1-125.

- Phleger, F. B. 1960. *Ecology and Distribution of Recent Foraminifera*: Baltimore, U.S.A., The Johns Hopkins Press, 297 p.
- Phleger, F. B. y Parker, F. L. 1951. Ecology of Foraminifera, northern Gulf of Mexico: Part 1, Foraminifera distribution, Part 2, *Foraminifera species*: *Geological Society of America Memoir*, 46, 1-88.
- Poag, C. W. 1981. *Ecologic atlas of benthic foraminifera of the Gulf of Mexico*: Woods Hole, Massachusetts, U.S.A., Hutchinson Ross Publishing Company, 153 p.
- Poag, C. W. 1984. Distribution and ecology of deep-water benthic foraminifera in the Gulf of Mexico: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 48: 25-37.
- Rathburn, A. E., Perez, M. E., Martin, J. B., Day, S. A., Mahn, C., Gieskes, J., Ziebis, W., Williams, D. y Bahls, A. 2003. Relationship between the distribution and stable isotopic composition of living benthic foraminifera and cold methane seep biogeochemistry in Monterey Bay, California. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 4, 1106.
- Rivas, D., Badan, A., Ochoa y J. 2005. The ventilation of the deep Gulf of Mexico: *Journal of Physical Oceanography*, 35: 1763-1781.
- Robinson, C. A., Bernhard, J. M. Levin, L., Mendoza, G. F. y Blanks, J. K. 2004. Surficial Hydrocarbon Seep infauna from the Blake Ridge (Atlantic Ocean, 2150 m) and the Gulf of Mexico (690–2240 m) *Marine Ecology*, 25 (4): 313–336 (2004).
- Sen Gupta B. K. y Machain-Castillo M. L. 1993. Benthic foraminifera in oxygen-poor habitats. *Marine Micropaleontology* 20:183-201.
- Sen Gupta, B. K. y Aharon, P. 1994. Benthic Foraminifera of bathyal hydrocarbon vents of the Gulf of Mexico. Initial report on communities and stable isotopes. *Geo-Marine Letters*, 14: 88-96.
- Sen Gupta, B., Platon, E., Bernhard, J.M. y Aharon, P. 1997. Foraminiferal colonization of hydrocarbon seep bacterial mats and underlying sediment, Gulf of Mexico Slope. *J. Foraminiferal Res.*, 27: 292–300.
- Sen Gupta, B. K., Smith, L. E. y Lobeguer, M. K. 2007. Attachment of Foraminifera to vestimentiferan tubeworms at cold seeps: Refuge from seafloor hypoxia and sulfide toxicity. *Marine Micropaleontology*, 62: 1–6.
- Sen Gupta, B.K., Smith, L.E. y Machain-Castillo, M.L. 2009, Foraminifera of the Gulf of Mexico. En: Tunnell Jr, J.W., Felder, D.L. y Earle, S.A.(eds.), *Gulf of Mexico origin, waters, and biota*: College Station, Texas, U.S.A., A&M University Press, 87–129.
- Smith Jr., K.L. 1992. Benthic boundary layer communities and carbon cycling at abyssal depths in the central North Pacific. *Limnology and Oceanography*, 37: 1034–1056.

- Snider, L. J., Burnett B. R. y Hessler, R. R. 1984. The composition and distribution of meio-fauna and nanobiota in a central North Pacific deep-sea area. *Deep-Sea Res.*, 31: 1225–1249.
- Steineck P. L., Maddocks, R. F., Turner, R. D., Coles, G. y Whatley, R. 1990. Xylophile Ostracoda in the deep sea. En: *Ostracoda and global events*, R. Whatley y C. Maybury (Eds.), Chapman and Hall, London, pp. 307-319.
- Turner R. D. 1977. Wood, mollusks, and deep-sea food chains. *Bulletin of the American Malacological Union*, 26, 13-19.
- Vidal, V. M.V., Vidal, F. V., Hernández, A. F., Meza, E. y Zambrano, L. 1994, Winter water mass distributions in the western Gulf of Mexico affected by colliding anticyclonic ring: *Journal of Oceanography*, 50, 559-588.
- Van Harten, D. 1992. Hydrothermal vent Ostracoda and faunal association in the deep sea. *Deep Sea Research*, 39(6): 1067-1070.



# LOS ANÉLIDOS POLIQUETOS DEL MAR PROFUNDO EN MÉXICO

Vivianne Solís-Weiss,<sup>1\*</sup> Pablo Hernández Alcántara,<sup>1</sup>  
Alejandro Granados Barba<sup>2</sup>

## RESUMEN

Los invertebrados marinos del mar profundo son aún muy poco conocidos a nivel mundial, debido en particular al poco tiempo que lleva la exploración formal del mar profundo y México no es una excepción. Sin embargo, sabemos que en este país, el grupo los anélidos poliquetos es abundante y diverso en el bentos profundo, habiéndose registrado a la fecha en el Océano Pacífico y Golfo de México, respectivamente, 50 y 18 familias, 173 y 32 géneros, y 291 y 42 especies, en los diferentes ambientes, incluyendo las ventilas hidrotermales, donde representan un importante papel ecológico. Estas cifras indican que el muestreo ha sido mucho más escaso en el Golfo de México. Se presenta una lista de las especies registradas a la fecha y se nota que en el Pacífico mexicano siete familias representan el 43% de toda la fauna de poliquetos siendo la familia Ampharetidae (29 especies, 16 géneros) la más diversa. En el Golfo de México, siete familias representan el 69% de la poliquetofauna, y la familia más diversa es la Cirratulidae (8 especies, 3 géne-

<sup>1</sup> Laboratorio de Ecología y Biodiversidad de Invertebrados Marinos, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México., México, DF, 04510, México.

<sup>2</sup> Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías, Universidad Veracruzana. Hidalgo No. 617, Col. Río Jamapa, Boca del Río, Veracruz. 94290, México.

\* Correo-e: solisw@cmarl.unam.mx. Tel. 56-22-58-40. Fax 56-16-07-48.

ros). Todas las familias representadas en el Golfo de México también están presentes en el Pacífico Mexicano, pero 29 de las 49 familias registradas en aguas profundas de México aún no han sido recolectadas en la porción mexicana del Golfo de México y únicamente cinco especies de cuatro familias son comunes en ambos océanos de México

Palabras clave: Annelida: Polychaeta, mar profundo, México, biodiversidad

#### ABSTRACT

The deep sea invertebrates are still poorly known internationally, mainly due to the short time since exploration of the deep sea began seriously, and Mexico is no exception. However, we already know that in this country, the polychaetous annelids are abundant and diversified in the deep bottoms. So far, 50 and 18 families, 173 and 32 genera, and 291 and 42 species have been reported from the Pacific Ocean and the Gulf of Mexico respectively, in different habitats, including the hydrothermal vents where they play an important ecological role. These numbers also mean that the sampling effort has been scarcer in the Gulf of Mexico. A list of the species so far reported is presented and remarks are made about the seven more diverse families that represent 43% of the whole polychaete fauna in the Mexican Pacific with the Ampharetidae family (29 species, 16 genera) as the most diverse, while in the Gulf of Mexico the first seven more diverse families represent 69% of the fauna, and the most diverse family is the Cirratulidae (8 species, 3 genera). All the families present in the Gulf of Mexico are present in the Mexican Pacific, but 29 of the 49 families reported from deep sea waters in Mexico have not yet been collected in the Mexican region of the Gulf. Only five species from four families are common to both oceans in Mexico.

Keywords: Annelida: Polychaeta, deep-sea, México, biodiversity

## INTRODUCCIÓN

Los anélidos poliquetos son un grupo de invertebrados vermiformes muy abundantes y diversos en los ambientes marinos y costeros del orbe que, a pesar de su gran importancia, son muy poco conocidos por el público en general. Esto se debe, fundamentalmente, a su tamaño usualmente pequeño y a su poca visibilidad en el sustrato ya que normalmente viven escondidos en la arena, lodo, o en los intersticios de los sustratos duros, ya sean de coral vivo o muerto, rocas u otros similares. Otro factor que influye en la escasa

percepción del grupo, es su complejidad anatómica y la consiguiente dificultad para identificar sus especies, lo cual tradicionalmente ha propiciado poco entusiasmo por su estudio y la divulgación de su conocimiento, situación que se está corrigiendo en estos últimos años.

Estos organismos, pertenecientes a la Clase Polychaeta, son los más abundantes y diversificados del Phylum Annelida, con aproximadamente 8,000-9,000 especies reconocidas (Rouse y Pleijel 2001). Revisten una importancia primordial en la ecología de prácticamente cualquier hábitat marino debido a su ubicuidad, así como a su enorme abundancia y diversidad (si bien no a su biomasa), siendo en general el grupo macrofaunístico dominante, y llegando a constituir entre el 60% y el 90% de los organismos de un hábitat dado (Fauchald 1977), aún en áreas sometidas a fuertes presiones ambientales (Scheltema 1997).

Su papel fundamental en el medio marino ya no está por demostrarse, desde aspectos como su diversidad etológica y reproductiva hasta procesos de bioerosión y desde su función como bioindicadores de contaminación hasta ser componentes de las redes tróficas de especies explotadas comercialmente. Debido a su importancia, cada vez más reconocida, no pueden faltar en ningún estudio de bentos marino, ya sea taxonómico, ecológico o de impacto ambiental, entre los más relevantes. De hecho, actualmente su estudio se está intensificando a nivel mundial, y ello está favoreciendo la descripción de especies nuevas para la ciencia y de nuevos registros y ampliaciones de ámbito tanto en México como alrededor del mundo (Hernández-Alcántara *et al.* 2008).

En el mar profundo, con el avance de la tecnología que permite su exploración, se ha reconocido que los poliquetos son tan abundantes y diversos como en aguas someras (Grassle y Maciolek 1992), estimándose que en los fondos blandos profundos la riqueza de sus especies se acerca, potencialmente, a la de los arrecifes coralinos, el ambiente marino conocido hasta hoy como el más rico y diversificado del planeta. Sea como fuere, el escaso conocimiento que se tiene aún del mar profundo, con sus múltiples paisajes y ambientes asociados, no nos permite todavía hacer evaluaciones fidedignas de los grupos animales presentes. Es quizás anecdótico recordar que hace menos de un siglo, se pensaba que la vida era imposible en aguas profundas, donde no penetra la luz y la presión del agua se incrementa considerablemente.

Las exploraciones marinas, desde luego, han demostrado lo contrario y cada vez los científicos han tenido que revisar sus conceptos sobre la presencia,

diversidad y abundancia de los organismos marinos a mayores profundidades, conforme la tecnología avanzaba y se podían explorar nuevas profundidades. El record de profundidad se obtuvo con el batiscafo “Trieste” que llegó a posarse en el fondo marino a 10,916 m de la superficie el 23 de enero de 1960, con las mismas aprehensiones sobre el fondo que iban a tocar, con las que se posó el Apolo 11 en la luna nueve años más tarde, en julio de 1969. Solo que, en contraste con este último, lo que los azorados tripulantes del batiscafo, Jacques Picard y Don Walsh, vieron a través de la escotilla a esas profundidades (las máximas que tenemos en este planeta) fue un pez bentónico, señal inconfundible de vida superior (Solis-Weiss 2004).

Desde los tiempos de Alejandro el Magno, considerado el primer humano que descendió bajo el mar en un artefacto fabricado expresamente para ello, consistente en una burda campana traslúcida que lo llevó a unos pocos metros de profundidad (aproximadamente 5), y hasta nuestros días, en que se están desarrollando pequeños submarinos científicos (capaces de alcanzar varios miles de metros de profundidad) o turísticos, no deja de asombrarnos la diversidad de la vida marina que existe bajo la superficie y de la cual son partícipes los cuatro grupos más importantes del bentos: poliquetos, crustáceos, moluscos y equinodermos.

En este ámbito, el descubrimiento más importante en ecología del siglo XX, lo constituye sin duda el de las ventilas hidrotermales cerca de las islas Galápagos en 1977 (Corliss *et al.* 1979), ya que cambió nuestra visión de la vida y su evolución en este planeta. Este ecosistema marino, cuya existencia nadie hubiera podido siquiera sospechar antes de esa fecha y cuyo muy peculiar funcionamiento, único conocido en el planeta que no depende de alguna manera u otra del sol para su supervivencia, es hoy el ejemplo más sobresaliente de las sorpresas que nos depara la exploración del fascinante mundo de las profundidades marinas.

Desde entonces, se han descubierto otros ambientes peculiares de las profundidades, como las “Cold seeps” o infiltraciones frías descubiertas por Paull en 1983 (Paull *et al.* 1984) a 3,200 m de profundidad en el Golfo de México, los “hielos” de hidratos de metano del Escarpe de Florida y los interesantísimos hábitats sostenidos por los esqueletos de ballena que caen en los fondos profundos, incluyendo la sucesión biológica que ahí se da a medida que aumenta la descomposición de la carcasa, así como los bellísimos ecosistemas de los montes submarinos. En todos estos ambientes, los poliquetos constituyen ya

sea el único ó el grupo biológico más diverso o el dominante y probablemente el más abundante.

Las comunidades del mar profundo, en general dependen energéticamente de las comunidades de la superficie, de la materia orgánica originada en la columna de agua y del acarreo de la descarga de los ríos que provee también materia orgánica compuesta de fragmentos de plantas, animales y heces. Sin embargo, algunos ecosistemas de mar profundo como por ejemplo las ventilas hidrotermales, están provistos de su propia fuente de energía que se origina en las emanaciones de magma ricas en ácido sulfhídrico que es procesado y transformado en fuente de alimento por las bacterias quimioautotróficas, mismas que representan a los productores primarios en los demás ecosistemas del orbe.

Este capítulo trata del conocimiento que existe de los anélidos poliquetos en las aguas profundas de los mares mexicanos. Nos basamos en los resultados de nuestras campañas e investigaciones y en los resultados publicados a la fecha.

## ÁREA DE ESTUDIO

Suele considerarse como mar profundo a la zona que se encuentra más allá de la plataforma continental, es decir, convencionalmente y en promedio, a más de 200 m de profundidad. En México, dadas las características y amplitud de la plataforma continental, muy ancha en la parte sur-oriental del Golfo de México (hasta unos 150 km) y muy estrecha en el Pacífico (unos 30 a 50 km), la Zona Económica Exclusiva (ZEE) se compone de 85% de mar profundo (Escobar-Briones y Soto 1993).

A partir del reborde de la plataforma continental, en ambos océanos de nuestra ZEE, nos adentramos hacia la zona profunda, encontrándonos primero con el talud continental (zona batial), que, a manera de ladera de montaña, baja (entre 200 y 4000 m) hasta la planicie o llanura abisal (a más de 4000 m). Las fosas oceánicas (zona hadal) que son las zonas más profundas del mundo no se encuentran en nuestra ZEE, por lo que no serán tratadas aquí.

El talud continental constituye un ambiente básicamente desconocido a nivel mundial ya que la pendiente que lo caracteriza hace muy difícil el muestreo convencional, es decir, con dragas o nucleadores (Granados-Barba *et al.* 2000, Eleftheriou y McIntyre 2005), los cuales al caer sobre una superficie no plana

y donde no es fácil que se acumule sedimento blando, no pueden recoger la muestra o la extraen con mucha dificultad. Como parte del talud, hay a veces fallas geológicas que provocan la formación de cañones submarinos (similares a los terrestres), aun más desconocidos en cuanto a su fauna bentónica.

Igual que en la superficie de la tierra, la planicie abisal además de sus grandes extensiones planas presenta, en las zonas de fallas tectónicas, un relieve variado similar a las montañas terrestres y con el mismo origen. Las cordilleras submarinas siguen el trayecto de las fallas oceánicas que separan a las placas que cerca de nuestras costas son: la placa del Pacífico al Norte y la placa de Cocos que se extiende por casi toda la costa del Océano Pacífico sur mexicano, con la placa del Caribe cubriendo el extremo sur del Pacífico de nuestro país (Briggs 1995). Atravesando longitudinalmente el Golfo de California, tenemos la falla que en superficie pasa por la California estadounidense como falla de San Andrés, que separa las placas del Pacífico y la de Norte América y que adentrándose en nuestras aguas profundas, da origen al relieve y al conocido punto de estudio de ventilas hidrotermales, llamado “Cuenca de Guaymas”. Las zonas de ventilas hidrotermales estudiadas en México a bordo de submarinos estadounidenses (sobre todo el “Alvin” y el “Turtle”) y franceses (“Nautile”), son dos y se encuentran respectivamente en la cuenca de Guaymas y al oeste de Manzanillo en el paralelo 21° N.

Los montes submarinos, cuya altura varía tanto como en el relieve terrestre, apenas empiezan a ser conocidos y explorados, estimándose que existen cientos de miles de ellos de todos los tamaños y formas: en ocasiones presentan forma de “guyots” (con la cima aplanada). En estas superficies planas se desarrollan comunidades ricas en especies, cuyas espectaculares fotografías están empezando a difundirse, gracias a los submarinos de investigación y que revelan inclusive coloridos paisajes con corales gorgonáceos y esponjas, además de una rica fauna asociada, desde los peces a los pequeños invertebrados, que se han podido observar a profundidades desde 200 a 600 m, o más.

En el Golfo de México, se encuentra en la parte central más profunda, la fosa de Sigsbee (Pérez-Mendoza *et al.* 2003) a profundidades de casi 4000 m y hacia el sureste domos de asfalto así como zonas de filtraciones de sal (Ding *et al.* 2010).

Con el incremento de la profundidad hacia la zona abisal, la heterogeneidad en la composición del tamaño de grano disminuye y se convierte paulatinamente en un sustrato cada vez más fino hasta predominar las arcillas. En

esas planicies, se observa sedimento blando fino, con muy poca variación en extensas zonas, con “ripplemarks” (o rizaduras de corriente), poca variación en temperatura y salinidad y poca megafauna, única reconocible en exploración con fotografía o video submarinos. En cambio la infauna, de tamaño pequeño, debe ser mucho más diversa y abundante si extrapolamos a estos fondos los resultados de Grassle y Maciolek (1992) en aguas estadounidenses, pero ha sido aun muy poco explorada.

Las variables fisicoquímicas determinan en gran medida la fauna del fondo marino. En respuesta al ambiente profundo, caracterizado por la ausencia de luz, presión considerable y bajas temperaturas, la fauna presenta modificaciones morfológicas, fisiológicas y etológicas, (entre otras: tamaño, coloración, bioluminiscencia, simbiosis con bacterias, entre las más destacadas), con respecto a la de aguas someras, por lo que es de esperar la descripción constante de especies nuevas.

El poco conocimiento de la diversidad del mar profundo en aguas mexicanas es consecuencia de los escasos estudios que se han podido realizar hasta hoy, básicamente debidos a los altos costos involucrados por la necesidad de tecnología muy sofisticada, por lo que el número de especies descritas es incipiente. Los registros taxonómicos existentes provienen principalmente de estudios realizados por investigadores extranjeros y desde finales de la década de los noventas por mexicanos, lo que ha coadyuvado a conjuntar listas faunísticas (Escobar-Briones y Soto 1993, Escobar-Briones 2000).

## METODOLOGÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN

Las especies registradas en las zonas profundas (> 200 m) del Pacífico mexicano han sido publicadas por diversos autores, entre los que destacan Chamberlin (1919), Treadwell (1923), Hartman (1939, 1940, 1944) y Fauchald (1968, 1970, 1972), cuyos estudios se basaron principalmente en el material recolectado durante las expediciones oceanográficas “Albatross” (1886-91 y 1911) y “Velero” (1967, 1970), en muestras aisladas recolectadas por personal de la *Scripps Institution of Oceanography*, y en material de la *Allan Hancock Pacific Expeditions* recolectado entre 1932 y 1942. También se utilizó la información de Méndez (2006) resultante de cuatro cruceros (de la serie “TALUD”, ICML-UNAM) realizados en parte del Talud del Golfo de California en 2001 y 2002. El material biológico asociado a las ventilas hidrotermales fue recolectado en

diversas campañas oceanográficas, con los submarinos mencionados más arriba y las especies de poliquetos fueron identificadas por diversos autores (Pettibone 1983, 1984, 1985a-c, 1989, Blake 1985, Desbruyères *et al.* 1985, Grassle *et al.* 1985, Grassle 1986, Desbruyères y Laubier 1991, Solís-Weiss y Hilbig 1992, Blake y Maciolek 1992, Solís-Weiss y Hernández-Alcántara 1994), se actualizaron los registros con la recopilación comprehensiva de la fauna de ventilas de mar profundo a nivel mundial de Desbruyères *et al.* (2006)

En el Golfo de México, los registros de mar profundo son menos numerosos, en particular porque hay una menor intensidad de muestreos; sin embargo, en Fauchald *et al.* (2009) existe una recopilación reciente sobre las especies de poliquetos registradas en todo el Golfo de México, cuyos registros de mar profundo se utilizaron aquí porque cubren toda la zona de estudio.

Las investigaciones en los sistemas de volcanes de asfalto del mar profundo mexicano en el Golfo de México se iniciaron en el año 2003 en la Bahía de Campeche (Mc Donald *et al.* 2004), aunque de acuerdo con Brüning *et al.* (2010) ya habían sido documentadas por Pequegnat en una fotografía en 1971. Son comunidades con mayor riqueza y abundancia de equinodermos, peces, crustáceos y bivalvos que las otras comunidades quimioautotróficas conocidas.

Para ilustrar la distribución geográfica de las especies registradas hasta el momento en aguas profundas de México, y las afinidades faunísticas entre las principales regiones marinas del país, se realizó un análisis de agrupamiento utilizando el índice de similitud de Bray Curtis (Southwood y Henderson 2000), cuyo resultado se observar en la Figura 1.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 1) Pacífico Mexicano y Golfo de California

En las zonas profundas del Pacífico Mexicano (> 200 m) se han registrado 173 géneros y 291 especies pertenecientes a 50 familias (Tabla 1). La familia Ampharetidae con 29 especies (16 géneros) es claramente la más diversa en esas aguas mexicanas, seguida de la Polynoidae (23 especies, 17 géneros), Onuphidae (19 especies, 8 géneros), Maldanidae (14 especies, 10 géneros), Lumbrineridae (14 especies, 4 géneros), Spionidae (12 especies, 6 géneros) y Paraonidae (12 especies, 5 géneros). Estas siete familias representan al 43%

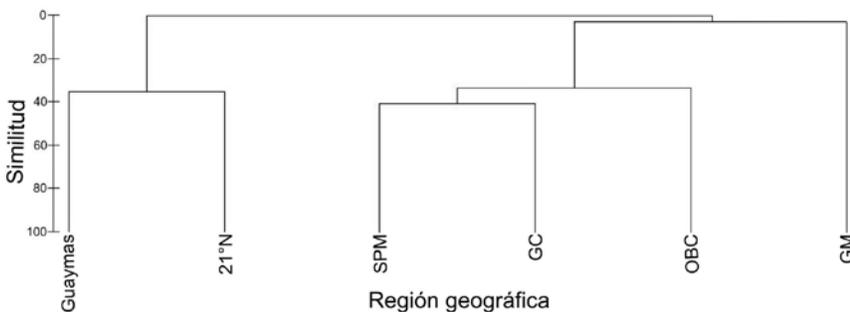
de toda la fauna de poliquetos registrada en el Pacífico mexicano, y en términos generales son de las familias más diversas en estos ambientes a nivel mundial.

Trece familias (28%) han sido solo ocasionalmente recolectadas en ambientes de aguas profundas y están representadas por una sola especie. Son: Archinomidae, Euphosinidae, Longosomatidae, Magelonidae, Nautiliniellidae, Oeonidae, Paralacydonidae, Pholoidae, Poecilochaetidae, Sabellariidae, Scalibregmatidae, Syllidae y Trichobranchidae. En términos generales, estas familias están mejor representadas en la plataforma continental, aunque la familia Archinomidae por el contrario, sólo ha sido recolectada en la cuenca de Guaymas (Tabla 1).

Es conveniente también aclarar que el registro de la familia Pholoidae corresponde a un solo ejemplar catalogado como *Peisidice indeterminable* por Fauchald (1972). El género es actualmente válido como *Pholoides*, pero sin posibilidad de ser identificado a nivel de especie por su mal estado de preservación.

A pesar de las diferentes metodologías, de los variados procesos de identificación y de la desigual intensidad de muestreo, se observa que las especies de poliquetos recolectados en el Océano Pacífico Mexicano no se distribuyen homogéneamente en toda el área de estudio y hay regiones donde esta fauna es más diversificada. En efecto, la comparación de la fauna que habita en las

**Figura 1.** Afinidades faunísticas entre las principales regiones de aguas profundas de México, de acuerdo con la composición de especies de poliquetos. (SPM: Sur del Pacífico mexicano; GC: Golfo de California; OBC: Oeste de la península de Baja California; GM: Golfo de México).



principales regiones geográficas del Pacífico mexicano: el Golfo de California, la zona occidental de la península de Baja California, el Pacífico sur y las zonas de ventilas hidrotermales hasta hoy exploradas (cuenca de Guaymas y paralelo 21°N), muestran que la composición faunística cambia a lo largo del Pacífico mexicano (Fig. 1). De hecho, el 63% (180 especies) de los poliquetos se ha registrado en una sola de estas regiones y el 30% (85 especies) en dos regiones (Tabla 1).

La fauna registrada en el Pacífico mexicano se divide en dos grupos principales, la que habita en ambientes hidrotermales y la de fondos blandos (Fig. 1). En cada uno de los dos ambientes hidrotermales del Pacífico mexicano se han registrado nueve familias de poliquetos, aunque en el paralelo 21°N (28 especies) se presenta una mayor variedad de especies que en la Cuenca de Guaymas (18 especies) (Tabla 1). Si bien es cierto que los Archinomidae, Alvinellidae y Siboglinidae recolectados son endémicos de las ventilas hidrotermales en el Pacífico mexicano, la mayoría de las especies de las familias Polynoidae, Dorvilleidae y Hesionidae que han sido registradas, han sido recolectadas en varios de estos ambientes hidrotermales, fuera de nuestras fronteras.

Desde luego, entre las restantes regiones del Pacífico mexicano, la composición faunística presenta valores mayores de similitud, aunque es evidente que la fauna de la parte occidental de la Península de Baja California es distinta de la que habita en el Golfo de California y en el sur del Pacífico mexicano (Fig. 1). El mayor número de familias (41), géneros (124) y especies (193) se registra en el Golfo de California, que si bien es la región marina más estudiada de México, también es conocido por su amplia variedad de hábitats, y su variabilidad topográfica, oceanográfica, geológica y sedimentaria, que permite el establecimiento de una amplia variedad de especies.

El sur del Pacífico mexicano es la región con menos registros de familias (28) y especies (68), y el 78% de esas especies (53) también están presentes en el Golfo de California; en sólo 15 de las 68 especies la distribución se restringe, hasta donde sabemos hoy, al sur del Pacífico mexicano (Tabla 1). En el oeste de la península de Baja California, por otra parte, se han registrado 33 familias y 109 especies. A pesar de que sólo el 18% de estas especies (19) se distribuye en todas las costas mexicanas del Pacífico, la fauna de esta región presenta ciertas similitudes con la que habita en el resto del Pacífico mexicano, ya que más de la mitad de los poliquetos registrados en el oeste de Baja California (59 especies = 54%) también se han recolectado en el Golfo de

Tabla 1. Distribución de los poliquetos de aguas profundas de México.

Familia	Especie	Golfo de California	Ventila Guaymas	Ventila 21°N	Oeste Baja California	Sur Pacífico	Golfo de México
ACOETIDAE	<i>Acoetes pacifica</i> Treadwell 1914	X					X
	<i>Euarche mexicana</i> Pettibone, 1989						X
	<i>Polyodontes panamensis</i> Chamberlin 1919	X					
ACROCIRRIDAE	<i>Flabelligella macrochaeta</i> Fauchald 1972	X					
	<i>Flabelligella mexicana</i> Fauchald, 1972				X		
ALVINELLIDAE	<i>Alvinella pompejana</i> Desbruyeres & Laubier, 1980		X				
	<i>Alvinella caudata</i> Desbruyeres & Laubier, 1986			X			
	<i>Paralvinella bactericola</i> Desbruyères & Laubier, 1991		X				
	<i>Paralvinella grasslei</i> Desbruyères & Laubier, 1982		X	X			
	<i>Paralvinella pandorae</i> Desbruyeres & Laubier, 1986			X			
AMPHARETIDAE	<i>Amagete delus</i> (Chamberlin, 1919)	X				X	
	<i>Ampharete acutifrons</i> (Grube, 1860)	X					
	<i>Ampharete arctica</i> Malmgren, 1866	X				X	

Tabla 1. Continúa.

Familia	Especie	Golfo de California	Ventilia Guaymas	Ventilia 21°N	Oeste Baja California	Sur Pacífico	Golfo de México
	<i>Amphicteis obscurior</i> Chamberlin, 1919					X	
	<i>Amphicteis scaphobranchiata</i> Moore, 1906				X		
	<i>Amphicteis uncopalea</i> Chamberlin 1919	X					
	<i>Amphisamytha galapagensis</i> Zottoli 1983		X	X			
	<i>Amphisamytha fauchaldi</i> Solís-Weiss & Hernández-Alcántara 1994	X					
	<i>Anobothrus bimaculatus</i> Fauchald 1972	X			X		
	<i>Anobothrus mancus</i> Fauchald 1972	X				X	
	<i>Ecamphicteis elongata</i> Fauchald 1972	X				X	
	<i>Egamella quadribranchiata</i> Fauchald, 1972	X			X		
	<i>Lysippe mexicana</i> Fauchald, 1972				X		
	<i>Melinna exilia</i> Fauchald 1972	X					
	<i>Melinna heterodonta</i> Moore 1923	X					
	<i>Melinna plana</i> Fauchald 1972	X					
	<i>Melinna tentaculata</i> Fauchald 1972	X				X	
	<i>Melinnampharete gracilis</i> Hartman 1969	X			X	X	

Tabla 1. Continúa.

Familia	Especie	Golfo de California	Ventila Guaymas	Ventila 21°N	Oeste Baja California	Sur Pacífico	Golfo de México
	<i>Melinnexis moorei</i> Hartman 1960	X			X		
	<i>Mexamage corrugata</i> Fauchald 1972	X					
	<i>Paralysippe annectens</i> (Moore, 1923)				X		
	<i>Paramage scutata</i> (Moore, 1923)	X			X		
	<i>Samythella elongata</i> Verrill 1873	X					
	<i>Samythella interrupta</i> Fauchald, 1972				X		
	<i>Samythella pala</i> Fauchald, 1972	X					
	<i>Schistocomus hiltoni</i> Chamberlin, 1919	X					
AMPHINOMIDAE	<i>Chloeia viridis</i> Schmarda 1861	X					
	<i>Linopherus abyssalis</i> (Fauchald, 1972)	X			X		
	<i>Linopherus ambigua</i> (Monro, 1933)	X					
APHRODITIDAE	<i>Aphrodita longipalpa</i> Essenberg, 1917	X			X		
	<i>Aphrodita negligens</i> Moore, 1905				X		
	<i>Aphrodita parva</i> Moore, 1905	X					
	<i>Laetmodice pellucida</i> Moore, 1903	X					
	<i>Laetmonice producta</i> wyvillei McIntosh, 1885	X			X		
ARCHINOMIDAE	<i>Archinome rosacea</i> Blake 1985		X				

Tabla 1. Continúa.

Familia	Especie	Golfo de California	Ventila Guaymas	Ventila 21°N	Oeste Baja California	Sur Pacífico	Golfo de México
CAPITELLIDAE	<i>Dasybranchus lumbricooides</i> (Grube 1878)	X					
	<i>Decamastus gracilis</i> Hartman, 1963						X
	<i>Heteromastus fliformis</i> Claparède, 1864						X
	<i>Leiochrides hemipodus</i> Hartman 1960	X				X	
	<i>Mediomastus californiensis</i> Hartman, 1944						X
	<i>Neoheteromastus lineus</i> Hartman 1960	X					
	<i>Neomediomastus glabrus</i> (Hartman 1960)	X			X		
	<i>Neonotomastus glabrus</i> Fauchald 1972	X				X	
	<i>Notodasus magnus</i> Fauchald 1972	X					
	<i>Notomastus abyssalis</i> Fauchald 1972	X				X	
	<i>Notomastus cinctus</i> Fauchald 1972	X			X	X	
	<i>Notomastus lineatus</i> Claparède, 1870						X
	<i>Notomastus magnus</i> Hartman 1947	X					
	<i>Notomastus precocis</i> Hartman 1960	X			X	X	
	<i>Notomastus tenuis</i> Moore 1909	X				X	

Tabla 1. Continúa.

Familia	Especie	Golfo de California	Ventila Guaymas	Ventila 21°N	Oeste Baja California	Sur Pacífico	Golfo de México
CHAETOPTERIDAE	<i>Phyllochaetopterus limicolus</i> Hartman 1960	X			X		
CIRRATULIDAE	<i>Aphelochaeta monilaris</i> (Hartman 1960)	X			X		
	<i>Aphelochaeta cf. monilaris</i> (Hartman, 1960)						X
	<i>Aphelochaeta multijilis</i> (Moore 1909)	X			X	X	
	<i>Aphelochaeta cf. phillipsi</i> Blake, 1996						X
	<i>Aphelochaeta cf. williamsae</i> Blake, 1996						X
	<i>Chaetozone cf. columbiana</i> Blake, 1996						X
	<i>Chaetozone cf. commonalis</i> Blake, 1996						X
	<i>Chaetozone corona</i> Berkeley & Berkeley, 1941	X					
	<i>Chaetozone setosa</i> Malmgren 1867	X			X	X	
	<i>Cirratulus sinicolens</i> Chamberlin 1919	X					
	<i>Monticellina baptisteae</i> (Kirkegaard, 1959)						X
	<i>Monticellina dorsobranchialis</i> (Kirkegaard, 1959)						X
	<i>Monticellina tessellata</i> (Hartman, 1960)	X					

Tabla 1. Continúa.

Familia	Especie	Golfo de California	Ventila Guaymas	Ventila 21°N	Oeste Baja California	Sur Pacífico	Golfo de México
	<i>Monticellina cf. tessellata</i> (Hartman, 1960)						X
COSSURIDAE	<i>Cossura brunnea</i> Fauchald 1972	X				X	
	<i>Cossura candida</i> Hartman, 1955				X	X	
	<i>Cossura rostrata</i> Fauchald 1972	X				X	
	<i>Cossura sima</i> Fauchald, 1972	X				X	
DORVILLEIDAE	<i>Dorvillea akessoni</i> Blake, 1985		X				
	<i>Dorvillea annulata</i> (Moore, 1906)				X		
	<i>Exallopus jumarsi</i> Blake 1985		X				
	<i>Ophryotrocha akessoni</i> Blake 1985		X				
	<i>Ophryotrocha platycephale</i> Blake 1985		X				
EUNICIDAE	<i>Eunice americana</i> Hartman, 1944				X		
	<i>Eunice antennata</i> Savigny 1818	X					
	<i>Eunice aphroditois</i> Pallas 1788	X					
	<i>Eunice fucata</i> Ehlers, 1887						X
	<i>Eunice megabranchia</i> Fauchald 1970	X					
	<i>Eunice pulvinopalpata</i> Fauchald, 1982			X			
	<i>Eunice segregata</i> (Chamberlin, 1919)	X			X		

Tabla 1. Continúa.

