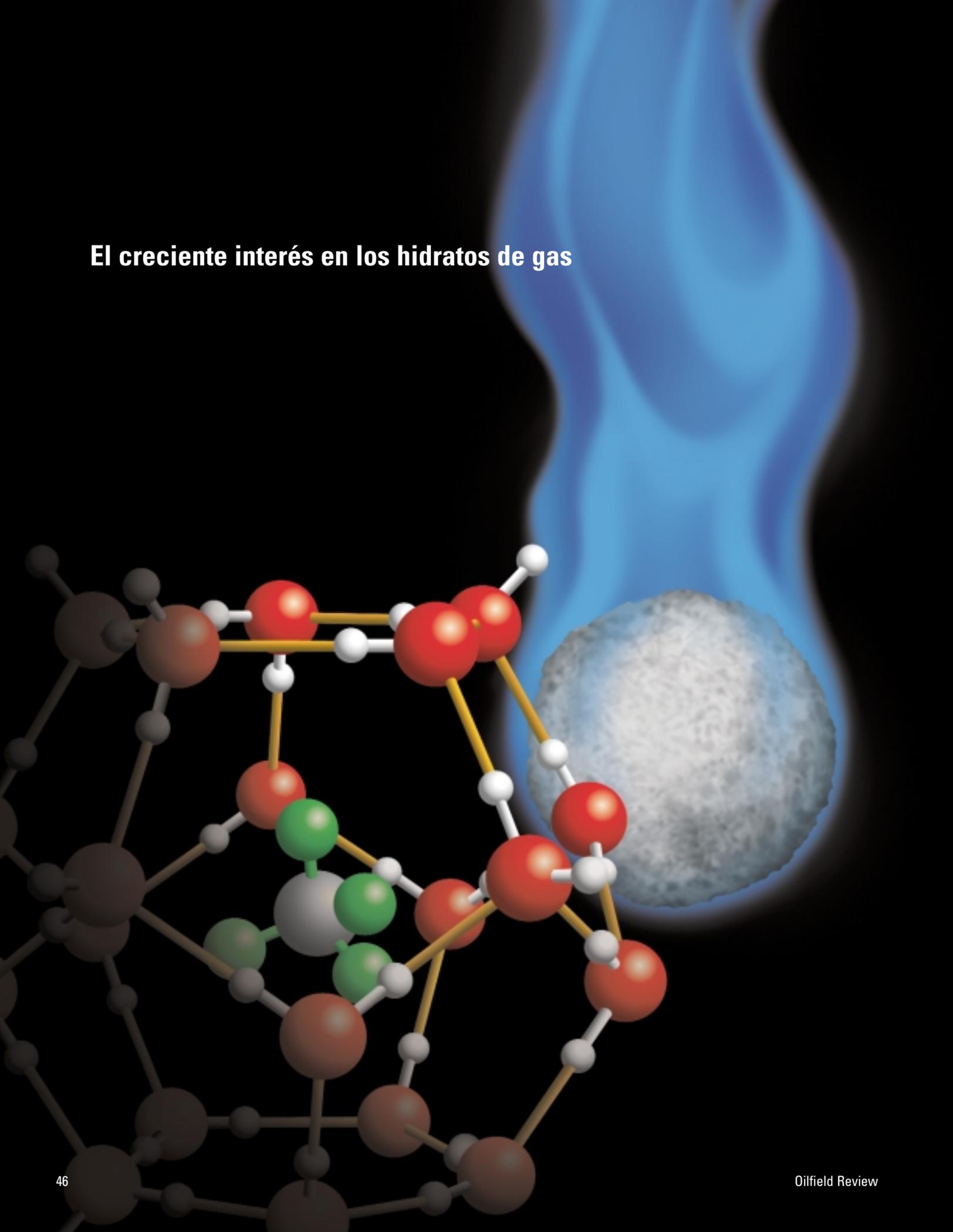


El creciente interés en los hidratos de gas



Para algunas personas en la industria de la energía, los hidratos formados a partir de gases son conocidos por los problemas que ocasionan al bloquear los ductos y las tuberías de producción. Pero para otros, los hidratos son un recurso potencial de hidrocarburos, ya que superan en gran medida el potencial de los recursos de gas natural convencional. Sin embargo, para ambos grupos, es esencial conocer más acerca de los hidratos.

Timothy S. Collett
United States Geological Survey
Denver, Colorado, EUA

Rick Lewis
Greenwood Village, Colorado

Takashi Uchida
Japan Petroleum Exploration Company, Ltd.
Chiba, Japón

Se agradece la colaboración en la preparación de este artículo a Gerard Daccord, Clamart, Francia; William Dillon, US Geological Survey, Woods Hole, Massachusetts, EUA; Yoshi Kawamura, Nagaoka, Japón; y Robert Kleinberg, Ridgefield, Connecticut, EUA.

AIT (Herramienta de Imágenes de Inducción), DSI (Imagen Sónica Dipolar de Cizallamiento), FMI (Imágenes Micro-eléctricas de Cobertura Total) y Platform Express son marcas de Schlumberger.

Los hidrocarburos son combinaciones especiales de hidrógeno y carbono. Estos compuestos de formación natural se han recolectado durante miles de años, en primer lugar, de filtraciones inusuales (para utilizarse como adhesivos en la construcción de caminos y edificios, para impermeabilización en barcos y cestas, para armamento, pintura, labores artísticas en mosaico, para cultos religiosos, propósitos medicinales y como combustible para alumbrado y para cocinar), y posteriormente se los ha extraído de los pozos. Durante los últimos dos siglos, la producción de petróleo y gas ha alcanzado una escala global y actualmente tiene influencia en la mayoría de las actividades mundiales.

Algún día, quizá en el siglo XXI, el depósito de hidrocarburos convencionales no podrá proporcionar por más tiempo la energía adecuada para las crecientes economías y poblaciones de la tierra. Para entonces, los no muy conocidos, pero hidrocarburos afines conocidos como hidratos, podrían tomar su lugar como importantes fuentes de energía. Los hidratos son también una combinación especial de dos sustancias comunes, agua y gas natural. Si estas sustancias se encuentran en condiciones de alta presión y alta temperatura, se unen para formar una sustancia sólida semejante al hielo. Vastos volúmenes de sedimentos en el fondo del mar y en las regiones polares favorecen la formación de hidratos.

Este artículo describe cómo y dónde existen los hidratos, cómo pueden ser evaluados como recursos y otras cuestiones y retos asociados con su explotación.

Energía compactada

La unidad básica de hidrato es un cristal hueco de moléculas de agua con una sola molécula de gas flotando en el interior. Los cristales se agrupan en un enrejado compactado. Los hidratos, conocidos también como hidratos de gas, hidratos de metano o clatratos (de las palabras griega y latina para "emparrillado"), presentan una estructura similar al hielo, excepto que las moléculas de gas se encuentran ubicadas dentro de los cristales en vez de estar entre ellos. A juzgar por las pocas ocasiones que se les ha podido observar, los hidratos también se asemejan al hielo. Pero no actúan como el hielo: ya que se queman cuando se encienden con un cerillo.

Los químicos conocen los hidratos desde hace casi 200 años, pero hasta hace poco estas sustancias eran consideradas como curiosidades de laboratorio.¹ La industria del petróleo se empezó a interesar en los hidratos en la década de 1930, cuando se encontró que la formación de los hidratos de gas era la causa de los bloqueos en algunos ductos en Kazakstán.² Desde entonces, la mayor parte de los esfuerzos de la industria relacionados con los hidratos han estado encaminados a evitarlos o a dificultar su acumulación (véase "Riesgos relacionados con los hidratos," página 59).

1. Sloan ED Jr: *Clathrate Hydrates of Natural Gas*, 2da ed. Nueva York, Nueva York, EUA. Marcel Dekker, Inc., 1998.

2. Bagirov E y Lerche I: "Hydrates Represent Gas Source, Drilling Hazard," *Oil & Gas Journal* 95, no. 48 (Diciembre 1, 1997): 99-101, 104.



▲ Presencias conocidas e inferidas de los hidratos de gas.

● Ubicación de los hidratos

En la década de 1960, personal de perforación ruso descubrió la formación natural de hidratos en un campo de gas en Siberia. Posteriormente, en la década de 1970, científicos de expediciones de perforación en aguas profundas, descubrieron que los hidratos no sólo se forman naturalmente en las regiones continentales polares, sino también en los sedimentos de las aguas profundas en los límites continentales exteriores.

Muchos estudios demuestran que el gas que se encuentra en los hidratos formados naturalmente se produce cuando bacterias anaeróbicas descomponen materia orgánica por debajo del fondo del mar, produciendo metano y otros subproductos gaseosos incluyendo dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, etano y propano. Todos estos pueden incorporarse como moléculas huésped en los hidratos, pero entre ellos predomina el metano.³ Existen algunas evidencias que respaldan el argumento de que en un limitado

número de ambientes, el metano en los hidratos proviene también de fuentes termogénicas, ubicadas a mayor profundidad dentro de la tierra.⁴

La naturaleza compacta de la estructura del hidrato contribuye a la altamente eficaz compactación del metano. Un volumen cúbico de hidrato contiene gas que se expandirá entre 150 y 180 volúmenes cúbicos a presión y temperatura estándar.

