

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

Luis A. Soto¹ y Alejandro Estradas Romero²

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

¹ Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México.

² 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.

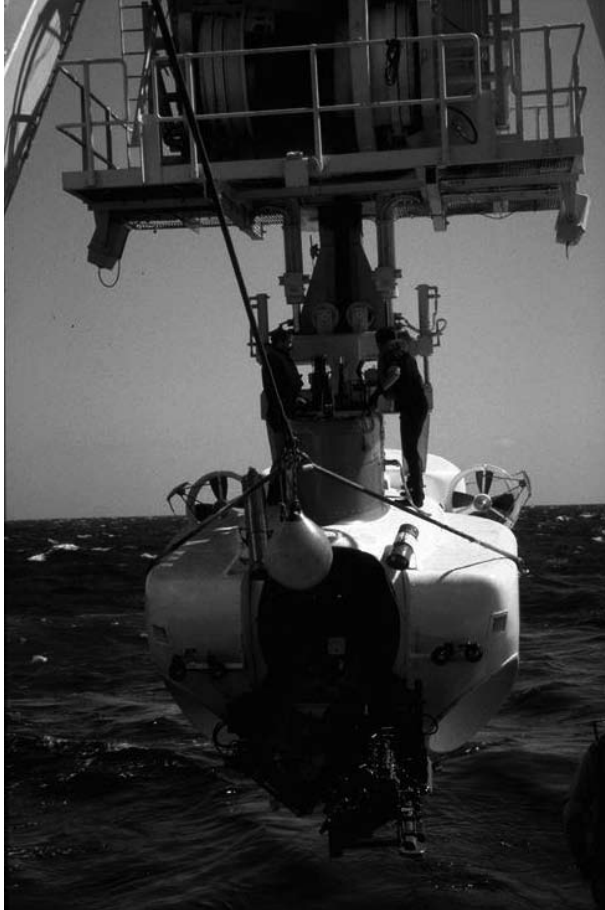
Keywords: deep-sea, hydrothermal vents, Guaymas Basin.

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

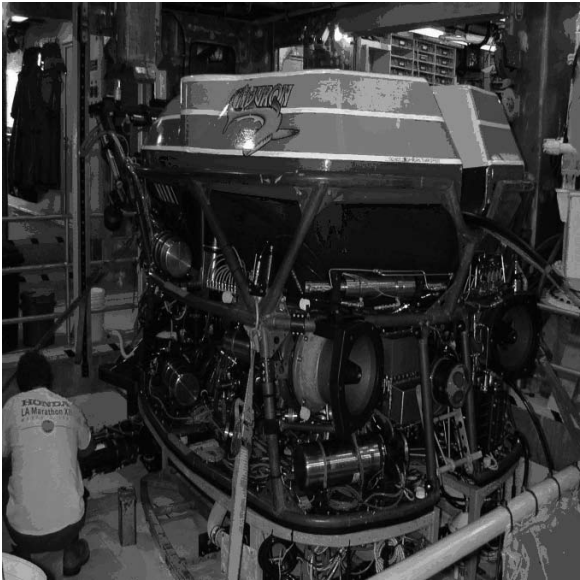


Figura 1. Continúa



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.

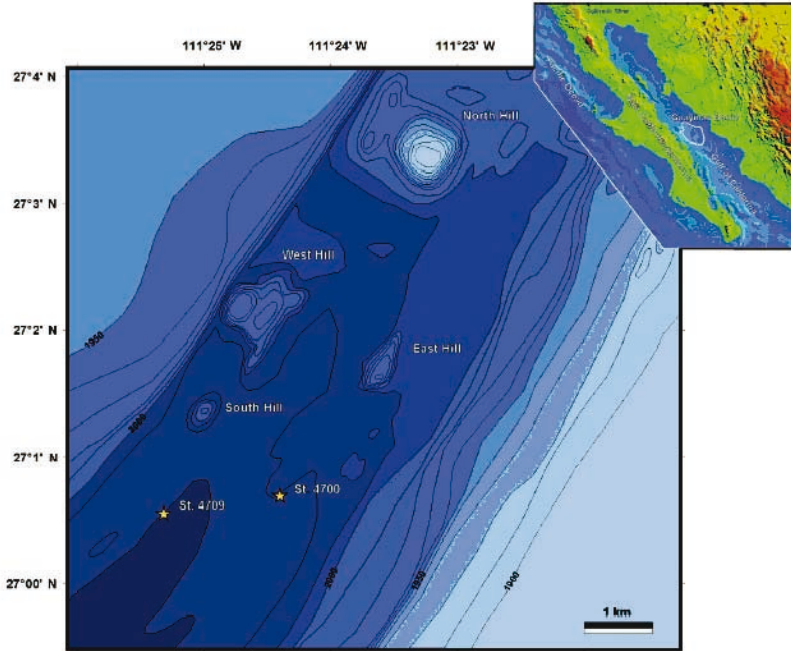
El fenómeno de hidrotermalismo en la Cuenca de Guaymas, está enmarcado por la rica productividad primaria de las aguas superficiales del Golfo de California y una significativa tasa sedimentaria; adicionalmente existe en el lecho marino, un flujo hidrotermal el cual aporta los elementos básicos para 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 HIDROTÉRMICOS PROFUNDOS