Familia	Especie	Golfo de California	Ventila Guaymas	Ventila 21°N	Oeste Baja California	Sur Pacífico	Golfo de México
	<i>Eunice semisegregata</i> Fauchald 1969	X				X	
	<i>Eunice vittata</i> delle Chiaje 1828	X					
EUPHROSINIDAE	<i>Euphrosine paucibranchiata</i> Hartman, 1960				X		
FAUVELIOPSIDAE	<i>Fauveliopsis glabra</i> (Hartman, 1960)				X	X	
	<i>Fauveliopsis rugosa</i> Fauchald 1972	X			X		
FLABELLIGERIDAE	<i>Brada pluribranchiata</i> (Moore, 1923)	X			X		
	<i>Brada verrucosa</i> Chamberlin, 1919					X	
	<i>Diplocirrus capensis</i> Day, 1961						X
	<i>Diplocirrus micans</i> Fauchald, 1972				X	X	
	<i>Ilyphagus bythincola</i> Chamberlin, 1919					X	
	<i>Ilyphagus ilyvestis</i> Hartman, 1960	X					
	<i>Pherusa abyssalis</i> Fauchald 1972	X				X	
	<i>Pherusa ?inflata</i> (Treadwell, 1914)				X	X	
	<i>Piromis hospitis</i> Fauchald 1972	X					
	<i>Therochaeta pacifica</i> Fauchald, 1972				X		
GLYCERIDAE	<i>Glycera americana</i> Leidy 1855	X					
	<i>Glycera branchiopoda</i> More, 1911				X		

Tabla 1. Continúa.

Familia	Especie	Golfo de California	Ventila Guaymas	Ventila 21°N	Oeste Baja California	Sur Pacífico mexicano	Golfo de México
	<i>Glycera capitata</i> Orsted 1843	X			X		
	<i>Glycera oxycephala</i> Ehlers, 1887				X		
	<i>Glycera profundus</i> Chamberlin 1919	X				X	
	<i>Glycera tessellata</i> Grube 1863	X					
GONIADIDAE	<i>Bathylglycinde cedroensis</i> Fauchald, 1972				X	X	
	<i>Bathylglycinde mexicana</i> Fauchald 1972	X					
	<i>Glycinde armigera</i> Moore 1911	X					
	<i>Goniada annulata</i> Moore, 1905				X		
	<i>Goniada brunnea</i> Treadwell 1906	X			X	X	
HESIONIDAE	<i>Hesiocaeca methanicola</i> Desbruyères & Toulmond, 1998						X
	<i>Hesiolyra bergi</i> Blake, 1985			X			
	<i>Hesiospina vestimentifera</i> Blake, 1985			X			
	<i>Kefersteinia cirrata</i> (Keferstein, 1862)						X
	<i>Nereimyra alvinae</i> Blake 1985		X				
	<i>Orseis grasslei</i> Blake 1985		X				
	<i>Podarkeopsis levifuscina</i> Perkins, 1984						X
LONGOSOMATIDAE	<i>Heterospio catalinensis</i> (Hartman, 1960)	X					
LUMBRINERIDAE							

Tabla 1. Continúa.

Familia	Especie	Golfo de California	Ventilia Guaymas	Ventilia 21°N	Oeste Baja California	Sur Pacífico mexicano	Golfo de México
	<i>Eranno lagunae</i> Fauchald 1970	X		X			
	<i>Lumbrinerides crassicephala</i> Hartman, 1965						X
	<i>Lumbrinerides jonesi</i> Perkins, 1979						X
	<i>Lumbrineris bicirrata</i> Treadwell, 1929	X			X		
	<i>Lumbrineris californiensis</i> Hartman 1944	X					
	<i>Lumbrineris cedroensis</i> Fauchald 1970	X			X		X
	<i>Lumbrineris cruzensis</i> Hartman, 1944				X		
	<i>Lumbrineris eugeniae</i> Fauchald 1970	X			X		
	<i>Lumbrineris index</i> Moore 1911	X					
	<i>Lumbrineris? latreilli</i> Audouin & Milne Edwards 1834	X					
	<i>Lumbrineris longensis</i> Hartman 1960	X					
	<i>Lumbrineris moorei</i> Hartman, 1942				X		
	<i>Lumbrineriopsis paradoxa</i> (Saint-Joseph, 1888)						X
	<i>Ninnoe foliosa</i> Fauchald 1972	X			X		
	<i>Ninnoe longibranchia</i> Fauchald 1972	X					X
	<i>Ninnoe fuscooides</i> Fauchald, 1972	X					X

Tabla 1. Continúa.

Familia	Especie	Golfo de California	Ventila Guaymas	Ventila 21°N	Oeste Baja California	Sur Pacífico mexicano	Golfo de México
	<i>Parainoe fusca</i> (Moore, 1911)				X		
	<i>Scoletoma verrilli</i> (Perkins, 1979)						X
MAGELONIDAE	<i>Magelona californica</i> Hartman 1944	X					
MALDANIDAE	<i>Asychis lobata</i> Fauchald, 1972	X			X		
	<i>Asychis ramosus</i> Levenstein 1961	X				X	
	<i>Asychis similis</i> (Moore, 1906)	X					
	<i>Clymaldane laevis</i> Fauchald, 1972				X		
	<i>Euclymene reticulata</i> Moore 1923	X			X		
	<i>Isocirrus longiceps</i> (Moore 1923)	X					
	<i>Maldane cristata</i> Treadwell 1923	X			X	X	
	<i>Maldane monilata</i> Fauchald 1972	X				X	
	<i>Metasychis disparidentata</i> (Moore, 1904)	X					
	<i>Nicomache arwidssoni</i> Blake, 1985					X	
	<i>Petaloproctus ornatus</i> Hartman 1969	X					
	<i>Praxillella gracilis</i> (Sars 1862)	X			X		
	<i>Praxillella triflora</i> Hartman 1960	X					
	<i>Rhodine bitorquata</i> Moore 1923	X				X	
NAUTILINIELLIDAE	<i>Santelma mirasetis</i> (Fauchald, 1972)						X

Tabla 1. Continúa.

Familia	Especie	Golfo de California	Ventila Guaymas	Ventila 21°N	Oeste Baja California	Sur Pacífico mexicano	Golfo de México
NEPHTYIDAE	<i>Aglaophamus eugeniae</i> Fauchald, 1972				X		
	<i>Aglaophamus fossae</i> Fauchald 1972	X					
	<i>Aglaophamus paucilamellata</i> Fauchald, 1972				X		
	<i>Aglaophamus surrufa</i> Fauchald 1972	X					
	<i>Nephtys cornuta</i> Berkeley & Berkeley, 1945				X		
	<i>Nephtys ferruginea</i> Hartman, 1940				X		
	<i>Nephtys paradoxa</i> Malm 1874	X				X	
<i>Nephtys squamosa</i> Ehlers 1887	X						
NEREIDIDAE	<i>Ceratocephale pacifica</i> Hartman, 1960	X			X		
	<i>Ceratonereis vermillionensis</i> Fauchald 1972	X				X	
	<i>Neanthes mexicana</i> Fauchald, 1972				X		
	<i>Nereis angelensis</i> Fauchald 1972	X					
	<i>Nereis anaculopsis</i> Fauchald 1972	X					
	<i>Nereis fossae</i> Fauchald 1972	X					
	<i>Nereis sandersi</i> Blake 1985		X	X			
<i>Nereis zonata</i> Malmgren, 1867				X			
<i>Platynereis bicanaliculata</i> (Baird, 1863)	X						
OENONIDAE	<i>Drilonereis falcata</i> Moore 1911	X				X	

Tabla 1. Continúa.

Familia	Especie	Golfo de California	Ventila Guaymas	Ventila 21°N	Oeste Baja California	Sur Pacífico mexicano	Golfo de México
ONUPHIDAE	<i>Hyalinoecia juvenalis</i> Moore, 1911	X					
	<i>Hyalinoecia leucara</i> Chamberlin, 1919					X	
	<i>Hyalinoecia tubicola</i> Müller, 1776	X					X
	<i>Hyalinoecia stricta</i> Moore, 1911	X		X		X	
	<i>Hyalinoecia tecton</i> Chamberlin, 1919	X					
	<i>Kinbergonuphis abyssalis</i> (Fauchald, 1968)	X		X			
	<i>Kinbergonuphis nannognathus</i> (Chamberlin, 1919)	X					
	<i>Kinbergonuphis prodiopus</i> (Chamberlin, 1919)	X		X		X	
	<i>Mooreonuphis nebulosa</i> (Moore, 1911)	X					
	<i>Nothria hiatidentata</i> Moore, 1911			X			
	<i>Nothria leptota</i> (Chamberlin, 1919)			X			
	<i>Onuphis iridescens</i> (Johnson, 1901)	X		X			
	<i>Onuphis litarbranchia</i> Chamberlin, 1919					X	
	<i>Onuphis mexicana</i> (Fauchald, 1968)	X				X	
	<i>Onuphis vexillaria</i> Moore, 1911			X			
	<i>Onuphis vibex</i> (Fauchald, 1972)			X			
	<i>Paradiopatra hartmanae</i> (Kirkegaard, 1980)						X
	<i>Paradiopatra cf. papillata</i> (Kucheruck, 1979)						X

Tabla 1. Continúa.

Familia	Especie	Golfo de California	Ventila Guaymas	Ventila 21°N	Oeste Baja California	Sur Pacífico mexicano	Golfo de México
	<i>Paradiopatra parva</i> (Moore, 1911)	X					
	<i>Paranorthis fissurata</i> Fauchald, 1972	X			X		
	<i>Paraonuphis abyssorum</i> (Chamberlin, 1919)	X				X	
OPHELIIDAE	<i>Ophelina acuminata</i> Örsted, 1843				X		
	<i>Ammotrypane pallida</i> Hartman, 1960	X			X	X	
	<i>Polyophtalmus translucens</i> Hartman, 1960				X		
	<i>Tachytrypane jeffreysii</i> McIntosh, 1879						X
	<i>Travisia brevis</i> Moore 1923	X				X	
	<i>Travisia foetida</i> Hartman 1969	X			X	X	
ORBINIIDAE	<i>Califfa calida</i> Hartman, 1957	X			X		
	<i>Califfa mexicana</i> Fauchald 1972	X			X		
	<i>Leitoscoloplos elongatus</i> (Johnson, 1901)	X			X		
	<i>Leitoscoloplos kerleguensis</i> (McIntosh 1885)	X			X		
	<i>Leitoscoloplos mexicanus</i> (Fauchald, 1972)	X					
	<i>Phylo nudus</i> (Moore, 1911)	X					
	<i>Scoloplos (Leodamas) mazatlanensis</i> Fauchald 1972	X					
OWENIIDAE	<i>Myriochele gracilis</i> Hartman, 1955				X		
	<i>Myriochele heeri</i> Malmgren, 1867					X	

Tabla 1. Continúa.

Familia	Especie	Golfo de California	Ventilia Guaymas	Ventilia 21°N	Oeste Baja California	Sur Pacífico mexicano	Golfo de México
	<i>Myriochele pygidialis</i> Hartman, 1960				X		
PARALACYDO- NIDAE	<i>Paralacydonia paradoxa</i> Fauvel 1913	X				X	X
PARAONIDAE	<i>Aricidea (Aedicira) alisetosa</i> Fauchald 1972	X					
	<i>Aricidea (Aedicira) longicirrata</i> Fauchald 1972	X				X	
	<i>Aricidea (Allia) antennata</i> (Annenkova 1934)	X			X		
	<i>Aricidea (Allia) crassicipitis</i> Fauchald 1972	X			X	X	
	<i>Aricidea (Allia) similis</i> Fauchald 1972	X			X		
	<i>Aricidea (Acmira) ?lopezi</i> Berkeley & Berkeley, 1956					X	
	<i>Cirrophorus aciculatus</i> (Hartman, 1957)					X	
	<i>Cirrophorus branchiatus</i> Ehlers, 1908						X
	<i>Cirrophorus lyra</i> (Southern, 1914)	X					
	<i>Levensenia gracilis</i> (Tauber, 1879)				X		
	<i>Levensenia oculata</i> (Hartman 1957)	X				X	
	<i>Paraonides cedroensis</i> Fauchald, 1972				X		
	<i>Paraonis pycnobranchiata</i> Fauchald 1972	X					

Tabla 1. Continúa.

Familia	Especie	Golfo de California	Ventila Guaymas	Ventila 21°N	Oeste Baja California	Sur Pacífico mexicano	Golfo de México
PHOLOIDAE	<i>Pholoides</i> (indeterminable)	X					
PHYLLODOCIDAE	<i>Austrophyllum exsilium</i> Fauchald 1972	X					
	<i>Eteone cf. dilatata</i> Hartman, 1936	X					
	<i>Eteone longa</i> Bergstrom, 1914						X
	<i>Eulalia aniculata</i> Fauchald 1972	X					
	<i>Eulalia mexicana</i> Fauchald 1972	X					
	<i>Eumida strigata</i> (Ehlers, 1901)	X					
	<i>Eumida sanguinea</i> (Örsted 1843)	X					
	<i>Paranaitis polynoides</i> (Moore, 1909)	X			X		
	<i>Phyllococe dubia</i> (Fauchald, 1972)	X					
	<i>Protomystides papillosa</i> Blake, 1985			X			
	<i>Sige brunnea</i> (Fauchald 1972)	X				X	
PILARGIDAE	<i>Ancistargis verrucosa</i> Fauchald 1972	X				X	
	<i>Ancistrosyllis hartmanae</i> Pettibone, 1966	X					
	<i>Sigambra rugosa</i> Fauchald 1972	X					
	<i>Sigambra setosa</i> Fauchald 1972	X					
	<i>Sigambra tentaculata</i> (Treadwell, 1941)						X
POECILOCHAETIDAE	<i>Poecilochaetus johnsoni</i> Hartman, 1939	X			X		

Tabla 1. Continúa.

Familia	Especie	Golfo de California	Ventilia Guaymas	Ventilia 21°N	Oeste Baja California	Sur Pacífico mexicano	Golfo de México
POLYNOIDAE	<i>Admetella longipedata</i> McIntosh, 1885	X		X		X	
	<i>Byligides anoculata</i> Moore 1910	X					
	<i>Bathykurila guaymasensis</i> Pettibone 1989		X				
	<i>Branchinotogluma grasslei</i> Pettibone 1985		X				
	<i>Branchinotogluma hessleri</i> Pettibone, 1985			X			
	<i>Branchinotogluma sandersi</i> Pettibone 1985		X				
	<i>Branchiplicatus cupreus</i> Pettibone 1985		X				
	<i>Halosydna brevisetosa</i> Kingberg, 1855	X					
	<i>Harmothoe mexicana</i> Chamberlin 1919	X				X	
	<i>Harmothoe multisetosa</i> Moore 1910	X					
	<i>Iphionella risensis</i> Pettibone, 1986			X			
	<i>Lepidasthenia curta</i> Chamberlin 1919	X					
	<i>Lepidonotopodium fimbriarum</i> Pettibone, 1983			X			
	<i>Lepidonotopodium riftense</i> Pettibone 1984	X	X				

Tabla 1. Continúa.

Familia	Especie	Golfo de California	Ventila Guaymas	Ventila 21°N	Oeste Baja California	Sur Pacífico mexicano	Golfo de México
	<i>Lepidonotopodium williamsae</i> Pettibone, 1984			X			
	<i>Lepidonotus squamatus</i> (Linnaeus, 1767)	X					
	<i>Lepidonotus versicolor</i> Ehlers 1901	X					
	<i>Levensteiniella kincaidi</i> Pettibone, 1985		X				
	<i>Macellicephala galapagensis</i> Pettibone, 1985		X				
	<i>Macellicephaloides alvini</i> Pettibone 1989		X				
	<i>Subadyte mexicana</i> Fauchald, 1972				X		
	<i>Ophisthotrochopodus alvinus</i> Pettibone, 1985			X			
	<i>Thermiphione tufari</i> Hartmann Schroeder, 1992			X			
SABELLARIIDAE	<i>Idanthyrsus armatopsis</i> Fauchald 1972	X					
SABELLIDAE	<i>Chone gracilis</i> Moore, 1906	X			X		
	<i>Euchonella magna</i> Fauchald, 1972	X					
	<i>Fabrisabella similis</i> Fauchald, 1972					X	

Tabla 1. Continúa.

Familia	Especie	Golfo de California	Ventila Guaymas	Ventila 21°N	Oeste Baja California	Sur Pacífico mexicano	Golfo de México
	<i>Magalomma circumspectum</i> (Moore, 1923)	X					
	<i>Pseudopotamilla intermedia</i> Moore, 1905	X					
SCALIBREGMATIDAE	<i>Pseudoscalibregma aciculata</i> Hartman, 1965						X
	<i>Scalibregma inflatum</i> Rathke 1843	X				X	
SERPULIDAE	<i>Laminatubus alvini</i> TenHove & Zibrowius, 1986		X				
	<i>Protis hydrothermica</i> TenHove & Zibrowius, 1986			X			
SIBOGLINIDAE	<i>Oasisia alvinae</i> Jones, 1985			X			
	<i>Riftia pachyptila</i> Jones, 1981		X	X			
SIGALIONIDAE	<i>Ehlersleanira incisa</i> (Grube, 1877)					X	
	<i>Leanira calcis</i> Hartman, 1960				X		
	<i>Leanira hystericis</i> Ehlers, 1875	X					
	<i>Neoleanira areolata</i> (McIntosh, 1885)	X				X	
	<i>Neoleanira aerolata</i> (McIntosh, 1885)	X					
	<i>Neoleanira racemosa</i> (Fauchald, 1972)	X			X		

Tabla 1. Continúa.

Familia	Especie	Golfo de California	Ventila Guaymas	Ventila 21°N	Oeste Baja California	Sur Pacífico mexicano	Golfo de México
	<i>Sthenelais tertiaglabra</i> Moore, 1910				X		
	<i>Sthenelanella uniformis</i> Moore 1910	X					
	<i>Sthenolepis spargens</i> Fauchald 1972	X			X		
SPHAERODORIDAE	<i>Clavodorum clavatum</i> Fauchald, 1972				X		
	<i>Ephesiella brevicapitis</i> (Moore, 1909)	X			X		
	<i>Sphaerephesia longisetis</i> Fauchald, 1972				X		
	<i>Sphaerephesia similisetis</i> Fauchald, 1972				X		
SPIONIDAE	<i>Laonice sacculata</i> (Moore 1923)	X			X	X	
	<i>Lindaspio dibranchiata</i> Blake & Maciolek, 1992		X				
	<i>Minuspio cirrifera</i> (Wirén, 1883)	X					
	<i>Parapriospio pinnata</i> (Ehlers, 1901)				X		
	<i>Polydora websteri</i> Hartman, 1943						X
	<i>Prionospio anuncata</i> Fauchald, 1972	X				X	
	<i>Prionospio ehlersi</i> Fauvel, 1928				X		
	<i>Prionospio fauchaldi</i> Maciolek, 1985						X
	<i>Prionospio malmgreni</i> Claparède 1870	X			X		
	<i>Prionospio vermillionensis</i> Fauchald, 1972	X					
	<i>Sphiophanes anoculata</i> Hartman, 1960				X		

Tabla 1. Continúa.

Familia	Especie	Golfo de California	Ventila Guaymas	Ventila 21°N	Oeste Baja California	Sur Pacífico mexicano	Golfo de México
	<i>Spiophanes cf. berkeleyorum</i> Pettibone, 1962						X
	<i>Spiophanes fimbriata</i> Moore, 1923	X			X	X	
	<i>Spiophanes kroeyeri</i> Grube 1860	X					
	<i>Spiophanes pallidus</i> Hartman, 1960			X			
STERNASPIDAE	<i>Sternaspis fossor</i> Stimpson, 1853	X			X	X	
	<i>Sternaspis maior</i> Chamberlin, 1919	X					
SYLLIDAE	<i>Exogone caribensis</i> San Martin, 1991						X
	<i>Exogone lourei</i> Berkeley & Berkeley, 1938	X					
	<i>Exogone pseudolourei</i> San Martin, 1991						X
	<i>Exogone wolfi</i> San Martin, 1991						X
	<i>Syllis alosae</i> San Martin, 1992						X
	<i>Syllis gracilis</i> Grube, 1840						X
TEREBELLIDAE	<i>Artacama coniferi</i> Moore 1905	X			X		
	<i>Nicolea latens</i> Chamberlin 1919	X					
	<i>Paraxionice artifex</i> Fauchald 1972	X					
	<i>Pista brevibranchiata</i> Moore 1923	X			X	X	
	<i>Scionella japonica</i> Moore 1903	X					
	<i>Streblosoma crassibranchia</i> Treadwell 1914	X					
	<i>Thelepus hamatus</i> Moore 1905	X					

Tabla 1. Continúa.

Familia	Especie	Golfo de California	Ventila Guaymas	Ventila 21°N	Oeste Baja California	Sur Pacífico mexicano	Golfo de México
	<i>Thelepus setosus</i> (Quatrefages, 1865)	X					
TRICHOBRANCHIDAE	<i>Terebellides stroemi</i> Sars, 1835	X			X		X

California, y 24 especies (22%) también se distribuyen en el sur del Pacífico mexicano (Fig. 1, Tabla 1).

A pesar de los pocos trabajos realizados y de los muestreos intermitentes en aguas profundas del Pacífico mexicano, las 291 especies pertenecientes a 50 familias registradas hasta el momento, indicarían en primera instancia que la fauna de estos ambientes es bastante diversificada. Como se mencionó anteriormente, pocos estudios faunísticos son comparables debido a las diferentes metodologías. Sin embargo, los resultados obtenidos por Levenstein (1991), que registró 120 especies recolectadas en 26 trincheras del mar profundo del mundo y los obtenidos por Levin *et al.* (1991) que recolectaron 38 familias en 18 montes submarinos de cuatro regiones al este del Océano Pacífico, ayudan a fortalecer la idea de que la fauna de poliquetos que habita las aguas profundas del Pacífico Mexicano es de elevada diversidad.

## 2) Golfo de México

En el Golfo de México, los poliquetos generalmente constituyen un 90% de la composición de la macrofauna y entre un 25 a 50% de su abundancia. Hasta el año de 2011, se han detectado en esa zona 61 de las 80 familias que se reconocen en el mundo, siendo las familias Syllidae, Spionidae, Sabellidae, Nereididae, Eunicidae, Serpulidae, Lumbrineridae, Paraonidae y Terebellidae las diez con riqueza de especies más alta (Fauchald *et al.* 2009); sin embargo, en el caso del mar profundo se han registrado a la fecha solamente 18 familias, que corresponden a un 22% de las registradas para todo el Golfo de México. Consideramos que este bajo valor es producto directo del escaso muestreo que se ha podido efectuar en el área en comparación con la del Océano Pacífico Mexicano y por lo tanto que representa un valor muy subestimado.

De acuerdo con lo integrado en este estudio, en las zonas profundas del Golfo de México se han registrado 32 géneros y 42 especies (Tabla 1), siendo la familia Cirratulidae con ocho especies (3 géneros) la que presenta mayor riqueza de especies, seguida de las familias Syllidae (5 especies, 2 géneros), Capitellidae (4 especies, 4 géneros), Lumbrineridae (4 especies, 3 géneros), Spionidae (3 especies, 3 géneros), Hesionidae (3 especies, 3 géneros) y Onuphidae (3 especies, 2 géneros). Estas siete familias representan el 69% de la poliquetofauna ahí registrada.

Asimismo, diez familias han sido ocasionalmente recolectadas en las aguas profundas del Golfo de México por lo que se consideran raras, toda vez que están representadas únicamente por una especie. Son las familias: Eunicidae, Flabelligeridae, Opheliidae, Paralacydonidae, Paraonidae, Phyllodocidae, Pilargidae, Polynoidae, Scalibregmatidae y Sigalionidae.

Al igual que en el Océano Pacífico, la fauna de poliquetos que habita en el mar profundo del Golfo de México se distribuye según los ambientes contrastantes que ahí se encuentran; es decir, la mayoría de los que se tienen registrados corresponden a zonas de sustratos blandos del talud continental y de la planicie abisal y son muy diferentes de la fauna que habita en ecosistemas funcionalmente similares a los ambientes hidrotermales del Pacífico, como las infiltraciones frías de hidratos de metano, no incluidas aquí ya que son registros del norte del golfo (zona estadounidense), y en los volcanes de asfalto en el sur del golfo.

Cinco especies de cuatro familias son comunes a ambos océanos: dos de la familia Acoetidae (*Acoetes pacifica* y *Euarche mexicana*), una de la familia Onuphidae (*Hyalinoecia tubicola*), una de la familia Paralacydoniidae (*Paralacydonia paradoxa*) y una de la familia Polynoidae (*Admetella longipe-data*) (Tabla 1).

Todas las familias representadas en el Golfo de México también están presentes en el Pacífico Mexicano, mientras que las familias Acrocirridae, Alvinellidae, Ampharetidae, Amphinomidae, Aphroditidae, Archinomidae, Chaetopteridae, Cossuridae, Dorvilleidae, Euphrosinidae, Fauveliopsidae, Glyceridae, Goniadidae, Longosomatidae, Magelonidae, Maldanidae, Nephtyidae, Nereididae, Oeonidae, Oweniidae, Paralacydonidae, Pholoidae, Poecilochaetidae, Sabellidae, Siboglinidae, Sphaerodoridae, Sternaspidae, Terebellidae y Trichobranchidae no se han encontrado aun en la parte mexicana del Golfo de México profundo.

Aunque se ha observado que casi todas las familias de poliquetos están representadas en aguas profundas (Eliason 1951, Hartman 1965, Hartman y Fauchald 1971, Fauchald 1972, Paterson et al. 1994), algunas familias son más importantes ahí en términos del número de especies. Esto se relaciona con las condiciones ambientales prevalecientes, en especial con el flujo de nutrientes, y con la ubicación geográfica del área de estudio que favorecen su desarrollo (Paterson et al. 1994).

Los estudios realizados no muestran una dominancia de algunas de las familias, pero las familias Spionidae, Cirratulidae y Paraonidae son usualmente

comunes, así como las familias Maldanidae y Syllidae que también han sido regularmente registradas en estos ambientes (Jumars y Gallagher 1982, Paterson *et al.* 1994). No obstante, los poliquetos de las familias Ampharetidae, Polynoidae, Onuphidae y Lumbrineridae son relevantes en el Pacífico Mexicano, no así los de la familia Syllidae de la que únicamente ha sido registrada la especie *Exogone lourei* en el Golfo de California, mientras que en el Golfo de México se han registrado hasta la fecha cinco especies.

La especie *Riftia pachyptila* Jones 1981 merece una mención especial, ya que su muy peculiar anatomía ha provocado su paso por varias categorías taxonómicas, desde el inicio del descubrimiento de las ventilas hidrotermales en que Jones (1981a, b) erigió un nuevo phylum (Vestimentifera) para ella, hasta su reciente inclusión en los Polychaeta primero en la familia Riftidae y ahora en la Siboglinidae (Rouse 2001). Son organismos muy vistosos, tal vez los más espectaculares de las ventilas hidrotermales de Guaymas y del paralelo 21° N en el Pacífico Mexicano y los dominantes junto con los moluscos gigantes *Calyptogena magnifica*.

Las *Riftias* así como las *Escarpias*, obtienen su alimento de la relación simbiótica que presentan con las bacterias quimioautotróficas que por millones se alojan en sus tubos. La primera se considera como la de crecimiento más rápido de todos los invertebrados marinos del mundo, ya que se ha observado que puede colonizar un nuevo sitio de ventilas, crecer hasta alcanzar 1.5 m y llegar a la madurez sexual en menos de dos años. Esto no es una característica propia a los ambientes extremos como los que habita, ya que por ejemplo se ha calculado que *Lamellibrachia luymesii*, otro poliqueto similar de las emanaciones frías de metano, tardaría entre 170 y 250 años para alcanzar una longitud de dos metros (Fischer *et al.* 1997, Bergquist *et al.* 2000).

La fauna poliquetológica de aguas profundas de México es diversa y seguramente abundante en comparación con los demás grupos bentónicos, aunque su biomasa no sea comparativamente significativa, excepto en el ambiente de ventilas hidrotermales. En esto, se refleja la misma tendencia que en aguas someras, y solo la intensificación de los muestreos en esas zonas, de tan difícil acceso que apenas están empezando a ser conocidas, permitirá tener una idea más apropiada de las especies ahí presentes y de los grupos dominantes en esas comunidades.

## CONCLUSIONES

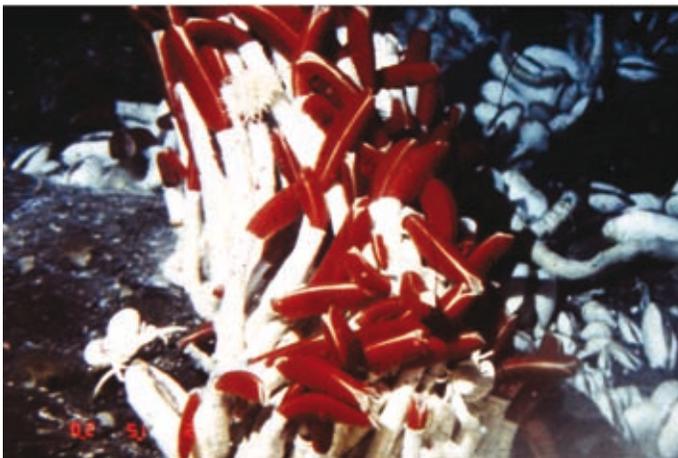
Como se pudo apreciar, los anélidos poliquetos son un grupo abundante y diverso en los fondos del mar profundo de la ZEE mexicana. Sin embargo, a causa de las dificultades inherentes a la exploración de mar profundo, en particular la necesidad de equipo muy sofisticado y oneroso necesario para alcanzar y muestrear tales profundidades, además hostiles a la supervivencia humana, su estudio es incipiente, principalmente en el Golfo de México donde el esfuerzo de muestreo es aún escaso.

En el Pacífico mexicano en solo siete familias se encontró concentrada casi la mitad de toda la fauna de poliquetos registrada en el oeste de México, con diversidades elevadas, sobre todo en la familia Ampharetidae, que con 29 especies y 16 géneros resultó la más diversa.

En cambio en las aguas profundas del Golfo de México, las primeras siete familias representaron casi el 70% de la poliquetofauna, pero el número de especies es mucho más reducido, ya que la familia más diversa, (Cirratulidae) solo presenta 8 especies y 3 géneros.

Únicamente se han registrado cinco especies comunes a ambos océanos en México, y todas las familias representadas en el Golfo de México también

**Figura 2.** *Riftia pachyptila* en ambiente de ventilas hidrotermales, cuenca de Guaymas, Golfo de California. Foto: Vivianne Solis-Weiss.



están presentes en el Pacífico Mexicano, pero 29 de las 49 familias registradas en aguas profundas de México aún no han sido recolectadas en la porción mexicana del Golfo de México.

Consideramos que estos resultados, que representan lo que se sabe hasta la fecha sobre el grupo de los anélidos poliquetos, son el resultado de un esfuerzo notable en el conocimiento de este grupo, pero solo representan la punta del iceberg. Es necesario continuar con la investigación en el mar profundo para poder tener una idea real de la diversidad y distribución de las poblaciones que se presentan en esas zonas, pero los retos que esto representa son enormes, en particular los que están ligados a las demandas tecnológicas y los costos involucrados en la exploración de estos hábitats tan lejanos y difíciles de alcanzar.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Samantha K. Rupit Arteaga y Nadiezhda Mariana Medina Cantú por su colaboración en la recopilación de la información sobre la distribución de la fauna.

## BIBLIOGRAFÍA

- Blake, J.A. 1985. Polychaeta from the vicinity of deep-sea geothermal vents in the eastern Pacific. I. Euprosinidae, Phyllodocidae, Hesionidae, Nereidae, Glyceridae, Dorvilleidae, Orbiniidae and Maldanidae. *Proc. Biol. Soc. Wash.*, 6:67-102.
- Blake, J.A. y Maciolek, N.J. 1992. Polychaeta from deep-sea hydrothermal vents in the eastern Pacific. III. A new genus and two new species of Spionidae from the Guaymas Basin, Sonora and Juan de Fuca Ridge with comments on a related species from the western north Atlantic. *Proc. Biol. Soc. Wash.*, 105(4):723-732.
- Bergquist, D.C., Williams, F.M. y Fisher, C.R. 2000. Longevity record for deep-sea invertebrate. *Nature*, 403:499-500.
- Brüning, M., Sahling, H., MacDonald, I.R., Ding F. y Bohrmann, G.. 2010. Origin, distribution, and alteration of asphaltites at Chapopote Knoll, Southern Gulf of Mexico. *Mar. Petrol. Geol.*, 27:1093-1106.
- Briggs, J.C. 1995. Global biogeography. Elsevier Science, Amsterdam, 452 pp.
- Chamberlin, R. V. 1919. The Annelida Polychaeta. *Mem. Mus. Comp. Zool.*, 48:1-514.
- Corliss J.B., Dymond, J., Gordo, L.I., Edmond, J.M., von Herzen, R.P., Ballard, R.D., Green, K.,

- Williams, D., Bainbridge, A., Crane, K. y van Andel, T.H.. 1979. Submarine thermal hot springs on the Galapagos Rift. *Science*, 203:1073-1083.
- Desbruyères, D. y Laubier, L. 1991. Systematics, phylogeny, ecology and distribution of the Alvinellidae (Polychaeta) from deep-sea hydrothermal vents. *Ophelia Suppl.*, 5:31-45.
- Desbruyères, D., Gaill, F., Laubier, L. y Fouquet, I. 1985. Polychaetous annelids from hydrothermal vent ecosystems: an ecological overview. *Bull. Biol. Soc. Wash.*, (6):103-116.
- Desbruyères, D., Segonzac, M. y Bright, M. (Eds.). 2006. *Handbook of Deep-Sea Hydrothermal Vent Fauna*. Second completely revised edition. Series DENISIA 18 ISSN: 1608-8700; ISBN: 10 3-85474-154-5. 544 pp
- Ding, F., Spiess, V., MacDonald, I.R., Bruning, M., Fekete, N. y Bohrmann, G. 2010. Shallow sediment deformation styles in north-western Campeche Knolls, Gulf of Mexico and their controls on the occurrence of hydrocarbon seepage. *Mar. Petrol. Geol.*, 27:959-972.
- Eleftheriou, A. y McIntyre, A.D. 2005. *Methods for the study of marine benthos*. Blackwell Science Oxford. 418 pp.
- Eliason, A. 1951. Polychaeta. Rep. Swedish deep-sea Exped. *Zoology*, 11:131-148.
- Escobar-Briones, E. 2000. La biodiversidad del mar profundo en México. *Biodiversitas* 29:1-6.
- Escobar-Briones, E. y Soto, L.A. 1993. Bentos del mar profundo en México. En: S.I. Salazar-Vallejo y N.E. González (eds.). *Biodiversidad marina y costera de México*. CIQRO-Conabio, México. 865 pp.
- Fauchald, K. 1968. Onuphidae (Polychaeta) from western Mexico. *Allan Hancock Monogr. Mar. Biol.*, 3:1-82.
- . 1970. Polychaetous annelids of the families Eunicidae, Lumbrineridae, Iphitimidae, Arabellidae, Lysaretidae and Dorvilleidae from western Mexico. *Allan Hancock Monogr. Mar. Biol.*, 5:1-135.
- . 1972. Benthic polychaetous annelids from deep water off western Mexico and adjacent areas in the eastern Pacific Ocean. *Allan Hancock Monogr. Mar. Biol.*, 7:1-575.
- . 1977. The Polychaete Worms, Definitions and Keys to the Orders, Families, and Genera. *Natural History Museum of Los Angeles County Science Series*, 28:1-190.
- Fauchald, K., Granados-Barba, A. y Solis-Weiss, V. 2009. Polychaeta (Annelida) of the Gulf of Mexico. Cap. 37– pp. 751-788, En: D. Felder y D. Camp, Eds. *Gulf of Mexico -Origins, Waters, and Biota*. Volume 1. Biodiversity. Texas A&M University Press, USA. 1393 pp.