La mayoría de los hidratos marinos parecen estar confinados en los límites de los continentes donde las aguas tienen una profundidad aproximada de 1500 pies [aproximadamente 500 m] y donde las aguas ricas en nutrientes descargan residuos orgánicos para que las bacterias lo conviertan en metano (arriba). Los hidratos de gas se han encontrado en el fondo del mar, pero su ubicación usual es de 325 a 1600 pies [100 a 500 m] por debajo de éste. En las regiones de permafrost (capas situadas a cierta profundidad que per-

manecen heladas todo el año), los hidratos de gas pueden formarse en zonas menos profundas debido a que las temperaturas de la superficie son menores. Se han podido identificar grandes acumulaciones costa afuera de Japón, en Blake Ridge fuera de la costa oriental de los Estados Unidos de Norteamérica (EUA), en la costa continental de Cascade a las afueras de Vancouver, en la Columbia Británica, en Canadá y costa afuera de Nueva Zelandia.⁵ Sólo una pequeña proporción de la evidencia de las acumulaciones de hidratos alrededor del mundo proviene de muestreo directo. La mayoría proviene de otras fuentes, tales como reflexiones sísmicas, registros diarios de pozos, información sobre perforación y mediciones de la salinidad del agua intersticial.

Experimentos de laboratorio muestran de qué manera la estabilidad de la fase sólida del hidrato de metano depende de la presión y la temperatura (próxima página, a la izquierda). Teóricamente,

3. Krajick K: "The Crystal Fuel," *Natural History* 106, no. 4 (Mayo de 1997): 26-31.

4. Collett TS: "Natural Gas Hydrates of the Prudhoe Bay and Kuparuk River Area, North Slope, Alaska," *AAPG Bulletin* 77, no. 5 (Mayo de 1993): 793-812.

MacDonald IR, Guinasso N, Sassen R, Brooks JM, Lee L y Scott KT: "Gas Hydrate That Breaches the Seafloor on the Continental Slope of the Gulf of Mexico," *Geology* 22, no. 8 (Agosto de 1994): 4539-4555.

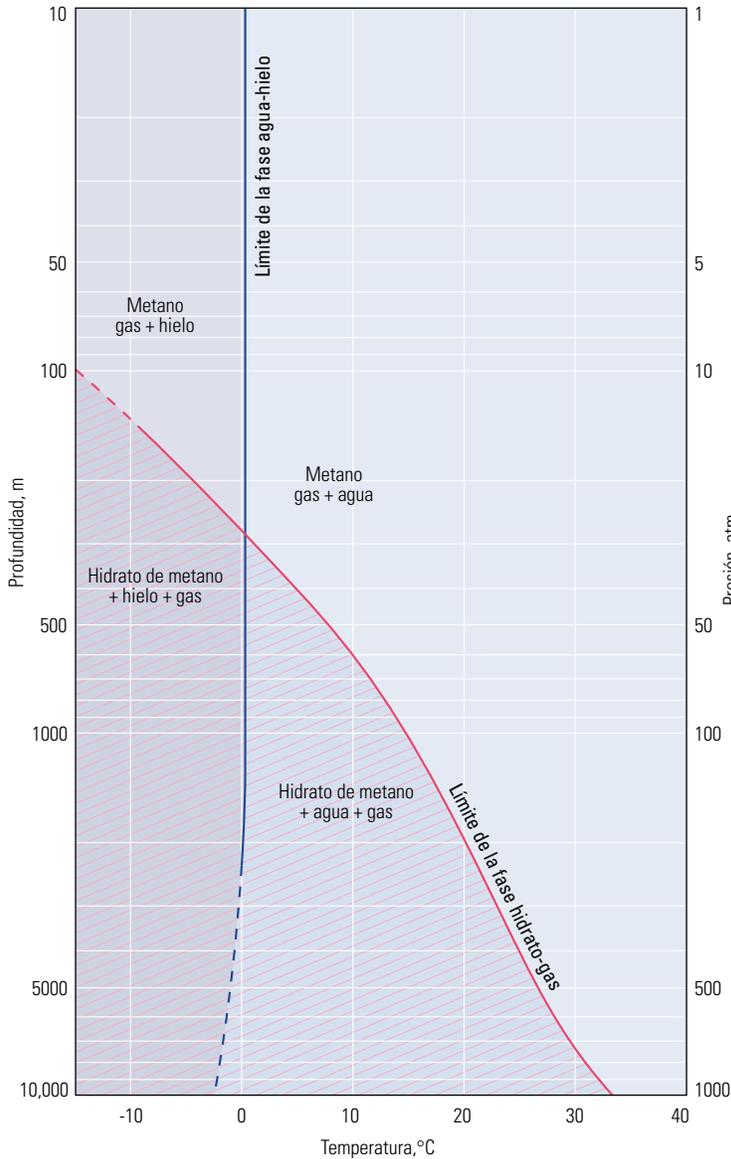
Suess E, Torres ME, Bohrmann G, Collier RW, Greinert J, Linke P, Rehder G, Trehu A, Wallman K, Winckler G y Zuleger E: "Gas Hydrate Destabilization: Enhanced Dewatering, Benthic Material Turnover and Large Methane Plumes at the Cascadia Convergent Margin," *Earth and Planetary Science Letters* 170, no. 1-2 (Junio de 1999): 1-15.

5. Collett TS y Kuuskraa VA: "Hydrates Contain Vast Store of World Gas Resources," *Oil & Gas Journal* 96, no. 19 (Mayo 11, 1998): 90-95.

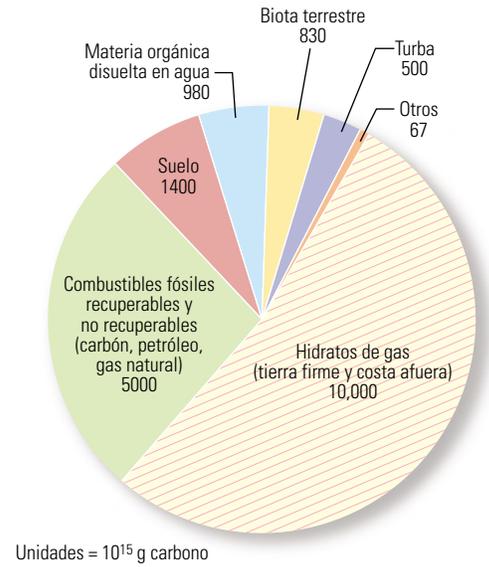
6. Krajick, referencia 3.

7. Kvenvolden K: "Gas Hydrates—Geological Perspective and Global Change," *Reviews of Geophysics* 31, no. 2 (Mayo de 1993): 173-187.

8. Makogan YF: *Hydrates of Hydrocarbons*. Tulsa, Oklahoma, EUA: PennWell Books, 1997.



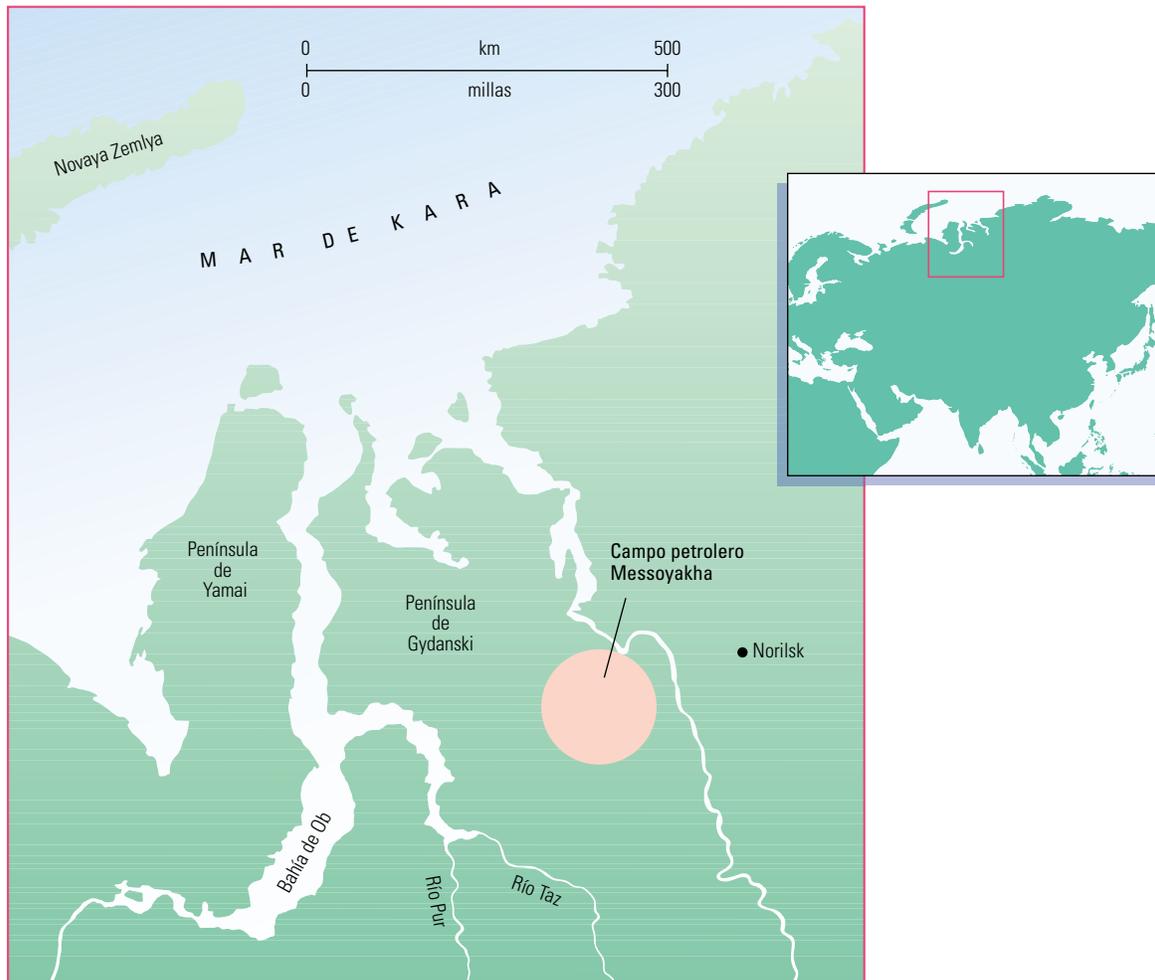
^ Estabilidad del hidrato de metano en función de la presión y la temperatura. La combinación de metano y agua a bajas temperaturas y a altas presiones resulta en un sólido (parte sombreada). Si se agrega cloruro de sodio al agua, la curva rosa se desplaza hacia la izquierda, mientras que si se agrega dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y otros hidrocarburos la curva se desplaza hacia la derecha.