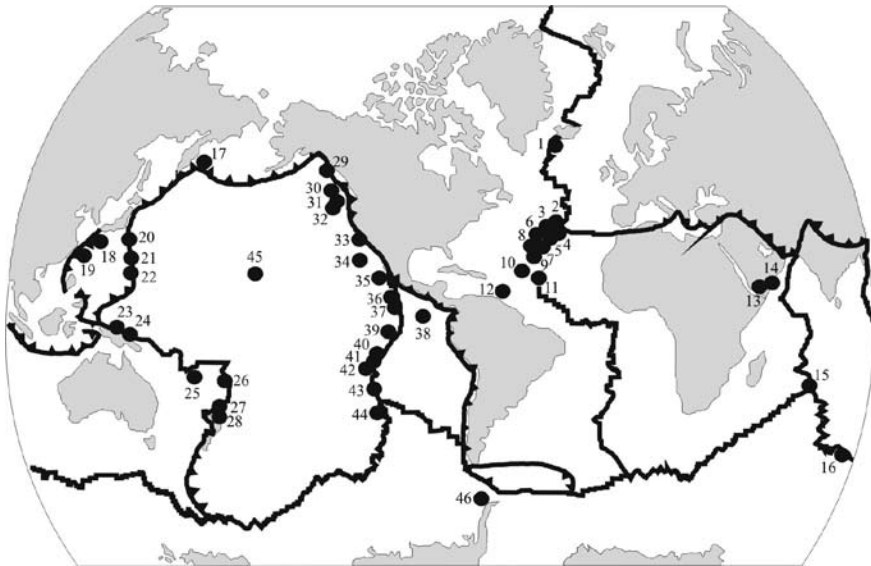
La mayoría de las ventilas hidrotermales de temperatura alta, se encuentran asociadas con los límites de placas activas como son: los centros de dispersión, zonas de fractura y en los centros de dispersión trasarco. También se registran ventilas de temperatura baja asociadas a montes submarinos como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

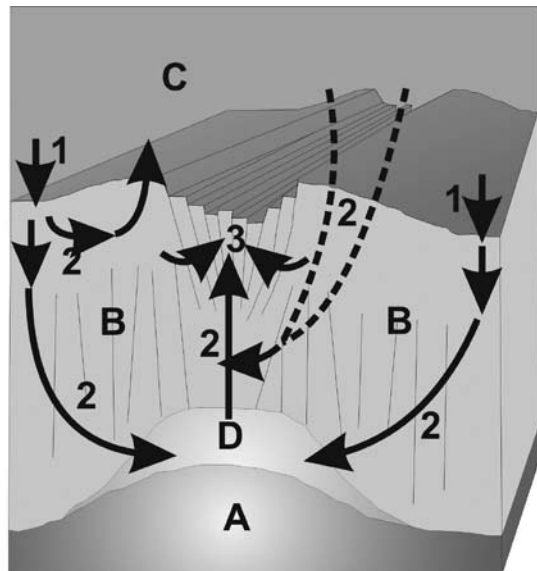
Figura. 3. Mapa representativo de las principales Dorsales centro-oceánicas y sitios de manantiales hidrotermales activos (Tarasov et al. 2005).



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° C) enriquecidos con sulfuro de hidrógeno (H₂S), metano (CH₄), 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° a 300° C). A estas temperaturas, la sílice, la anhídrita (CaSO₄) y la barita (BaSO₄) precipitan como partículas blancas (Figura 5b).