- Fisher, C.R., Urcuyo, I.A., Simpkins, M.A. y Nix, E. 1997. Life in the slow lane: Growth and longevity of cold-seep vestimentiferans. *Mar. Ecol.*, 18:83-94.
- Granados-Barba, A., Solís-Weiss, V. y Bernal-Ramírez, R. G. (eds.). 2000. Métodos de muestreo en la investigación oceanográfica. 17 Capítulos. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, México. 448 pp.
- Grassle, J.F. 1986. The ecology of deep-sea hydrothermal vent communities. *Advances in Marine Biology*, 23:301-362.
- Grassle, J.F. y Maciolek, N.J. 1992. Deep-sea species richness: regional and local diversity estimates from quantitative bottom samples. *The American Naturalist*, 139(2):313-341.
- Grassle, J.F., Brown-Leger, S., Morse-Porteus, J., Petrecca, R. y Williams, L. 1985. Deep-sea fauna of sediments in the vicinity of hydrothermal vents. *Biol. Soc. Wash. Bull.*, (6):443-452.
- Hartman, O. 1939. Polychaetous annelids. Part I. Aphroditidae to Pisionidae. *Allan Hancock Pacific Expeditions*, 7(1):1-155.
- . 1940. Polychaetous annelids. Part II. Chrysopetalidae to Goniadidae. *Allan Hancock Pacific Expeditions*, 7(3):1-287.
- . 1944. Polychaetous annelids. Part V. Eunice. *Allan Hancock Pacific Expeditions*, 10(1):1-237.
- . 1965. Deep-water benthic polychaetous annelids off New England to Bermuda and other north Atlantic areas., Allan Hancock Foundation Occasional Papers, 28:1-378.
- Hartman, O. y Fauchald, K.. 1971. Deep-water benthic polychaetous annelids off New England to Bermuda and other north Atlantic areas. Part 2. *Allan Hancock Monographs in Marine Biology*, 6:1-327.
- Hernández-Alcántara, P., Tovar-Hernández, M.A. y Solís-Weiss, V. 2008. Polychaetes (Annelida: Polychaeta) described from the Mexican Pacific: an historical review and an updated checklist. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 36(1):37-61.
- Jones, M.L. 1981a. Riftia pachyptila, new genus, new species, the vestimentiferan worm from the Galápagos Rift geothermal vents (Pogonophora). *Proc. Biol. Soc. Wash.*, 93(4):1295-1313.
- Jones, M.L. 1981b. Riftia pachyptila Jones: Observations on the Vestimentiferan Worm from the Galápagos Rift. *Science*, 213: 333-336.
- Jumars, P.A. y Gallagher, E.D. 1982. Deep-sea community structure: three plays on the benthic proscenium. In: W. G. Ernst and J. G. Morin (eds.). *The environment of the deep-sea*. Prentice Hall, New Jersey. pp. 217-253.

- Levenstein, R.I. 1991. Distributional patterns of polychaeta in deep-sea trenches. *Ophelia Suppl.*, 5:587-592.
- Levin, L.A., McCann, L.D. y Thomas, C.L.. 1991. The ecology of polychaetes on deep-seamounts in the eastern Pacific Ocean. *Ophelia Suppl.*, 5:467-476.
- MacDonald, I.R., Bohrmann, G., Escobar-Briones, E., Abegg, F., Blanchon, P., Blinova, V., Brückmann, W., Drews, M., Eisenhauer, A., Han, X., Heeschen, K., Meier, F., Mortera, C., Naehr, T., Orcutt, B., Bernard, B., Brooks, J. y de Faragó, M. 2004. Asphalt Volcanism and Chemosynthetic Life in the Campeche Knolls, Gulf of Mexico. *Science*, 304:999-1002.
- Méndez, N. 2006. Deep water polychaetes (Annelida) from the southeastern Gulf of California, Mexico. *Rev Biol. Trop (Intl)* 54 (3): 773-785
- Paterson, G.L.J., Gage, J.D., Lamont, P., Bett, B. y Thurston, M.T. 1994. Patterns of abundance and diversity from the abyss-polychaetes from northeastern Atlantic abyssal plains. *Mém. Mus. Natn. Hist. Nat.*, 162:511-520.
- Paull, C.K., Hecker, B., Commeau, R., Freemanlynde, R.P., Neumann, C., Corso, W.P., Golubic, S., Hook, J.E., Sikes, E. y Curray, J. 1984. Biological communities at the Florida Escarpment resemble hydrothermal vent taxa. *Science*, 226:965-967.
- Pérez-Mendoza, A., Hernández-Alcántara, P. y Solís-Weiss, V. 2003. Bathymetric distribution and diversity of deep water polychaetous annelids in the Sigsbee Basin, northwestern Gulf of Mexico. *Hydrobiologia*, 496:361-370.
- Pettibone, M.H. 1983. A new scale worm (Polynoidae) from the hydrothermal rift-area off western Mexico at 21°N. *Proc. Biol. Soc. Wash.*, 96:392-399.
- Pettibone, M.H. 1984. Two new species of Lepidonotopodium (Polynoidae) from hydrothermal vents off Galapagos and East Pacific Rise at 21°N. *Proc. Biol. Soc. Wash.*, 97:849-863.
- Pettibone, M.H. 1985a. An additional new scale worm (Polynoidae) from the hydrothermal rift-area off western Mexico at 21°N. *Proc. Biol. Soc. Wash.*, 98:150-157.
- Pettibone, M.H. 1985c. New genera and species of deep-sea Macellicephalinae and Harmothoinae (Polynoidae) from the hydrothermal rift-areas of the Galapagos and western Mexico at 21°N and from Santa Catalina channel. *Proc. Biol. Soc. Wash.*, 98:740-757.
- Pettibone, M.H. 1989. Polynoidae and Sigalionidae (Polychaeta) from the Guaymas Basin, Sonora, with descriptions of two new species and additional records from hydrothermal vents of the Galapagos Rift, 21° N, and seep-sites in the Gulf of Mexico (Florida and Louisiana). *Proc. Biol. Soc. Wash.*, 102(1):154-168.
- Rouse, G.W. 2001. A cladistic analysis of Siboglinidae Caullery, 1914 (Polychaeta, An-

- nelida): formerly the phyla Pogonophora and Vestimentifera. *Zool. J. of the Linnean Soc.*, 132:55-80.
- Rouse, G.W. y Pleijel, F. (eds). 2001. *Polychaetes*. Oxford, University Press. New York. 354 pp.
- Scheltema, A.H. 1997. Aplacophoran molluscs: deep-sea analogs to polychaetes. *Bull. Mar. Sci.*, 60(2):575-583.
- Solís-Weiss, V. y Hilbig, B. 1992. Redescription of *Ophryotrocha platycephale* Blake (Polychaeta, Dorvilleidae) from the Guaymas Basin hydrothermal vents. *Bull. Southern California Acad. Sci.*, 91(2):92-96.
- Solís-Weiss, V. y Hernández-Alcántara, P. 1994. *Amphysamytha fauchaldi*: a new species of Ampharetid (Annelida: Polychaeta) from the hydrothermal vents at Guaymas Basin, Mexico. *Bull. Southern California Acad. Sci.*, 93(3):127-134.
- Solis-Weiss, V. 2004. Il Batiscafo Trieste. *Fantascienza e realtà del mondo sottomarino: dal Batiscafo "Trieste" alle sorgenti idrotermali*. Edizioni Comune di Trieste, Graphic Linea Print Factory UD, Italia. 47 pp.
- Southwood, T.R.E. y Henderson, P.A. 2000. *Ecological methods*. Oxford, Blackwell Science Publishing, 575 pp.
- Treadwell, A.L. 1923. Polychaetous annelids from lower California with descriptions of new species. *American Museum Novitates*, (74):1-11.

# BIODIVERSIDAD DE LOS EQUINODERMOS (ECHINODERMATA) DEL MAR PROFUNDO MEXICANO

Francisco A. Solís-Marín,<sup>1</sup> A. Laguarda-Figueras,<sup>1</sup>  
A. Durán González,<sup>1</sup> A.R. Vázquez-Bader,<sup>2</sup> Adolfo Gracia<sup>2</sup>

## RESUMEN

Nuestro conocimiento de la diversidad del mar profundo en aguas mexicanas se limita a los escasos estudios existentes. El número de especies descritas es incipiente y los registros taxonómicos que existen provienen sobre todo de estudios realizados por extranjeros y muy pocos por investigadores mexicanos, con los cuales es posible conjuntar algunas listas faunísticas. Es importante dar a conocer lo que se sabe hasta el momento sobre los equinodermos de las zonas profundas de México, información básica para diversos sectores en nuestro país, tales como los tomadores de decisiones y científicos interesados en el tema. México posee hasta el momento 643 especies de equinodermos reportadas en sus aguas territoriales, aproximadamente el 10% del total de las especies reportadas en todo el planeta (~7,000). Según los registros de la Colección Nacional de Equinodermos (ICML, UNAM), la Colección de Equinodermos del "Natural History Museum, Smithsonian Institution", Washington, DC., EUA y la bibliografía revisa-

<sup>1</sup> Colección Nacional de Equinodermos "Ma. E. Caso Muñoz", Laboratorio de Sistemática y Ecología de Equinodermos, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICML), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Apdo. Post. 70-305, México, D. F. 04510, México.

<sup>2</sup> Laboratorio de Ecología Pesquera de Crustáceos, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICML), (UNAM), Apdo. Postal 70-305, México D. F., 04510, México.

da, existen 348 especies de equinodermos que habitan las aguas profundas mexicanas ( $\geq 200$  m) lo que corresponde al 54.4% del total de las especies reportadas para el país. Los registros en orden de abundancia provienen del Océano Pacífico Mexicano (188 especies), Caribe Mexicano (111 especies), Golfo de México (103 especies) y en último lugar el Golfo de California (59 especies). Por su propia naturaleza el mar profundo es poco accesible, para conocer la fauna de equinodermos que ahí habita, se requiere de embarcaciones que funcionen como plataformas para apoyar desde ellas la utilización de modernos instrumentos de muestreo. La diversidad de los equinodermos de las aguas profundas del territorio nacional se encuentra sujeta a amenazas por la actividad antropogénica, dada la reducción de las pesquerías de aguas de la plataforma continental, se ha recurrido a la pesca de aguas profundas lo cual pone en peligro los ambientes. La explotación de recursos no renovables como el petróleo y gas, así como de minerales (nódulos de manganeso) conllevará a la perturbación del ambiente natural de los fondos marinos profundos. El catálogo de los equinodermos del mar profundo en México aún no está completo, muy probablemente existan nuevos registros y nuevas especies en este ambiente poco estudiado. A pesar de que los estudios taxonómicos en México son extensos, los estudios sobre la ecología, historia de vida, etc., de los equinodermos del mar profundo en México, son escasos.

Palabras clave: Echinodermata, Mar profundo, Biodiversidad, México.

## ABSTRACT

Our knowledge on the biodiversity of the Mexican marine deep-sea regions is limited to a very few studies. The number of described species is incipient and the taxonomic records came principally from foreign researchers and very few from Mexican scientists. It is imperative to show here, the updated information about the echinoderms inhabiting the Mexican deep-sea regions, this basic information is highly important to decision-makers and scientists interested in this matter. Mexico possesses, until now, 643 reported species of echinoderms inhabiting its marine waters, approximately the 10% of the total species number reported in the whole planet (~7,000). According to the "Colección Nacional de Equinodermos" (ICML, UNAM), the Echinoderm Collection from the Natural History Museum, Smithsonian Institution, Washington, DC., USA, and the literature, there are 348 echinoderm species inhabiting deep-sea Mexican marine zones ( $\geq 200$  m), which corresponds to a 54.4% of the total number of species reported for Mexico. The records (in abundance appearance order) came from the Mexican Pacific Ocean (188 species), Mexican Caribbean (111 species), Gulf of México (103 species) and, the Gulf of California (59 species). For its own nature, the deep-sea is almost inaccessible, and

to study the echinoderm fauna of such environment we require special sampling equipment. The deep-sea echinoderm fauna in the national territory is threatened because the anthropogenic activities. The low fisheries catches in the continental shelf has led to the exploitation of always deeper areas in our marine territory, such events endanger the very fragile deep-sea environment. The exploitation of non-renewable resources, such as gas, petroleum, and polymetallic nodules (manganese nodules) unequivocally will lead us to marine habitat alteration. Mexico's deep-sea echinoderm taxonomic catalogue is not completed yet, there are probably new records or new species in this poorly known environment. Despite the numerous taxonomic records for the whole echinoderm fauna in Mexico, it is important to promote studies on the ecology, life history, etc., of the deep-sea echinoderms.

Keywords: Echinodermata, Deep Sea, Biodiversity, Mexico.

## INTRODUCCIÓN

Los equinodermos (Echinodermata del griego *echinos*, “espinoso” y *dermatos*, “piel”) constituyen un grupo altamente diversificado y bien caracterizado entre los macroinvertebrados marinos bentónicos más importantes de las costas de México. Son organismos deuterostomados con representantes fósiles y actuales, que presentan una amplia variedad de formas corporales: pentacrinal en los crinoideos (lirios de mar), estelar en los asteroideos (estrellas de mar) y en los ofiuroideos (estrellas serpientes o estrellas quebradizas), esferoidal, discoidal y cordiforme en los equinoideos (erizos de mar) y cilíndrica en los holoturoideos (pepinos de mar).

Estos organismos son muy diversos en las aguas someras de las regiones tropical y subtropical del planeta: en general, decrecen en su diversidad y abundancia en las latitudes altas (Pawson 2007). Su presencia es conspicua en todos los ambientes marinos, desde la zona intermareal hasta los abismos oceánicos (6,000 m de profundidad) y desde las fuentes hidrotermales submarinas hasta las aguas polares (Hooker *et al.* 2005). Con excepción de algunos pepinos de mar pelágicos y un género comensal de un pez óseo (*Rynkatorpa pawsoni* Martin 1969), todos los equinodermos son bentónicos. En los mares profundos, pueden constituir hasta más del 90% de la biomasa bentónica (Brusca y Brusca 1990). Su éxito

en la colonización del mar se debe a las adaptaciones que han desarrollado desde su aparición antes del Cámbrico inferior (hace 600 millones de años) (Hooker *et al.* 2005). El Phylum posee un linaje antiguo y existen aproximadamente 16 clases extintas, con más de 13,000 especies fósiles descritas.

Actualmente, a escala mundial, existen aproximadamente 7,000 especies de equinodermos vivientes agrupadas en cinco clases: Crinoidea (700 especies), Ophiuroidea (2,000), Asteroidea (1,800), Echinoidea (900) y Holothuroidea (1,200) (Hendler *et al.* 1995; Pawson 2007).

Es bien sabido que los océanos cubren casi 71% de la superficie de nuestro planeta, y sin embargo es un hecho poco conocido que estas aguas tienen en promedio casi 3,000 m de profundidad y que el 85% de los fondos marinos se encuentran por debajo de los 2,000 m. La superficie de estos abismos es dos veces mayor que la de las partes expuestas en la Tierra.

Se conoce como “mar profundo” a la región marina ubicada a más de 200 m de profundidad; la ausencia de luz es el factor ambiental que determina el límite de esta región al comienzo del talud continental (Escobar-Briones 2000).

Nuestro conocimiento de la diversidad del mar profundo en aguas mexicanas se limita a los escasos estudios existentes. El número de especies descritas es incipiente y los registros taxonómicos que existen provienen sobre todo de estudios realizados por extranjeros y muy pocos por investigadores mexicanos, con los cuales es posible conjuntar algunas listas faunísticas (Escobar-Briones 2000). Por lo anterior, es importante dar a conocer lo que se sabe hasta el momento sobre los equinodermos de las zonas profundas de México, información básica para diversos sectores en nuestro país, tales como los tomadores de decisiones y científicos interesados en el tema.

La fauna de equinodermos de mar profundo muestra, adaptaciones en respuesta a las condiciones ambientales de esa zona: modificaciones morfológicas, en tamaño, coloración, densidad de elementos esqueléticos, bioluminiscencia, entre otras. Algunas partes del cuerpo como las espinas de los erizos diademátidos y los largos apéndices dorsales (papilas) de algunos pepinos de mar de las familias Synallactidae y Deimatidae, han sido modificadas para la locomoción sobre sedimentos blandos como arenas finas y lodos. Muchos equinodermos de profundidad son de color rojo o violeta lo que puede atribuirse a mecanismos crípticos en este ambiente ausente de luz. Las especies bioluminiscentes de equinodermos de profundidad no son raras, esta adaptación capacita a sus poseedores a emitir luz de ciertas longitudes

de onda que les sirve quizá para la comunicación intraespecífica o como defensa ante posibles depredadores. El polimorfismo genético de muchas especies de equinodermos se encuentra asociado al mar profundo, tal es el caso de los pepinos de mar del orden Elasipoda (Hansen 1975). La calcificación a grandes profundidades es limitada dada la elevada tasa de disolución del carbonato de calcio a temperaturas bajas y a presión elevadas. Por consiguiente el endoesqueleto de los equinodermos se ha adaptado a dichas condiciones: los erizos de mar han ablandado su testa (género *Phormosoma*) y en algunos casos los elementos esqueléticos han disminuido o desaparecido por completo, como sucede en el caso de algunas especies de pepinos de mar de la familia Synallactidae.

## ANTECEDENTES

Los primeros registros de equinodermos de aguas profundas recolectados en los mares territoriales mexicanas fueron obtenidos por los buques de investigación “Challenger” y “Albatross” en el siglo XIX. Hasta la primera mitad del siglo XX surgió interés específico sobre este grupo de organismos en México. La Dra. Ma. Elena Caso Muñoz (UNAM) fue la precursora del estudio de los equinodermos de México. Su obra comprende más de 60 publicaciones y monografías (e.g., Caso 1943, 1961, 1976, 1978, 1980, 1983, 1986a y b, 1994, 1996a, b, c, y d), sentó las bases del conocimiento de organismos de este grupo en México y creó la Colección de Equinodermos más importante del País, ahora depositada en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM.

## Pacífico tropical oriental

Una revisión exhaustiva de la fauna de equinodermos del Pacífico tropical oriental (desde el sur de California, EUA, y el Golfo de California hasta Perú) fue presentada por Maluf en 1988. En esta compilación, Maluf incluye una lista completa de las especies conocidas para esta subregión. En México, entre las contribuciones recientes, tanto para la fauna de aguas someras como de aguas profundas, podemos citar los trabajos de Maluf (1991), Solís-Marín *et al.* (1997), Nybakken *et al.* (1998), Cintra-Buenrostro *et al.* (1998), Lambert (2000), Solís-Marín (2003a), Maluf y Brusca (2005), Solís-Marín *et al.* (2005),

Tilot (2006), Mah (2007), Honey-Escandón *et al.* (2008), Solís-Marín *et al.* (2009), Massin y Hendrickx (2010) y Pineda Enríquez (2011). Otros trabajos de importancia para el Pacífico americano tropical fueron publicados en los dos volúmenes dedicados a los estudios de los equinodermos de América Latina (Alvarado y Cortés 2005, 2008).

## Golfo de California

El estudio de los equinodermos del Golfo de California empezó en el siglo antepasado y ha durado más de un siglo. Verrill (1870a, b, y c, 1871a, b y c) trabajó con equinodermos recolectados tanto en aguas someras, como en aguas profundas del Golfo de California, tal material dio como resultado el primer trabajo de investigación sobre los equinodermos del área de estudio. Más adelante, Ludwig (1894, 1905) y Hartlaub (1895) trabajaron con material recolectado por el “Albatross” en 1891 en aguas del Golfo de California. Durante el siglo pasado destacan las investigaciones de H. L. Clark (1913, 1920, 1923), A. H. Clark (1916), Boone (1928), Ziesenhenné (1937, 1940, 1942), Deichmann (1937, 1938, 1941, 1958), Caso (1944, 1947, 1948, 1949, 1951, 1953, 1961, 1967, 1975, 1976, 1979a y b, 1980a,b, 1983a,b, 1984, 1986a,b, 1992, 1994, 1996a, b, c y d), Brusca (1973, 1980), Maluf (1988), Kerstitch (1989), Caso *et al.* (1996), Solís-Marín *et al.* (1997), Holguín-Quiñones *et al.* (2008) y Cintra-Buenrostro (2001).

La mayor parte de los trabajos corresponden a recolectas en aguas someras litorales y los menos se refieren a organismos obtenidos en expediciones oceanográficas, siendo las primeras las del “Albatross” (1904-1905, 1911) y las más frecuentes de 1984 a la fecha, las del B/O “El Puma”.

Los trabajos publicados son principalmente de carácter sistemático aunque otros se refieren a temas biogeográficos (Parker 1964) o ecológicos (Barham *et al.* 1973, Caso *et al.* 1996, Morgan y Cowles, 1996; Herrero-Pérezrul *et al.* 1998, 1999 y Solís-Marín *et al.* 2005, 2009).

## Golfo de México

El inicio de los estudios sobre los equinodermos del Golfo de México, datan del siglo antepasado (1841), cuando Gabriel Valentin citó la especie *Mellita hexapora* (= *M. quinquesperforata*) de Veracruz. Posteriormente, Rathbun (1885)

estudió los equinodermos recolectados por el “Albatross” en 1884 en el Golfo de México y gran Caribe. De 1877 a 1880, en el “Blake” se realizaron importantísimas recolectas en el Golfo de México y gran Caribe, las cuales fueron estudiadas y dadas a conocer por Agassiz (1878-1879, 1888), Perrier (1881) y Théel (1886). Durante el siglo pasado, destacan los trabajos producto de las recolectas efectuadas en expediciones extranjeras y los trabajos realizados por Deichmann (1930, 1954), Clark, A. H. (1954), Caso (1943, 1946, 1948, 1951, 1953, 1955, 1961, 1968a,b, 1971a,b, 1974, 1979 b y c), Phelan (1970), Downey (1972, 1973), Litvinova, N. M. (1975), Hendler y Turner (1987), Caso *et al.* (1994). Recientemente, destacan los trabajos de Barbosa-Ledesma *et al.* (2000), Turner y Graham (2003) y Laguarda-Figueras *et al.* (2005, 2009).

Casi o todos los trabajos realizados se refieren a recolectas en aguas litorales y los menos se refieren a equinodermos recolectados en Buques Oceanográficos, particularmente de las campañas realizadas por el B/O “Justo Sierra” PROGMEX (I-1983, II y III en 1984); OGMEX (I y II en 1987, V-1988, VIII-1989, IX y X en 1990, XI-1993, XII-1994, XIII-1995, XIV-1996, y XV y XVI en 1997), y SIGBEE (I-1997).

## Caribe Mexicano

Los primeros trabajos sobre los equinodermos del Caribe Mexicano datan de hace más de un siglo. Entre ellos se encuentran los efectuados a partir de las recolectas del “Blake” realizadas durante el periodo comprendido entre 1878 y 1884; entre estas publicaciones se encuentran las de Perrier (1881) sobre asteroideos, Lyman (1883) sobre ofiuroideos, Théel (1886) sobre holoturoideos y Agassiz (1888) sobre equinoideos. Así mismo, la recolectas de equinodermos efectuadas por el “Albatross” durante 1884, dieron lugar a los informes de Rathbun (1885) sobre los erizos de la zona.

En el siglo pasado, destacan los trabajos de Clark, A. H. (1918), Clark, H. L. (1933), Thomas (1962), Deichmann (1963), Schroeder (1964), Kier y Grant (1965), Phelan (1970), Downey (1973), Kier (1975), Litvinova (1975), Pawson (1976), Pawson y Caycedo (1980), Carpenter (1981), Pawson y Gust (1981), Lessios *et al.* (1984a, b), Hunte *et al.* (1986), Hendler y Turner (1987), Hendler y Peck (1988), Sambrano *et al.* (1990), Hendler *et al.* (1995), Cutress (1996) y recientemente Zetina-Moguel *et al.* (2003).

En lo que se refiere a los equinodermos del Caribe mexicano, destaca el

trabajo de Deichmann (1930) sobre holoturias de algunas localidades. Los de Caso sobre especies recolectadas aguas profundas (1996a, b, c), los trabajos de Solís-Marín *et al.* (1997), Bravo-Tzompantzi *et al.* (1999) y Laguarda-Figueras *et al.* (2001, 2002, 2004, 2009).

En este trabajo se presenta una extensa lista de las especies de equinodermos de aguas profundas de México, basada esencialmente en los ejemplares depositados en la Colección Nacional de Equinodermos del ICML, UNAM y en los trabajos citados en los párrafos anteriores.

## RESULTADOS

México posee hasta el momento 643 especies de equinodermos reportadas en sus aguas territoriales, aproximadamente el 10% del total de las especies reportadas en todo el planeta (~7,000) (Solís-Marín *et al.*, en prensa). Según los registros de la Colección Nacional de Equinodermos (ICML, UNAM), la Colección de Equinodermos del "Natural History Museum, Smithsonian Institution", Washington, DC., EUA y la bibliografía revisada, existen 348 especies de equinodermos que habitan las aguas profundas mexicanas ( $\geq 200$  m) lo que corresponde al 54.4% del total de las especies reportadas para el país.

Los registros en orden de abundancia provienen del Océano Pacífico Mexicano (188 especies), Caribe Mexicano (111 especies), Golfo de México (103 especies) y en último lugar el Golfo de California (59 especies).

En el Anexo 1 se presenta la lista de especies de equinodermos de aguas profundas ( $>200$  m) registradas en los mares mexicanos. Las fuentes principales de donde se extrajo la información fueron: la Colección Nacional de Equinodermos (CNE), ICML, UNAM, la Colección de Equinodermos del "Natural History Museum, Smithsonian Institution", Washington, DC., EUA; la publicación de Maluf (1988); Solís-Marín (2003a y b); Solís-Marín *et al.* (2005, 2009); Solís-Marín y Laguarda-Figueras (2008), Honey-Escandón *et al.* (2008); Laguarda-Figueras *et al.* (2005, 2009), Vázquez-Bader *et al.* (2008), Pineda-Enríquez (2011) y Zárate-Montes (2011). Seguido del nombre de la especie, su autor y año, en su caso, se da información de la presencia de ejemplares depositados en la CNE, además del rango de distribución batimétrica conocida para la especie a nivel mundial (en metros y entre paréntesis) y por último, las áreas oceánicas donde se ha reportado para México (P= Océano Pacífico Mexicano, GC= Golfo de California, GM= Golfo de México y C= Caribe Mexicano).

*Crinoidea*. En la actualidad se conocen 650 especies vivientes de lirios de mar (Pawson 2007). En las aguas territoriales mexicanas se han reportado 28 especies de crinoideos: de éstas 23 (mas del 80%) han sido registradas para las aguas profundas. Solamente existen tres registros de Crinoidea en el Pacífico mexicano, dos comatúlidos y una especie de crinoide pedunculado (Roux 2004) (Anexo 1). Los registros son más abundantes en el Caribe Mexicano (22 especies), seguido por Golfo de México (3 especies) y el Océano Pacífico Mexicano (3 especies). Hasta el momento, no existen reportes de crinoideos para el Golfo de California.

*Asteroidea*. Las estrellas de mar cuentan con aproximadamente 2,100 especies descritas (Pawson 2007). De las aguas territoriales de México han sido reportadas 181 especies de asteroideos, de éstas 90 (mas del 50%) han sido registradas en aguas profundas. El Océano Pacífico Mexicano presenta la mayor cantidad de registros (63 especies), seguido por el Golfo de México (30 especies), el Golfo de California (22 especies) y por último el Caribe Mexicano (9 especies).

*Ophiuroidea*. La Clase Ophiuroidea está representada por aproximadamente 2,000 especies vivientes (Pawson 2007), de éstas, 197 han sido reportadas para las aguas someras y profundas de los mares territoriales. México cuenta con 134 especies de ofiuroides de aguas profundas, es decir, más del 60% del total reportado. Los registros son más abundantes para el Pacífico mexicano (61 especies), seguido por el Caribe Mexicano (59 especies), el Golfo de México (41 especies) y por último Golfo de California (8 especies).

*Echinoidea*. Los erizos de mar, con un total aproximado de 650 especies vivientes (Pawson 2007), cuentan con 119 especies registradas en la totalidad

**Tabla 1. Número de especies de equinodermos por zona del Mar Territorial Mexicano.**

Zona del mar territorial	Clase Crinoidea	Clase Asteroidea	Clase Ophiuroidea	Clase Echinoidea	Clase Holothuroidea
Golfo de California	0	58	71	39	64
Pacífico	4	58	63	37	53
Golfo de México	25	96	79	59	33
Caribe	13	51	78	50	33

del territorio mexicano, de éstas, 58 se encuentran representadas en aguas que van más allá de los 200 m. Los registros son más abundantes para el Pacífico mexicano (27 especies), seguido por el Golfo de México (22 especies), el Caribe Mexicano (19 especies) y por último Golfo de California (18 especies).

*Holothuroidea*. De esta clase han sido reportadas aproximadamente 800 especies vivientes (Pawson 2007); 107 de éstas se encuentran reportadas para los mares mexicanos. El 41% (44 especies) son especies con rangos de distribución batimétrica que sobrepasa los 200 m. Los registros más abundantes corresponden al Pacífico mexicano (34 especies), seguido por el Golfo de California (11 especies), el Golfo de México (7 especies) y por último el Caribe Mexicano (2 especies).

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El mar profundo del territorio nacional no excede los 4,000 m de profundidad. La profundidad máxima del Golfo de México son los 3,900 m (Planice Sigsbee) y la profundidad máxima del Pacífico Mexicano y Golfo de California no excede los 3,000 m de profundidad.

**Figura 1.** *Tethyaster canaliculatus*, estrella de mar habitante del mar profundo del Océano Pacífico Mexicano. Foto: Lorenzo Rosenzweig.



La región en la que ha sido mayor el esfuerzo de recolecta, es el Pacífico Mexicano, del cual conocemos 188 especies descritas para esa zona. Sorpresivamente (aún con todo el esfuerzo de recolecta que se ha hecho en el área) el último lugar en registros lo tiene el Golfo de California, de donde solo se han reportado hasta la fecha 59 especies de equinodermos de aguas profundas, mostrando que aún hay mucho que hacer por el conocimiento de esta fauna en esa zona.

Por su propia naturaleza el mar profundo es poco accesible, para conocer la fauna de equinodermos que ahí habita se requiere de embarcaciones que fun-

**Figura 2.** *Ophiothrix galapagensis*, ofiuroides habitante del mar profundo del Océano Pacífico Mexicano. Foto: Carlos Sánchez-Ortíz.



Figura 3. Pepino de mar, de la familia Stichopodidae, habitante del mar profundo del Océano Pacífico Mexicano. Foto: Octavio Aburto-Oropeza.



cionen como plataformas para apoyar desde ellas la utilización de modernos instrumentos de muestreo tales como redes, sumergibles, dragas, nucleadores, sondas, cámaras, autómatas, etc., para obtener, tanto especímenes como datos físicoquímicos,

El conocimiento de la diversidad de invertebrados en el mar profundo de aguas mexicanas se limita a escasos estudios y publicaciones. El número de especies descritas es incipiente (Escobar-Briones 2000). Hasta hace muy poco tiempo, los escasos registros taxonómicos provenían, sobre todo, de expediciones extranjeras y no es que hasta años recientes tal información se ha incrementado mediante el esfuerzo de estudiosos de nuestro país.

Los registros de algunas especies de equinodermos provienen solamente de fotografías obtenidas con cámaras remotas o sumergibles, dada su fragilidad y dificultad para recolectarlos con los medios convencionales (redes, dragas, etc.).

Otro reto es el describir la fauna de equinodermos asociada a ventilas hidrotermales en México como las del Golfo de California en Guaymas, Sonora, localizadas a 2,200 m de profundidad, la fauna de equinodermos asociada a las infiltraciones de metano y la de los volcanes sumergidos (>500 m).

La diversidad de los equinodermos de las aguas profundas del territorio nacional se encuentra sujeta a amenazas por la actividad antropogénica, ya que dada la reducción de las pesquerías de aguas de la plataforma continental, se ha recurrido a la pesca de aguas profundas lo cual pone en peligro los ambientes. La explotación de recursos no renovables como el petróleo y gas, así como de minerales (nódulos de manganeso) conllevará a la perturbación del ambiente natural de los fondos marinos profundos.

El catálogo de los equinodermos del mar profundo en México aún no está completo, muy probablemente existan nuevos registros y nuevas especies en este ambiente poco estudiado. A pesar de que los estudios taxonómicos en México son extensos, los estudios sobre la ecología, historia de vida, etc., de los equinodermos del mar profundo en México, son escasos.

A medida que la infraestructura científica y tecnológica mundial avanza, nuestro país requiere la participación de varias fuentes de apoyo, tanto gubernamental como privado para la investigación del mar profundo.

## AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Elva Escobar Briones, a la Dra. Vivianne Solís W., al Dr. Arturo Soto, y al Biól. Carlos Illescas Monterroso, por la donación de material de distintos cruceros realizados bajo su dirección (ICML, UNAM). A la Dirección General de Apoyo al Personal Académico (DGAPA, proyecto PAPIIT IN 207011-3) por el financiamiento para la realización de algunas recolectas científicas. A Carlos Sánchez-Ortíz, Octavio Aburto-Oropeza y Lorenzo Rosenzweig por las fotos utilizadas para ilustrar el presente trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Agassiz, A. 1878-1879. Reports of the results of dredging, under the supervision of Alexander Agassiz, in the Gulf of Mexico, by the United States Coast Survey Steamer "Blake". II. Report on the Echini. *Bull. Mus. of Comp. Zool.* 5(9): 181-195.
- Agassiz, A. 1888. *Characteristic deep-sea types. Echinoderms. Three cruises of the United States Coast and Geodetic Survey Steamer "Blake" in the Gulf of Mexico in the Caribbean Sea, and along the Atlantic Coast of the United States, from 1877 to 1880.* The Riverside Press. Cambridge. 2: 84-127.

- Alvarado, J. J., y J. Cortés 2005 (eds.). Estudios Latinoamericanos en Equinodermos. *Revista de Biología Tropical*, 53 (Supl. 3): 1-382.
- Alvarado, J.J., y J. Cortés 2008 (eds.). Estudios Latinoamericanos en Equinodermos II. *Revista de Biología Tropical*, 56 (Supl. 3): 1-360.
- Barham, E. G., R. W. Gowdy and F. H. Wolfson 1973. *Acanthaster* (Echinodermata, Asteroidea) in the Gulf of California. *Fishery Bulletin* 71(4): 927-942.
- Barbosa-Ledesma, I. F., Solís-Marín, F. A. y A. Laguarda-Figueras. 2000. New records for cidaroid echinoids (Echinodermata: Echinoidea) of the Gulf of Mexico, Mexico. *Revista de Biología Tropical*, 48(2/3): 721.
- Boone, L. 1928. Echinoderms from the Gulf of California and the Perlas Islands. *Bulletin of the Bingham Oceanographic Collection* 2(Art. 6): 1-14.
- Bravo-Tzompantzi, D., F.A. Solís-Marín, A. Laguarda-Figueras, M. Abreu-Pérez y A. Durán-González. 1999. Equinoideos (Echinodermata: Echinoidea) del Caribe Mexicano: Puerto Morelos, Quintana Roo, México. *Avicennia*. 10/11: 43-72.
- Brusca, R. C. 1973. *A Handbook to the Common Intertidal Invertebrates of the Gulf of California*. Univ. Arizona Press, Tucson. p. 304-343.
- Brusca, R. C. (Ed.) 1980. *Common Intertidal Invertebrates of the Gulf of California*. Chapter 26. Echinodermata.: 398-422. 2nd. Ed. Univ. Arizona Press, Tucson. 513 pp.
- Brusca, R. C. y G. J. Brusca, 1990. *Invertebrates*. Sinaver Associates, Inc. Publishers. Editorial Sunderlands, Massachussets. 922 pp.
- Carpenter, R.C. 1981. Grazing by *Diadema antillarum* (Philippi) and its effects on the benthic algal communitie. *J. Mar. Res.* 39:749-765.
- Caso, M. E. 1943. Contribución al conocimiento de los astéridos de México. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México: 1-136.
- . 1944. Estudio sobre astéridos de México. Algunas especies interesantes de astéridos litorales. *Anales del Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México*, 15(1): 237-257.
- . 1946. Contribución al conocimiento de los Equinodermos de México. I. Distribución y morfología de *Mellita quinquesperforata* (Leske), *M. lata* Clark y *M. longifissa* Michelin. *Anales del Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México* 17(1-2): 247-259.
- . 1947. Estudios sobre Astéridos de México. Descripción de una nueva especie del género *Moiraster* de Santa Rosalía, Golfo de California. *Anales del Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México*, 18(1): 225-231.