^ Contenido de carbono de los recursos de hidrocarburos conocidos en el mundo. Los hidratos de gas contabilizan más de la mitad de los recursos de hidrocarburos. (Esta cifra excluye el carbono orgánico disperso como el kerógeno y el asfalto). [Adaptado de Kvenvolden, referencia 7].

estos requisitos de estabilidad se cumplen en un alto porcentaje en el fondo del mar de la pendiente continental. Los descubrimientos más recientes de hidratos de gas oceánicos formados naturalmente corroboran estas condiciones de estabilidad. Como parte de unos programas de investigación en aguas profundas se perforó la parte central de sedimentos ricos en hidratos, se extrajeron núcleos y se intentó tomar muestras para su estudio a bordo de las embarcaciones y en el laboratorio.⁸ Sin embargo, cuando los primeros núcleos se colocaron a bordo, éstos se despresurizaron y autodestruyeron. Pocos hidratos formados naturalmente han sobrevivido el suficiente tiempo para ser estudiados.

Se cree que se han encontrado cantidades suficientes de hidratos como para efectuar estimaciones sobre su volumen total. Existe un arduo consenso, que aproximadamente 20,000 trillones de metros cúbicos [aproximadamente 700,000 Tpc] de metano se encuentran atrapados en los hidratos.⁷ Alrededor del 99% de éstos se encuentran en sedimentos marinos costa afuera.⁸ El total es de aproximadamente dos órdenes de magnitud mayores a la cantidad del metano convencional recuperable, el cual se calcula es de aproximadamente 250 trillones de m³ [aproximadamente 8800 Tpc]. Es decir, los hidratos pueden contener 10 trillones de toneladas de carbono, más del doble de todo el carbón, el petróleo y las reservas de gas convencionales del mundo combinados (arriba). Tales estimaciones de este recurso de hidrocar-



^ Campo petrolero Messoyakha en Rusia, descubierto en 1968. Mucha de la producción de gas se atribuye a la disociación de hidratos de metano.

buros potenciales, está conduciendo a varios países a iniciar programas de investigación y exploración para entender el comportamiento de los hidratos, identificar las acumulaciones y desarrollar métodos de extracción. Japón, India, Estados Unidos, Canadá, Noruega y Rusia son algunos de los países que actualmente están desarrollando investigaciones sobre los hidratos de gas.

Messoyakha, un temprano descubrimiento extraordinario

El único ejemplo conocido de producción de gas atribuido a los hidratos ocurrió en el campo de gas Messoyakha en Siberia (arriba). El campo Messoyakha, descubierto en 1968, fue el primer campo productor en el noroeste de la cuenca

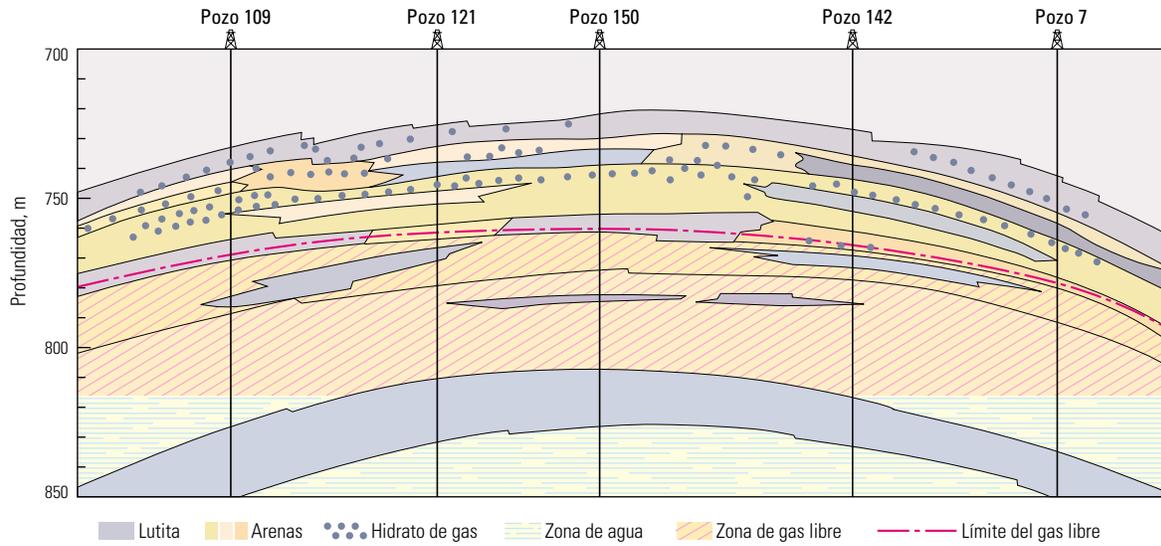
siberiana. Para mediados de la década de 1980, más de 60 campos de gas habían sido descubiertos en la cuenca, que conjuntamente contenían aproximadamente 777 Tpc [22 trillones m³], o un tercio de las reservas de gas del mundo. Antes de la producción, se calculó que el campo Messoyakha contenía 2.8 Tpc [79 millones de m³] de gas, un tercio del cual se encuentra contenido en los hidratos que recubren el intervalo de gas libre en el campo (página siguiente, arriba).

La producción se inició en 1969 desde la zona de gas libre del yacimiento y por un par de años las presiones disminuyeron de acuerdo a lo esperado (página siguiente abajo). Posteriormente, en 1971 se midieron presiones y obtuvieron producciones mayores a lo esperado. Esto se atribuyó a la producción de gas originada en la

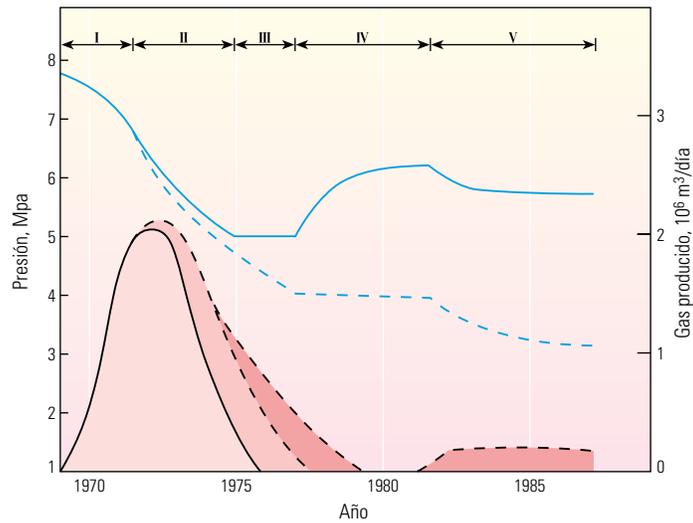
capa de hidrato: conforme disminuyó la presión en la capa de gas libre, la capa de hidrato se despresurizó y liberó gas de los hidratos disociados. Alrededor del 36% ó 183,000 MMpc [5000 millones de m³] del gas producido en Messoyakha fue atribuido a la disociación de hidratos de gas.⁹

Este método de despresurización para producir gas a partir de hidratos funciona cuando hay gas libre asociado con la acumulación de hidrato. En consecuencia, esto puede funcionar también para los campos del Río Kuparuk-Bahía de Prudhoe en Alaska, EUA.

9. Para un argumento contrario: Collett TS y Ginsberg GD: "Gas Hydrates in the Messoyakha Gas Field of the West Siberian Basin—A Re-Examination of the Geologic Evidence," *International Journal of Offshore and Polar Engineering* 8, no. 1 (Marzo de 1998): 22-29.



^ En el campo Messoyakha, los hidratos de gas se encuentran por encima del gas libre.



^ Historia de producción del campo Messoyakha que muestra presiones pronosticadas (línea punteada azul) y medidas (línea continua azul) del yacimiento y los volúmenes de gas producido (curvas en color negro). Se han identificado cinco períodos de producción: I. Producción de gas libre; II. Producción de gas a partir de la zona de gas libre y el depósito de hidrato; III. Producción de gas a partir del hidrato solo; IV. Cierre; V. Pequeña cantidad de la producción de gas a partir del hidrato. Los volúmenes producidos debajo de las líneas negras punteadas se atribuyen a la disociación de hidrato.

Bahía de Prudhoe

Las acumulaciones de hidrato más estudiadas en el mundo, después de los hidratos de gas en el campo ruso Messoyakha, son las encontradas en el área del Río Kuparuk-Bahía de Prudhoe en Alaska. En 1972, se extrajeron hidratos de gas en barriles cilíndricos presurizados del pozo de exploración Northwest Hien 2 de ARCO y Exxon en la pendiente norte de Alaska (abajo).¹⁰ El espesor de la zona de estabilidad de hidratos de gas para el área de la Bahía de Prudhoe-Kuparuk puede calcularse a partir de los gradientes de temperatura y presión en la región. Potencialmente, los hidratos son estables entre 210 y 950 m [690 y 3120 pies].