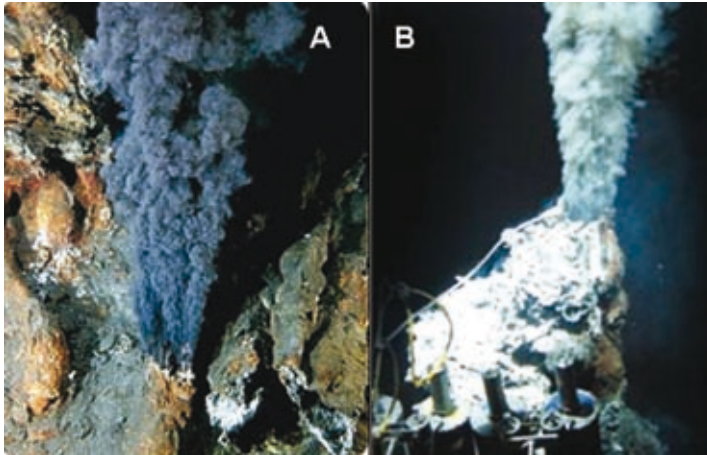
PROPIEDADES QUÍMICAS DEL FLUJO HIDROTHERMAL

Los sistemas hidrotermales de mar profundo están formados por agua de mar (alcalina, oxidante, rica en sulfatos (SO₄⁼) y magnesio, con concentraciones de metales del orden de 10² o 10³ μM. 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 (CaCO₃) 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 (CH₄) e hidrógeno (H₂), que es el gas más abundante. Algunos fluidos tienen niveles de CO₂ menor o igual a los presentes en el agua de mar (~2.5 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.whoi.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 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, CaSO_4) quebradiza y porosa alrededor de la salida de los fluidos. La anhidrita precipita debido a la presencia del calcio (Ca^{2+}) en los fluidos termales y a los sulfatos (SO_4^{2-}) del agua de mar circundante con una temperatura mayor a 150°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 (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
CO_2	2.3	3.9-4.5	50-285	11.6-18.2	n. d.	16-24
NH_4	<0.01	n. d.	n. d.	1.64-0.95	n. d.	10-16
H_2S	0	3.5	7.0	3.2-608	5.9	3.8-6.0
CH_4	0.0003	82-118	25-45	1,800-3,400	n. d.	2,000-6,800
H_2O mar	0.0003	335	25-80	160-420	n. d.	n. d.

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

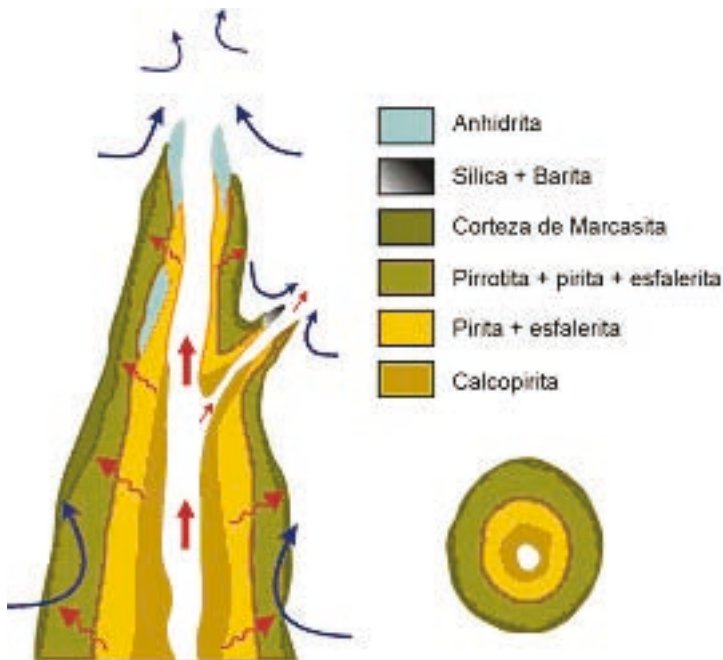
de anhidrita se enfrían a temperaturas inferiores a 150° C, la anhidrita comienza a disolverse de nuevo en el agua de mar.

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 S₂, 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 3.7×10^9 procariontes/g. En estos substratos lodosos es frecuente el hallazgo de almejas de *Vesicomya gigas* y *Solemya reidi*, que destacan por su talla (~ 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, Mex.: 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.