- . 1948. Contribución al conocimiento de los equinodermos de México. II. Algunas especies de equinoideos litorales. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 19(1): 183-231.
- . 1949. Contribución al conocimiento de los Equinodermos litorales de México. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México* 20 (1-2): 341-355.
- . 1951. Contribución al conocimiento de los ofiuroideos de México. 1. Algunas especies de ofiuroideos litorales. *Anales Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México* 22(1): 219-312.
- . 1953. Estado actual de los conocimientos acerca de la fauna de los equinodermos de México. *Memoria del Congreso Científico Mexicano, Universidad Nacional Autónoma de México* 7: 209-222.
- . 1955. Contribución al conocimiento de los holoturoideos de México. II. Algunas especies de los holoturoideos litorales de la costa Atlántica Mexicana. *Anales Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 26(2): 501-525.
- . 1961. Los Equinodermos de México. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México: 1-338.
- . 1967. Contribución al estudio de los Holoturoideos de México. Morfología y sistemática de *Euthyonidium ovulum* (Selenka). *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Ciencias del Mar y Limnología* 38(1): 1-10.
- . 1968. Contribución al conocimiento de los holoturoideos de México. Ecología y morfología de *Holothuria glaberrima* Selenka. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Ciencias del Mar y Limnología* 39(1): 21-30.
- . 1968. Contribución al estudio de los Holoturoideos de México. Un caso de parasitismo de *Balcis intermedia* (Cantraine) sobre *Holothuria glaberrima* Selenka. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Ciencias del Mar y Limnología* 39(1): 31-40.
- . 1971. Contribución al estudio de los Holoturoideos de México. Morfología externa e interna y ecología de *Holothuria grisea* Selenka. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Ciencias del Mar y Limnología* 42(1): 31-40.
- . 1971. Contribución al conocimiento de los Equinoideos de México. Estudio morfológico de *Brissopsis alta* Mortensen, erizo de profundidad. *Anales Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie. Ciencias del Mar y Limnología* 42(1): 41-56.

- . 1974. Contribución al estudio de los Equinoideos de México. El género *Tripneustes* Agassiz. Morfología y ecología de *Tripneustes ventricosus* (Lamarck). *Anales del Centro de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México* 1(1): 1-24.
- . 1975. Contribución al conocimiento de los Asterozoa de México. La Familia Mithrodiidae. Descripción de una nueva especie del género *Mithrodia*. *Mithrodia enriquecasoi* sp. nov.. *Anales del Centro de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México* 2 (1): 1-28.
- . 1976. El estado actual del estudio de los equinodermos de México. *Anales del Centro de Ciencias del Mar y Limnología Universidad Nacional Autónoma de México, México* 3(1): 1-56.
- . 1978. Los equinoideos del Pacífico de México. Parte 1. Ordenes Cidaroida y Aulodonta; Parte 2. Ordenes Stiridonta y Camarodonta. *An. Centro Cienc. del Mar y Limnol. Univ. Nal. Autón. México. Publ. esp.* (1): 244 pp.
- . 1979a. Los Equinodermos de la Bahía de Mazatlán, Sinaloa. *Anales del Centro de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México* 6(1): 197-368.
- . 1979b. Los equinodermos (Asteroidea, Ophiuroidea y Echinoidea) de la Laguna de Términos, Campeche. Centro de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Publicación Especial (3): 1-186.
- . 1979c. Descripción de una nueva especie de ofiuroideo de la laguna de Términos, *Amphiodia guillermosoberoni* sp. nov.. *Anales del Centro de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México* 6(2): 161-184.
- . 1980a. Los equinoideos del Pacífico de México. Parte Tercera. Orden *Clypeasteroidea*. Centro de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Publicación Especial (4): 1-252.
- . 1980b. Contribución al estudio de los Echinozoa de México. La Familia Mellitidae Stefanini. Descripción de una nueva especie del género *Mellita*, *Mellita eduardobarreroi* sp. nov. *Anales del Centro de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México* 7(2): 141-180.
- . 1983a. Los equinoideos del Pacífico de México. Parte Cuarta. Ordenes *Cassiduloidea* y *Spatangoida*. Instituto Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Publicación Especial (6): 1-200.
- . 1983b. Especies del género *Amphiochondrius* de la costa del Pacífico Americano. Descripción de una nueva especie del género *Amphiochondrius*. *Amphiochondrius unamexici* sp. nov. (Ophiuroidea). *Anales del Centro de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México* 10 (1): 209-230.

- . 1984. Descripción de un género nuevo y una especie nueva de Holoturoideo. *Parathyonaca* gen. nov. y *Parathyonacta bonifaznuñoi* sp. nov. colectada en la campaña oceanográfica SIPCO III a bordo del Buque Oceanográfico "El Puma". *Anales del Centro de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 11(1): 181-210.
- . 1986a. Los Equinodermos del Golfo de California colectados en las campañas SIPCO I-II-III a bordo del B/O "El Puma". *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, México* 13: 91-184.
- . 1986b. Descripción de una nueva especie de ofiuroideo de la Bahía de Mazatlán, Sin. *Ophioderma sodipallaresi* sp. nov. y comparación con *Ophioderma variegatum* Lütken. *Anales del Centro de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 13 (2): 223-248.
- . 1992. *Los Equinodermos (Asteroideos, Ofiuroideos y Equinoideos de la Bahía de Mazatlán, Sinaloa*. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Publicaciones Especiales (11): 1-214.
- . 1994. Estudio morfológico, taxonómico, ecológico y distribución geográfica de los asteroideos colectados durante las campañas oceanográficas Cortés 1, 2, 3. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, Pub. Esp.* 12: 1-111.
- . 1996a. Las especies del género *Luidia* Forbes y *Astropecten* Gray del Caribe Mexicano, colectadas en las campañas oceanográficas PROIBE II-III-IV-V a bordo del B/O "Justo Sierra". *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México* 22(1): 1-25.
- . 1996b. III Asteroideos del Caribe mexicano colectados en las campañas oceanográficas PROIBE II-III-IV-V a bordo del B/O "Justo Sierra". *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 22(1): 27-57.
- . 1996c. IV Asteroideos del Caribe mexicano colectados en las campañas oceanográficas PROIBE I-II-III-IV-V a bordo del B/O "Justo Sierra". *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 22(1): 59-82.
- . 1996d. I. Las especies del género *Hesperocidaris* Mortensen, *Astropyga* Gray, *Arbacia* Gray y *Lytechinus* Agassiz, colectadas en las campañas oceanográficas Cortes 1, 2, 3 a bordo del B/O "El Puma". *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 22(1): 83-100.
- Caso, M. E., A. Laguarda-Figueroa, F. A. Solís-Marín, A. Ortega-Salas y A. L. Durán-González. 1994. Contribución al conocimiento de la ecología de las comunidades de equinodermos de la Laguna de Términos, Campeche, México. *Anales del Instituto de*

*Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 21(1-2): 67-85.

- Caso, M. E., A. Laguarda-Figueras, F. A. Solís-Marín, A. Ortega-Salas y A. L. Durán-González. 1996. Contribución al conocimiento de la ecología de las comunidades de equinodermos de la bahía de Mazatlán, Sinaloa, México. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 22(1): 101-119.
- Cintra Buenrostro, C. E. 2001. Los Asteroideos (Echinodermata: Asteroidea) de aguas someras del Golfo de California, México. *Oceánides*, 16(1): 49-90.
- Cintra-Buenrostro, C. E., H. Reyes-Bonilla y O. Arizpe-Covarrubias. 1998. Los equinodermos (Echinodermata) del arrecife de Cabo Pulmo, Pacífico de México. *Revista de Biología Tropical* 46 (2): 341-344.
- Clark A. H. 1916. Six new starfishes from the Gulf of California and adjacent waters. *Proceedings of the Biological Society of Washington*, 29: 51-62.
- . 1918. A new genus and species of multibrachiate ophiuran of the family Gorgonocephalidae from the Caribbean Sea. *Proc. Unit. Stat. Nat. Hist. Mus.* 54: 637-640.
- . 1954. Echinoderms (other holothurians) of the Gulf of Mexico. Pp. 373-379, In P. S. Galtsoff, ed. Gulf of Mexico. Its origin, waters and marine life. *U. S. Fish. Wildl. Serv. Fish. Bull.*, 55(89): 604 pp.
- Clark, H.L. 1913. Echinoderms from Lower California, with Descriptions of New Species. *Bulletin of the American Museum of Natural History* 32(8): 185-236.
- . 1920. Asteroidea. Reports on the scientific results of the expedition to the Eastern Tropical Pacific in charge of Alexander Agassiz, by the U. S. Fish Commission Steamer "Albatross", from October, 1904, to March, 1905, Lieut. Commander L. M. Garrett, U. S. N., commanding. *Memoirs of the Museum of Comparative Zoology at Harvard College* 39 (3): 69-114.
- . 1923. Echinoderms from Lower California, with Descriptions of New Species: Supplementary Report. *Bulletin of the American Museum of Natural History* 48(6): 147-163.
- . 1933. Scientific survey of Porto Rico and Virgin Islands. Part. 1. A handbook of the littoral echinoderms of Puerto Rico and the other West Indian Islands. *New York Acad. Sci.* 16: 1-147.
- Cutress, B.M. 1996. Changes in dermal ossicles during somatic growth in Caribbean littoral sea cucumbers (Echinodermata: Holothuroidea: Aspidochirota). *Bull. Mar. Sci.* 58: 44-116.
- Deichmann, E. 1930. The holothurians of the western part of the Atlantic Ocean. *Bull. Mus. Comp. Zool. Harvard*, 71(3): 41-226.

- . 1937. The Templeton Crocker Expedition. IX. Holothurians from the Gulf of California, the West Coast of Lower California, and Clarion Island. *Zoologica* (NY), 22: 161-176.
- . 1938. 18. Eastern Pacific Expeditions of the New York Zoological Society. XVI. Holothurians from the western coasts of Lower California and Central America, and from Galápagos Islands. *Zoologica* 23(18): 361-387.
- . 1941. The Holothurioidea collected by the VELERO III during the years 1932–1938. Part I. Dendrochirotida. *Allan Hancock Pacific Expeditions*, 8 (3): 61–195.
- . 1954. The holothurians of the Gulf of Mexico. Pp. 381-410. In P. S. Galtsoff (co-ord.). 1954. Gulf of Mexico, its origin, waters, and marine life. *Fishery Bulletin of the Fish and Wildlife Service*, 55(89): 381-410.
- . 1958. The Holothuroidea collected by the VELERO III and IV during the years 1932 to 1954. Part II. Apsidochirota. *Allan Hancock Pacific Expeditions*, 11(2): 239-349.
- . 1963. Shallow water holothurians known from the Caribbean waters. *Studies on the fauna of Curacao and other Caribbean Islands*, 63: 100-118.
- Downey, M. E. 1972. *Midgardia xandaros* new genus, new species, a large brisingid starfish from the Gulf of Mexico. *Proceedings of the Biological Society of Washington* 84(48): 421-426.
- . 1973. Starfishes from the Caribbean and the Gulf of Mexico. *Smithsonian Contributions to Zoology* (126): 1-158.
- Escobar-Briones, E. 2000. La biodiversidad del mar profundo en México. *Biodiversitas*, 29: 1-6.
- Hartlaub, C. 1895. Reports on the dredging operations off the west coast of Central America to the Galapagos, to the west coast of Mexico, and in the Gulf of California, in charge of Alexander Agassiz, carried on by the U. S. Fish Commission steamer "Albatross", during 1891, Lieut. Commander Z. L. Tanner, U. S. N., commanding. 13. Die Comatulien. *Bulletin of the Museum of Comparative Zoology at Harvard University*, 27(4): 129-152.
- Hansen, B. 1975. Systematics and biology of the deep-sea holothurians. Part I. Elaspoda. *Galathea Report* 13: 1–262.
- Hendler, G. y R. L. Turner. 1987. Two new species of *Ophiolepis* (Echinodermata: Ophiuroidea) from the Caribbean Sea and Gulf of Mexico: With notes on ecology, reproduction and morphology. *Contributions in Science* (Los Angeles), 395: 1-14.
- Hendler, G. y R. W. Peck. 1988. Ophiuroids off the deep end: Fauna of the Belizean fore-reef slope. *Proceedings of the sixth International Echinoderm Conference, Victoria: 23-28 August*, 411-419.

- Hendler, G., J.E. Miller, D.L. Pawson and P.M. Kier. 1995. Sea Stars, Sea Urchins and Allies. Echinoderms of Florida and the Caribbean. *Smithsonian Institution Press*, EE.UU. 383 pp.
- Herrero-Pérezrul, M. D., H. Reyes-Bonilla y F. García-Domínguez. 1998. Casual hermaphroditism in gonochoric *Isostichopus fuscus* (Ludwig, 1875) (Echinodermata: Holothuroidea) of the Southern Gulf of California, Mexico. *Bulletin of Marine Science*, 63(3): 611-615.
- Herrero-Pérezrul, M. D., H. Reyes-Bonilla, F. García-Domínguez and C. E. Cintra-Buenrostro. 1999. Reproduction and growth of *Isostichopus fuscus* (Echinodermata: Holothuroidea) in the Gulf of California, México. *Marine Biology*, 135(3): 521-532.
- Holguín-Quiñones, O.E., F. de J. González-Medina, F.A. Solís-Marín & E.F. Félix Pico. 2008. Variación espacio-temporal de Scleractinia, Gorgonacea, Gastropoda, Bivalvia, Cephalopoda, Asteroidea, Echinoidea y Holothuroidea, de fondos someros de la isla San José, Golfo de California. *Revista de Biología Tropical*, 56 (3): 1189-1199.
- Honey-Escandón, M., F.A. Solís-Marín y A. Laguarda-Figueras. 2008. Equinodermos (Echinodermata) del Pacífico Mexicano. *Revista de Biología Tropical* 56 (Suppl. 3): 57-73.
- Hooker, Y., Solís-Marín F. A. y M. Llellish. 2005. Equinodermos de las Islas Lobos de Afuera (Lambayeque, Perú). *Revista Peruana de Biología* 12 (1): 77-82.
- Hunte, W., I. Côté y T. Tomascik. 1986. On the dynamics of the mass mortality of *Diadema antillarum* in Barbados. *Coral Reefs*. 4: 135-139.
- Kerstitch, A. 1989. Sea of Cortez Marine Invertebrates. A Guide for the Pacific Coast Mexico to Ecuador. *Sea Challengers Publ.* 115 pp.
- Kier, P.M. 1975. The echinoids of Carrie Bow Cay, Belize. *Smith. Cont. Zool.* 206: 1-20.
- Kier, P.M. y R.E. Grant. 1965. Echinoid distribution and habits, Key Largo Coral Reef Preserve, Florida. *Smith. Misc. Coll.* 149: 1-68.
- Laguarda-Figueras, A., F.A. Solís-Marín, A. Durán-González, P. Hernández Pliego y R. Del Valle García. 2001. Holoturoideos (Echinodermata: Holothuroidea) del Caribe Mexicano: Puerto Morelos. *Avicennia*, 14: 7-46.
- Laguarda-Figueras, A., J. Torres-Vega, F.A. Solís-Marín, E. Mata-Pérez, A. Durán-González y M. Abreu. 2002. Los asteroideos (Echinodermata: Asteroidea) del Caribe Mexicano: Incluyendo comentarios sobre su zoogeografía. *Avicennia*, 15: 1-8.
- Laguarda-Figueras, A., M. Abreu, J. Torres Vega., F. A. Solís-Marín y Alicia de la Luz Durán-González, A. 2004. Ofiuroideos (Echinodermata: Ophiuroidea) del Caribe Mexicano: Puerto Morelos. *Avicennia*, 17: 13-34.
- Laguarda-Figueras, A., A. I. Gutiérrez-Castro, F. A. Solís-Marín, A. Durán-González y J. Torres-Vega. 2005. Equinoideos (Echinodermata: Echinoidea) del Golfo de México. *Revista de Biología Tropical*, 53 (Supl. 3): 69-108.

- Laguarda-Figueras, A., Hernández-Herrejón, A., Solís-Marín F. A. y A. Durán-González. 2009. *Los ofiuroideos del Caribe Mexicano y Golfo de México*. 245 pp.
- Lambert, P. 2000. *Sea Stars of British Columbia, Southeast Alaska, and Puget Sound*. Royal British Columbia Museum Handbook. UBC Press, Vancouver, BC. 186 pp.
- Lessios, H. A., D. R. Robertson y J. D. Cubit. 1984a. Spread of *Diadema* mass mortality through the Caribbean. *Science*, 226: 335-337.
- Lessios, H. A., J. D. Cubit, D. R. Robertson, M. J. Shulman, M. R. Parker, S. D. Garrity y S. C. Levings. 1984b. Mass Mortality of *Diadema antillarum* on the Caribbean Coast of Panama. *Coral Reefs*, 3: 173-182.
- Litvinova, N. M. 1975. Ophiuroids of the Caribbean and Gulf of Mexico collected during 14<sup>th</sup> Cruise of the R/V "Akademic Kurchatov". *Institute of Oceanology, Academy of Sciences of the USSR. Moscow*, 100: 196-204.
- Ludwig, H. L. 1894. The Holothuroidea. Reports on an exploration off the west Coast of Mexico, Central and South America, and off Galapagos Island, in Charge of Alexander Agassiz. by the U.S. Fish Commission Steamer "Albatross" during 1891, Lieut. Commander Z. L. Tanner, U. S. N. Comanding. *Memoirs of the Museum of Comparative Zoology at Harvard Colege. Cambridge, U. S. A.* 17(3): 1-183.
- . 1905. Asteroidea. Reports on an exploration off the West Coasts of Mexico, Central and South America, and off The Galapagos Islands, in charge of Alexander Agassiz, by the U. S. Fish Commission Steamer "Albatross", during 1891, Lieut. Commander Z. L. Tanner, U. S. N., commanding. Reports on the scientific results of the expedition to the Tropical Pacific in charge of Alexander Agassiz, on the U. S. Fish Commission Steamer "Albatross", from August, 1899, to March, 1900, Commander Jefferson F. Moser, U. S. N., commanding. *Memoirs of the Museum of Comparative Zoology at Harvard College*, 32: 1-292.
- Lyman, T. 1883. Report on the Ophiuroidea. Reports on the results of dredging, under the supervision of Alex Agassiz, in the Caribbean Sea (1878-79), and on the east coast of the United States, during the summer of 1880, by the U. S. Coast survey Steamer "Blake", commander J. R. Bartlett, U. S. N. commanding. *Bull. Mus. Comp. Zool. Harvard College*. 10: 227-287.
- Mah, C.L. 2007. Phylogeny of the Zoroasteridae (Zorocallina; Forcipulatida): evolutionary events in deep-sea Asteroidea displaying Palaeozoic features. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 150: 177-210.
- Maluf, L. Y. 1988. Composition and distribution of the Central Eastern Pacific Echinoderms. *Natural History Museum of the Angeles Country. Technical Reports*, (2): 1-242.

- . 1991. Echinoderm Fauna of the Galapagos Islands. Ch. 16. Pp. 345-367. In: M.J. James (ed.). *Galapagos Marine Invertebrates: Taxonomy, Biogeography and Evolution in Darwin's Islands*, Plenum Press, New York.
- Maluf, L.Y. y R.C. Brusca. 2005. Cap. 18. Echinodermata. Pp. 327-344. In: Hendrickx, M.E., R.C. Brusca, L.T. Findley (eds.). *Listado y distribución de la macrofauna del Golfo de California, México, Parte 1. Invertebrados*. Arizona-Sonora Desert Museum, 429 pp.
- Massin, C. y M. E. Hendrickx. 2010. A new species of deep-water Holothuroidea (Echinodermata) of the genus *Synallactes* from off western Mexico. *Scientia Marina*, 74 (3): 599-603.
- Morgan, M. B. y D. L. Cowles. 1996. The effects of temperature on the behaviour and physiology of *Phataria unifascialis* (Gray) (Echinodermata, Asteroidea). Implications for the species distribution in the Gulf of California, Mexico. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 208: 13-27.
- Nybakken, J., S. Craig, L. Smith-Beasley, G. Moreno, A. Summers, and L. Weetman. 1998. Distribution density and relative abundance of benthic invertebrate megafauna from three sites at the base of the continental slope off central California as determined by camera sled and beam trawl. *Deep-Sea Research, II*, 45: 1753-1780.
- Parker, R. H. 1964. Zoogeography and ecology of macroinvertebrates of the Gulf of California and continental slope of Western Mexico. In: Marine Geology of the Gulf of California, ed. Tjeerd H. van Andel y George G. Shor, Jr., 331-376. *American Association of Petroleum Geologists*, 333 pp.
- Pawson, D.L. 1976. Shallow-water sea cucumbers (Echinodermata: Holothuroidea) from Carrie Bow Cay, Belize. *Proc. Biol. Soc. Wash.*, 89: 369-382.
- Pawson, D. L. 2007. Phylum Echinodermata. *Zootaxa*, 1668: 749-764.
- Pawson, D. L. y I. E. Caycedo. 1980. *Holothuria* (*Thymiosycia*) *thomasi* new species, a large caribbean coral reef inhabiting sea cucumber (Echinodermata: Holothuroidea). *Bull. Mar. Sci.* 30: 454-459.
- Pawson, D. L. y C. A. Gust. 1981. *Holothuria* (*Platyperona*) *rowei*, a new sea cucumber from Florida (Echinodermata: Holothuroidea). *Proc. Biol. Soc. Wash.* 94: 873-877.
- Perrier, E. 1881. Description sommaire des espèces nouvelles d'astéries. Reports on the results of dredging under the supervision on Alexander Agassiz, in the Gulf of Mexico, 1877-78, by the United States coast survey steamer «Blake», Lieut-Commander C. D. Sigsbee, U. S. N., commanding and in the Caribbean sea, 1878-79, by the U. S. C. S. S. «Blake», commander J. R. Bartlett, U. S. N., commanding. *Bulletin of the Museum of Comparative Zoölogy, at Harvard College.* 9(1):1-31.

- Phelan, T. 1970. A field guide to the cidaroid echinoids of the Northwestern Atlantic Ocean, Gulf of Mexico, and the Caribbean Sea. *Smithsonian Contributions to Zoology* (40):1-22.
- Pianka, E. R. 1966. Latitudinal gradients in species diversity: a review of concepts. *The American Naturalist*, 100(910): 33-46.
- Pineda-Enríquez, T. 2011. Biodiversidad de los equinodermos (Echinodermata) del Golfo de California, de 0 a 300 m de profundidad, utilizando el submarino DeepSee como herramienta de muestreo. Tesis profesional. Facultad de Ciencias, UNAM. Pp. 186.
- Rathbun, R. 1885. Report upon the echini collected by the U.S. Fish Commission Steamer "Albatross" in the Caribbean Sea and Gulf of Mexico, January to May, 1884, *Proc. U. S. Nat. Mus.*, (3): 1-83.
- Roux, M. 2004. New hydrinid crinoids (Echinodermata) from submersible investigations in the Pacific Ocean. *Pacific Science* 58: 597-613.
- Sambrano, A., H. Díaz y J.E. Conde. 1990. Caracterización de la ingesta de *Isostichopus badionotus* (Selenka) y *Holothuria mexicana* Ludwig (Echinodermata: Holothuroidea). *Carib. J. Sci.* 26: 45-51.
- Schroeder, E.E. 1964. Notes on the biology of the echinoid *Diadema antillarum*. *Caribbean Journal of Sciences*, 4: 421-433.
- Solís-Marín, F. A. 2003. Molecular Phylogeny, Systematics and Biology of the Holothurian Family Synallactidae. Unpublished Ph.D. dissertation. University of Southampton, 356 pp.
- Solís-Marín, F.A. 2003. Systematics and phylogeny of the holothurian family Synallactidae. Ph.D. thesis, University of Southampton, Gran Bretaña, 356 p.
- Solís-Marín, F. A. y A. Laguarda-Figueras. 2008. Equinodermos. Capítulo 11, p. 187-214. En: Mejía-Ortíz, L. M. (Ed.). *Biodiversidad acuática de la Isla de Cozumel*. CONABIO, Universidad de Quintana Roo, Plaza y Valdés, México. 422 pp.
- Solís-Marín, F. A., H. Reyes-Bonilla, M. D. Herrero-Pérezrul, O. Arizpe-Covarrubias, y A. Laguarda-Figueras. 1997. Sistemática y distribución de los equinodermos de la bahía de La Paz. *Ciencias Marinas* 23 (2): 249-263.
- Solís-Marín, F. A., A. Laguarda-Figueras, A. Durán-González, C. Gust Ahearn, y J. Torres Vega. 2005. Echinoderms (Echinodermata) from the Gulf of California, México. *Revista de Biología Tropical* 53 (suppl. 3): 123-137.
- Solís-Marín, F. A., J. A. Arriaga-Ochoa, A. Laguarda-Figueras, S. C. Frontana-Uribe y A. Durán-González. 2009. *Holoturoideos (Echinodermata: Holothuroidea) del Golfo de California*. CONABIO e Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, México, D.F. 177 pp.

- Solís-Marín, F. A., Francisco A. Solís-Marín; Magali B. I. Honey-Escandón, Ma. Dinorah Herrero-Pérezrul; Francisco Benítez-Villalobos; Julia P. Díaz-Martínez; Blanca E. Buitrón-Sánchez; Julio S. Palleiro Nayar and Alicia Durán-González. In press. Echinoderms from Mexico: Biodiversity, distribution and current state of knowledge. En: Alvarado-Barrientos y Solís-Marín (eds). En prensa. Springer.
- Théel, H. 1886. XXX. Report on the Holothurioidea. Reports on the Results of dredging, under the Supervision of Alexander Agassiz, in the Gulf of Mexico (1877-78), in the Caribbean Sea (1879-80), and along the Eastern Coast of the United States during the Summer of 1880, by the U. S. Coast Survey Steamer "Blake", Lieut Commander, C. D. Sigsbee, U. S. N., and Commander J. R. Bartlett, U. S. N., Commanding. *Bulletin of the Museum of Comparative Zoölogy* 13(1): 1-20.
- Thomas, L. P. 1962. The shallow water amphiuroid brittle stars (Echinodermata, Ophiuroidea) of Florida. *Bull. Mar.Sci. of the Gulf and Caribbean*. 12: 623-694.
- Tilot, V. Biodiversity and distribution of megafauna. Vol. 1: The polymetallic nodule ecosystem of the Eastern Equatorial Pacific Ocean; Vol. 2: Annotated photographic atlas of the echinoderms of the Clarion-Clipperton fracture zone. Paris, UNESCO/IOC, 2006 (IOC Technical Series, 69).
- Turner, R. L. y B. D. Graham. 2003. *Calocidaris micans* (Cidaridae) and *Pseudoboletia maculata* (Toxopneustidae): additions to the sea urchin fauna (Echinodermata: Echinoidea) of the Gulf of Mexico. *Proceedings of the Biological Society of Washington*, 116(1): 61-81.
- Vázquez-Bader, A. R.; Laguarda-Figueras, A., Gracia Gasca A., Solís-Marín, F. A., Celaya-Hernández, E. V. and A. Durán-González. 2008. Seasonal changes in the density and species composition of the epifaunal echinoderms recorded from the southwester Gulf of Mexico. *Revista Biología Tropical*, 56 (Supl. 3): 297-310.
- Verrill, A. E. 1870a. 2. Recent explorations of the deep-sea faunae. *American Journal of Science*, 69(145): 129-134.
- Verrill, A. E. 1870b. Comparison of the tropical faunae of the east and west coasts of America. *Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Science*, 1: 341-351.
- Verrill, A. E. 1870c. Art. XIII. Contributions to zoology from the Museum of Yale College. No. 5. Descriptions of echinoderms and corals from the Gulf of California. *Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Science*, 61: 93-98.
- Verrill, A. E. 1871a. V. Notes on the Radiata in the Museum of Yale College, with Descriptions of New Genera and Species. No. 8. Additional observations on Echinoderms, chiefly from the Pacific Coast of America. *Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Science*, 1(2): 568-593.

- Verrill, A. E. 1871b. V. Notes on the Radiata in the Museum of Yale College, with Descriptions of New Genera and Species. No. 9. On the Echinoderm fauna of the Gulf of California and Cape St. Lucas. *Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Science*, 1(2): 593-610.
- Verrill, A. E. 1871c. No. 15. Descriptions of starfishes and ophiurians from the Atlantic coasts of America and Africa. *The American Journal of Science and Arts*, 3th series. 2(19): 130-133.
- Zárate-Montes, C. M. 2011. Biocenosis y distribución de los Asteroidea en el talud continental del golfo de California. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias del mar y Limnología, Unidad Académica Mazatlán, UNAM. 106 pp.
- Zetina-Moguel, C, V. Ríos-Lara, M. Koyoc, I. Cruz Hernández-Herrera, K. Cervera-Cervera, D. De Anda-Fuentes, P. Arceo-Briseo, E.E. Ortíz and M. Guevara-Ortíz. 2003. Sea cucumber (*Astichopus multifidus*, *Isostichopus badionotus* and *Holothuria floridana*) biomass estimation in two areas of Yucatan Coast between October 2000 to March 2001. *Proc. Gulf and Carib. Fish. Inst.*, 54: 297-306.
- Ziesenhenné, F.C. 1937. The Templeton Crocker Expedition. X. Echinoderms from the West Coast of Lower California, the Gulf of California and Clarion Island. *Zoologica*, N.Y., 22(15): 209-239.
- Ziesenhenné, F. C. 1940. New Ophiurans of the Allan Hancock Pacific Expeditions. *Allan Hancock Pacific Expeditions*, 8(2): 9-58.
- .1942. New Eastern Pacific sea stars. *Allan Hancock Pacific Expedition* 8(4): 197-223.

## APENDICE I

Lista de especies de equinodermos de aguas profundas (>200 m) registradas en los mares mexicanos. Fuentes principales de información: Colección Nacional de Equinodermos, ICML, UNAM (CNE), la Colección de Equinodermos del "Natural History Museum, Smithsonian Institution", Washington, DC., EUA; Maluf (1988); Solís-Marín (2003), Solís-Marín *et al.* (2005, 2009); Solís-Marín y Laguarda-Figuera (2007), Honey-Escandón *et al.* (2008); Laguarda-Figuera *et al.* (2005, 2009), Vázquez-Bader *et al.* (2008), Pineda-Enríquez (2011) y Zárata-Montes (2011). Seguimiento del nombre de la especie, su autor y año, en su caso, se da información de la presencia de ejemplares depositados en la CNE, además del rango de distribución batimétrica conocida para la especie a nivel mundial (en metros y entre paréntesis) y por último, las áreas oceánicas donde se ha reportado para México: P= Océano Pacífico Mexicano, GC= Golfo de California, GM= Golfo de México y C= Caribe Mexicano.