El análisis de los datos de registros de pozos de otros 445 pozos de la pendiente norte, revelaron que 50 pozos contenían hidratos en seis capas de areniscas continuas en el extremo este de la unidad de producción del Río Kuparuk y en el extremo oeste de la unidad de producción de la Bahía de Prudhoe. El análisis relacionó los registros de estos pozos con los registros del pozo de exploración en el cual se había recuperado el núcleo de hidrato. Estos y otros estudios indicaron que es difícil distinguir los hidratos mediante registros sencillos; la utilización de múltiples tipos de registros parece funcionar mejor. Los registros acústicos registran valores similares a aquellos encontrados en el hielo. Los registros de resistividad miden valores altos que indican la presencia de hidrocarburos. El incremento en el gas de trasfondo medido mediante el registro del lodo de perforación fue el mejor indicador de hidratos, pero su

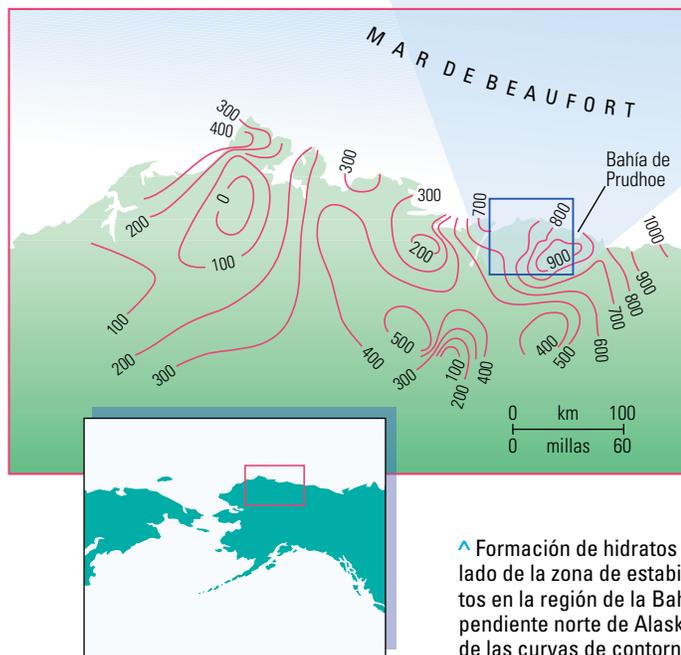
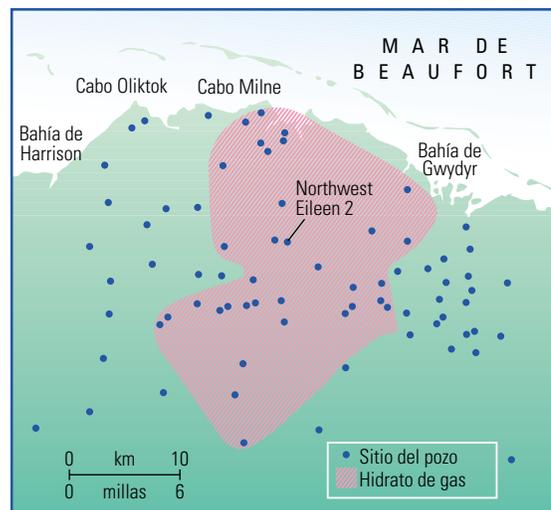
respuesta no fue muy diferente al de un registro obtenido en una zona de gas libre (página siguiente, arriba).

Estos primeros descubrimientos de hidratos asociados con acumulaciones convencionales de hidrocarburos mostraron cómo las herramientas de adquisición de registros podían identificar las zonas de hidratos en ambientes árticos. La perforación de huecos para buscar hidratos en ambientes marinos es costosa, sin embargo, hay otra herramienta disponible para tales efectos; ésta es la sección sísmica.

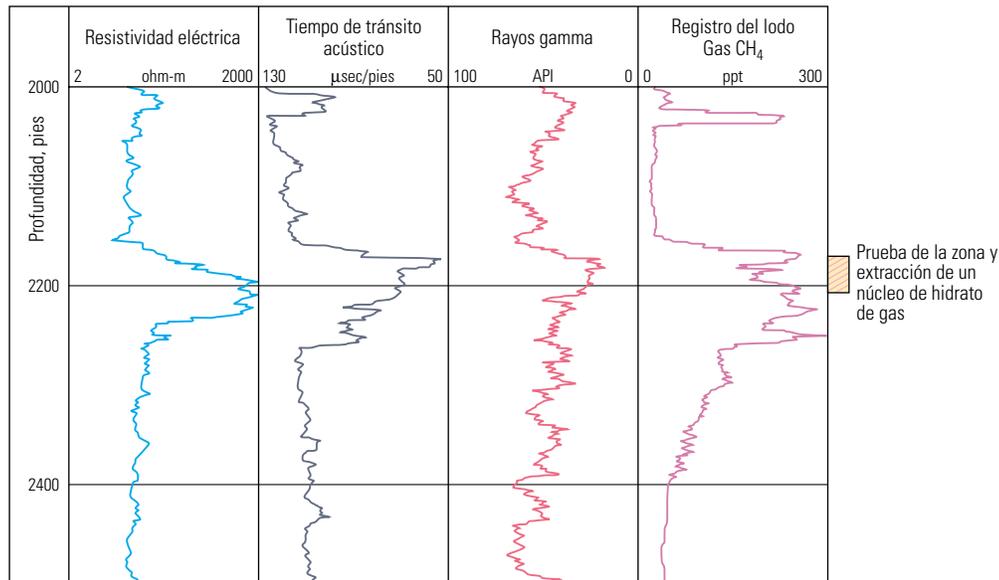
El descubrimiento de hidratos en el mar

Para cuantificar el volumen probable de hidratos y su potencial como recurso, es importante conocer

tanto la distribución de los hidratos en los sedimentos, como las propiedades mecánicas de las formaciones que contienen hidratos. Las muestras extraídas muestran partículas individuales de hidrato diseminado en la sección sedimentaria, pero los hidratos también se presentan como cemento intergranular, nódulos, láminas, vetas y capas masivas (página siguiente, abajo). Tanto en los depósitos de hielos continentales y marinos, las secciones que contienen hidratos normalmente varían en espesor, de unos cuantos centímetros a 30 m [1 pulg a 100 pies]. Una vez se tomó una muestra de hidrato sólido de una capa de 3 a 4 m [10 a 13 pies] de espesor.



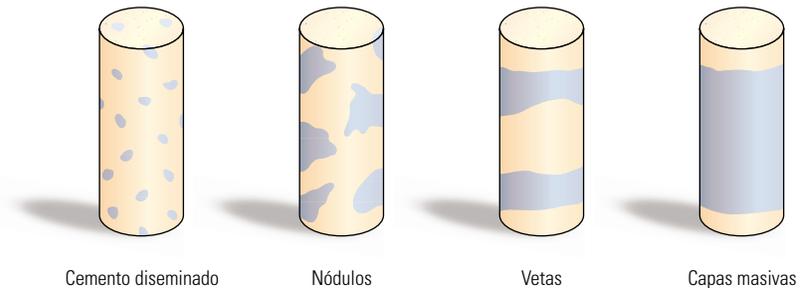
^ Formación de hidratos y espesor calculado de la zona de estabilidad de los hidratos en la región de la Bahía de Prudhoe, pendiente norte de Alaska. Los intervalos de las curvas de contorno en la figura del centro se presentan en metros.



^ Registros obtenidos en el pozo Northwest Eileen 2 de ARCO y Exxon. La velocidad sónica (Carril 2) aumenta a lo largo de la zona de hidrato, como lo haría en una capa de hielo. La resistividad (Carril 1) aumenta debido al metano. El registro del lodo (Carril 4) muestra un incremento en el gas de trasfondo, similar a la respuesta observada durante la perforación en una zona de gas libre.

El hidrato que actúa como cemento endurecerá la matriz del sedimento. Esto también puede ocurrir en el espacio intersticial, sin afectar en forma importante la rigidez del sedimento. Cuando los hidratos de gas se forman en los espacios intersticiales del sedimento consolidado, el hidrato sólido, en lugar del agua líquida, ocupa los espacios intersticiales y los procesos diagenéticos de consolidación y cementación mineral se inhiben en gran medida.

Se cree que la velocidad del sonido en el hidrato puro es similar a la del hielo, pero el valor exacto todavía no se ha determinado y probablemente depende de la química del hidrato. La velocidad acústica en una capa de hidrato cementado también es alta, más alta que en un sedimento lleno de líquido. Como resultado, el contacto entre una capa rica en hidrato y una capa llena de gas puede actuar como un prominente reflector sísmico. A estos reflectores que se presentan en la base de la zona de hidrato se les conoce como reflectores simuladores de fondo, (BSR; por sus siglas en Inglés). Su forma sigue la forma del fondo del mar y la polaridad de su pulso sísmico se invierte. La profundidad de los BSR por debajo del fondo del mar depende de las temperaturas y las presiones requeridas para la estabilidad del hidrato. En zonas marinas se han mapeado BSRs que se encuentran a profundidades de entre 100 a 500 m [330 a 1640 pies] por debajo del fondo del mar.¹¹



^ Distribución de los hidratos en los sedimentos. Una formación puede contener (izquierda a derecha) hidratos en la forma de cemento diseminado, nódulos, vetas y capas masivas.