### Phylum Echinodermata

#### Clase Crinoidea

#### Orden Isocrinida

#### Familia Isselicrinidae

*Neocrinus* (*Neocrinus*) *decorus* Whyville-Thompson, 1864 (CNE) (143-747 m) (C)

*Neocrinus* (*Isocrinus*) *blakei* (Carpenter, 1882) (CNE) (221-747 m) (C)

*Endoxocrinus parrae* (Gervais, 1835) (CNE) (157-1,033 m) (C)

*Cenocrinus asterius* (Linnaeus, 1767) (183-412 m) (C)

#### Orden Bourgetticrinina

#### Familia Bourgetticrinidae

*Democrinus rawsoni* (Portalès, 1874) (CNE) (130-230 m) (GM) (C)

#### Familia Bathyrcrinidae

*Monachocrinus caribbeus* A. H. Clark, 1908 (746-1,390 m) (GM) (C)

#### Orden Hyocrinida

#### Familia Hyocrinidae

*Hyocrinus foelli* Roux & Pawson, 1999 (3,030-4,500 m) (P)

#### Orden Millericrinida

#### Familia Holopodidae

*Holopus rangii* d'Orbigny, 1837 (300-700 m) (GM)

#### Familia Comasteridae

*Neocomatella alata* (Portualès, 1878) (CNE) (35-567 m) (C)

*Neocomatella pulchella* (Portualès, 1878) (CNE) (125-2416 m) (GM) (C)

*Davidaster discoideus* (Carpenter, 1888) (11-640 m) (C)

*Comatonia cristata* (Hartlaub, 1912) (CNE) (50-369 m) (C)

#### Orden Comatulida

##### Familia Comasteridae

*Comactinia echinoptera* (Müller, 1840) (CNE) (24-236 m) (C)

*Comactinia meridionalis* (L. Agassiz, 1865) (CNE) (8-640 m) (C)

##### Familia Thalassometridae A. H. Clark, 1908

*Stylometra spinifera* (Carpenter, 1881) (102-658 m) (C)

*Horaeometra duplex* (Carpenter, 1888) (368-567 m) (C)

##### Familia Charitometridae

*Crinometra brevipinna* (Portualès, 1817) (CNE) (70-795 m) (GM) (C)

##### Familia Antedonidae

*Coccometra guttata* Clark, 1918 (329-465 m) (C)

*Coccometra hagenii* (Portualès, 1867) (139-1,046 m) (C)

*Coccometra nigrolineata* A.H. Clark, 1908 (40-987 m) (C)

*Florometra serratissima* (A.H. Clark, 1907) (12-3,234 m) (P)

*Florometra tanneri* (Hartlaub, 1895) (104-207 m) (P)

*Hypalometra defecta* (Carpenter, 1888) (46-386 m) (C)

*Trichometra cubensis* (Pourtalès, 1869) (CNE) (210-4,829 m) (C)

##### Familia Zenometridae

*Zenometra columnaris* (Carpenter 1881) (309-1,033 m) (C)

*Fariometra parvula* (Hartlaub, 1895) (344-636 m) (P)

##### Familia Atelecrinidae

*Atelecrinus balanoides* Carpenter, 1881 (CNE) (275-2,809 m) (C)

Clase Asteroidea

Orden Paxillosoidea

Familia Luidiidae

*Luidia asthenosoma* Fisher, 1906 (P)

*Luidia barbadensis* Perrier, 1881 (CNE) (245-394 m) (GM)

*Luidia armata* Ludwig, 1905 (CNE) (15-284 m) (GC)

Familia Astropectinidae

*Astropecten alligator* Perrier, 1881 (22-576 m) (C)

*Astropecten americanus* Verrill, 1880 (CNE) (539-548 m) (GM)

*Astropecten duplicatus* Gray, 1840 (CNE) (403 m) (GM)

*Astropecten comptus* Verill, 1915 (CNE) (312 m) (GM)

*Astropecten nitidus* Verrill, 1915 (CNE) (245-246 m) (GM)

*Astropecten ornatissimus* Fisher, 1906 (CNE) (9-366 m) (P) (GC)

*Astropecten verrilli* de Loriol, 1899 (P)

*Blakiaaster conicus* Perrier, 1881 (168-366 m) (C)

*Dipsacaster letmophylus* Fisher, 1910 (1,016-1,422 m) (P) (GC)

*Dytaster gilberti* Fisher, 1905 (P)

*Dytaster insignis* (Perrier, 1884) (CNE) (3,350-3,730 m) (GM)

*Leptychaster inermis* (Ludwig, 1905) (P)

*Persephonaster echinulatus* H. L. Clark, 1941 (CNE) (500-618 m) (GM)

*Psilaster armatus* Ludwig, 1905 (P)

*Psilaster pectinatus* (Fisher, 1905) (P)

*Persephonaster echinulatus* H. L. Clark, 1941 (CNE) (416-693 m) (GM)

*Tethyaster canaliculatus* (A. H. Clark, 1916) (CNE) (245 m) (GC)

*Thrissacanthias penicillatus* (Fisher, 1905) (931-1,167 m) (P) (GC)

Orden Notomyotida

Familia Benthoplectinidae

*Benthopecten acanthonotus* Fisher, 1905 (P)

*Benthopecten pectinifer* (Ludwig, 1905) (P)

*Cheiraster* (*Cheiraster*) *planus* Verrill, 1915 (CNE) (539-548 m) (GM)

*Cheiraster* (*Barbadosaster*) *echinulatus* (Perrier, 1875) (CNE) (150-618 m) (GM) (C)

*Cheiraster* (*Christopheraster*) *blakei* A.M.Clark, 1981 (CNE) (400 m) (GM) (C)

*Cheiraster* (*Christopheraster*) *mirabilis* (Perrier, 1881) (CNE) (604-693 m) (GM)

*Nearchaster aciculosus* (Fisher, 1910) (466-1,903 m) (P) (GC)

*Pectinaster agassizii* (Ludwig, 1905) (790-2,323 m) (P) (GC)

Familia Gonioplectinidae

*Prionaster elegans* Verrill, 1899 (CNE) (245-352 m) (GM)

*Pseudarchaster gracilis* (Sladen, 1889) (CNE) (613-618 m) (GM)

Familia Porcellanasteridae

*Eremicaster crassus gracilis* (Salden, 1883) (P)

*Eremicaster pacificus* (Ludwig, 1905) (P)

*Hyphalaster inermis* Sladen, 1883 (3) (P)

Familia Ctenodiscidae

*Ctenodiscus crispatus* (Retzius, 1805) (10-2,423 m) (P) (GC) (GM)

Orden Valvatida

Familia Goniasteridae

*Anthenoides piercei* Perrier, 1881 (CNE) (253-311 m) (GM)

*Apollonaster yucatanensis* Halpern, 1970 (CNE) (600-610 m) (GM)

*Ceramaster leptoceramus* (Fisher, 1905) (587-1,086 m) (P) (GC)

*Ceramaster grenadensis patagonicus* Sladen, 1889 (P)

*Cryptopeltaster lepidonotus* Fisher, 1905 (P)

*Floriaster maya* Downey, 1980 (933-1,024 m) (C)

*Mediaster aequalis* Stimposn, 1857 (P)

*Mediaster tenellus* Fisher, 1905 (P)

*Mediaster transfuga* Ludwig, 1905 (778-902 m) (P) (GC)

*Nymphaster diomedea* Ludwig, 1905 (702-1,450 m) (P) (GC)

*Nymphaster arenatus* (Perrier, 1881) (CNE) (245-693 m) (GM)

*Nymphaster subspinosus* (Perrier, 1881) (CNE) (311 m) (GM)

*Plinthaster dentatus* (Perrier, 1884) (CNE) (455-620 m) (GM)

*Paragonaster subtilis* (Perrier, 1881) (3,350 – 3,410 m) (GM)

*Pseudarchaster gracilis* (Sladen, 1889) (CNE) (311-645 m) (GM)

*Tosia parva* (Perrier, 1881) (30-600 m) (C)

Familia Odontasteridae

*Odontaster crassus* Fisher, 1905 (P)

Familia Pseudoarchaster

*Pseudarchaster pectinifer* Ludwig, 1905 (P)

*Pseudarchaster pulcher* Ludwig, 1905 (P)

*Pseudarchaster pusillus* Fisher, 1905 (P)

Familia Oreasteridae

*Anthenea mexicana* A.H. Clark, 1916 (P)

Familia Ophidiasteridae

*Linckia nodosa* Perrier, 1875 (CNE) (35-475 m) (C)

*Narcissia trigonaria* Sladen, 1889 (CNE) (37-274 m) (C)

Familia Poraniidae

*Poraniopsis inflatus* Fisher, 1906 (P)

Orden Velatida

Familia Pterasteridae

*Pteraster militaris* (O. F. Muller, 1776) (CNE) (3,545 – 3,635 m) (GM)

*Pteraster personatus* Sladen, 1891 (CNE) (3,350 – 3,360 m) (GM)  
*Pteraster rugosus* H. L. Clark, 1941 (CNE) (3,350 – 3,360 m) (GM)

Familia Solasteridae

*Lophaster furcilliger* Fisher, 1905 (841-1,244 m) (P) (GC)  
*Lophaster validus* (Ludwig, 1905) (P)

Familia Korethrasteridae

*Peribolaster biserialis* Fisher, 1905 (104-633 m) (P) (GC)

Familia Myxasteridae

*Pythonaster pacificus* Downey, 1979 (P)

Familia Pterasteridae

*Hymenaster pellucidus* W. Thomson, 1873 (P)  
*Hymenaster quadrispinosus* Fisher, 1905 (P)  
*Hymenaster violaceus* Ludwig, 1905 (P)  
*Pteraster jordani* Fisher, 1905 (P)

Orden Spinulosida

Familia Echinasteridae

*Echinaster (Othilia) serpentarius* H. L. Clark in Krau 1950 (CNE) (213-222 m) (GM)  
*Echinaster (Othilia) spinulosus* Verrill, 1869 (CNE) (1-238 m) (C)  
*Henricia antillarum* (Perrier, 1881) (CNE) (311-352 m) (GM)  
*Henricia aspera* Fisher, 1906 (P)  
*Henricia asthenactis* Fisher, 1905 (P)  
*Henricia clarki* Fisher, 1906 (CNE) (200 m) (P) (GC)  
*Henricia gracilis* (Ludwig, 1905) (P)  
*Henricia leviuscula* (Stimpson, 1857) (P)  
*Henricia nana* (Ludwig, 1905) (CNE) (200 m) (GC)  
*Henricia polyacantha* Fisher, 1906 (P)  
*Henricia seminuda* (A.H. Clark, 1906) (P)

Orden Forcipulatida

Familia Zoroasteridae

*Cnemidaster nudus* (Ludwig, 1905) (P)  
*Doraster constellatus* Downey, 1970 (548 m) (GM)  
*Myxoderma platyacanthum* (H.L. Clark, 1913) (91-2,904 m) (P) (GC)  
*Myxoderma sacculatum* (Fisher, 1905) (91-2,012 m) (P) (GC)  
*Myxoderma longispinum* (Ludwig, 1905) (P)  
*Myxoderma qawashqari* (Moyana & Larrain Prat, 1976) (P)  
*Sagenaster evermanni* (Fisher, 1905) (P)  
*Zoroaster actinocles* Fisher, 1919 (P)  
*Zoroaster fulgens* Thomson, 1873 (500 m) (GM)

*Zoroaster hirsutus* Ludwig, 1905 (P)

*Zoroaster ophiurus* Fisher, 1905 (P)

#### Familia Asteroidea

*Pisaster giganteus* (Stimpson, 1857) (P)

*Sclerasterias heteropaes* Fisher, 1924 (P)

#### Familia Pedicellasteridae

*Ampheraster chiropus* Fisher, 1928 (920 m) (P) (GC)

*Ampheraster hyperoncus* (H.L. Clark, 1913) (587-943 m) (P) (GC)

*Ampheraster marianus* (Ludwig, 1905) (P)

*Anteliaster coscinactis* Fisher, 1923 (819-950 m) (P) (GC)

#### Familia Pycnopodiidae

*Pycnopodia helianthoides* (Brandt, 1835) (P)

#### Familia Labidiasteridae

*Coronaster briareus* (Verrill, 1882) (CNE) (311-403 m) (GM)

*Coronaster marchenus* Ziesenheim, 1942 (CNE) (5-768 m) (P) (GC)

#### Orden Brisingida

##### Familia Brisingidae

*Astrolirus panamensis* (Ludwig, 1905) (P)

#### Clase Ophiuroidea

##### Orden Phrynophiurida

##### Familia Ophiomyxidae

*Ophiomyxa flaccida* (Say, 1825) (CNE) (0-368 m) (GM) (C)

*Ophiomyxa tumida* Lyman, 1883 (CNE) (112-601 m) (GM) (C)

##### Familia Asteronychidae

*Asteronyx loveni* Müller & Troschel, 1842 (CNE) (155-2,491 m) (GM) (P)

*Asteronyx excavata* Lütken & Mortensen, 1899 (P)

##### Familia Asteroschematidae

*Asteroschema brachiatum* Lyman, 1878 (CNE) (108-783 m) (GM) (C)

*Asteroschema elongatum* Koehler, 1914 (CNE) (42-708 m) (GM) (C)

*Asteroschema intectum* Lyman, 1878 (CNE) (53-315 m) (C)

*Asteroschema laeve* (Lyman, 1872) (CNE) (42-446 m) (C)

*Asteroschema sublaeve* Lütken & Mortensen, 1899 (P)

##### Familia Gorgonocephalidae

*Asteropora annulata* Oersted & Lütken, 1856 (CNE) (16-397 m) (GM) (C)

*Astrochele lymani* Verrill, 1878 (CNE) (215 m) (C)

*Astrogomphus vallatus* Lyman, 1869 (60-706 m) (C)

*Astrachme mucronata* (Lyman, 1869) (CNE) (70-366 m) (C)

Orden Ophiurida

Familia Ophiuridae

*Amphiophiura fasciculata* (Lyman, 1853) (87-406 m) (C)

*Amphiophiura metabula* H. L. Clark, 1915 (CNE) (315-1,719 m) (C)

*Amphiophiura oligopora* (H.L. Clark, 1913) (P)

*Amphiophiura cf. ponderosa* (Lyman 1878) (P)

*Amphiophiura superba* ( Lütken & Mortensen, 1899) (P)

*Anthophiura ingolfi* Fasmer, 1930 (CNE) (21-1,200 m) (C)

*Gymnophiura mollis* Lütken & Mortensen, 1899 (P)

*Ophiernus adpersus adpersus* Lyman, 1883 (CNE) (539-548 m) (GM)

*Ophiolepis crassa* Nielsen, 1932 (CNE) (6-230 m) (P) (GC)

*Ophiolepis elegans* Lütken, 1859 (CNE) (1-329 m) (C)

*Ophiolepis impresa* Lütken, 1859 (CNE) (0-373 m) (GM) (C)

*Ophiomisidium pulchellum* (Wyville-Thmpson, 1876) (CNE) (11-3,061 m) (C)

*Ophiomusium acuferum* Lyman, 1875 (CNE) (185-575 m) (GM) (C)

*Ophiomusium eburneum* Lyman, 1869 (CNE) (139-1,064 m) (GM)

*Ophiomusium lymani* Wyville-Thmpson, 1873 (CNE) (62-2,904 m) (C)

*Ophiomusium lutkeni* Lyman, 1878 (CNE) (190-278 m) (C)

*Ophiomusium planum* Lyman, 1878 (CNE) (368-4,062 m) (C)

*Ophiomusium serratum* Lyman, 1878 (CNE) (520-3,103 m) (GM)

*Ophiomusium testudo* Lyman, 1875 (CNE) (60-930 m) (C)

*Ophiosphalma armigerum* (Lyman, 1878) (CNE) (262-4,024 m) (GM) (C)

*Ophiosphalma glabrum* ( Lütken & Mortensen, 1899) (P)

*Ophiosphalma jolliensis* (McClendon, 1909) (P)

*Ophiozonella granulifera* H. L. Clark, 1941 (CNE) (270-1,097 m) (GM) (C)

*Ophiozonella nivea* Lyman, 1875 (CNE) (57-1,249 m) (C)

*Ophiolipus agassizi* Lyman, 1878 (CNE) (146-310 m) (C)

*Ophiura acervata* (Lyman, 1869) (CNE) (47-640 m) (GM)

*Ophiura bathybia* H. L. Clark, 1911 (P)

*Ophiura falcifera* (Lyman, 1869) (290-1,050 m) (C)

*Ophiura flagellata* (Lyman, 1878) (P)

*Ophiura irrorata* (Lyman, 1860) (193-5,870 m) (P) (C)

*Ophiura ljungmani* (Lyman, 1878) (CNE) (46-2,654 m) (GM) (C)

*Ophiura luetkeni* (Lyman, 1860) (P)

*Ophiura sarsi* (Lütken 1854) (CNE) (82-827 m) (GM)

*Ophiura scomba* Paterson, 1985 (CNE) (358-3,943 m) (C)

*Ophiura scutellata* ( Lütken & Mortensen, 1899) (P)

*Ophiura fallax* Cherbonnier, 1969 (CNE) (20-842 m) (GM)

*Ophiura irrorata poliacantha* Mortensen, 1933 (CNE) (620 m) (GM)

Familia Ophioleucidae

*Ophiernus adpersus adpersus* Lyman, 1883 (CNE) (85-3,337 m) (C)

*Ophiernus adpersus annectens* Lütken & Mortensen, 1899 (P)

*Ophiernus seminudus* Lütken & Mortensen, 1899 (P)  
*Ophiopyren longispinus* Lyman, 1878 (39-600 m) (C)

Familia Ophiocomidae

*Ophiocoma paucigranulata* Devaney, 1974 (CNE) (0-455 m) (GM) (C)  
*Ophiocoma pumila* Lütken, 1859 (CNE) (0-368 m) (GM) (C)  
*Ophiocoma wendtii* Müller & Troschel, 1842 (CNE) (0-384 m) (GM) (C)  
*Ophiopsila riisei* Lütken, 1859 (CNE) (0-366 m) (C)

Familia Ophionereididae

*Ophiochiton carinatus* Lütken & Mortensen, 1899 (P)  
*Ophiochiton ternispinus* Lyman, 1883 (CNE) (450-1,585 m) (GM) (C)  
*Ophionereis annulata* (Le Conte, 1851) (CNE) (0-229 m) (P) (GC)  
*Ophionereis eurybrachioplax* H.L. Clark, 1911 (P)  
*Ophionereis reticulata* (Say, 1825) (CNE) (1-560 m) (GM) (C)

Familia Ophiodermatidae

*Bathypectinura heros* (Lyman, 1879) (CNE) (402-3,150 m) (GM) (C)  
*Ophioderma brevispinum* (Say, 1825) (CNE) (1-223 m) (C)  
*Ophioderma cinereum* Müller & Troschel, 1842 (CNE) (0-1,719 m) (GM) (C)

Familia Ophiacanthidae

*Astrocyclus caecilia* (Lütken, 1856) (CNE) (20-677 m) (GM) (C)  
*Astrophyton muricatum* (Lamarck, 1816) (CNE) (0-508 m) (GM)  
*Ophiacantha adiaphora* H.L. Clark, 1911 (P)  
*Ophiacantha costata* Lütken y Mortensen, 1899 (P)  
*Ophiacantha diplasia* H.L. Clark, 1911 (CNE) (9-1,408 m) (P) (GC)  
*Ophiacantha eurypoma* H.L. Clark, 1911 (P)  
*Ophiacantha hirta* Lütken & Mortensen, 1899 (P)  
*Ophiacantha moniliformis* Lütken & Mortensen, 1899 (P)  
*Ophiacantha normani* Lyman, 1879 (P)  
*Ophiacantha pacifica* Lütken & Mortensen, 1899 (P)  
*Ophiacantha phragma* Ziesenhenné, 1940 (CNE) (13-644 m) (P) (GC)  
*Ophiacantha quadrispina* H.L. Clark, 1917 (P)  
*Ophiacantha rhachophora* H.L. Clark, 1911 (P)  
*Ophiacantha rosea* Lyman, 1878 (CNE) (402-1,538 m) (C)  
*Ophiacantha sentosa* Lyman, 1878 (P)  
*Ophiacanthella troschelli* (Lyman, 1878) (185-796 m) (C)  
*Ophiolimna bairdi* (Lyman, 1883) (1,775 m) (P)  
*Ophiomitra granifera* (Lütken & Mortensen, 1899) (P)  
*Ophiomitra partita* (Lütken & Mortensen, 1899) (P)  
*Ophiomyces mirabilis* Lyman, 1869 (CNE) (270-560 m) (C)  
*Ophioplinthaca dipsacos* (Lyman, 1878) (420-949 m) (C)  
*Ophiotholia supplicans* Lyman, 1880 (CNE) (270-3,338 m) (C)

*Ophiotoma coriacea* Lyman, 1883 (CNE) (245 m) (GM)  
*Ophiotrema tertium* Koehler, 1906 (CNE) (245 m) (GM)  
*Ophiotreta sertata* (Lyman, 1869) (183-618 m) (GM) (C)

Familia Hemieuryalidae

*Sigsbeia conifera* Koehler, 1914 (CNE) (270-450 m) (C)  
*Sigsbeia murrhima* Lyman, 1878 (122-706 m) (GM) (C)

Familia Ophiactidae

*Histampica duplicata* (Lyman, 1875) (P)  
*Ophiactis quinqueradia* Ljungman, 1871 (CNE) (0-640 m) (GM) (C)  
*Ophiactis savignyi* (Müller & Troschel, 1842) (CNE) (0-518 m) (P) (GC) (GM)  
*Ophiactis simplex* (Le Conte, 1851) (CNE) (0-320 m) (P) (GC)  
*Ophiopholis kennerlyi* (Lyman, 1860) (P)  
*Ophiopholis bakeri* McClendon, 1909 (P)  
*Ophiopholis longispina* H.L. Clark, 1911 (P)

Familia Amphiuroidae

*Amphilimna olivacea* (Lyman, 1869) (CNE) (45-400 m) (C)  
*Amphiodia assimilis* (Lütken y Mortensen, 1899) (P)  
*Amphiodia occidentalis* (Lyman, 1860) (P)  
*Amphiodia periercta* H.L. Clark, 1911 (P)  
*Amphiodia pulchella* (Lyman, 1869) (CNE) (0-370 m) (GM) (C)  
*Amphiodia urtica* (Lyman, 1860) (P)  
*Amphioplus daleus* (Lyman, 1879) (P)  
*Amphioplus strongyloplax* (H.L. Clark, 1911) (P)  
*Amphioplus coniertodes* H. L. Clark, 1918 (CNE) (257-311 m) (GM)  
*Amphipholis januarii* Ljungman, 1867 (CNE) (1-311 m) (GM) (C)  
*Amphipholis abditus* (Verrill, 1871) (CNE) (6-587 m) (GM)  
*Amphipholis coniertodes* H. L. Clark, 1918 (CNE) (0-1,207 m) (GM) (C)  
*Amphipholis pugetana* (Lyman, 1860) (P)  
*Amphipholis squamata* (Delle Chiaje, 1828) (CNE) (0-1,962 m) (P) (GM) (C)  
*Amphiura arcystata* H. L. Clark, 1911 (P)  
*Amphiura carchara* H. L. Clark, 1911 (P)  
*Amphiura diomedea* Lütken & Mortensen, 1899 (P)  
*Amphiura fibulata* Koehler, 1914 (CNE) (2-500 m) (GM) (C)  
*Amphiura palmeri* Lyman, 1882 (CNE) (6-479 m) (GM) (C)  
*Amphiura seminuda* Lütken & Mortensen, 1899 (P)  
*Amphiura serpentina* Lütken & Mortensen, 1899 (P)  
*Amphiura stimpsonii* Lütken, 1869 (CNE) (0-2,844 m) (GM) (C)  
*Dougaloplus amphacanthus* (McClendon, 1909) (P)  
*Dougaloplus gastracanthus* (Lütken & Mortensen, 1899) (P)  
*Dougaloplus notacanthus* (Lütken & Mortensen, 1899) (P)  
*Microphipholis puntarenae* (Lütken, 1856) (P)  
*Ophiocnida californica* Ziesenhenné, 1940 (P)

*Ophiostigma isocanthum* (Say, 1825) (CNE) (1-223 m) (GM) (C)

Familia Amphilepidae

*Amphilepis patens* Lyman, 1879 (P)

Familia Ophiotrichidae

*Ophiothrix angulata* (Say, 1825) (CNE) (1-540 m) (GM) (C)

*Ophiothrix galapagensis* Lütken & Mortensen, 1899 (CNE) (0-549 m) (P) (GC)

*Ophiothrix spiculata* Le Conte, 1851 (CNE) (0-2,059 m) (P) (GC)

*Ophiothrix suensonii* Lütken, 1856 (CNE) (0-479 m) (P) (GC)

Clase Echinoidea

Orden Cidaroida

Familia Cidariidae

*Cidaris abyssicola* (A. Agassiz, 1869) (CNE) (315 m) (GM)

*Eucidaris tribuloides* (Lamarck, 1816) (CNE) (0-624 m) (GM) (C)

*Hesperocidaris perplexa* (H.L. Clark, 1907) (CNE) (13-1,500 m) (P) (GC)

*Stereocidaris ingolfiana* Mortensen, 1903 (CNE) (257-700 m) (C)

*Stylocidaris affinis* (Philippi, 1845) (CNE) (213 m) (GM) (C)

*Stylocidaris lineata* Mortensen, 1910 (CNE) (44-450 m) (GM)

Orden Arbacioida

Familia Arbaciidae

*Podocidaris sculpta* A. Agassiz, 1869 (CNE) (315 m) (C)

Orden Salenioida

Familia Saleniidae

*Salenocidaris varispina* A. Agassiz, 1869 (CNE) (260-350 m) (C)

Familia Ctenocidaridae

*Aporocidaris milleri* (A. Agassiz, 1898) (CNE) (3,010-3,875 m) (P) (GC)

Familia Kamptosomatidae

*Kamptosoma asterias* (A. Agassiz, 1881) (P)

Orden Camarodonta

Familia Trigonocidaridae

*Trigonocidaris albida* A. Agassiz, 1869 (CNE) (70-700 m) (C)

Familia Toxopneustidae

*Lytechinus anamesus* H. L. Clark 1912 (CNE) (14-288 m) (P) (GC)

*Lytechinus pictus* (Verrill, 1867) (CNE) (0-300 m) (P) (GC) (GC)

*Lytechinus variegatus* (Lamarck, 1816) (CNE) (0-250 m) (P) (GC)

Familia Strongylocentrotidae

*Allocentrotus fragilis* (Jackson, 1912) (CNE) (P) (GC)

Familia Echinidae

*Echinus tyloides* H. L. Clark, 1912 (CNE) (700 m) (GM)

Orden Echinothuroidea

Familia Echinothuriidae

*Aerosoma fenestratum* (Wyville-Thompson, 1872) (145-900 m) (C)

*Calveriosoma hystrix* Wyville-Thompson, 1872 (360-1,800 m) (C)

*Tromikosoma hispidum* (A. Agassiz, 1898) (P)

*Tromikosoma panamense* (A. Agassiz, 1898) (CNE) (1,480-1,510 m) (P)

Familia Phormosmatidae

*Phormosoma placenta placenta* W. Thomson, 1872 (CNE) (50-3,700 m) (GM)

Orden Diadematoida

Familia Diadematidae

*Diadema antillarum* (Philippi, 1845) (CNE) (0-400 m) (GM) (C)

*Aspidodiadema jacobyi* A. Agassiz, 1880 (CNE) (170-720 m) (GM) (C)

*Centrostephanus longispinus rubicingulus* H. L. Clark, 1921 (CNE) (33-310 m) (GM)

(C)

Familia Aspidodiadematidae

*Plesiodiadema antillarum* (A. Agassiz, 1880) (CNE) (580-3,700 m) (GM)

Orden Phymosomatoida

Familia arbaciidae

*Arbacia punctulata* (Lamarck, 1816) (CNE) (0-225 m) (GM) (C)

Orden Holoctypoida

Familia Echinoneidae

*Echinoneus cyclostomus* Leske, 1778 (CNE) (5-570 m) (C)

Orden Holasteroida

Familia Pourtalesiidae

*Cystocrepis setigera* (A. Agassiz, 1898) (P)

*Pourtalesia tanneri* A. Agassiz, 1898 (P)

Familia Plexechinidae

*Plexechinus cinctus* A. Agassiz, 1898 (1,216 m) (P)

Familia Urechinidae

*Urechinus giganteus* A. Agassiz, 1898 (1,791 m) (P) (GC)

*Urechinus loveni* (A. Agassiz, 1898) (1,546-3,553 m) (P) (GC)

*Urechinus reticulatus* H.L. Clark, 1913 (1,582 m) (P)

Orden Spatangoida

Familia Brissidae

- Brissopsis alta* Mortensen, 1907 (CNE) (25-310 m) (GM)  
*Brissopsis atlantica* Mortensen, 1907 (CNE) (26-540 m) (GM)  
*Brissopsis columbaris* A. Agassiz, 1898 (280-1,251 m) (P) (GC)  
*Brissopsis pacifica* (A. Agassiz, 1898) (0-1,430 m) (P) (GC)  
*Meoma ventricosa ventricosa* (Lamarck, 1816) (CNE) (2-200 m) (GM) (C)  
*Plethotaenia spatangoides* (A. Agassiz, 1883) (CNE) (150-795 m) (GM) (C)

Familia Lovenidae

- Lovenia cordiformis* A. Agassiz, 1872 (CNE) (0-201 m) (P) (GC)

Familia Pourtalesiidae

- Pourtalesia tanneri* A. Agassiz, 1898 (CNE) (1,450-2,380 m) (GC)

Familia Spatangidae

- Spatangus californicus* H.L. Clark, 1917 (63-594 m) (P) (GC)  
*Pseudomaretia laevis* (H. L. Clark, 1917) (6-216 m) (P) (GC)

Familia Maretiidae

- Homolampas fulva* A. Agassiz, 1879 (P)  
*Nacospatangus depressus* H.L. Clark, 1917 (P)

Familia Schizasteridae

- Brisaster latifrons* (A. Agassiz, 1898) (1,800 m) (P) (GC)  
*Brisaster towsendi* (A. Agassiz, 1898) (CNE) (262-1,393 m) (P) (GC)  
*Brissus obesus* Verrill, 1867 (CNE) (0-240 m) (P) (GC)  
*Hypselaster limicolus* (A. Agassiz, 1878) (CNE) (72-282 m) (GM)  
*Moiria atropos* (Lamarck, 1816) (CNE) (0-445 m) (GM)

Orden Echinolampadoida

Familia Echinolampadidae

- Conolampas sigsbei* (A. Agassiz, 1878) (CNE) (214-215 m) (GM)

Orden Cassiduloida

Familia Echinolampadidae

- Echinolampas depressa* Gray, 1851 (CNE) (37-310 m) (GM) (C)

Orden Clypeasteroida

Familia Clypeasteridae

- Clypeaster europacificus* H.L. Clark, 1914 (CNE) (18-200 m) (P)  
*Clypeaster ravenelli* (A. Agassiz, 1869) (CNE) (50-230 m) (GM) (C)  
*Clypeaster rosaceus* (Linnaeus, 1758) (CNE) (0-285 m) (GM) (C)  
*Clypeaster subdepressus* (Gray, 1825) (CNE) (5-312 m) (GM) (C)

Familia Dendrasteridae

*Dendraster excentricus* (Eschscholtz, 1829) (CNE) (5-228 m) (P) (GC)

Familia Fibularidae

*Echinocyamus grandiporus* Mortensen, 1907 (CNE) (150-1,500 m) (C)

Clase Holothuroidea

Orden Dendrochirotida

Familia Psolidae

*Psolidium gracile* Ludwig, 1894 (2,322 m) (P)

*Psolus cf. squamatus* (O.F. Müller, 1776) (37-1,061 m) (P)

Familia Cucumariidae

*Abyssocucumis abyssorum* (Théel, 1886) (55-4,548 m) (P) (GC)

*Abyssocucumis albatrossi* (Cherbonnier, 1941) (P)

*Cucumaria crax* Deichmann, 1941 (GC) (P)

Orden Dactylochirotida

Familia Ypsilothuriidae

*Ypsilothuria bitentaculata* (Ludwig, 1893) (P)

Orden Aspidochirotida

Familia Holothuriidae

*Holothuria (Cystipus) occidentalis* Ludwig, 1874 (CNE) (200-215 m) (GM)

*Holothuria (Cystipus) cf. inhabilis* Selenka, 1867 (CNE) (1-203 m) (P) (GC)

*Holothuria (Merthensiothuria) cf. leucospilota* (Brandt, 1835) (0-695 m) (P) (GC)

*Holothuria (Vaneyothuria) zaca* f. *iota* Deichman, 1937 (CNE) (0-220 m) (P) (GC)

Familia Stichopodidae

*Parastichopus californicus* (Stimpson, 1857) (5-5,640 m) (P) (GC).

Familia Synallactidae

*Amphigymnas bahamensis* Deichmann, 1930 (CNE) (645-700 m) (GM)

*Bathyplores bigelowi* Deichmann, 1940 (396-576m) (C)

*Bathyplores natans* (Sars, 1868) (CNE) (193-2,212 m) (GM) (C)

*Hansenothuria benti* Miller & Pawson, 1989 (CNE) (548 m) (GM)

*Mesothuria lactea* (Théel, 1886) (CNE) (600 m) (GM)

*Paelopatides confundens* Théel, 1886 (450-4,070 m) (P)

*Pseudostichopus mollis* Théel, 1886 (100-5,205) (P) (GC)

*Synallactes aenigma* Ludwig, 1893 (2,404-4,520) (P)

*Synallactes alexandri* Ludwig, 1894 (273-1,018 m) (P)

*Synallactes sagamiensis* Augustin, 1908 (128-4,297 m) (P)

*Synallactes virgulasolida* Massin & Hendrickx, 2010 (CNE) (1,030 m) (GC)

Orden Elaspodida

Familia Deimatidae

*Oneirophanta mutabilis mutabilis* Théel, 1879 (P)

Familia Laetmogonidae

*Laetmogone scotoeides* (H.L. Clark, 1913) (P)

*Laetmogone wyvillethomsoni* Théel, 1879 (P)

*Pannychia moseleyi* Théel, 1882 (CNE) (199-2,350 m) (P)

Familia Psychropotidae

*Benthodytes sanguinolenta* Théel, 1882 (S) (P)

*Benthodytes typica* Théel, 1882 (CNE) (3,545-3,635 m) (GM)

*Psychronaetes hansenii* Pawson, 1983 (P)

*Psychropotes longicauda* Théel, 1882 (P)

*Psychropotes semperiama* Théel, 1882 (CNE) (3,545-3,635 m) (GM)

Familia Elpidiidae

*Peniagone intermedia* Ludwig, 1894 (P)

*Peniagone papillata* Hansen, 1975 (P)

*Scotoplanes clarki* Hansen, 1975 (3,570-5,107 m) (P) (GC)

*Scotoplanes globosa* (Théel, 1879) (P)

Orden Apodida

Familia Synaptidae

*Leptosynapta albicans* (Selenka, 1867) (P)

Familia Chiridotidae

*Chiridota aponocrita* H. L. Clark, 1920 (P)

Orden Molpadiida

Familia Molpadiidae

*Molpadia granulata* (Ludwig, 1894) (P)

*Molpadia intermedia* (Ludwig, 1894) (CNE) (53-2,972 m) (P) (GC)

*Molpadia musculus* Risso, 1826 (CNE) (37-5,400 m) (P) (GC)

*Molpadia parva* (Théel, 1886) (CNE) (600-610 m) (GM)

*Paracaudina chilensis* (J. Müller, 1850) (P)

Familia Caudinidae

*Hedgingia californica* (Ludwig, 1894) (85-2,850 m) (P) (GC)



# RECURSOS PESQUEROS DEL MAR PROFUNDO

Adolfo Gracia, Ana Rosa Vázquez Bader<sup>1</sup>

## RESUMEN

La producción pesquera de México alcanzó sus máximos de producción desde la década de 1980. La mayor parte de los recursos pesqueros de fondos marinos históricamente se ha obtenido en las zonas someras (< 100m de profundidad) de la plataforma continental de los mares de México, además de algunas especies pelágicas que se explotan en la zona oceánica. Una alternativa para incrementar la producción pesquera silvestre en México es el descubrimiento de nuevos recursos pesqueros en aguas profundas, la cual resulta particularmente importante debido a la gran extensión de la Zona Económica Exclusiva de México prácticamente inexplorada. Existen algunos antecedentes sobre algunas pesquerías de mar profundo en México; sin embargo, su desarrollo ha sido limitado y poco consistente. En el Golfo de México se han descubierto seis especies de camarón en aguas profundas (300-1000 m) que tienen un alto valor económico y son potencialmente aprovechables. La incursión en aguas profundas del territorio mexicano y la eventual utilización de sus recursos pesqueros requiere de estrategias específicas basadas en las características particulares de su historia de vida y el potencial de renovación de sus poblaciones. Asimismo, es imperativo establecer las medidas necesarias que

<sup>1</sup> Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Apartado Postal 70-305. México, D. F. 04510. gracia@unam.mx.

aseguren el aprovechamiento de los recursos pesqueros potenciales y a la vez minimicen el impacto en los frágiles ecosistemas de aguas profundas.

**Palabras clave:** recursos pesqueros, camarón de profundidad, explotación, sustentabilidad

## ABSTRACT

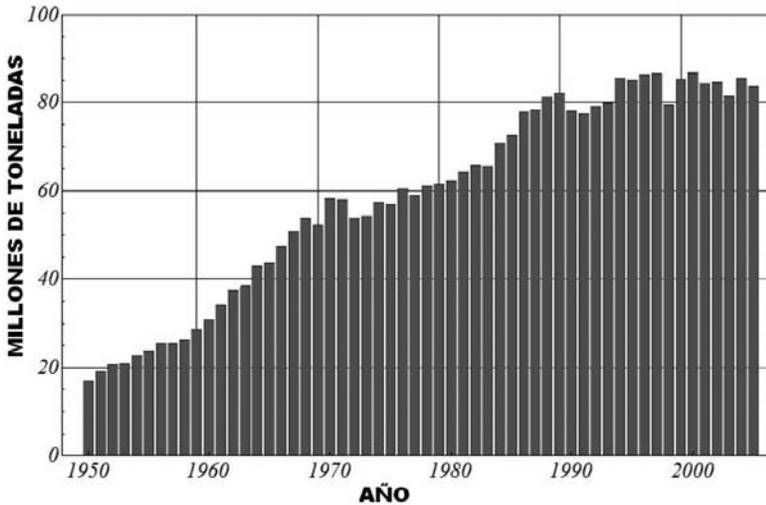
National fishery production in México attained maximum values during the 1980 decade. Most of the bottom fishery resources are exploited in shallow waters of the continental shelf of Mexican seas (< 100 m depth). Besides, some pelagic resources are utilized in oceanic waters. The only alternative to increase Mexican wild fishery production is to find unexploited deepwater resources in the Exclusive Economic Zone. This seems very attractive considering the size of this territory practically unexplored. There are some antecedents of utilizing deepwater resources in México; however, these fishery activities are scarce and limited. In the Gulf of México six deepwater shrimp species have been discovered between 300-1000 m depth, which represent a valuable potential fishery resource. Exploiting deepwater resources in Mexican ZEE requires establishing specific strategies based on its life histories as well as on its reproductive potential. Also, it is necessary to consider actions to prevent potential impacts on these fragile deepwater ecosystems.

**Keywords:** fishery resources, deepwater shrimp, exploitation, sustainability

## INTRODUCCIÓN

Los recursos pesqueros han sido la fuente primordial de alimento de origen marino a lo largo de la historia de la humanidad. Después de la Segunda Guerra Mundial la explotación de los recursos pesqueros se incrementó rápida y sostenidamente, hasta llegar a sus niveles máximos de producción en la década de los años 1990 (Fig. 1). Actualmente la producción pesquera mundial incluso muestra tendencias negativas, ya que una parte importante de los recursos pesqueros a nivel global se encuentra en estado de sobreexplotación o de agotamiento (FAO 2009). Asimismo, la constante demanda de alimentos de origen pesquero ha propiciado una expansión de la actividad de las zonas costeras hacia aguas más profundas en la zona oceánica. Por otro lado, también se ha diversificado el grupo de especies que se utilizan para consumo humano,

Figura 1. Producción pesquera marina mundial.

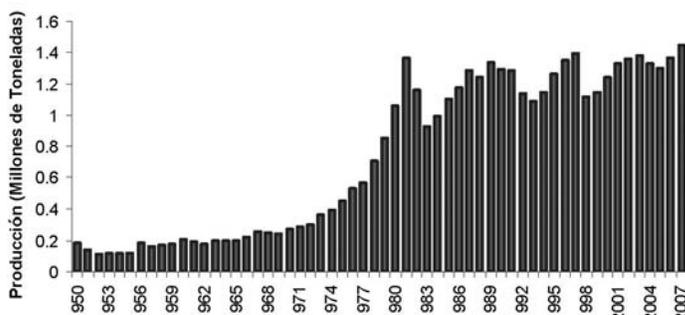


ya que cada vez se incide en organismos de niveles tróficos menores o especies comúnmente no utilizadas.

La producción pesquera de México se encuentra en una situación similar (Fig. 2) ya que alcanzó los niveles máximos de captura (~1.4 millones de toneladas anuales) durante las últimas décadas del siglo pasado (CONAPESCA 2008). La mayor parte de sus recursos pesqueros (85%) se encuentran utilizados al máximo, un número considerable de las principales especies están sobre-explotadas y no se vislumbran posibilidades de incrementar la producción pesquera solo basados en los campos y recursos pesqueros tradicionalmente explotados.

La mayoría de estos recursos pesqueros se ubican en la plataforma continental marina por debajo de los 200 m de profundidad y solo algunos recursos pesqueros como el atún, peces picudos, tiburones y algunos pelágicos menores se explotan en aguas oceánicas. Cabe señalar que la utilización de recursos pesqueros asociados a los fondos marinos más allá de la plataforma continental es prácticamente nula. Una alternativa que se ha considerado para incrementar la producción pesquera silvestre es el descubrimiento de nuevos

Figura 2. Producción pesquera de México.



recursos pesqueros en nuevas áreas de pesca en aguas profundas cuyo potencial es necesario determinar.

Debido a la trascendencia e importancia potencial para el incremento de la producción pesquera nacional, la prospección y evaluación de recursos pesqueros potenciales, de nuevas áreas de pesca y/o mayores profundidades de pesca está contemplada como uno de los componentes temáticos principales en el Plan Nacional de Investigación Científica y Tecnológica en Pesca y Acuicultura (INAPESCA 2010).

El potencial de exploración, posible detección y utilización de recursos pesqueros de mar profundo de los mares mexicanos se aprecia de una forma mas clara si se consideran dos aspectos de la Zona Económica Exclusiva Mexicana: 1) la gran extensión que alcanza, 3.149 millones de km<sup>2</sup>, la cual incluso es un tercio mayor que el territorio terrestre nacional y, 2) la extensión relativamente pequeña (11.4%) de la zona costera de donde se obtiene actualmente la mayor parte de la producción pesquera del país.

## ANTECEDENTES

Generalmente se identifica a las pesquerías de “aguas profundas” o “de mar profundo” a aquellas actividades que se llevan a cabo en recursos pesqueros asociados al fondo marino en profundidades ubicadas en el talud continental entre 300 y 1,500 m o mayores, para diferenciarlas de los escómbridos y

otras especies pelágicas que se capturan en aguas oceánicas en el ambiente pelágico. A nivel mundial las acciones dirigidas a utilizar los recursos pesqueros de aguas profundas comenzaron desde la década de 1950, generalmente con la utilización de trampas, palangres y líneas de anzuelos. Sin embargo, la sobrepesca de los recursos pesqueros costeros tradicionales propició el incremento del esfuerzo de pesca en las áreas más profundas con el fin de utilizar recursos pesqueros más alejados en campos pesqueros marginales, así como también se despertó el interés en especies menos atractivas para su comercialización. La exploración de recursos pesqueros en el océano profundo permitió el descubrimiento de nuevos hábitats tales como las montañas submarinas en las cuales se detectaron concentraciones altas de peces mesopelágicos. Las especies dominantes en estas áreas resultaron ser muy aptas para utilización comercial por su alta abundancia, así como por su tamaño y características organolépticas.

La utilización de técnicas de arrastre en aguas profundas que resultaron en un alto rendimiento en algunas especies muy abundantes como el pez “orange roughy” (*Hoplostethus atlanticus*), principalmente en los mares del hemisferio sur, estimuló la búsqueda de nuevos recursos y propició el crecimiento y diversificación de las pesquerías en mares profundos en gran parte del mundo. Las pesquerías que se han desarrollado desde entonces en mares profundos contemplan desde las artesanales hasta las altamente tecnificadas con buques de gran tamaño. Algunas de estas pesquerías están enfocadas en una sola especie; sin embargo, la mayoría son pesquerías mixtas que actúan sobre un conjunto de especies. Las bases de datos de la FAO registran 133 especies de aguas profundas que están sujetas a una pesquería (FAO 2009).

Después del período inicial de desarrollo de las pesquerías de mar profundo en los años 1950-1960, éstas alcanzaron su máximo de producción en la década de 1970 y actualmente presentan una producción total mundial constante cercana a 3.3 millones de toneladas (FAO 2009). No obstante, esta aparente estabilización de la producción se debe a que progresivamente se han desarrollado nuevas pesquerías de mar profundo que han compensado la disminución de producción de otras pesquerías previamente establecidas. Una situación común de varias pesquerías de mar profundo es que alcanzaron su máximo de explotación en el período de 1970-1990 y se vieron sujetas a una sobreexplotación lo cual ocasionó una severa disminución del tamaño de las poblaciones de varios peces tales como: la perca oceánica del Pacífico (*Sebastes*

spp), Halibut de Groenlandia, Corifenoides (*Coryphaenoides acrolepis*), Lings (*Molva molva*), Tusk (*Brosme brosme*), Pelagic armorhead (*Pseudopentaceros wheeleri*), Orange roughy (*H. atlanticus*) y Pez Sable (*Trichiurus lepturus*).

En América Latina también se han desarrollado pesquerías de aguas profundas tanto en aguas del Pacífico como del Atlántico. La mayor parte de las pesquerías se llevan a cabo en el talud continental y montañas submarinas de la ZEE de Brasil, Chile, Perú, Costa Rica, Guyana Francesa y Uruguay. Las especies que soportan estas pesquerías comprenden varias especies de camarón, cuatro especies de cangrejos geriónidos, una especie de calamar y algunos peces. En contraste con muchas áreas de los océanos donde las pesquerías de aguas profundas están orientadas a peces óseos y cartilagosos, en América Latina los invertebrados bentónicos y demersales son comparativamente más importantes (Arana *et al.* 2009).

En México no se ha desarrollado una actividad pesquera importante en aguas profundas a pesar de la gran extensión de la ZEE de ambas costas del país que contiene una gran cantidad de montañas submarinas, cañones y planicies que pudieran albergar recursos pesqueros potenciales. El único antecedente de una actividad pesquera en mar profundo lo constituye el bacalao negro (*Anoploploma fimbria*) que se distribuye entre 200 y 2,740 m de profundidad (SAGARPA 2010). El aprovechamiento de este recurso pesquero no ha sido de forma sistemática y no existe una pesquería formal, ya que ha sido capturado bajo el esquema de Pesca de Fomento en cooperación con empresas pesqueras internacionales. Las capturas obtenidas han sido muy variables con suspensiones intermitentes de la actividad pesquera debido a los bajos rendimientos obtenidos. A lo largo de su historia la captura registrada ha alcanzado un promedio anual de cerca de 49 toneladas con un máximo de producción anual de 148 toneladas en 1991. Estos niveles de productividad han ocasionado que no se mantenga una actividad pesquera constante ya que los rendimientos son muy bajos comparados con los obtenidos en otros países donde se distribuye este pez.

Recientemente en aguas mexicanas de la corriente de California al norte de Ensenada, B. C. entre 126 y 252 m de profundidad se registró la presencia del camarón mancha blanca *Pandalus platyceros* con potencial de explotación pesquero (Flores *et al.* 2004). Posteriormente se desarrolló una pesca experimental con trampas de este camarón pandálico con trampas que tuvo como conclusión que su explotación es factible y que puede ser una alternativa econó-

mica viable (Flores 2007) mediante la comercialización del producto vivo para exportación. No obstante, la pesquería se encuentra en etapa de desarrollo y es necesario establecer las reglas y estrategias para su aprovechamiento.

Diversos estudios han documentado la presencia de otras especies de aguas profundas que pudieran representar recursos pesqueros potenciales como la merluza y especies de camarones y cangrejos de profundidad; sin embargo, no se cuenta con estudios suficientes para determinar su potencial.

La Universidad Nacional Autónoma de México a través del Proyecto "Biodiversidad y Recursos Pesqueros Potenciales del Mar Profundo Golfo de México" (DGAPA PAPIIT IN223109-3) ha desarrollado un estudio exploratorio sobre las comunidades de organismos asociados al fondo marino en grandes profundidades del Golfo de México. Este estudio tiene como objetivo contribuir al conocimiento de la biodiversidad de las comunidades bentónicas en un intervalo de profundidad de 300 a 1200 m. Otro de sus objetivos principales es detectar especies que puedan ser de importancia pesquera y evaluar su potencial de utilización.

Este estudio sistemático y pionero en su tipo para esta área del Golfo de México se ha desarrollado a bordo de uno de los buques oceanográficos de la UNAM, el B/O Justo Sierra que cuenta con equipo oceanográfico de tecnología de punta para la prospección y determinación precisa del fondo marino. En especial, ecosondas monohaz y multihaz de alta precisión, un perfilador del subsuelo marino de alta penetración (> 170 m) y un equipo de posicionamiento por satélite con una precisión de 1.2 m que permiten el registro preciso de la batimetría y tipo de fondo marino.

Hasta el momento se han llevado a cabo cinco campañas oceanográficas exploratorias ubicadas a todo lo largo del Golfo de México mexicano desde la frontera con los EE.UU. hasta el mar Caribe mexicano frente a los estados de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche y Yucatán. El procedimiento para el muestreo de las comunidades bentónicas, de las cuales existe conocimiento escaso, se describe en Gracia *et al.* (2010); que consiste en la utilización de redes de arrastre tipo camaroneras de 60 pies de abertura de boca y luz de malla de 4.5 cm. Es importante destacar además que en esta área del Golfo de México Mexicano no se cuenta con estudios detallados de la orografía submarina por lo que para llevar a cabo dicho estudio primero fue necesario la localización de fondos propicios para la operación de las redes de arrastre. Una vez determinado las zonas de arrastre se efectuaron lances de 30 minutos de

duración y la captura obtenida se separó y procesó en principio a bordo del buque. Asimismo, se continuó el procesado del material biológico en el laboratorio cuando fue necesario.

En la captura obtenida, compuesta por diversos moluscos, equinodermos crustáceos y peces, destacan los camarones de profundidad que son especies distintas a los camarones que comúnmente se capturan en las zonas costeras y pertenecen a las familias Aristeidae, Solenoceridae y Penaeidae de la Superfamilia Penaeoidea. Los camarones de esta superfamilia constituyen uno de los recursos más valiosos de mar profundo. Entre otras especies de camarón que se registraron en el estudio prospectivo en aguas profundas del Golfo de México, Gracia *et al* (2010) señalan que seis especies resaltan tanto por su abundancia como por su tamaño: el camarón rojo gigante, *Aristaeomorpha foliacea* (Risso 1827), el camarón escarlata, *Aristaeopsis edwardsiana* (Johnson 1867), el camarón rojo real, *Pleoticus robustus* (Smith 1885), el camarón púrpura, *Aristeus antillensis* A. Milne Edwards y Bouvier, 1909, el camarón rosado moteado, *Penaeopsis serrata* Bate, 1881 y el camarón rosa, *Parapenaeus americanus* (Smith, 1881), las cuales pueden ser potencialmente aprovechables.

La mayor parte de estas especies tiene una distribución amplia a nivel mundial y en algunos casos sostienen pesquerías bien establecidas de alta importancia económica. Por ejemplo, el camarón rojo gigante *A. foliacea*, conocido como camarón moruno o rasposo en Brasil, tiene una distribución cosmopolita, ya que se ha registrado en el Atlántico Occidental desde el sur de Massachussets, EE.UU. hasta Rio Grande do Sul en Brasil. También se distribuye en el Atlántico Oriental desde la Bahía de Biscay, Francia al sur de África, incluyendo el Mar Mediterráneo y se encuentra además en el Océano Indopacífico. La explotación del camarón rojo gigante en el Mar Mediterráneo constituye la base de una actividad pesquera muy redituable y representa el recurso pesquero más importante de mar profundo del área (D'Onghia *et al.* 1998; Belcari *et al.* 2003). En América se ha iniciado recientemente una pesquería sobre esta especie en Brasil desde 2003 (Pezzuto *et al.* 2006, Dallagnolo *et al.* 2009).

El camarón escarlata o carabinero, *A. edwardsiana* también tiene una distribución geográficamente amplia ya que se le encuentra tanto en el Océano Atlántico Occidental desde Canadá hasta Uruguay, como en el Océano Atlántico Oriental desde el Sur de Portugal hasta África. En el Océano Indopacífico se distribuye desde Mozambique hasta Australia. Esta especie soporta una pesquería comercial en África del Norte. En América Latina se ha utilizado estacio-

nalmente en Guyana Francesa (Guéguen 2000) y más ampliamente en el mar profundo de Brasil (Pezzuto et al. 2006, Dallagnolo et al. 2009).

El camarón rojo real *P. robustus* tiene una distribución limitada al Atlántico Occidental desde EUA, Golfo de México, Mar Caribe hasta la Guyana Francesa. Esta especie sostiene una pesquería pequeña, pero bien establecida, frente a las costas de Florida (Jones et al.1994; Stiles et al. 2007).

El camarón escarlata o alistado, *A. antillensis* también tiene una distribución restringida al Atlántico Occidental desde Delaware, EUA hasta el norte de Brasil. En la Guyana Francesa ha sostenido una pesquería estacional y en Brasil se explota en combinación con el camarón rojo gigante y el carabinero.

El camarón rosado moteado *P. serrata* se distribuye tanto en la parte Occidental como Oriental del Océano Atlántico, mientras que el camarón rosa, *P. americanus* solo se ha registrado en la zona Occidental del Océano Atlántico desde el Golfo de México hasta Uruguay. Estas dos especies de camarón son de importancia comercial potencial, pero hasta el momento no están sujetos a una pesquería formal.

De acuerdo a lo señalado por Gracia et al. (2010), los camarones de aguas profundas más importantes en términos de biomasa en el Golfo de México son el camarón rojo gigante, el camarón escarlata y el camarón rojo real que representan casi el 90% de la captura en peso (Fig. 3). Además estas tres especies presentan una talla grande comercialmente muy apreciada. Las tres especies restantes tienen menor peso en conjunto así como tallas más pequeñas y constituyen el 10 % restante (Fig. 4).

Fig. 3. Principales especies de camarones Penaeoideos de aguas profundas del Golfo de México.

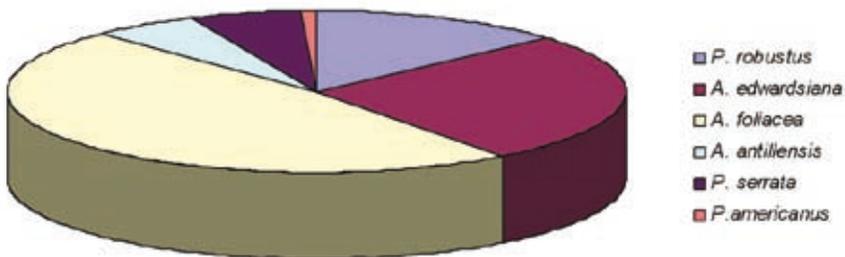
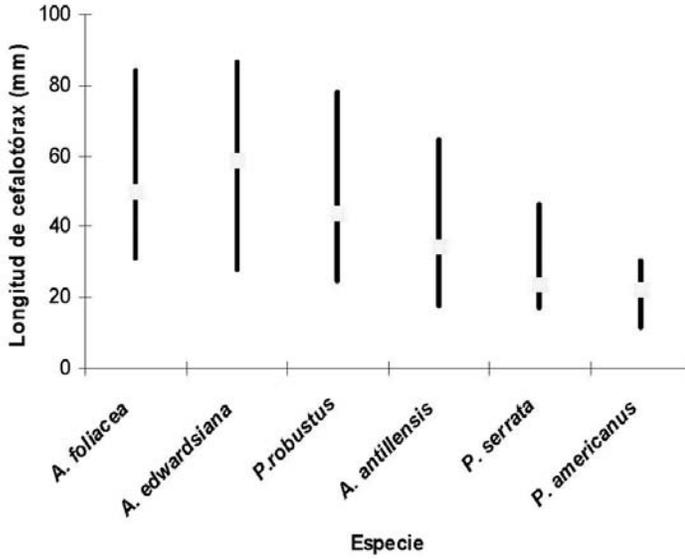


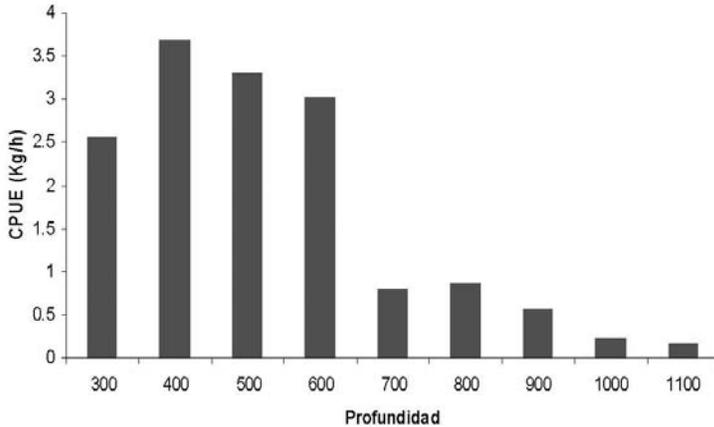
Figura 4. Tallas de las especies de camarones Penaeoideos de aguas profundas del Golfo de México.



Los diversos muestreos realizados muestran que las seis especies de camarón de aguas profundas se encuentran presentes lo largo de todo el Golfo de México. La captura obtenida, estandarizada por hora de pesca, en los diversos lances efectuados presenta una alta variabilidad desde valores muy bajos hasta valores de 16.4 kg/h en el intervalo de profundidad examinado de 300 a 1200 m. Cada una de esas especies presenta un patrón de distribución batimétrico específico; sin embargo, se observa que las mayores capturas de camarón en conjunto se obtienen entre 300 y 700 m de profundidad (Fig.5) (Gracia *et al.* 2010).

Según Gracia *et al.* (2010) los valores de abundancia de camarones de profundidad son comparables a los obtenidos en pesquerías de camarón de aguas profundas en otras partes del mundo, como el Mar Mediterráneo, Atlántico Oriental y Brasil. También es pertinente mencionar que estos registros de captura se obtuvieron mediante estudios de tipo exploratorios y por lo general no son tan precisos como cuando se desarrolla una explotación pesquera sistemática. En algunos casos, como la pesquería recientemente desarrollada

Figura 5. Captura por Unidad de Esfuerzo (Kg/h) por estrato de 100 de profundidad registrada en las campañas exploratorias desarrolladas en el Golfo de México.



en Brasil, los estudios científicos previos concluyeron que la abundancia de recursos pesqueros de camarón de profundidad no era suficiente para sostener una explotación económicamente sustentable; sin embargo, finalmente se estableció una pesquería rentable sobre estos camarones de aguas profundas (Dallagnolo *et al.* 2009).

A pesar de que los rendimientos de las pesquerías de camarón de aguas profundas no son tan altos o redituables como las pesquerías de camarón de aguas someras, el alto valor por unidad de peso que tienen en el mercado internacional los hace atractivos desde el punto de vista comercial. Por otro lado, la extensión del área donde se puede encontrar este recurso pesquero, lo caracteriza como un recurso potencialmente muy atractivo para su utilización.

La importancia de este recurso pesquero potencial se refuerza si se considera que los rendimientos estimados por Gracia *et al.* (2010) son comparables, e incluso superiores, a los de las pesquerías de camarón rosado (*Farfantepenaeus duorarum*) y camarón blanco (*Litopenaeus setiferus*) que actualmente se encuentran sobreexplotados en aguas someras del Golfo de México y que sostienen una pesquería regular (INP 2007). Dado que los camarones de aguas profundas no alcanzan rendimientos tan altos como los de zo-

nas someras, es improbable que lleguen a tener la productividad del camarón café (*Farfantepenaeus aztecus*) que es la única especie de camarón de aguas someras que no está sobreexplotada y que actualmente sostiene en su mayor parte la pesquería de camarón del Golfo de México (Gracia y Vázquez-Bader, 1999, Gracia 2004).

Generalmente los volúmenes totales anuales de captura de las diversas especies de camarón de aguas profundas que actualmente se explotan son relativamente bajas ya que fluctúan alrededor de 100 a 200 toneladas (Stiles *et al.* 2007, Dallagnolo *et al.* 2009) con excepción de *A. foliacea* en el Estrecho de Sicilia que alcanza 1,000 toneladas anuales (Bianchini *et al.* 2003). Para el caso de los camarones descubiertos en el Golfo de México es factible esperar una situación similar en la que el potencial máximo de explotación no alcance magnitudes superiores a 200-400 toneladas anuales. Aunque es necesario realizar los estudios pertinentes para establecer el potencial de explotación, las características de las especies de camarón de aguas profundas no permiten suponer una alta productividad. No obstante, por su alto valor económico y por las condiciones del recurso camarón de aguas costeras, estas especies de camarón de aguas profundas representan un recurso potencial alternativo de gran importancia para la industria pesquera del Golfo de México.

## EXPECTATIVAS Y VULNERABILIDAD

La existencia de recursos pesqueros potenciales en el Golfo de México fortalece la posibilidad de desarrollar actividades pesqueras en aguas profundas tanto en el mismo Golfo de México como eventualmente en el Océano Pacífico Mexicano, las cuales actualmente no se llevan a cabo en gran escala. Sin embargo, la utilización de los recursos pesqueros de mar profundo requiere de estrategias específicas basadas en las características ecológicas particulares, historia de vida de las especies y del papel ecológico que estos desempeñan en estos distintivos ecosistemas.

Los ecosistemas de mar profundo y los recursos pesqueros de aguas profundas son altamente vulnerables a la explotación pesquera. Las experiencias en pesquerías de mar profundo han demostrado que el agotamiento de los stocks puede ser rápido y la recuperación muy lenta. Gran parte de los stocks pesqueros de diversos peces de mar profundo en el Atlántico Norte, el “orange roughy” en Nueva Zelanda y Australia han sido severamente agotados hasta

cerca del 20% de la abundancia que tenían en la fase pre-explotada (Large et al. 2002, Koslow et al. 2000).

También en el caso de los crustáceos se tienen experiencias similares ya que por ejemplo, el crecimiento rápido del esfuerzo pesquero en la recientemente desarrollada pesquería de camarones de mar profundo en Brasil condujo a un decremento de las tasas de captura de *A. edwardsiana* y una alternancia en la dominancia de especies, lo cual condujo a una mayor representatividad de *A. foliacea* en la captura (Dallagnolo et al. 2009). Otro caso similar ocurrió en la pesquería de camarones de profundidad en Costa Rica donde las capturas disminuyeron sustancialmente (Werthman y Nielsen-Muñoz, 2009)

Las características de la historia de vida de los organismos de mar profundo explican este comportamiento y además están directamente relacionadas con su conservación y manejo. A las especies de mar profundo, en particular a los peces, se les cataloga como organismos con estrategias tipo “K”, con características demográficas muy diferentes a las de las especies de la plataforma continental. Por lo general, tienen una alta longevidad, madurez tardía, crecimiento lento y potencial reproductivo bajo. No obstante, este patrón no es el típico para todas las especies ya que algunas de ellas presentan características que son comparables a las de las especies de aguas someras. Entre los peces, el “orange roughy” es el representante extremo ya que tiene una longevidad mayor a 150 años, tasas de crecimiento bajas y edad de reclutamiento alta (30 años), aunque existen otros peces como el alfonsino (*Beryx splendens*) que tienen una longevidad menor y tasas de crecimiento y de reproducción más similares a las de las especies de aguas someras.

En el caso de los camarones de mar profundo también se presenta un patrón similar, ya que aunque estos crustáceos tienen una longevidad menor y tasas de crecimiento y tasas reproductivas más altas que los peces de aguas profundas; las características de historia de vida son distintas a la de los camarones de aguas someras con rasgos más orientados a organismos tipo “K”. Por ejemplo, la longevidad media de los camarones de los géneros *Farfantepenaeus* y *Litopenaeus* es alrededor de 14-16 meses (Gracia 1989, 1995, 1997) mientras que en los camarones de aguas profundas de las familias Aristeidae y Solenoceridae se ha registrado una longevidad media de 5-7 años (D’Onghia et al. 1998).

Estas características de la historia de vida de los organismos de mar profundo tienen profundas implicaciones demográficas ya que propicia que se

ubiquen en el extremo superior del intervalo de afectación por explotación pesquera. Las tasas bajas de crecimiento, de reproducción y de mortalidad están asociadas a una baja productividad, lo cual redundaría en una tasa baja de explotación sustentable. El incremento descontrolado de esfuerzo pesquero, al igual que en los recursos pesqueros costeros, puede conducir a estados de sobreexplotación; solo que el agotamiento en recursos pesqueros de mar profundo es más rápido y la recuperación por lo general es más lenta y compleja.

Por otro lado, el agotamiento de las especies sujetas a explotación en mar profundo puede tener varios efectos a largo plazo en las relaciones ecológicas del ecosistema; no obstante, se conoce poco sobre su impacto en la viabilidad de las poblaciones, en el potencial de recuperación o en las interacciones depredador-presa.

Otro de los temas que causa una gran preocupación a nivel mundial es el impacto que las pesquerías de arrastre ocasionan en las comunidades bentónicas, el cual puede llegar a ser potencialmente grave. Particularmente por el efecto sobre la biodiversidad a causa de la remoción sistemática de la fauna de acompañamiento que se obtiene en las operaciones de pesca, la cual a menudo es descartada; y también por el daño ocasionado al hábitat debido al efecto mecánico de las redes sobre las comunidades sésiles tales como corales de mar profundo y otros organismos. Además, el efecto sobre los componentes del ecosistema de mar profundo se ve incrementado por los altos niveles de endemismo local y la fragilidad del mismo ecosistema.

La perturbación de comunidades coralinas de mar profundo es el ejemplo más dramático ya que están conformadas por corales, a menudo por una sola especie, que tienen tasas de crecimiento muy lentas, de unos cuantos milímetros al año; y que se han desarrollado a lo largo de miles de años (Rogers 1999). Otro hábitat altamente vulnerable a la pesca son las laderas de las montañas submarinas donde se han localizado grandes concentraciones de recursos pesqueros tales como el "orange roughy". La acción de las redes de arrastre ocasiona daños a la fauna benthica asociada a sustratos duros que tiene una tasa de recuperación muy lenta (Koslow *et al.* 2000, Roberts 2002). Con el fin de proteger estas delicadas comunidades de mar profundo se ha propuesto la creación de reservas marinas cerradas a la pesca. No obstante, algunos autores señalan que estas acciones no son suficientes y que en vez de considerar la utilización de los recursos pesqueros de mar profundo se deben orientar los esfuerzos a la conservación de estos recursos y del ecosistema de mar profundo mediante una prohibición total

de actividades. Esto último lógicamente genera una gran controversia con la industria pesquera y remite la discusión a las posiciones extremas entre utilización y conservación de los recursos.

Algunos autores señalan que los stocks de peces de mar profundo deben considerarse como recursos no renovables debido a sus características demográficas (Merret y Haedrich 1997). Este argumento puede ser discutible; sin embargo, es un hecho que las características biológicas de los recursos pesqueros de mar profundo obligan a re-evaluar las estrategias de explotación que se han utilizado en los recursos pesqueros tradicionales de aguas someras y pensar en nuevas estrategias acordes a las características de las especies biológicas de las especies de mar profundo. En varios de los casos se han seguido estrategias de aprovechamiento que se acercan más al tipo de “explotación minero”, ya que prácticamente se utilizan los recursos hasta que se agotan. Por ello es particularmente importante para nuestro país, que en el caso de que se desarrollen pesquerías en aguas profundas, se tomen en consideración las experiencias y conocimiento desarrollado hasta el momento en otras partes del mundo donde ya se ha llevado a cabo la explotación de estos recursos pesqueros y que en algunos casos han sido diezmados rápidamente.

## CONCLUSIONES

La necesidad creciente de generar alimentos de origen pesquero ha reavivado la intención de buscar y aprovechar recursos pesqueros potenciales en aguas profundas de nuestros mares. También existen opiniones, reforzadas por las experiencias de explotación de mares profundos a nivel internacional, tendientes a la conservación total de los frágiles ecosistemas de mar profundo. Tanto la necesidad de alimentos como la protección de los delicados ecosistemas de mar profundo plantean la necesidad de buscar un balance entre ambas actividades.

En todo caso la incursión de México en el aprovechamiento de recursos pesqueros potenciales de mar profundo requiere tanto de iniciativas que lleven a conocer la existencia y potencial de los recursos como de estrategias para su aprovechamiento, conservación y uso integral de dichos recursos dentro de un contexto de respeto a los frágiles ecosistemas de mar profundo, por ejemplo: 1) Evaluación de las existencias de los recursos, delimitación de campos pesqueros, definición de niveles de explotación y conocimiento

de la biología y ecología de dichos recursos pesqueros, 2) Adoptar enfoques distintos en el aprovechamiento de los recursos con el fin de desarrollar una pesca precautoria basada en el potencial de renovación de los recursos pesqueros y en la fragilidad del ecosistema marino para evitar caer en la estrategia tipo “minero” de utilización de estos recursos de profundidad y minimizar el impacto en el ecosistema, 3) Aprovechamiento integral de la fauna acompañante de los recursos pesquero objetivo y 4) explorar nuevas formas de procesamiento, mercadeo y comercialización de los recursos pesqueros potenciales de mar profundo que permitan su aprovechamiento óptimo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arana, P., J.A. Álvarez Pérez y P. R. Pezzuto. 2009. Deep-sea fisheries off Latin America: an introduction. En: P. Arana, J.A. Álvarez Pérez y P. R. Pezzuto (eds.). Deep-sea fisheries off Latin America. *Latin American Journal of Aquatic Research*, Vol. 37 (3): 281-284.
- Belcari, P., C. Viva, M. Mori y S. de Ranieri. 2003. Fishery and biology of *Aristaeomorpha foliacea* (Risso, 1827) (Crustacea: Decapoda) in the Northern Tyrrhenian Sea (Western Mediterranean). *J. Northw. Atl. Fish. Sci.* 31:195-204.
- Bianchini, M. L., Ragonese, S. y Levi, D. 2003. Management hypotheses to improve yield-per-recruit and economic returns in the red shrimp (*Aristaeomorpha foliacea*) fishery of Southern Sicily (Mediterranean Sea). *J. Northw. Atl. Fish Sci.*, 31:233-243.
- CONAPESCA, 2008. *Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca*. Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca, SAGARPA. Mazatlán, México: 211 pp.
- Dallagnolo, R., J. A. Álvarez Pérez, P. R. Pezzuto y R. Wahrlich. 2009. The deep-sea shrimp fishery off Brazil (Decapoda: Aristeidae): development and present status. En: P. Arana, J.A. A. Pérez y P.R. Pezzuto (eds.). Deep-sea fisheries off Latin America. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 37(3): 327-346.
- D'Onghia, G., A. Tursi, P. Maiorano, M. Panza. 1998. Distribution, biology, and population dynamics of *Aristaeomorpha foliacea* (Risso, 1827) (Decapoda, Natantia, Aristeidae) in the north-western Ionian Sea (Mediterranean Sea). *Crustaceana* 71:518-544.
- FAO, 2009. *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2008*. Departamento de Pesca y Acuicultura de la Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la Alimentación, Roma 2009: 196 pp.

- Flores, J. 2007. El camarón *Pandalus* spp. (*Pandalus platyceros*). Una nueva alternativa para el sector pesquero. *Industria Acuícola*, Vol. 3 No. 3: 12-16.
- Flores, J., M. E. Hendrickx y H. Chapa- Saldaña. 2004. Capturas del camarón mancha blanca, *Pandalus platyceros* Brandt, 1851 (Caridea: Pandalidae), en la costa oeste de Baja California, México con una breve revisión de su biología y su pesca. *Contribuciones al Estudio de los Crustáceos del Pacífico Este*, Vol. 3: 199-211.
- Gracia, A. 1989. Ecología y Pesquería del Camarón Blanco *Penaeus setiferus* (Linnaeus, 1767) en la Laguna de Términos-Sonda de Campeche. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 125 pp.
- Gracia, A. 1995. Impacto de la pesca artesanal sobre la producción de camarón rosado *Penaeus Farfantepenaeus duorarum* Burkenroad, 1939. *Ciencias Marinas*, 21: 343-359.
- . 1997. Simulated and Actual Effects of the Brown Shrimp, *Penaeus aztecus*, Closure in Mexico. *Mar. Fish. Rev.*, 59: 18-24.
- . 2004. Aprovechamiento y conservación del recurso Camarón. En: Caso, M., I. Pisanty y E. Ezcurra (comps.). *Diagnóstico ambiental del Golfo de México*, Vol. 2. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, A. C., Harte Research Institute for the Gulf of Mexico Studies. pp. 713-725.
- Gracia, A. y A. R. Vázquez-Bader. 1999. Shrimp fisheries in the south Gulf of Mexico: present and future management alternatives. En: Kumpf, H., D. Steidinger y K. Sherman (Eds.). *The Gulf of Mexico large marine ecosystem: assessment, sustainability, and management*, Berlin: Blackwell Science. pp. 205-234.
- Gracia, A., A. R. Vázquez-Bader, E. Lozano-Alvarez y P. Briones-Fourzán. 2010. Deep-water shrimps (Crustacea: Penaeoidea) off the Yucatan Peninsula (Southern Gulf of Mexico): a potential fishing resource?. *Journal of Shellfish Research*, Vol. 29 (1): 37-43.
- Guéguen, F. 2000. Distribution et abondance des crustacés décapodes du talus continental (200-900 m) de Guyane Française. *Crustaceana* 73:685-703.
- INAPESCA, 2010. Programa Nacional de Investigación Científica y Tecnológica en Pesca y Acuicultura. Instituto Nacional de la Pesca. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. [www.inapesca.gob.mx](http://www.inapesca.gob.mx).
- INP. 2007. Instituto Nacional de la Pesca, 2007. Análisis de las poblaciones de camarón en la Sonda de Campeche y Tabasco. <http://www.inp.sagarpa.gob.mx/Dictámenes/2007/dictamencierrecamaronsondaJurado%20011107.pdf>.
- Jones, C. J., J. M. Nance y W. O. Antozzi Jr. 1994. *A review of the royal red shrimp resource and fishery in the Gulf of Mexico*. Tampa, Florida: Gulf of Mexico Management Council. 14 pp.