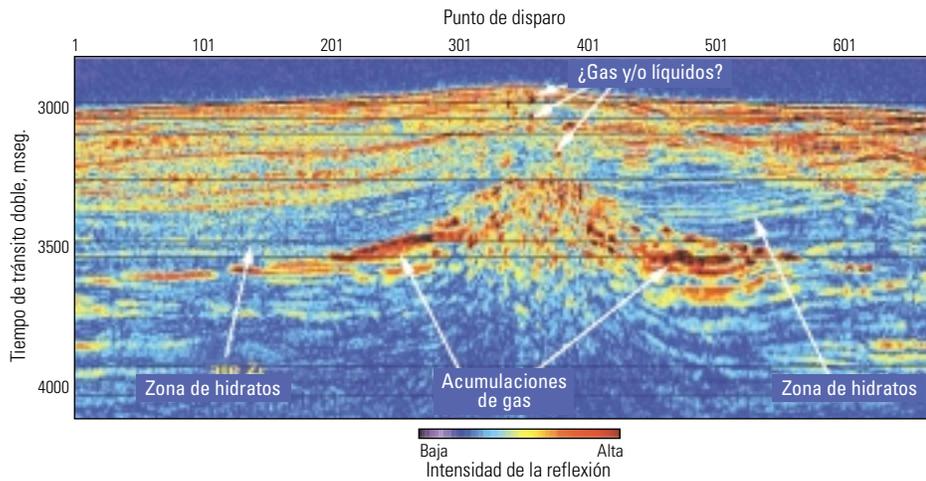
La ocurrencia de los BSR en los datos de reflexión sísmica, es el indicador más importante de la existencia de hidratos en los sedimentos marinos. No obstante, los hidratos pueden existir sin la creación de los BSR si no existe una cantidad importante de gas libre o si el hidrato no endurece considerablemente la matriz del sedimento. Unos investigadores en Canadá han reportado éxito en la identificación de zonas marinas de hidratos utilizando resonancia eléctrica remota en áreas donde los BSR no son visibles.¹²

Los reflectores simuladores de fondo se han observado en muchas partes del mundo. Una de las regiones mejor estudiadas es Blake Ridge, costa afuera de Carolina del Norte, EUA

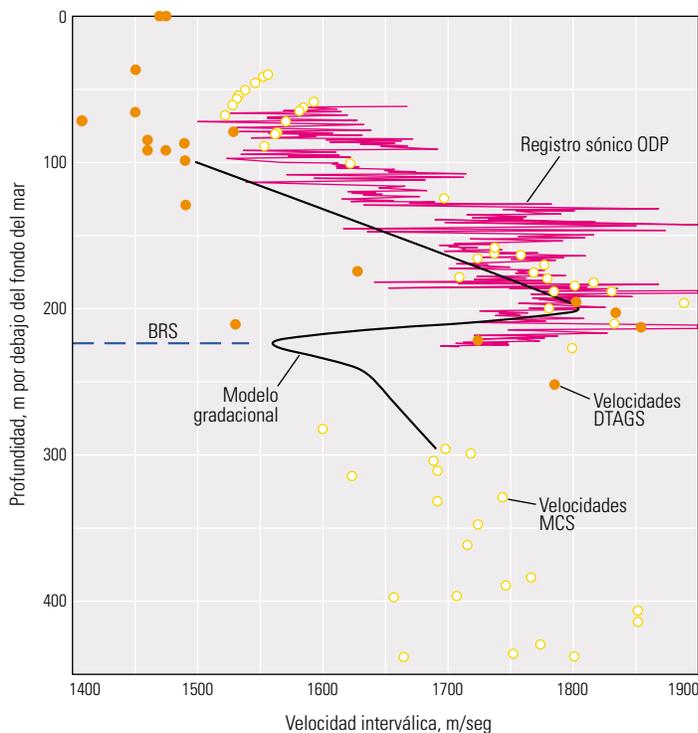
10. Collett, referencia 4.
Collett TS: "Well Log Characterization of Sediment Porosities in Gas-Hydrate-Bearing Reservoir," artículo de la SPE 49298, presentado en la Conferencia y Exhibición Anual de la SPE, Nueva Orleans, Luisiana, EUA, Septiembre 27-30, 1998.

11. Collett T: "Methane Hydrate: An Unlimited Energy Resource?" *Trabajos del Simposio Internacional sobre Recursos de Hidratos de Metano en un Futuro Cercano*, Ciudad de Chiba, Japón, Octubre 20-22, 1998: 1-12.

12. Yuan J y Edwards RN: "The Assessment of Marine Gas Hydrates Through Electrical Remote Sounding: Hydrate Without a BSR?" *Geophysical Research Letters* 27, no.16 (Agosto 15, 2000): 2397-2400.



^ Sección sísmica que muestra la intensidad de la reflexión a lo largo de la Costa del Atlántico en Blake Ridge, EUA. Se observa un reflector simulador de fondo (BSR) siguiendo la base de la capa de hidrato de gas. El BSR se eleva en el centro del perfil, donde se introdujo un diapiro de sal. [De Taylor MH, Dillon WP y Pecker IA: "Entrampado y Migración del Metano Asociado con la Zona de Estabilidad del Hidrato de Gas en el Diapiro de Blake Ridge: Nuevas Visiones a partir de Datos Sísmicos," *Geología Marina* 164 (2000): 79-89, cortesía de William P. Dillon].



^ Velocidades acústicas en el contacto entre una capa que contiene hidrato y una zona de gas libre costa afuera de Vancouver, Columbia Británica, Canadá. Se observa consistencia entre las velocidades del registro sísmico, los estudios sísmicos multicanal (MCS, por sus siglas en Inglés) y levantamientos sísmicos de alta frecuencia (DTAGS, sistemas geofísicos y acústicos para arrastre profundo) registrados durante un Programa de Perforación Marina, (ODP, por sus siglas en Inglés). Los resultados de mayor frecuencia implican un contacto gradacional (curva continua en color negro). [Adaptado de Gettrust et al, referencia 15].

(izquierda arriba).¹³ Aquí, los científicos para la Investigación Geológica en los Estados Unidos de Norteamérica (USGS, por sus siglas en Inglés) han realizado estudios sísmicos bidimensionales (2D) sobre la superficie marina y estudios de sísmica de pozo conjuntamente con perforaciones de investigación para conducir experimentos sobre las propiedades químicas e isotópicas de los hidratos.¹⁴

Si bien los estudios sísmicos normales multicanal marinos detectan el gran contraste en la impedancia acústica entre una capa de hidrato de gas y una capa subyacente de gas libre, los BSR no son tan evidentes en relevamientos de mayor frecuencia, en los que el muestreo se efectúa a una resolución vertical mayor.¹⁵ Un relevamiento de alta resolución realizado costa afuera de Vancouver, Columbia Británica, Canadá, registró señales de datos multicanal que varían de 250 a 650 Hz, sin embargo, se registraron sólo reflexiones débiles en un área donde los BSR son fuertes a menor frecuencia. Esto indica que el contraste de velocidad en la interfase entre la zona de hidrato y la zona de gas libre es gradual y ocurre a lo largo de unos cuantos metros. Las velocidades inferidas a partir del relevamiento de alta resolución son consistentes con aquellas obtenidas a partir de relevamientos multicanal y a partir del registro de datos del Programa de Perforación Marina, (ODP, por sus siglas en Inglés) (izquierda abajo).

El contraste en la velocidad sísmica compresional y de cizallamiento en los BSR puede también dar lugar a una respuesta típica de la variación de la amplitud con el desplazamiento (AVO, por sus siglas en Inglés) que puede ayudar a determinar si el hidrato está actuando como un cemento o está llenando los espacios intersticiales sin cementar los granos de sedimento.¹⁶

13. <http://abacus.er.usgs.gov/hydrates/index.html>

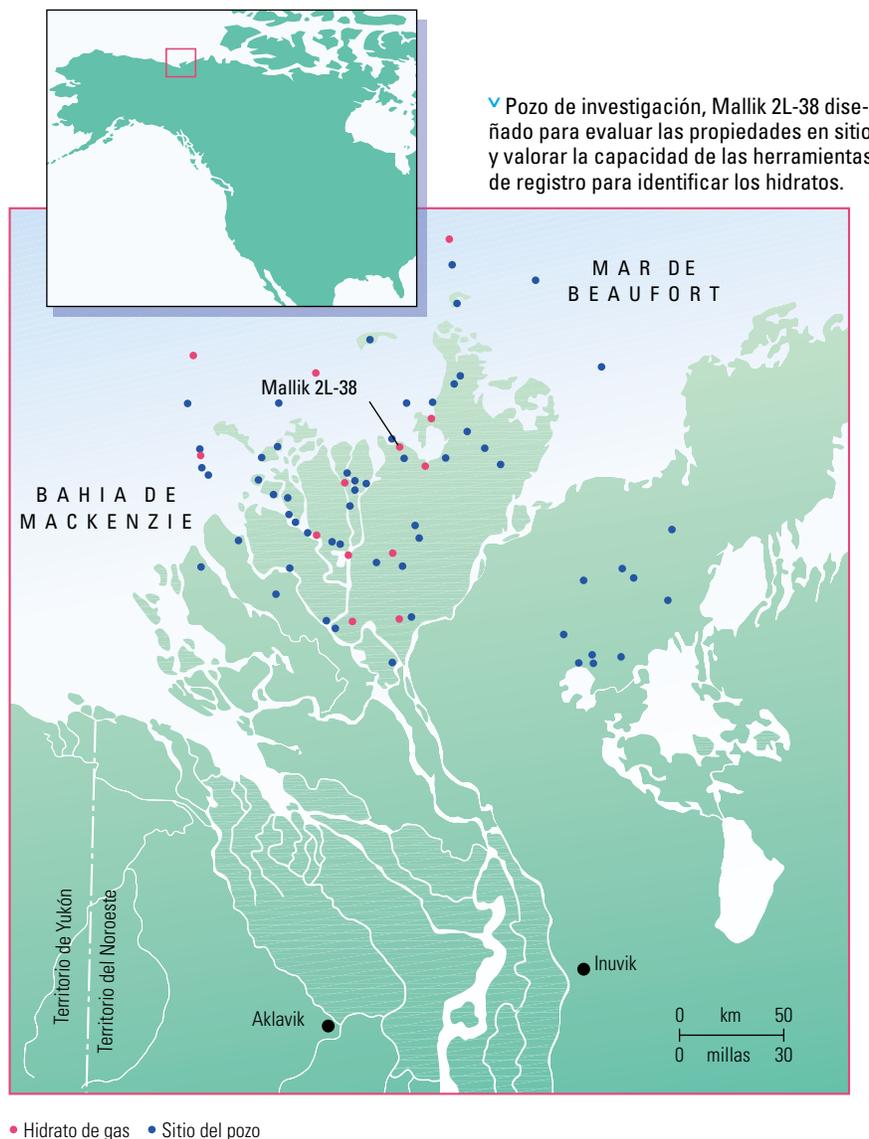
14. <http://obs.er.usgs.gov/BlakeRidge95.html>

15. Gettrust J, Wood W, Lindwall D, Chapman R, Walia R, Hannay D, Spence G, Loudon K, MacDonald R y Hyndman RD: "New Seismic Study of Deep Sea Gas Hydrates Results in Greatly Improved Resolution," *EOS Transactions of the American Geophysical Union* 80, no. 38 (Septiembre 21, 1999): 439-440.

16. La variación de la amplitud de reflexión con el desplazamiento entre la fuente sísmica y el receptor indica el contraste en la relación de Poisson a través del reflector.

17. Ecker C, Dvorkin J y Nur A: "Sediments with Gas Hydrates: Internal Structure from Seismic AVO," *Geophysics* 63, no. 5 (Septiembre-Octubre de 1998): 1659-1669.

18. Collett TS, Lewis RE, Dallimore SR, Lee MW, Mroz TH y Uchida T: "Detailed Evaluation of Gas Hydrate Reservoir Properties Using JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38 Gas Hydrate Research Well Downhole Well-Log Displays," en Dallimore SR, Uchida T y Collett TS (eds): *Scientific Results from JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38 Gas Hydrate Research Well, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canadá*. Ottawa, Ontario, Canadá: Geological Survey of Canada, Bulletin 544 (1999): 295-311.



Personal de Chevron Petroleum Technology Company, La Habra y de la Universidad de Stanford, ambas en California, Estados Unidos, han analizado la respuesta AVO en los BSR a lo largo y ancho de una parte de Blake Outer Ridge costa afuera de Florida y Georgia en los Estados Unidos y han concluido que el hidrato en ese ambiente no es cementante.¹⁷

Además de los estudios sísmicos marinos que abarcan grandes áreas, las mediciones de la salinidad del agua intersticial pueden detectar la existencia, o reciente presencia, de hidratos cerca del fondo del mar. Los hidratos contienen sólo agua pura y eliminan las sales y otros compuestos que puedan estar presentes en el agua del mar. Inmediatamente después de la cristalización de la molécula de hidrato, el agua marina circundante se enriquece con los componentes

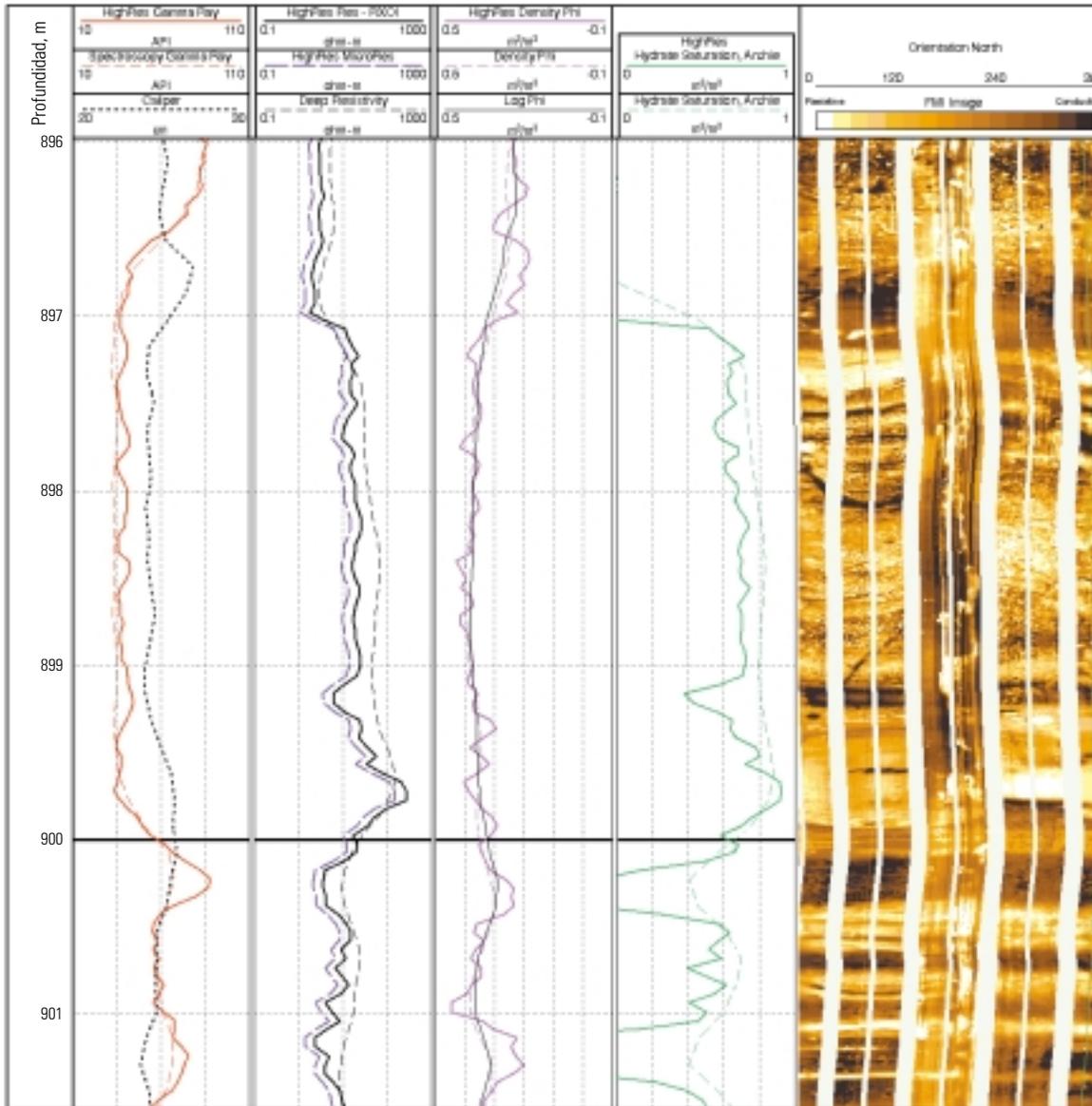
expulsados, tales como el cloruro. Las mediciones de la salinidad tomadas en este momento, muestran altas concentraciones de cloruro. Inmediatamente después de la cristalización, la combinación provoca que la anomalía del cloruro desaparezca. En forma inversa, la disociación del hidrato purifica el agua reduciendo la salinidad del agua intersticial. La detección de agua pura durante la perforación puede indicar la disociación de hidrato y, en consecuencia, su presencia reciente.

Exploración actual de los hidratos

Se ha investigado un yacimiento de hidratos de gas en los territorios al noroeste del delta de Mackenzie, en Canadá, mediante un proyecto que comprende miembros de la Geological Survey of Canada, (GSC), la Japan National Oil Corporation

(JNOC), Japan Petroleum Exploration Company (JAPEX), la USGS, el Departamento de Energía de los Estados Unidos de Norteamérica y distintas compañías, incluyendo Schlumberger.¹⁸ Perforado en 1998, cerca de un pozo de la Imperial Oil Ltd. que ha encontrado hidratos, el nuevo pozo de investigación, Mallik 2L-38 se diseñó para evaluar las propiedades en sitio de los hidratos y valorar la capacidad de las herramientas de registros para identificarlos (arriba).

Como otros pozos en el Ártico, el pozo Mallik 2L-38 se perforó y revistió a través del intervalo de permafrost, el cual alcanzó una profundidad de 640 m [2100 pies]. Antes de fijar el revestidor, se corrieron varios registros de Schlumberger a través de la zona de permafrost. Los registros incluyeron la herramienta de Imágenes de Inducción AIT, la herramienta de Imagen Sónica