- Koslow, J. A., G. W. Boehlert, J. D. M. Gordon, R. L. Haedrich, P. Lorance y N. Parin. 2000. Continental slope and deep-sea fisheries: implications for a fragile ecosystem. *ICES J. Mar. Sci.* 57:548–557.
- Large, P. A., C. Hammer, O. A. Bergstad, J.D.M. Gordon y P. Lorance. 2002. Deep-water Fisheries of the Northeast Atlantic: II Assessment and Management Approaches. *J. Northw. Atl. Fish. Sci.*, Vol. 31: 151-163.
- Merret, N. R. y R. L. Haedrich. 1997. *Deep-sea Demersal Fish and Fisheries*. Chapman and Hall, London. 282 pp.
- Pezzuto, R., J. A. A. Pérez y R. Wahrlich. 2006. Deep-sea shrimps (Decapoda: Aristeidae): new targets of the deep-water trawling fishery in Brazil. *Braz. J. Oceanogr.* 54:123–134.
- Roberts, C. M. 2002. Deep impact: the rising toll of fishing in the deep sea. *Trends Ecol. Evol.* 17:242–245.
- Rogers, A.D. 1999. The biology of *Lophelia pertusa* (Linnaeus 1758) and other deep-water reef-forming corals and impact from human activities. *Int. Rev. Hydrobiol.* 84, 315-406.
- SAGARPA. 2010. Carta Nacional Pesquera. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. *Diario Oficial de la Federación de los Estados Unidos Mexicanos*, 1-94.
- Stiles, M. L., E. Harrould-Kolieb, P. Faure, H. Ylitalo-Ward y M. F. Hirshfield. 2007. *Deep sea trawl fisheries of the Southeast US and the Gulf of Mexico: rock shrimp, royal red shrimp, Callico scallops*. Washington, DC: Oceana. 18 pp.
- Wehrtmann, I.S. y V. Nielsen-Muñoz. 2009. The deepwater fishery along the Pacific coast of Costa Rica, Central America. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 37(3): 543-554.

# ANÁLISIS DE VACÍOS Y OMISIONES EN CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD DEL MAR PROFUNDO

Verónica Aguilar Sierra<sup>1</sup>

## RESUMEN

En el contexto del análisis de vacíos y omisiones en conservación de la biodiversidad marina de México, se identificaron 26 sitios de mar profundo que representan 25% del número total de los sitios prioritarios (105) y que en términos de superficie cubren un área de 4,743,622 ha que representan cerca del 14% del área total de todos los sitios. La mayoría de ellos se localizan en el Golfo de California con nueve sitios y el Pacífico Tropical con siete. Están considerados como objetos importantes de conservación por su complejidad estructural y funcional a los cañones submarinos, montes submarinos, dorsales y trincheras, y por sus características biológicas y fisicoquímicas a los arrecifes profundos de corales y agregaciones de esponjas, ventilas hidrotermales e infiltraciones de metano e hidrocarburos. La priorización de los sitios resultó en 15 sitios de extrema importancia, 6 muy importantes y 5 importantes.

Estos sitios funcionan como oasis de los cuales depende un gran número de especies oceánicas, además de mantener una interacción funcional importante con corredores

<sup>1</sup> Tomado del libro: CONABIO-CONANP-TNC-Pronatura. 2007. *Análisis de vacíos y omisiones en conservación de la biodiversidad marina de México: océanos, costas e islas*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, The Nature Conservancy-Programa México, Pronatura, A.C. México, D.F.

migratorios y con la columna de agua. En la actualidad están decretados dos santuarios correspondientes a las Ventilas hidrotermales de la Cuenca de Guaymas y la Dorsal del Pacífico Oriental. Sin embargo, se requieren de esfuerzos mayores para incorporar otros ecosistemas que por su importancia ecológica deben ser protegidos para asegurar su permanencia, así como cubrir los grandes vacíos en el conocimiento detallado de estos ambientes.

Palabras clave: sitios prioritarios de mar profundo, biodiversidad marina, análisis de vacíos y omisiones en conservación

#### ABSTRACT

In the context of the gap and omissions analysis in conservation of marine biodiversity of Mexico, 26 deep sea sites were identified representing 25% of the total number of priority sites (105), and in terms of area it represents 4,743,622 ha that means almost 14% of the total area of all sites. Most of them are located in the Gulf of California with nine sites and in the Tropical Pacific with seven. Considered as the most important conservation objects are, by its structural and functional complexity, the submarine canyons, seamounts, mid-ocean ridges and trenches; and by its biological and physicochemical characteristics, the cold water deep sea corals and sponge aggregations, hydrothermal vents, cold seeps and gas hydrates communities. Of the 26 deep sea priority sites, 15 were of extreme importance, 6 very important and 5 important. These sites can act as biodiversity hotspots hosting and attracting a large number of species as well as maintaining an important functional interaction with migratory corridors and the water column above. Actually there are two deep-sea marine protected areas established, the Guaymas basin's hydrothermal vents and the Western Pacific Ridge. However, major efforts are required to incorporate other ecosystems of utmost importance to assure its permanence and to fulfill the gaps with a more detailed knowledge of these environments.

Keywords: Deep sea priority sites, marine biodiversity, gap analysis in conservation

## INTRODUCCIÓN

Se conoce como mar profundo la región marina ubicada a más de 200m de profundidad, siendo la ausencia de luz lo que determina el límite de esta región al comienzo del talud continental. Este espacio corresponde a 64% de la superficie del planeta y a 90% de la parte oceánica, con una profundidad promedio de 3,730 m, y donde 60% del piso oceánico se encuentra por debajo de los 2000 m (UNEP 2007). A diferencia de como se creía, el mar profundo es un ambiente altamente dinámico, en términos espacial y temporal, con una sorprendente variedad de ecosistemas y especies de todos tipos y tamaños, y directamente relacionado con la vida en el planeta.

Tan solo considerando las cifras de la extensión marina y la ubicación geográfica de México nos podemos dar cuenta claramente de la posición excepcional del país en cuanto a su diversidad. El mar territorial abarca alrededor de 231 000 km<sup>2</sup> y la zona económica exclusiva (ZEE) tiene un área de 3,149,920 km<sup>2</sup> que equivale a 1.6 veces la superficie continental. Esta zona se extiende desde la costa hasta los abismos, que en nuestro territorio no exceden los 4,000 m de profundidad. La profundidad máxima en el Golfo de México es de 3,900 m, y se localiza en la parte central occidental de la cuenca conocida como planicie abisal de Sigsbee, mientras que en el Caribe Mexicano, el Golfo de California y el Pacífico, la plataforma continental es estrecha y el talud cae abruptamente hacia la zona abismal que no excede de 3,000 m. La temperatura promedio es de 4°C y, a excepción de la zona de mínimo de oxígeno que se encuentra a 500 m, las aguas profundas provenientes del hundimiento de aguas superficiales subpolares en altitudes altas se encuentran bien oxigenadas. Los fondos están conformados por sedimento fino de material carbonatado procedente de los esqueletos de foraminíferos, cocolitofóridos y conchas de pterópodos en el Golfo de México, de silicatos en el Pacífico y de material arrecifal en el Caribe (Escobar 2000).

Desde una perspectiva biológica, las aguas profundas incluyen una gran variedad de estructuras geológicas y hábitats que determinan fuertemente la distribución de los organismos de mar profundo. Entre ellos destacan los cañones submarinos, planicies abisales, dorsales, trincheras, montes submarinos, diapiros y escarpes, así como las comunidades de ventilas hidrotermales, infiltraciones de hidrocarburos y metano, arrecifes profundos de corales y de esponjas, estructuras de barita, sedimentos laminados de diatomeas,

zonas de mínimo de oxígeno y tapetes bacterianos. Estos sitios funcionan como oasis de los cuales dependen un gran número de especies oceánicas, además de mantener una interacción funcional importante como corredores migratorios y con la columna de agua. En ellos habitan todo tipo de organismos, desde generalistas hasta especies altamente especializadas que viven y se alimentan únicamente de huesos de ballenas. Se estima que la magnitud de la biodiversidad de estos ambientes puede alcanzar los diez millones de especies (UNEP 2006).

## ANTECEDENTES

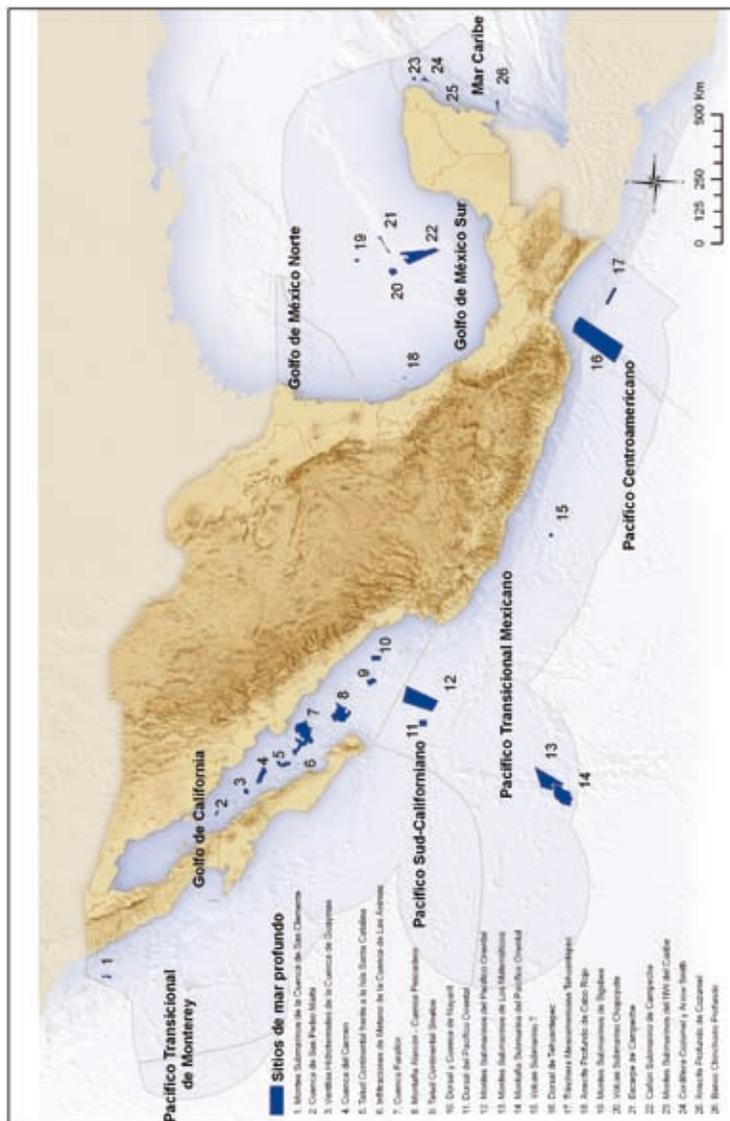
Durante la Séptima Conferencia de las Partes de la Convención sobre Diversidad Biológica (CDB) en 2004, se acordó fortalecer los sistemas de áreas protegidas mediante el Programa de Trabajo sobre Áreas Protegidas. Con ello, los países adquirieron el compromiso de determinar los vacíos y las omisiones en la conservación de la biodiversidad (análisis gap) con el fin de tener una red efectiva de áreas protegidas que representen adecuadamente a la biodiversidad, así como fortalecer los planes de manejo y los mecanismos de financiamiento (SCDB 2004). Para ello se conformó un grupo de trabajo que decidió llevar a cabo diferentes análisis de vacíos y omisiones para determinar las prioridades de conservación *in situ*, con el fin de que puedan servir de guía para la creación de nuevas AP en México, así como para analizar otros instrumentos y estrategias complementarias para su conservación.

## RESULTADOS

En el contexto del análisis de vacíos y omisiones en conservación de la biodiversidad marina, el presente artículo sólo se enfoca en aquellos sitios prioritarios de mar profundo (SMP) que por primera vez son identificados y delimitados con base en estudios existentes al respecto.

Se identificaron 26 sitios de mar profundo que representan 25% del número total de los sitios prioritarios (105) para la conservación de la biodiversidad marina de México (Figura 1). En términos de superficie cubren un área de 4 743 622 ha que representan cerca del 14% del área total de todos los sitios. La mayoría de ellos se localizan en el Golfo de California con nueve sitios y el Pacífico Tropical con siete (Tabla 1).

# ¿TÍTULO?



**Tabla 1. Número de sitios de mar profundo por región marina**

Regiones marinas	No. de sitios de mar profundo
Pacífico Noroeste	1
Golfo de California	9
Pacífico Tropical	7
Golfo de México	5
Mar Caribe	4

Entre las estructuras geológicas que por su complejidad estructural y funcional son consideradas como objetos importantes de conservación se pueden mencionar a los cañones submarinos, montes submarinos, dorsales y trincheras.

Los cañones submarinos, localizados en siete SMP, son rasgos comunes del talud continental y de algunas islas oceánicas que debido a su complejidad estructural son considerados como cañones únicos. Algunos de ellos pueden alcanzar longitudes de más de 300 km y alturas de cerca de 5 km, lo que significa tres veces más profundo que el Gran Cañón. Los cañones submarinos actúan no sólo como trampas de materia orgánica, sino como corredores por donde es transportada grandes cantidades de materiales diversos de la plataforma continental hacia la cuenca oceánica. Por esta razón soportan altas densidades y biomásas de vida marina además de ser considerados áreas de crianza y de coexistencia de la fauna abisal y de plataforma. Su alta productividad los hace importantes también como áreas de alimentación para especies pelágicas y algunas poblaciones de cetáceos (WWF/IUCN/WCPA2001; UNEP2006).

Los montes submarinos, que se encuentran en cinco SMP, generalmente de origen volcánico y en ocasiones tectónico, se caracterizan por presentar grandes variaciones en tamaño y altura y pueden encontrarse solos o formando cadenas o conjuntos. Se estima que existen alrededor de 100 000 montes submarinos en todo el mundo, sin embargo sólo se han estudiado alrededor de 200 a nivel mundial. Ecológicamente, los montes submarinos son considerados centros de desarrollo de nuevas especies, oasis oceánicos que facilitan la dispersión y el movimiento de los organismos y refugio de especies relictas. Su naturaleza insular les permite albergar una alta riqueza de especies y endemismos de peces, corales, esponjas, hidroides y anémo-

nas diferentes de otros montes submarinos vecinos. También interactúan de manera directa con el océano produciendo remolinos que atrapan el plancton que viaja en las corrientes favoreciendo así la productividad, lo que los convierte en sitios de alimentación, crianza y reproducción de especies pelágicas y bentónicas de mar profundo, que resultan muy atractivos para organismos visitantes como tiburones, peces espada, atunes, rayas, tortugas y ballenas (UNEP 2006).

Es importante mencionar que tanto los cañones como los montes submarinos se han convertido en blancos de las pesquerías comerciales sobretodo las de arrastre de mar profundo, las cuales se han incrementado más rápido que la investigación y el conocimiento de estos ecosistemas por parte de los científicos. Muchas de estas especies son extremadamente longevas, con una capacidad regenerativa muy limitada y tasas de crecimiento y reclutamiento muy bajas por lo que su recuperación puede tardar décadas y a veces hasta siglos.

Las trincheras, que se extienden a lo largo de los márgenes continentales y de islas de arcos en las llamadas zonas de subducción, presentan profundidades entre los 6,000 y 11,000 m, son de formas alargadas y angostas, y están sujetas a altas tasas de sedimentación. Estos ambientes son poco estables debido a los altos niveles de actividad sísmica y a los patrones complejos de sedimentación, sin embargo son muy estables en términos de temperatura, salinidad y concentración de oxígeno. Se caracteriza por presentar una fauna hadal única, compuesta principalmente por crustáceos, holotúridos, moluscos bivalvos, poliquetos, foraminíferos y bacterias. Mucha de esta fauna es endémica, altamente especializada y adaptada a condiciones tróficas poco usuales, presiones hidrostáticas extremas y frecuentes disturbios físicos. Se tienen reportes de gigantismo en isópodos y tanaidaceos, así como de organismos ciegos y sin pigmentación (WWF/IUCN/WCPA 2001). En México este ambiente se encuentra representado por la Trinchera Mesoamericana.

La principal amenaza a la biodiversidad en las trincheras o zonas de subducción es el envenenamiento de los organismos por desechos tóxicos vertidos en ellos. Esto debido a que las trincheras han sido propuestas como sitios adecuados para depositar residuos peligrosos provenientes de actividades mineras, petroleras e industriales.

Existen también hábitats y comunidades que por sus características biológicas y fisicoquímicas son considerados también objetos importantes de

conservación. Entre las más relevantes se pueden mencionar a los arrecifes profundos de corales y agregaciones de esponjas, las ventilas hidrotermales y las infiltraciones de metano e hidrocarburos. Estas últimas representadas en ocho SMP.

Los corales profundos, presentes en 10 SMP, se caracterizan por una amplia distribución en todos los océanos, desde los polos hasta el ecuador, y a grandes profundidades en cordilleras oceánicas, bancos, escarpes, montes y cañones submarinos. Pueden vivir en temperaturas entre los 4° y 8°C, hasta los 2,000 m, en completa oscuridad y asociados a corrientes para asegurar su alimento y mantenerse libres de sedimento. Las especies formadoras de la estructura arrecifal son *Lophelia pertusa*, *Goniocorrelladumosa* y *Oculina varicosa* y se les puede encontrar formando pequeños manchones o áreas extensas y complejas (WWF/IUCN/WCPA 2001). El papel más importante de estos ecosistemas es el de proveer de hábitat a una gran diversidad de especies asociadas o de refugio a juveniles de especies de importancia comercial.

Este mismo fenómeno ocurre con las agregaciones de esponjas, las cuales pueden alcanzar hasta 19 m de altura y una antigüedad de más de 100 años. Las comunidades de esponjas también proveen de hábitat y de refugio a muchas especies incluyendo algunos peces de interés comercial.

Los arrecifes coralinos y las agregaciones de esponjas son estructuras delicadas, de lento crecimiento y muy vulnerables a ser dañadas, por lo que su recuperación puede tardar siglos. Una de las mayores amenazas para estas comunidades es la pesca demersal. Los arrastres de mar profundo alcanzan profundidades de hasta 1 900 m, lo que ha provocado fuertes daños a los arrecifes del NE del Atlántico (WWF/IUCN/WCPA 2001).

Los análisis a escalas ecorregionales permiten tener una visión nacional amplia de los procesos y patrones de la biodiversidad y son una herramienta importante para la planificación de la conservación. Las ecorregiones marinas de Norteamérica en el nivel 1 capturan diferencias entre ecosistemas marinos que ocurren a la escala de los macroprocesos presentes en las cuencas oceánicas tales como la temperatura y la circulación de las grandes corrientes y masas de agua marina, y comprenden ocho grandes ecorregiones dentro de la ZEE (Figura 2, Tabla 2). En la ecorregión del Golfo de California se identificó el mayor número de sitios prioritarios (34.6%) mientras que la mayor área se presentó en la ecorregión del Pacífico Transicional Mexicano (43.19%). Esto es debido a que el Golfo de California es una de las regiones marinas mejor

**Tabla 2. Número y área de los sitios de mar profundo por Ecorregión Marina de Norteamérica**

Ecorregiones Marinas de Norteamérica	Número de SMP	% Número de SMP	Área de SMP (ha)	%
<b>Área de SMP</b>				
Pacífico Transicional de Monterey	0	0	0	0
Pacífico Sud-Californiano	1	3.85	24 908	0.53
Pacífico Transicional Mexicano	6	23.08	2 48 747	43.19
Pacífico Centroamericano	2	7.69	980 169	20.66
Golfo de California	9	34.62	1 112 742	23.46
Golfo de México Norte	0	0	0	0
Golfo de México Sur	5	19.23	501 217	10.57
Mar Caribe	4	15.38	75 837	1.60

estudiadas y con una heterogeneidad ambiental muy grande, y el Pacífico Transicional Mexicano es donde se encuentran los objetos de conservación de mayor tamaño (dorsales, montes submarinos y trinchera).

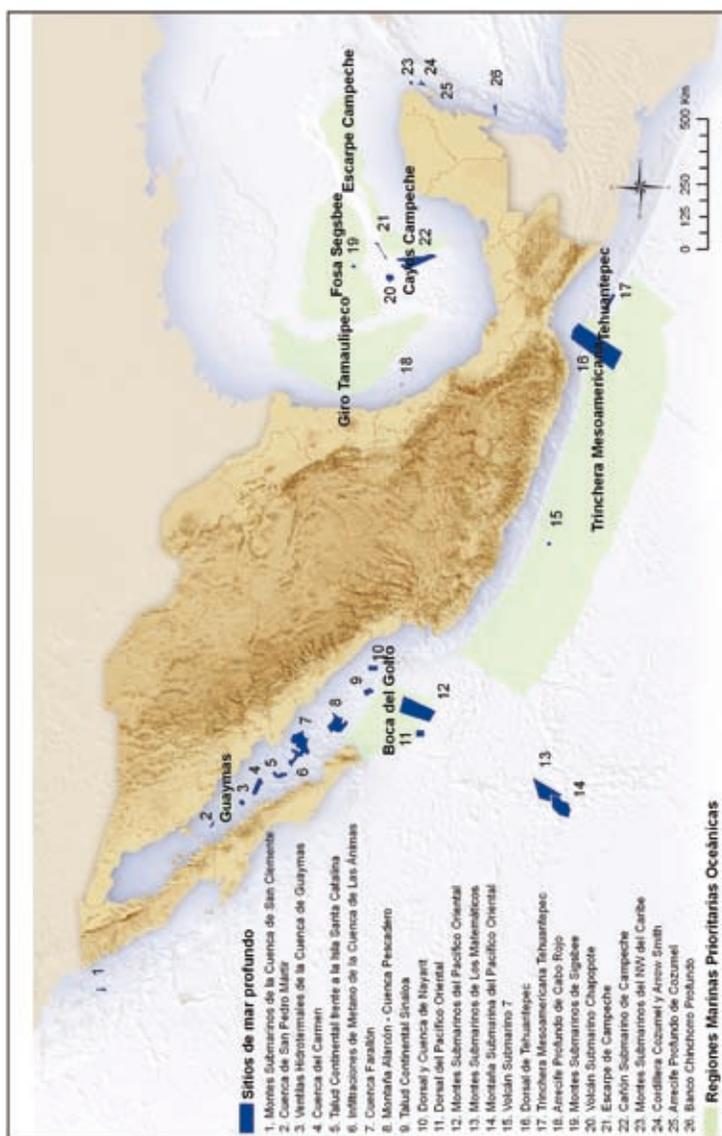
La comparación de los sitios de mar profundo con las Regiones Marinas Prioritarias (RMP) representa un indicador indirecto del avance en el conocimiento de los ecosistemas bentónicos, ya que en la mayoría de los SMP se han realizado estudios y se cuenta con información detallada de los mismos (Figura 3, Tabla 3). Siete RMP oceánicas se traslapan con seis SMP, lo que en términos de superficie total equivale a cerca de 2% del área total de las RMP oceánicas.

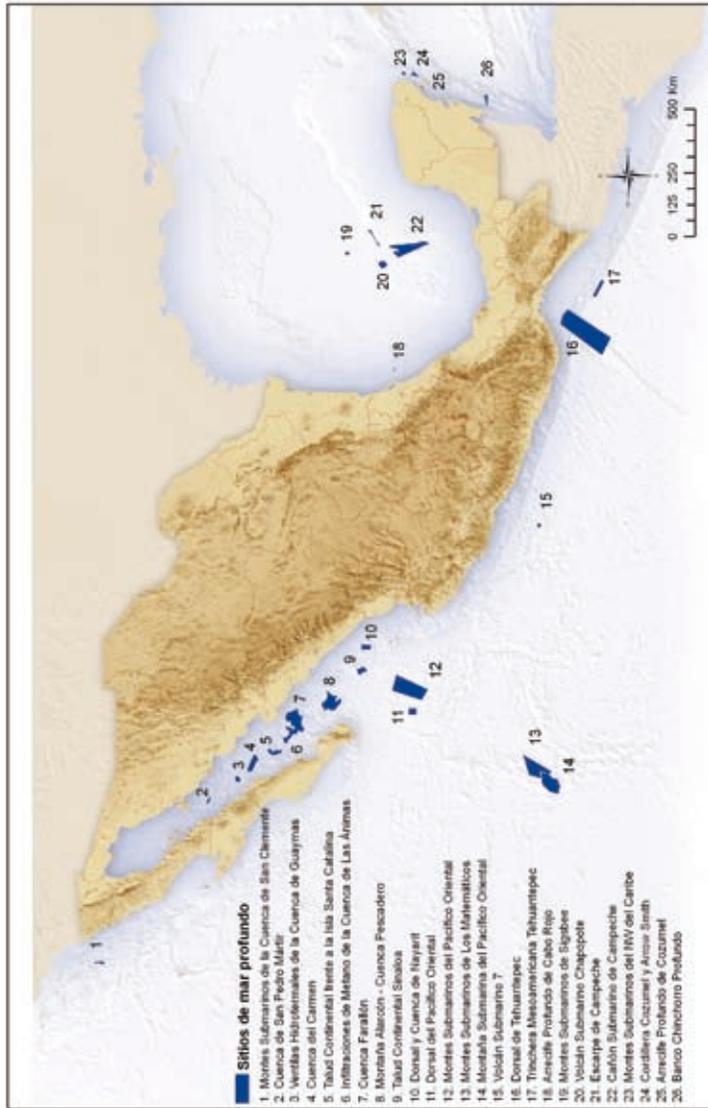
El análisis de vacíos y omisiones en conservación para los sitios de mar profundo dio como resultado que sólo una porción muy pequeña (0.01%) correspondiente a Banco Chinchorro coincide con un SMP, indicando con ello la nula representatividad de estos ecosistemas dentro de las AP.

**Figura 3. Sitios de mar profundo y Regiones Marinas Prioritarias oceánicas**

Sitios	Área total (ha)	No. de sitios	% Área sobrelapada	No. de sitios sobrelapados	% de sitios sobrelapados
SMP	4 743 622	26	37	6	23
RMP oceánicas	75 768 983	8	2	7	88

## ¿TÍTULO?





En la actualidad ya están decretados dos santuarios correspondientes a las Ventilas hidrotermales de la Cuenca de Guaymas y la Dorsal del Pacífico Oriental. Sin embargo, se requieren de esfuerzos mayores para incorporar otros ecosistemas que por su importancia ecológica deben ser protegidos para asegurar su permanencia.

Por último, el análisis de la priorización de los sitios de mar profundo se realizó con base en una calificación de los expertos para los diferentes sitios. La priorización utilizó tres niveles de importancia que resultaron en 15 sitios de extrema importancia, 6 muy importantes y 5 importantes.

## CONCLUSIONES

La delimitación de los SMP como sitios de importancia para la conservación de la biodiversidad marina, es una propuesta novedosa hacia la protección de dichos ambientes, lo que a su vez impulsa nuevas investigaciones encaminadas a cubrir los grandes vacíos en el conocimiento detallado de los mismos. El hecho que los sitios fueron calificados en su mayoría como de alta prioridad refuerza la necesidad de crear nuevas AP oceánicas de ambientes pelágicos y bentónicos, así mismo se identificó la necesidad de proteger los montes y cañones submarinos de la amenaza de la pesca de arrastre de mar profundo a través de instrumentos como el ordenamiento pesquero.

Finalmente, el análisis de vacíos y omisiones en conservación marina representa un avance importante hacia una planeación sistematizada de la conservación de la diversidad biológica marina y brinda un marco de referencia para mejorar el conocimiento del medio marino, las necesidades de investigación, las iniciativas de política pública y la toma de decisiones en cuestiones de manejo y conservación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Escobar-Briones, E. 2000. La biodiversidad del mar profundo en México. *CONABIO. Biodiversitas* 29:1-6.
- SCDB. 2004. Programa de Trabajo sobre Áreas Protegidas (Programas de trabajo del CDB). Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica. Montreal. 34 pp.
- UNEP (United Nations Environment Programme). 2006. Ecosystems and Biodiversity in Deep Waters and High Seas. *UNEP Regional Seas Reports and Studies No. 178*. UNEP/IUCN, Switzerland. 58 pp.

- . 2007. Deep-Sea Biodiversity and Ecosystems: A scoping report on their socio-economy, management and governance. UNEP-WCMC, United Kingdom. 84 pp.
- WWF/IUCN/WCPA (World Wildlife Fund, International Union for Conservation of Nature and Natural Resources). 2001. The status of natural resources on the high-seas. WWF/IUCN, Gland, Switzerland. 93 pp.



# EFFECTOS DE LAS ACTIVIDADES HUMANAS SOBRE EL MAR PROFUNDO: TENDENCIAS MUNDIALES Y ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO EN LA ZONA ECONÓMICA EXCLUSIVA (ZEE) DE MÉXICO

Elva Escobar-Briones<sup>1</sup>

## RESUMEN

Más que nunca, el impacto de las actividades humanas y del cambio climático está afectando el estado del mar, de manera directa o indirecta. La formulación de políticas sostenibles de los ecosistemas oceánicos y de mar profundo debe fundamentarse en las escalas espaciales nacional, regional y global por los resultados de las evaluaciones con bases científicas. El mar profundo, el ecosistema más grande, y uno de los menos estudiados de la Tierra, alberga gran diversidad biológica y ofrece una riqueza vasta de recursos de importancia económica. Aunque los seres humanos han extraído recursos y aprovechado los océanos durante milenios, el impacto humano sobre los hábitats de aguas profundas y comunidades asociadas ha adquirido importancia solamente en el último siglo. El desarrollo tecnológico que se ha dado en las últimas décadas permite realizar en la actualidad actividades de exploración y explotación de recursos pesqueros, de compuestos activos, de hidrocarburos y de minerales a profundidades mayores a 2000 m. El aumento y diversificación de actividades y uso de recursos sin una reglamentación bien fundamentada o sistemas de seguimiento conlleva un riesgo mayor resultado de accidentes y daños al ecosistema que pueden tener un impacto en escala espacial y temporal mayor. Lo remoto del fondo marino ha promovido desde los años 50s se usen éstos para el desecho de

<sup>1</sup> Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Laboratorio Biodiversidad y Macroecología, A.P. 70-305.04510 México, D.F..

residuos de manera directa e indirecta. El cambio climático global actúa en sinergia a la afectación por las actividades antrópicas a través del calentamiento, la acidificación del océano y la expansión de las zonas hipóxicas. El reto que enfrenta la conservación de los fondos marinos en la actualidad es grande y requiere de una interacción entre miembros de la comunidad científica, la industria y las organizaciones nacionales e internacionales con el fin de colaborar desarrollando oportunidades manejo y administración de las actividades humanas y de la conservación de los ecosistemas del mar profundo. Esta revisión presenta una síntesis del conocimiento existente sobre las tendencias de los impactos, resultado de las actividades humanas sobre los ecosistemas de aguas profundas a nivel mundial, y de aquellos que han sido reconocidos en la ZEE de México.

Palabras claves: mar profundo, impacto de las actividades humanas.

#### ABSTRACT

More than ever, the impact of human activities and climate change is affecting, directly or indirectly, the state of the oceans. The formulation of sustainable policies for ocean ecosystems and deep sea must be based, more than ever, in the national, regional and global spatial scales as based in the results of assessments with scientific bases. The deep sea, the largest ecosystem, and one of the least studied of the Earth contains a vast biological diversity and offers a large wealth of resources of economic importance. Although humans have extracted resources and exploited the oceans for thousands of years, the human impact on the deep sea habitats and associated communities have become important only in the last century. The technological development that has taken place in recent decades allows nowadays activities of exploration and exploitation of fishery resources, of active hydrocarbons compounds and of minerals at depths over 2000m. The increase and diversification of activities and use of resources without a well-founded regulatory or monitoring systems carries a greater risk as result of accidents and damage to the ecosystem that can have an impact on larger spatial and temporal scales. The remoteness of the seafloor has been promoted its use for the direct or indirect disposal of waste since the 1950s. Global climate change acts in synergy to effects caused by human activities through global warming, ocean acidification and expansion of minimum oxygen zones. The challenge faced at present by the conservation efforts of the seabed is large and requires the interaction among members of the scientific community, industry and national and international organizations in order to collaborate in the development of management opportunities and the administration of human activities and the conservation of deep-sea ecosystems. This review presents a synthesis of existing knowledge on the trends of the ongoing impacts of human activi-

ties on the global deep sea ecosystems as well as those that have been recognized in the Mexican Exclusive Economic Zone (EEZ).

Keywords: Deep-Sea; impact of human activities.

## INTRODUCCIÓN

El mar profundo, aguas y fondos marinos por debajo de los 200 m de profundidad (Thistle 2003), conforman el ecosistema más grande en el planeta con un volumen de  $1,368 \times 10^6 \text{ km}^3$ , un área de 360 millones de  $\text{km}^2$  y una profundidad promedio de 3,800 m. Este equivale a casi el 50% de la superficie de la Tierra (Ramírez-Llodra et al. 2011) contribuyendo con gran parte del valor de los servicios naturales en el planeta. El mar profundo ha permanecido alejado de la conciencia pública por la complejidad de los procesos, por el desfase en tiempo entre el efecto de las alteraciones y la respuesta del ecosistema a ellas. Lo anterior conlleva a que la extracción de recursos y los impactos de origen antropogénico tiene un impacto tardío en la sociedad y su economía.

El papel que juega el mar profundo en las actividades antropogénicas es importante por los servicios naturales con los que contribuye a la vida. Las aguas suprayacente son la reserva más grande de alimento en la Tierra con 20% del promedio *per capita* contribuyendo beneficios a más de 2.6 miles de millones de personas (GESAMP 2001). Otros servicios ecosistémicos que provee el mar profundo, y que se han identificado desde el siglo XX, incluyen las áreas para el desecho de basura, fuente potencial de recursos minerales y biológicos en zona fuera de la jurisdicción nacional. Entre los servicios menos valorados, pero de mayor importancia para la vida que proveen los océanos, están la regulación del clima, el almacén de  $\text{CO}_2$  y una diversidad elevada de especies cuyo papel en los ciclos biogeoquímicos se conoce incipientemente. Esta diversidad oculta del mar profundo, que sostiene diversos ecosistemas, promete una contribución económica importante para la industria farmacéutica, médica e industrial. En el marco de recursos no renovables se prevé que en un futuro inmediato, conforme se desarrolla la tecnología requerida, se inicie la extracción de sulfuros, cobalto y nódulos polimetálicos en aguas profundas (ISA 2009). Así mismo se espera que la industria petrolera se expanda hacia mar profundo para la extracción de crudo y gas natural.

A pesar de los beneficios económicos que provee el mar profundo, la degradación es cada día mayor a través de impactos por contaminación, alteración física, presión por sobrepesca y crecimiento poblacional entre los factores principales que los amenazan y se concatenan a los efectos del cambio climático. La preocupación por estos impactos sobre los mares, sus bienes y servicios son de interés global, requiriendo acciones locales, siendo para el mar profundo un gran reto lograr un uso sostenible de éstos.