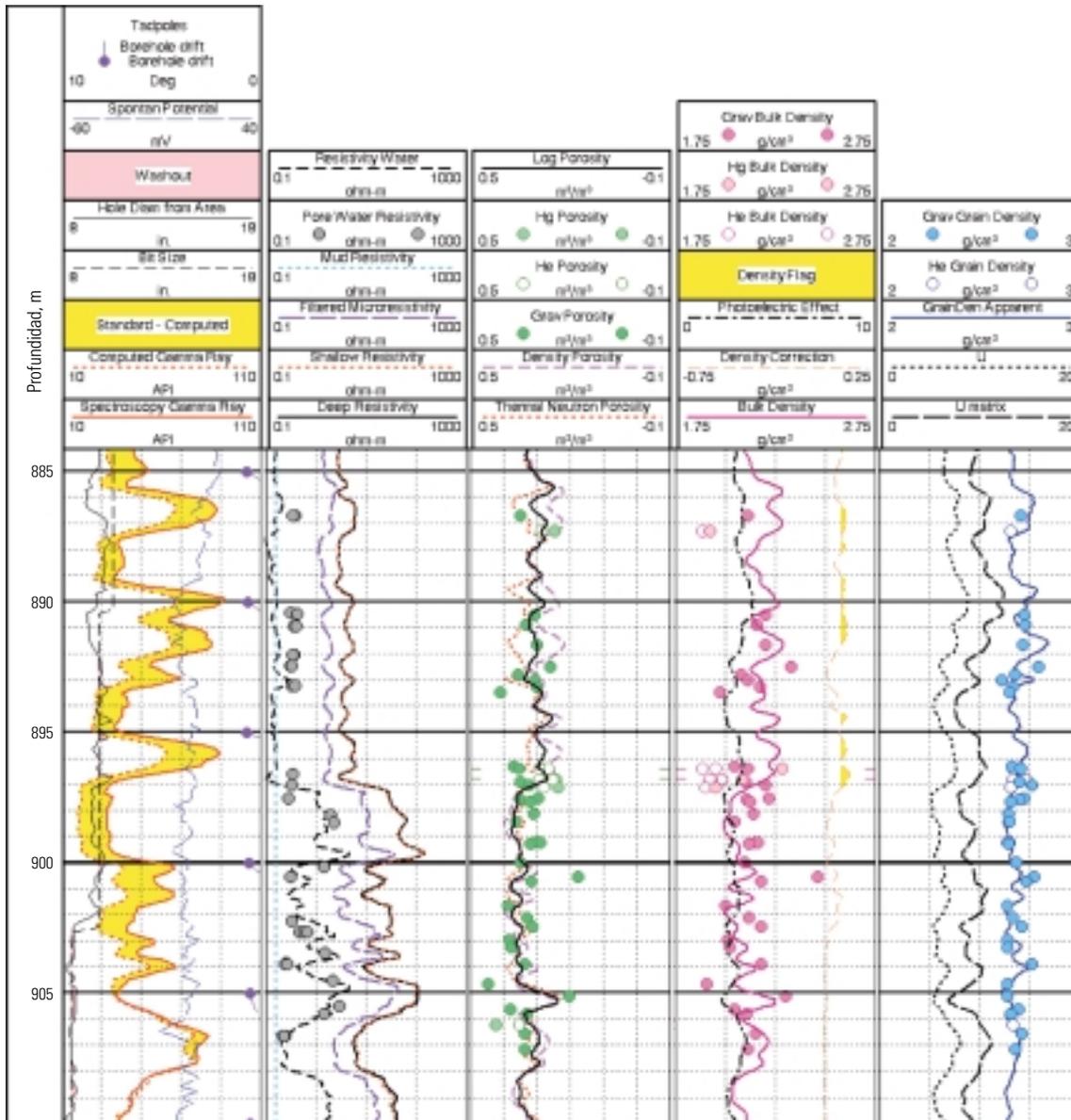
^ Registros e imágenes del pozo desde los primeros metros de la capa de hidrato en el pozo Mallik 2L-38. La resistividad en el Carril 2 muestra un incremento indicativo de la presencia de hidrocarburos. La saturación calculada de hidrato en el Carril 4 alcanza más del 80%.

Dipolar de Cizallamiento DSI y la sonda Platform Express. El pozo fue perforado por debajo del intervalo de permafrost, hasta los 1150 m [3770 pies] y se extrajo un núcleo. En esta sección del subpermafrost se corrieron las mismas herramientas de registros, así como también el Microbarredor de Formaciones de Cobertura Total FMI (arriba).

El registro y la calidad del hueco fueron excelentes en la sección con presencia de hidratos, la

cual se extendió de 897.5 a 1109.5 m [2945 a 3640 pies]. Se utilizó un enfriador de lodos que incrementó en gran medida la estabilidad del hidrato. La resistividad eléctrica de fondo de pozo y los registros de velocidad acústica confirmaron la presencia de hidratos de gas en un intervalo de más de 200 m [656 pies] de espesor. Los valores de resistividad eléctrica de lectura profunda variaron de 10 ohm-m a 100 ohm-m. Las velocidades de la onda acústica compresional (V_p) variaron de 2.5 a 3.6 km/seg, y las velocidades

acústicas de cizallamiento (V_s) variaron de 1.1 a 2.0 km/seg. El bajo valor de la relación entre la velocidad acústica compresional y la velocidad acústica de cizallamiento, V_p/V_s , en la base de la zona de hidrato, indica una capa delgada de gas libre. A partir del pequeño cruce de las curvas del registro densidad–neutrón, se puede interpretar una pequeña cantidad de gas libre en otras partes del hueco, pero esto puede estar causado por los hidratos que se vieron afectados durante la



^ Comparación de los registros con las mediciones del núcleo del pozo Mallik 2L-38. Las resistividades del agua intersticial medida en los núcleos correlacionan bien con los valores derivados del registro (Carril 2). Las porosidades del núcleo, desplegadas en el Carril 3, concuerdan con las porosidades del registro de densidad-neutrón. Las densidades de la formación se muestran en el Carril 4 y las densidades del grano en el Carril 5.

perforación. Las mediciones en el núcleo concuerdan bien con los valores de resistividad del agua intersticial, de porosidad y de densidad de la formación y del grano derivados del registro (arriba). Las imágenes del pozo y el núcleo indican que el yacimiento es de arenisca de alta calidad con hidratos que rellenan los poros. La porosidad varía de 20 a 40%. Los hidratos no se encuentran en las capas circundantes de lutita.

Las saturaciones de los hidratos de gas se calcularon en base a la ecuación "estándar" de Archie.¹⁹ Las saturaciones se calcularon también a partir de los datos del registro acústico, pero sus valores fueron menores a los obtenidos en las mediciones de los núcleos recuperados. Los cálculos basados en la resistividad indican la presencia de algunas zonas con saturaciones de hidrato que exceden el 90%. El volumen de hidratos inferidos a partir de los datos de registro y de los datos del núcleo es equivalente a valores

de 3 a 4 x 10⁹ m³ de gas en un área de 1 km² [0.36 milla²] alrededor del pozo.

La experiencia obtenida en el pozo de investigación Mallik 2L-38 ayudó a aclarar las características de los hidratos de gas natural y motivó a JAPEX y a los grupos asociados a comprometerse en el siguiente proyecto de perforación de hidratos en el valle de Nankai, costa afuera de

19. Collett TS: "Well Log Evaluation of Gas Hydrate Saturations," *Trabajos de la Conferencia Anual de la SPWLA N° 39*, Keystone, Colorado, EUA, Mayo 26-29, 1998, artículo MM.

Japón. Mediante los BSR se han identificado aproximadamente una docena de áreas como potenciales yacimientos de hidrato (abajo).

Como primer paso, a fines de 1999 y principios del 2000 se perforó un pozo de exploración en un área donde el lecho marino tiene 945 m [3100 pies] de profundidad.²⁰ Se perforaron dos huecos piloto y un hueco principal de 1600 m [5250 pies] y 3300 m [10830 pies] de profundidad respectivamente. Se obtuvieron núcleos, así como mediciones que incluyen las anomalías de cloro; registros durante la perforación, (LWD, por sus siglas en Inglés); registros de neutrón, inducción dual y de resistividad frente a la barrena; registros de velocidad acústica de compresión y de cizallamiento dipolar, registros de lateroperfil

y de resonancia magnética nuclear.²¹ En las areniscas del yacimiento, se calculó una saturación de hidratos de gas máxima de aproximadamente el 80% de la porosidad total.

Nuevas formas para monitorear la formación de hidratos

En el laboratorio, se han formado hidratos de gas a partir de gas y agua, pero con dificultad.²² Los hidratos se forman lentamente en recipientes a presión, incluso a temperaturas y presiones dentro de los límites de la fase termodinámica. El proceso es también autolimitante: conforme se incrementa la presión y disminuye la temperatura, se forma una capa sólida de hidrato en la interfase gas-agua. Al dejarse reposar, esta capa detiene eficazmente la producción adicional de hidratos. La barrera de hidrato puede romperse

mediante una fuerte agitación y muchos investigadores han recurrido frecuentemente a la instalación de un aparato pulverizador dentro de sus recipientes a presión para acelerar la cristalización. Aún así, el llenar con hidrato un pequeño recipiente a presión puede tomar varios días.

A principios de 1996 un grupo liderado por Peter Brewer del Instituto de Investigación del Acuario de la Bahía de Monterrey (MBARI, por sus siglas en Inglés) de California, consideró una nueva forma para estudiar la formación de hidratos. Estos investigadores se dieron cuenta de que el fondo del mar proporcionaba no solamente condiciones de temperatura y presión adecuadas para la formación de hidratos, sino también un ambiente en el cual podía duplicarse la dinámica de la formación natural de hidratos.²³

En un experimento, se utilizó un pequeño submarino operado a control remoto para transportar al fondo del océano tubos de plástico transparentes llenos de agua de mar o de mezclas de sedimento y agua de mar. En la profundidad adecuada, se permitió que el metano de un tanque brotara desde el fondo de cada cilindro. Los investigadores que estaban preocupados de que la reacción pudiera no ocurrir dentro de las tres a cuatro horas disponibles, se sorprendieron cuando una masa translúcida de hidrato se formó en sólo algunos minutos.

Los submarinos para investigación utilizados en estas investigaciones estaban equipados con termómetros, medidores de presión, sensores de conductividad eléctrica e instrumentos de navegación. El instrumento principal utilizado para observar la formación de hidratos fue una video cámara.²⁴ La cámara proporcionó impresionantes imágenes gráficas, pero no datos cuantitativos. Se están diseñando otros experimentos a los efectos de ayudar a comprender la distribución espacial y de textura de los hidratos en los sedimentos.