*Perspectiva histórica de atención a los mares.* Desde el siglo 17 y hasta casi la primera mitad del siglo 20 los mares estuvieron sujetos a una doctrina en la cual la jurisdicción y los derechos nacionales se encontraban limitados a la zona costera de las naciones mientras las libertades del resto de los océanos se consideraba un área común. En la cuarta década del siglo 20 las naciones con economías más robustas mostraron el interés por los recursos marinos. En esa misma época se expresó una preocupación por la disminución de la pesquería costera, por la competencia por recursos así como por los posibles efectos de la contaminación y desechos que a lo largo de las rutas navieras y que pudieran incorporarse al mar por embarcaciones y los buques petroleros. El fundamento de esta preocupación era el efecto negativo que se diera sobre las economías y hacia la vida marina lo cual incrementó las tensiones entre naciones costeras y los derechos por los recursos, generando conflictos entre sectores (pesca, minería, conservación, etc.). La iniciativa de extender a la plataforma continental adyacente en la jurisdicción de todos los recursos naturales (gas, petróleo, minerales, pesca, fármacos, etc.) inició en 1945 por los EEUU y fue secundada por otras naciones con economías grandes y avances tecnológicos. Aunado a este reclamo de recursos, la Segunda Guerra Mundial expuso nuevos riesgos con el emplazamiento de misiles en los fondos marinos y la contaminación de material radiactivo. Lo anterior impuso una presión internacional por un proceso para legislar los océanos.

Los antecedentes a los esfuerzos por proteger el ecosistema marino y coordinar sus recursos inició en 1982 durante la tercera conferencia de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar. El capítulo 17 de la Agenda 21 consideró la protección de los océanos, la conservación, el uso racional y sostenible de los recursos vivos durante la Conferencia de Naciones Unidas sobre el Ambiente y Desarrollo en 1992. La Comisión sobre Desarrollo Sustentable hizo un llamado a la investigación científica para definir y apoyar las prioridades requeridas para proteger los mares y sus recursos en 1999. El Consejo de administración del Programa de Naciones Unidas para el Ambiente solicitó la colaboración de

agencias de Naciones Unidas en 2001 para explorar la factibilidad de establecer un Proceso Regular para evaluar el estado del ambiente marino que involucre activamente a través de acuerdos regionales a las naciones para crear programas de seguimiento. De ésta derivan la reunión consultiva de Islandia en 2001 y el taller de Bremen en 2002 a las cuales siguió la Reunión Cumbre de Desarrollo sustentable de Johannesburgo de la cual resultó el documento de implementación que acordó establecer un Proceso Regular de evaluación del estado del ambiente marino. El proceso de evaluación basado en evaluaciones existentes se inicia en 2004 con la creación de un grupo de expertos que generó recomendaciones en la fase de Evaluación de las Evaluaciones con talleres en 2005 a 2009 coordinados por UNEP y COI/UNESCO. Esta permitirá ampliar la capacidad predictiva del efecto de factores estresantes y la respuesta a una reducción de éstos que es uno de los retos en la actualidad.

*Factores que generan estrés en la vida marina de mar profundo.* Un factor que genera estrés es una perturbación que puede ser externa o interna al sistema y que ocurre en exceso o sostenidamente. Las perturbaciones actúan sobre el ecosistema en la totalidad de escalas jerárquicas afectando en mayor o menor grado. Estrés es la condición generada por la suma de reacciones de la intensidad, frecuencia y duración y se aplica a todos los factores que afectan al ecosistema. El estrés en el ecosistema se mide a partir de las respuestas a una condición subóptima cambio ambiental, presencia y ausencia de especies clave, reducción en diversidad. Estos pueden ser periódicos, episódicos o crónicos.

El desarrollo tecnológico para la exploración del mar profundo combinado con la reducción de recursos en las zonas someras ha avanzado más rápidamente que la adquisición de conocimiento científico en estos ecosistemas. Lo anterior ha conllevado al interés en la exploración y explotación de bienes y servicios de mar profundo con una consecuente afectación, por desconocimiento, de ecosistemas del fondo marino y el agua suprayacente. Como ejemplo se cita el auge de la pesquería de profundidad en las décadas de 1970-1980, el desecho de basura en la década de los 1980s así como el de desechos industriales y armamento. Adicional a lo anterior el impacto en el cambio global generado por actividades en tierra que se refleja en el calentamiento del océano, la generación y expansión de hipoxia natural y la acidificación de los océanos.

El análisis realizado por Halpern *et al.* (2008) reconoce que todas las áreas en los océanos están afectadas por las actividades humanas. Así mismo señala

que en un 41% esta afectación es por más de un tipo de factor estresante, lo cual interfiere con la función normal de un ecosistema (Auerbach 1981). Esta interferencia puede incrementar o reducir procesos fundamentales del ecosistema, p.e. el flujo de energía. Los ecosistemas marinos expuestos a actividades humanas varían siendo que las áreas ubicadas en las inmediaciones a la costa o aquellas expuestas a actividades humanas son las más afectadas al recibir el impacto, desechos y modificaciones. Las áreas más remotas no están exentas debido al tránsito intenso de embarcaciones y por factores estresantes de escala global como es el cambio climático y la sobrepesca. Éstos actúan de manera conjunta afectando diversas escalas de complejidad. A la fecha la información disponible sobre el efecto de las actividades antropogénicas en el océano profundo en el largo plazo es limitada por la dificultad y costo de dar el seguimiento al efecto en al menos una región, a un ecosistema o a un grupo taxonómico en el largo plazo.

El presente trabajo contribuye identificando los impactos de tipo antropogénico más importantes que afectan o afectarán en el corto plazo los hábitats de mar profundo en la ZEE en México con base en las tendencias económicas mundiales y las prioridades de uso de los mares asentadas en foros nacionales.

*Zonación del mar profundo.* El mar profundo está dividido en las siguientes zonas batimétricas: el talud continental, la elevación continental, la planicie abisal y la zona hadal. A la vez en el talud continental se encuentran los cañones, las zonas de mínimo de oxígeno y las infiltraciones de metano. En la planicie abisal se encuentran fondos blandos y en ellos ocurren regiones con nódulos polimetálicos, ventilas hidrotermales y se elevan los montes marinos. En la zona hadal se encuentran las trincheras.

En la ZEE de México se presentan hábitats únicos asociados a acantilados, en el Golfo de México y en el Golfo de California, que conectan la plataforma continental con la planicie abisal. Todas estas zonas bénticas colindan con los ecosistemas batipelágicos de gran importancia para mantener la conectividad de las poblaciones de fauna de profundidad.

Estado del conocimiento de los impactos que afectan el mar profundo en la ZEE de México.- En México los impactos de tipo antropogénico al mar profundo se han venido dando, con un cierto retraso, siguiendo la tendencia de las actividades y la economía a nivel mundial. Los impactos que tratará este trabajo se caracterizan en aquellos que ocurrieron en el pasado, los que impactan

actualmente y las que se prevé se llevarán a cabo en los próximos años en la ZEE en México. La información publicada sobre impactos y afectaciones al mar profundo en la ZEE en México es inexistente en virtud a que es hasta hace casi dos décadas que las instituciones de investigación iniciaron estudios en colaboración en ventilas hidrotermales del Golfo de California y solamente hace 20 años se iniciaron muestreos en el mar profundo del Golfo de México. Las publicaciones en estos ecosistemas describen la estructura de las comunidades asociadas, en su mayor parte, solamente dos versan sobre el funcionamiento. En el Golfo de México se cuenta con una estación de estudios ecológicos de largo plazo en mar profundo, en la cual se da un seguimiento desde 1997 a la variabilidad de la diversidad y de los factores ambientales que la determinan en el mar profundo. En las otras regiones geográficas, menos estudiadas se cuenta con listados de especies de megafauna para fondos suaves del talud continental, descripciones breves de grupos taxonómicos dominantes, abundancias relativas. Los estudios sobre los impactos de tipo antropogénico requerirán de un esfuerzo adicional ya que es hasta 2002 que se elaboró el primer listado de basura encontrada conjuntamente con la fauna de arrastres sobre fondos suaves de la planicie abisal en el Golfo de México. En 2010 se registró fotográficamente por vez primera el efecto de la colecta en los fondos marinos asociados a hidrotermalismo en cuenca de Guaymas y en fondos con infiltración de metano en el margen de Sonora.

*Basura y desechos desde embarcaciones.* Los desechos intencionales inician con la navegación incluyendo rocas de lastre de embarcaciones de vela, carbón producto de desecho de embarcaciones de vapor, basura desechada hasta 1972 de embarcaciones de petróleo que se acumulan en el fondo marino abisal y provee sitios de anclaje para organismos bénticos en los fondos lodosos. La basura incorporada a nivel mundial al mar profundo hasta que entró en vigor a nivel global la legislación en 2006 (<http://www.imo.org>) se ha estimado en 636,000 T. A la fecha continúa acumulándose en una magnitud  $6.4 \text{ millones T a}^{-1}$  (UNEP 2009) incorporada por tormentas y proveniente de la zona costera (p.e. vía ríos: basura sólida, nutrientes que promueven la eutrofización, plástico, metales), por la pesca (Galil 2006) o por hundimiento intencional por diversas industrias.

Un estudio de serie de tiempo de 1986 a 2008 en muestras de columna de agua en el Atlántico Norte y Mar Caribe reconoció la presencia de contenido elevado de restos de plástico de talla milimétrica con valores mayores a

60% en latitudes subtropicales y corrientes superficiales asociadas a zonas de convergencia. En el caso de los fondos marinos cada una de las expediciones que emplean vehículos remotos oceanográficos (ROV por sus siglas en inglés), sumergibles, o realizan arrastres a profundidad han registrado objetos de plástico, vidrio y metal. En la campaña BIG desarrollada en 2010 se realizaron observaciones sistemáticas fotográficas de las localidades en las cuales se obtuvieron muestras. En éstas se registró cada localidad con una imagen previa a la colecta, una serie de imágenes durante la colecta y una imagen de la localidad al término para documentar el impacto del muestreo. La conclusión de estos registros es que los muestreos obtenidos por los nucleadores de caja y de tubo realizados por el sumergible son incipientes y su efecto es de escala local. Durante la misma campaña se documentó así mismo la basura, predominando en esta localidad restos de redes, madera, bolsas de plástico y algunas latas metálicas. En el talud continental y planicie abisal del Golfo de México se ha documentado la diversidad de desechos hasta en un 74% en los arrastres de prospección científica (Rowe y Kennicutt 2009), se ha evaluado la presencia de contaminantes orgánicos en núcleos de sedimento superficial y en la fauna béntica profunda. En arrastres de prospección científica en el Banco de Campeche se han descrito restos de latas con pintura, cajas de circuitos eléctricos, medicamentos e implementos médicos, plástico y restos de redes. Las muestras de sedimento superficial incluyen micropartículas de plástico resultado de la erosión en aguas someras.

El emplazamiento de equipo científico en los fondos marinos desde buques, por sumergibles y robots contribuye con el peso de lastre como un tipo de desecho. Durante la colecta de rocas para estudios geológicos se desecha metal hasta 65 kg por inmersión y hasta una tonelada de gránulos de hierro por día en cada inmersión de sumergible. En localidades estudiadas intensamente llega a acumularse lastre en grandes cantidades a lo largo del tiempo. El impacto es insignificante en aquellas zonas del mar profundo donde de manera natural se acumulan metales traza en cantidades grandes, como son las ventilas hidrotermales, pero debe atenderse en aquellas regiones donde naturalmente los metales no están presentes. La intensidad de estudios y emplazamiento de equipos científicos en el Golfo de México contribuye con más de 5 toneladas de desperdicio de hierro en el fondo marino al año. La acumulación de basura se ha reconocido por el programa regional de los mares de UNEP (UNEP 2009).

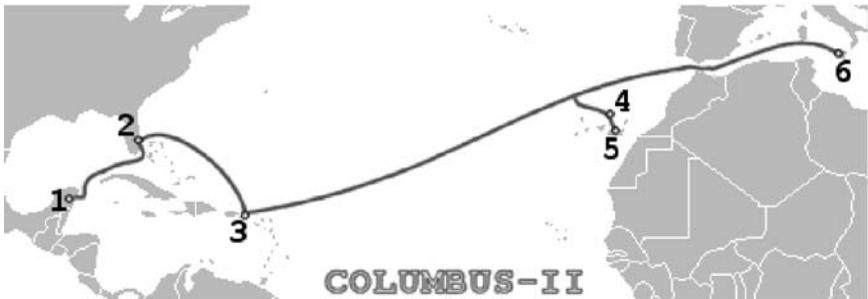
Los desechos industriales que tienden a ser no-biodegradables, mutagénicos, carcinogénicos y teratogénicos y de uso amplio se han venido introduciendo al mar profundo desde barcasas en aguas alejadas a la costa. En contraste los desechos de la explotación de minerales llegan a través de los aportes fluviales a la zona costera donde se acumula y eventualmente se arrastra hacia aguas profundas siendo más evidente en el océano Pacífico. Estos aportes generan cambios en la fauna en fondos marinos y la vida de la columna de agua como lo han reconocido en otras regiones y que requiere cuantificarse.

El mar profundo se ha sugerido históricamente como el sitio de acumulación final para los contaminantes de origen antrópico (Woodwell et al. 1971). La fauna y sedimento son el almacén para contaminantes semivolátiles con bioacumulación reconociéndose en el Golfo de México acumulación de PAH en fauna béntica (Soliman y Wade 2008). Los fondos afectados por hidrotermalismo presentan acumulación de elementos como Ag, As, Au, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, Sb, Se, y Zn de origen hidrotermal que se acumulan en la fauna típica de las ventilas como se ejemplifica en la cuenda de Guaymas en el Golfo de California. El factor de bioconcentración de metales traza en la fauna asociada a ventilas hidrotermales es selectivo y alcanza hasta 3 ordenes de magnitud (Demina et al. 2009).

*Cables submarinos.* El primer cable submarino telegráfico transatlántico aislado con gutta-percha se colocó por vez primera a mediados del siglo 19, recién inventada la telegrafía en 1939. Esto ocurrió mucho antes de que se realizara investigación y se conocieran aspectos ecológicos del mar profundo. La colocación de cables submarinos para comunicación se desarrolló ampliamente a partir de la segunda mitad del siglo 19 y ha tenido gran auge hasta la fecha. En México la introducción de cables submarinos de telecomunicación es reciente y contempla el proyecto de Telmex conocido como COLUMBUS-II que cuenta con un punto que enlaza a México desde Cancún (Fig. 1), así como a Centro y Sudamérica, al Caribe y a los Estados Unidos de Norte América, con Europa y el resto del mundo por medio de telecomunicación. La información disponible se encuentra en [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_international\\_submarine\\_communications\\_cables](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_international_submarine_communications_cables). El impacto generado por los cables submarinos es bajo comparado con el impacto de la contaminación.

En México no se ha evaluado el efecto de los cables submarinos en el fondo marino y vida asociada. Los estudios existentes han documentado con apoyo de ROV, video y colecta de sedimento superficial la interacción entre el cable

Figura 1 Ruta del cable submarino COLUMBUS-II con una extensión total de 1121 km y transferencia de 560 MB/s.



y el fondo marino. Entre las observaciones realizadas en aguas profundas se ha reconocido que la fauna, anémonas, equinodermos, esponjas y peces, se agrega sobre el cable (NRC 2003). El impacto del cable en el largo plazo se relaciona a la necesidad de llevar a cabo reparaciones y de otras actividades como la pesca de arrastre en el área. El efecto potencial de retirar al cable del fondo marino es la mortalidad de los organismos asociados, la ruptura de rocas que se hayan debilitado por efecto de su presencia. Otros efectos incluyen así mismo la desestabilización del sustrato y generación de turbidez generada por la acción de remover el cable que puede afectar fauna filtradora y al dejar de ser un obstáculo para las artes de pesca conllevará a mayor extracción por arrastre en el fondo.

Desecho de dióxido de carbono al fondo y subsuelo marinos profundos.-Esta acción corresponde a un impacto a futuro que responde al interés que ha tomado el cambio global y la reducción potencial de largo plazo en los niveles de  $\text{CO}_2$  atmosférico bajo el principio de que en el fondo marino se forma hidratos de metano almacenándose de esta manera el exceso  $\text{CO}_2$ . Los experimentos realizados a la fecha tienen un efecto sobre la vida incluyen la narcosis temporal en peces. Aunque la mayor parte de invertebrados rehúyen las plumas tóxicas de  $\text{CO}_2$  en ventilas hidrotermales o bien son tolerantes a éstas. Los experimentos de emplazamiento artificial de  $\text{CO}_2$  líquido en sedimentos abisales reconocieron mortandad de la infauna ante el cambio de pH. Lo anterior sugirió que en el largo plazo los efectos serían variables de taxon a taxon, pero negativos en todos los casos dada la mortalidad en las inmediaciones de donde se emplace el  $\text{CO}_2$  en escala industrial. Otra estrategia que permitirá almacenar  $\text{C}_{\text{org}}$  a los fondos

marinos incluye la fertilización con hierro de la capa superficial del océano. Para ello se han elegido zonas de concentración baja de clorofila, contribuyendo a incrementar la biomasa fitoplanctónica, la agregación y hundimiento (Smith et al. 2008b). El efecto es local contribuyendo a generar hipoxia locales.

*Extracción de recursos.* Este es otro impacto considerado para las próximas décadas. Mientras que en el pasado y hasta el presente la amenaza principal para los fondos marinos ha sido el desecho de residuos sólidos y de contaminantes diversos así como el efecto en cascada sobre la trama trófica y hasta la pesca (Smith 2006), las nuevas amenazas previstas se centran en el efecto de la tecnología que permitirá explotar recursos energéticos, minerales y biológicos, antes inaccesibles por la falta de tecnología y costo elevado para la extracción.

*La pesca de profundidad por arrastre y palangre.* El desarrollo tecnológico y demanda en el mercado ha incrementado la explotación de peces de profundidad, a la fecha se requiere desarrollar legislaciones, y estrategias para una extracción sostenible sin tener conflicto ni comprometer la persistencia de los hábitats y los recursos (Shotton 2003). Hacia mediados del siglo pasado las actividades de arrastre se restringían a la plataforma continental. Sin embargo después de los años 60s el desarrollo de buques de mayor capacidad iniciaron la extracción de aguas profundas. Al declinar los recursos hacia los años 70s se propusieron los primeros reglamentos para reducir la extracción reduciendo las oportunidades de extraer recursos en la plataforma continental. Estos sucesos conllevaron a la exploración de recursos y extracción de éstos cada vez a mayor profundidad y distancia de la costa. La extracción de recursos pesqueros en el talud continental y cimas de montes marinos a profundidades de 1500m han mostrado no ser sustentables a nivel global (Clark 2009). Este tipo de actividad ha tenido impacto en poblaciones que se extienden hasta 3100 m, así como a las especies que caen en la pesca incidental. En México la reducción de las capturas ha ocurrido históricamente antes que exista un conocimiento científico sólido o que se haya redactado e instrumentado un reglamento que proteja a las especies en cuestión, llevando a que un gran número de especies se colapsen como en otras partes del mundo. Dado que las especies de mar profundo son longevas, con tasas lentas de crecimiento y madurez retrasada debe evitarse la sobrepesca y considerar que no pueden sostener una presión pesquera intensa. Aunado a lo anterior la ubicación geográfica del país conlleva a una tasa de exportación de materia orgánica generada en superficie hacia la

profundidad lo que promueve una diversidad de especies elevada todas ellas con una densidad baja.

El efecto de las actividades de arrastre sobre los hábitats y comunidades bénticas pueden tener impactos severos especialmente en el talud continental y montes marinos abisales cuya cima se encuentra cercana a aguas superficiales. A la fecha la tendencia mundial y estrategias futuras del país es a extraer recursos del talud continental y de preferencia en las zonas de agregación de peces y crustáceos como son los cañones y las agregaciones de coral de profundidad. Las actividades pesqueras con redes de arrastre reducen la diversidad y la biomasa (Rowden et al. 2010). La recuperación de estas comunidades de la perturbación generada por la pesca es lenta aún a pesar de haber cesado la pesquería por 5 a 10 años no se muestran signos de recuperación (Williams et al. 2010). La pérdida y desecho de redes por la pesca industrial contribuye a impactos mayores al generar una pesca fantasma pasiva por décadas sobre las especies bénticas y bentopelágicas.

La pesca de líneas de anzuelos ha invadido lentamente aguas más profundas en los últimos años en hábitats que presentan fondos rocosos como son los cañones y los montes marinos extendiéndose por debajo de 2000 m de profundidad. Su efecto, aún no bien cuantificado, deja de afectar las comunidades de fondos blandos pero afecta de manera directa a la fauna sésil (esponjas, corales) y extrae fauna que de otra forma había encontrado refugio en los fondos rocosos.

El efecto tiende a incrementarse conforme las embarcaciones de pesca desarrollan tecnología de rastreo más avanzada, específica y confiable. Entre los factores que pueden llegar a limitar la extracción de recursos pesqueros de profundidad podemos citar: la reducción de los subsidios a la pesca, el costo creciente del diesel, medidas para combatir la pesca ilegal y la introducción de regulaciones más estrictas por una parte para hacer sustentable el recurso, por otra parte la baja calidad del recurso en virtud a la elevada cantidad de agua en su músculo que caracteriza a peces e invertebrados de profundidad (Bensch et al., 2008).

*Minería.* A la fecha tres tipos de recursos son de interés para la explotación comercial y desarrollo económico de los estados (ISA 2004: nódulos de manganeso,), cortezas de cobalto y depósitos de sulfuros polimetálicos en localidades con hidrotermalismo. Los primeros proveerán en los próximos 15 a 20 años una fuente enorme de cobre, níquel y cobalto, metales en demanda cre-

ciente por los países en desarrollo. Una operación puede dañar comunidades bénticas en un área de la extensión del estado de Zacatecas (75,539 km<sup>2</sup>). El impacto mayor en esta actividad es la remoción de los nódulos que requirieron millones de años para crecer (McMurtry 2001) y que contribuyen con el único sustrato duro en grandes extensiones de fondos abisales eliminando un hábitat único y generando extinción local de la fauna típica de nódulos que difiere sustancialmente de la del fondo vecino inmediato. Otra perturbación es la remoción del sedimento superficial que queda resuspendido en la columna de agua después de la actividad de extracción de nódulos el cual es transportado por corrientes de fondo sepultando en su trayectoria a fauna no adaptada a recibir esta cantidad de sedimento que se vaya depositando.

En el caso de las cortezas de cobalto es importante reconocer que éstas se generaron a lo largo de un periodo geológico grande a través de la precipitación de material particulado. La composición química de estos incluye manganeso y hierro junto con cobalto, cobre y platino. Su extracción podría contribuir con hasta el 20% de la demanda global de cobalto. A nivel mundial la información sobre la rentabilidad de esta actividad está pobremente documentada sin embargo se reconocen posibles impactos que tendría sobre la fauna sésil.

Con respecto a los sulfuros polimetálicos de origen hidrotermal (Van Dover 2010) se ha contemplado su extracción para obtener zinc, cobre, plomo, cadmio, oro y plata. En este caso la industria minera ha iniciado la etapa de exploración en aguas profundas en la ZEE de países del Pacífico occidental. Para reducir el impacto sobre la fauna asociada se ha contemplado extraer minerales de sitios no activos ya que se prevén se encuentra la destrucción física del sitio, la afectación a la fauna asociada por las plumas de sedimento que se generen de la actividad minera, la introducción de agua de desecho con la consecuente contaminación química. Para proceder a una fase de explotación se requiere aún de desarrollar guías para la protección del ambiente, tener un mejor conocimiento de los procesos de endemismos y conectividad de la fauna asociada e identificar los vacíos en conocimiento que permita modelar escenarios que garanticen el manejo ambiental de la actividad minera en mar profundo.

*Exploración y extracción de crudo y gas.* En los pasados 20 años se ha llegado a perforar a profundidades de 3000 m (DWL, 2005). Los efectos más importantes de estas actividades se registrarán en los márgenes continentales, taludes, infiltraciones y ventilas, zonas de mínimo de oxígeno y hábitats de coral de profundidad. El riesgo más grande de esta actividad en los hábitats de

mar profundo es la descarga de lodos y los derrames generados por la perforación. A la fecha la industria petrolera ha mostrado una gran irresponsabilidad ambiental donde la parte sustantiva de la contaminación se debe a derrames accidentales durante el proceso de exploración y explotación. Un ejemplo reciente es el derrame del Deepwater Horizon en el Golfo de México (<http://www.bp.com/gulfofmexicoresponse>) con aproximadamente 5 millones de barriles ( $780 \times 10^3 \text{m}^3$ ) de crudo liberados que redujeron significativamente la concentración de oxígeno disuelto, resultado del metabolismo de las bacterias hidrocarbonoclásticas adheridas al dispersante y los hidrocarburos. Otro efecto fue la muerte masiva de miles de holoturoideos batiales y abisales (Rainer 2010). Conforme la exploración de crudo avanza a zonas de mayor profundidad las asociaciones de corales de profundidad encuentran sustratos rígidos en las estructuras de operación que colonizan.

Otra fuente potencial de energía con potencial para explotación son los hidratos de metano que ocurren en los márgenes continentales y fondos abisales. Al momento se desconoce la capacidad técnica para extraerlos de manera segura y con beneficio económico para su uso en virtud a posibles impactos. Si se llevara a cabo una extracción masiva los hábitats de infiltración estarían expuestos a perturbación en escala local y que repercutirían en la escala global a través de la liberación de metano a la atmósfera.

*Actividad científica.* Desde el inicio de la exploración del mar profundo en el siglo 19 las metodologías empleadas han evolucionado rápidamente permitiendo la colecta de organismos y materiales del fondo marino, principalmente, así como de la columna de agua inmediata. El número de estas exploraciones ha incrementado con el paso de las décadas, la disponibilidad de embarcaciones de investigación, desarrollo de tecnologías muchas de las cuales tienen gran impacto sobre los fondos marinos aunque en una escala significativamente menor que la de las industrias pesquera o minera. A la fecha la investigación abandona y pierde muchos materiales de sus anclajes, cuerdas, estructuras, plástico experimentos que afectan pasivamente a las poblaciones y contaminan los fondos marinos. Concientes de este impacto la comunidad de investigadores de mar profundo formularon un Código de Conducta para las mejores prácticas de muestreo en ecosistemas actividad quimiosintética que fue coordinado por InterRidge y ChEss (Devey *et al.* 2007).

*Bioprospección.* Entre los servicios que dan los mares a la humanidad se encuentra el intrínseco de la biodiversidad a través de su material genético que

ofrece recursos potenciales a las industrias farmacéutica tecnológica en virtud al proceso evolutivo y adaptaciones fisiológicas de esta fauna bajo condiciones extremas de presión, temperatura y de concentraciones químicas de ventilas hidrotermales. La bioprospección está en sus inicios y requiere aún de una discusión grande en temas de la ética de su uso.

*Cambio climático.* El cambio climático actual se ha generado por el hombre a diferencia de evento similares del pasado. Éste afecta el ambiente marino incluyendo al mar profundo implicando una serie de procesos que incluyen la acidificación, el cambio de la temperatura, la elevación en la concentración de CO<sub>2</sub> la expansión de las zonas hipóxicas, la desestabilización de los taludes e hidratos de metano y la introducción de especies invasoras. Con el conocimiento actual la interpretación de los efectos en mar profundo es totalmente especulativa debido al número reducido de localidades con registros de largo plazo que permitan documentar el cambio con datos sólidos. El cambio global presenta una sinergia en la interacción de dos o más impactos teniendo un efecto de magnificación sobre el ecosistema.

*Hábitats en riesgo actual y futuro.* Las tendencias actuales de extracción de recursos pesqueros, y a futuro de extracción de otro tipo de recursos permiten reconocer que los taludes, los cañones, los montes marinos y los fondos con mínimo de oxígeno son los hábitats con mayor riesgo actual a ser afectados en su diversidad biológica. El efecto del enriquecimiento por aporte de nutrientes e incremento en frecuencia y extensión de los eventos de hipoxia ocurre ya a lo largo del talud continental. Conjuntamente debe buscarse regular y proteger estos ecosistemas de la pesquería y de los procesos de eutrofización.

A la fecha las áreas marinas protegidas y reservas marinas representan menos del 30%, porcentaje que debe incrementarse para conservar y proteger los recursos y comunidades marinas vulnerables en aguas profundas. En la ZEE solamente existe un ejemplo de área protegida para las ventilas hidrotermales en la Cuenca de Guaymas y un santuario de ventilas hidrotermales en la dorsal del Pacífico Oriental.

Acciones inmediatas requeridas incluyen estrategias de conservación de los ecosistemas de profundidad en el Golfo de México donde una de las preocupaciones es el uso múltiple que se quiere tener de sus fondos marinos sin existir aún un diagnóstico, un programa de seguimiento del estado del ambiente marino un una legislación para el uso compartido incluyendo la conservación. A nivel global tenemos como un primer ejemplo el programa ambiental

estricto para los futuros procesos de exploración y de pruebas mineras para sulfuros y nódulos polimetálicos en el área propuesto durante la 17ª sesión de la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos.

## AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Nacional de Ecología por la organización del Primer Seminario de Mar Profundo, al apoyo de las gestiones del ICML a lo largo del estudio de largo plazo para adquirir conocimiento de las comunidades de mar profundo en México. A CONACYT, a CONABIO y a PAPIIT y a diversas agencias internacionales (NSF, MMS) por el financiamiento en diversas etapas para realizar las observaciones de largo plazo en mar profundo. A la valiosa colaboración internacional en la yal se prepararon y discutieron muchas de estas ideas generando un artículo científico publicado en PlosOne del cual deriva este capítulo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Auerbach, S.I. 1981. Ecosystem response to stress: a review of concepts and approaches. En: Barrett, G.W. y Rosenberg, R. (eds.). *Stress effects on natural ecosystems*. John Wiley and Sons Ltd., Chichester, pp, 29-41.
- Bensch, A., Gianni, M., Gréboval, D., Sanders, J. y Hjort A. 2008. *Worldwide review of bottom fisheries in the high seas*. FAO Technical Paper 522, 1-145.
- Clark, M.R. 2009. Deep-sea seamount fisheries: a review of global status and future prospects. *Latin American Journal of Aquatic Research* 37(3). 501-512.
- Demina, L.L., S. V. Galkin y E. N. Shumilin 2009. Bioaccumulation of some trace elements in the biota of hydrothermal fields of the Guaymas Basin (Gulf of California). *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 61 (1): 31-45.
- Devey, C. W., Fisher C, Scott S. 2007. Responsible science at hydrothermal vents. *Oceanography* 20: 162-171.
- DWL, Douglas Westwood Ltd. 2005. *Marine industries global market analyses*. Marine Foresight Series 1, Marine Institute, Ireland.
- Galil, B.S. 2006. The marine caravan – the Suez Canal and the Erythrean invasion. En: Gollasch, S., Galil, B.S., Cohen, A.N. (Eds.). *Bridging Divides: Maritime Canals as Invasion Corridors*. Monographiae Biologicae 83. Springer, pp. 207-300.
- GESAMP(IMO/FAO/UNESCO-IOC/WMO/WHO/IAEA/UN/UNEP. Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection) and Advisory

- Committee on Protection of the Sea. 2001. A sea of troubles. Rep. Stud. GESAMP No. 70, 35 pp.
- Halpern B.S., Walbridge S., Selkoe K.A., Kappel C.V. y Micheli F. 2008. A global map of human impact on marine ecosystems. *Science*, 319: 948-952.
- ISA. 2004. Polymetallic sulphides and cobalt rich ferromanganese crust deposits: establishment of environmental baselines and an associated monitoring programme during exploration, Proceedings of the International Seabed Authority's workshop, Kingston, Jamaica, 6-10 September.
- . 2009. Marine Mineral Resources Scientific Advances and Economic Perspectives A Joint Publication by the United Nations Division for Ocean Affairs and the Law of the Sea, Office of Legal Affairs, and the International Seabed Authority. 118 pp.
- McMurtry, G. 2001. Authigenic deposits. En: *Encyclopedia of Ocean Sciences*, ed. S.A. Thorpe y K.K. Turekian, pp. 201-220. London, UK: Academic Press.
- NRC. 2003. *Enabling Ocean Research in the 21st Century: Implementation of a Network of Ocean Observatories*. The national Academies Press, EE.UU. 240 pp.
- Rainer, A. 2010. Deepwater spill survey: Contaminated Gulf kills thousands of sea cucumbers. *Scientific American* online <http://www.scientificamerican.com/blog/expeditions/?author=2433>.
- Ramirez-Llodra E., Tyler P.A., Baker M.C., Bergstad O.A. y Clark M.R. 2011. Man and the Last Great Wilderness: Human Impact on the Deep Sea. *PLoS ONE* 6(8): e22588. doi:10.1371/journal.pone.0022588.
- Rowe, G.T. y Kennicutt II, M.C. (eds.). 2009. Northern Gulf of Mexico continental slope habitats and benthic ecology study: Final report. U.S. Dept. of the Interior, Minerals Management. Service, Gulf of Mexico OCS Region, New Orleans, LA. OCS Study MMS 2009-039. 456 pp.
- Rowden, A.A., Schlacher, T.A., Williams, A., Clark, M.R., Stewart, R., Althaus, F., Bowden, D.A., Consalvey, M., Robinson W. y Dowdney, J. 2010. A test of the seamount oasis hypothesis: seamounts support higher epibenthic megafaunal biomass than adjacent slopes. *Marine Ecology*, 31 (suppl. 1): 95-106.
- Shotton R. (Ed). 2003. Deep Sea 2003: Conference on the Governance and Management of Deep-sea Fisheries. Part 1: Conference reports 1-5 December 2003, Queenstown, New Zealand, FAO Fisheries Department. 718 pp.
- Smith, C. R. 2006. Bigger is better: The role of whales as detritus in marine ecosystems. En: *Whales, Whaling and Ocean Ecosystems*, J.A. Estes, D.P. DeMaster, R.L. Brownell Jr., D.F. Doak y T.M. Williams (Eds.). University of California Press, Berkeley, CA, EE.UU., pp. 286-301.

- Smith, C. R. , F. C. De Leo, A. F. Bernardino, A. K. Sweetman y P. Martinez Arbizu. 2008b. Abyssal Food Limitation, Ecosystem Structure and Climate Change. *Trends in Ecology and Evolution*, 23: 518-528.
- Soliman Y. y Wade T.L. 2008. Estimates of PAHs burdens in a population of ampeliscid amphipods at the head of the Mississippi Canyon (N. Gulf of Mexico). *Deep-Sea Research*, II 55: 2577–2584.
- Thistle, D. 2003. The deep-sea floor: an overview. *Ecosystems of the World*, V. 28 Ecosystems of the deep ocean. P. A. Tyler. Amsterdam, Elsevier: 5-39.
- UNEP .2009. Marine litter: a global challenge. Nairobi: UNEP, 232 pp., [www.unep.org/pdf/UNEP\\_Marine\\_Litter-A\\_Global\\_challenge.pdf](http://www.unep.org/pdf/UNEP_Marine_Litter-A_Global_challenge.pdf).
- Van Dover, 2010. Mining seafloor massive sulphides and biodiversity: what is at risk? *ICES Journal of Marine Science Advance*. Access published June 30, 2010.
- Williams A., Schlacher T.A., Rowden A.A., Althaus F., Clark M.R., Bowden D.A., Stewart R., Bax N.J., Conalvey M., Kloser R.J. 2010. Seamount benthos fails to recover from trawling impacts. *Special Seamounts issue of Marine Ecology*, 31 (suppl. 1): 183-199.
- Woodwell G.M., Craig P.P. y Johnson H.J. 1971. DDT in the biosphere: where does it go? *Science*, 174:1101-1107.

La edición electrónica de *La frontera final: el océano profundo*, editado por Antonio Low Pfeng y Edward Peters Recagno se realizó durante el mes de abril de 2014 en el INECC.