^ Regiones con reflexiones sísmicas simuladoras de fondo costa afuera de Japón.

20. Uchida T, Hailong L, Tomaru H, Dallimore S, Matsumoto R, Oda H, Delwiche M y Okada S: "Japan's Efforts to Explore Marine Gas Hydrates off Tokai at the Nankai Trough and Their Occurrences: Geological Overview," *Supplement to EOS, Transactions, American Geophysical Union* 81, no. 22 (Mayo 30, 2000): WP59.

21. Kazuhiko T, Uchida T y Akihisa K: "Well Log Evaluation of Gas Hydrate Saturation in the MITI Nankai Trough Well Drilled Offshore Tokai, Japan," *Supplement to EOS, Transactions, American Geophysical Union* 81, no. 22 (Mayo 30, 2000): WVP60.

22. Sloan, referencia 1.

23. Brewer PG, Orr FM Jr, Friedrich G, Kvenvolden KA, Orange DL, McFarlane J y Kirkwood W: "Deep Ocean Field Test of Methane Hydrate Formation from a Remotely Operated Vehicle," *Geology* 25, no. 5 (Mayo de 1997): 407-410.

24. Para bajar un video del experimento: http://www.mbari.org/~brpe/gas_hydrates.html

Riesgos relacionados con los hidratos

Los hidratos de gas son una preocupación para las compañías de petróleo y gas en cualquier lugar donde el agua y el gas natural entren en contacto entre sí. Los hidratos presentan restricciones para el flujo de petróleo y gas, ocasionan riesgos de perforación y de terminación submarina e inducen riesgos a la estabilidad de las plataformas marinas.

En la década de 1930, los hidratos de gas fueron identificados como los responsables de bloquear los ductos superficiales en la ex-Unión Soviética. Cuando el petróleo o el gas son conducidos a través de ductos presurizados en climas fríos, puede existir suficiente agua y metano en la mezcla para formar hidratos sólidos, los cuales pueden obstruir el ducto.

El quitar un taponamiento formado por hidratos puede ser peligroso. Un taponamiento de hidratos despresurizado puede viajar a velocidades balísticas, lesionando a trabajadores y ocasionando la ruptura de ductos. Una forma de evitar la obstrucción de los ductos es a través del calentamiento de los mismos, pero la extracción del agua antes de la compresión de los hidrocarburos puede ser un tratamiento más efectivo desde el punto de vista de los costos. A los efectos de evitar la formación de hidratos en los ductos, se puede utilizar una combinación de técnicas que puede resultar efectiva; esto es: eliminar el agua por debajo del punto de rocío, mantener la temperatura por encima del punto de formación de hidratos y utilizar inhibidores para evitar que la mezcla se solidifique.

Para los operadores que perforan en aguas profundas, el encuentro de hidratos de gas sólidos formados naturalmente, puede ocasionar un problema de control en el pozo, en particular si grandes cantidades de hidratos entran en el hueco y se despresurizan. Además, la circulación de líquido caliente dentro del hueco puede reducir la temperatura en los sedimentos circundantes ricos en hidratos, conduciendo al derretimiento de los hidratos y a la desestabilización de los sedimentos que sostienen el pozo. El calor liberado durante la solidificación

del cemento también puede desestabilizar la formación de hidratos. Algunos sistemas especiales de cemento diseñados para minimizar el calor liberado pueden ayudar a prevenir la disociación de los hidratos.

En las operaciones que se llevan a cabo en aguas profundas, la formación de hidratos sólidos en el pozo que resulta de la combinación de líquidos, presenta un problema importante de control del pozo. Si entra gas en el pozo, la alta presión hidrostática y la baja temperatura del fondo del mar pueden ocasionar la formación de hidratos en fluidos a base de agua, así como también en la salmuera de lodos a base de petróleo y de lodos sintéticos.¹ Las repercusiones de la formación de hidratos son el taponamiento de las líneas de estrangulación y de control del pozo, de los preventores de reventón, (BOP, por sus siglas en Inglés), las dificultades en el monitoreo de la presión del pozo, la restricción del movimiento de la sarta de perforación y el deterioro en las propiedades del lodo debido a la deshidratación.² Las líneas de estrangulación y de control del pozo y los conjuntos BOPs son particularmente susceptibles, ya que se encuentran ubicados en lugares donde la temperatura es la más baja y ésta cae rápidamente cuando se detiene la circulación.

Una manera práctica de detener la formación de hidratos es agregando sales, glicol u otros inhibidores químicos que ayudan a reducir la cantidad de agua libre. El mantener la temperatura del cabezal del pozo alta y circular líquidos de perforación puede ayudar hasta profundidades de agua de 1000 pies [305 m], pero a profundidades mayores, es difícil transmitir suficiente calor mediante la circulación de lodo. El precalentamiento de fluidos también puede ser útil, así como también la reducción del peso del lodo a valores tan bajos como sea posible, ya que las bajas presiones reducen la estabilidad de los hidratos. La solución correcta para el tratamiento de los riesgos relacionados con los hidratos está íntimamente relacionada con la habilidad de prever el encuentro de los mismos.

Distintas organizaciones han desarrollado programas de cómputo para predecir la formación de hidratos para algunas composiciones químicas de lodo idealizadas, y para la determinación de los niveles y tipos apropiados de aditivos inhibidores.³ Para utilizar estos programas, el usuario fija las condiciones ambientales. No obstante, la diversidad de la composición de los verdaderos lodos de perforación limita la aplicabilidad de estos programas.

Las operaciones submarinas también se ven afectadas por los hidratos.⁴ La formación de hidratos durante la terminación y las intervenciones submarinas pueden evitarse mediante la inyección de metanol en las líneas de inyección del árbol de válvulas submarino. Las líneas de flujo submarinas también están sujetas al bloqueo por hidratos, especialmente cuando grandes distancias de enlace entre el árbol de válvulas submarino y la plataforma de producción, están sometidas a bajas temperaturas y a presiones hidrostáticas altas por largos períodos de tiempo.

Ciertas áreas de operaciones petroleras y gasíferas están expuestas a problemas causados por hidratos formados naturalmente. El Mar Caspio se ha caracterizado como una cuenca particularmente peligrosa, con una enorme cantidad de sedimento y una alta tasa de sedimentación.⁵ Grandes sobrepresiones conducen al diapirismo del lodo y al vulcanismo. Los diapiros de lodo son grandes masas de roca no consolidada, agua y gas que se elevan y penetran las formaciones sedimentarias. Los volcanes de lodo dejan escapar el lodo, el agua y el gas de los diapiros. Durante la erupción de un volcán de lodo pueden arrojarse decenas de millones de metros cúbicos de metano. Las bajas temperaturas del agua y las altas presiones son favorables para la formación de hidratos. La extracción de núcleos por gravedad directa de tres volcanes de lodo caspios ha proporcionado muestras de muchos hidratos de gas.

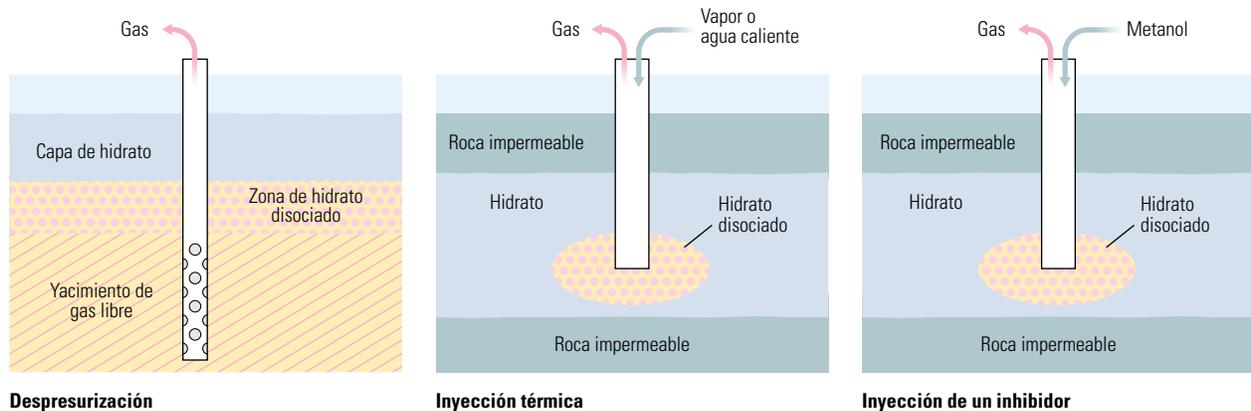
1. Brandt W, Dang AS, Magne E, Crowley D, Houston K, Rennie A, Hodder M, Stringer R, Juiniti R, Ohara S y Rushton S: "Deepening the Search for Offshore Hydrocarbons," *Oilfield Review* 10, no. 1 (Primavera de 1998): 2-21.

2. Barker JW y Gomez RD: "Formation of Hydrates During Deepwater Drilling Operations," artículo de la SPE 16130, presentado en la Conferencia de Perforación de la SPE/IADC, Nueva Orleans, Luisiana, EUA, Marzo 15-18, 1987.

3. Tohidí B, Danesh A, Burgass RW y Todd AC: "Effect of Heavy Hydrate Formers on the Hydrate Free Zone of Real Reservoir Fluids," artículo de la SPE 35568, presentado en la Conferencia y Exhibición de Operaciones de Producción Europea de la SPE, Stavanger, Noruega, Abril 16-17, 1996.

4. Para mayor información acerca de actividades submarinas: Christie A, Kishino A, Cromb J, Hensley R, Kent E, McBeath C, Stewart H, Vidal A y Koot L: "Soluciones Submarinas," *Oilfield Review* 11, no. 4 (Invierno de 1999/2000): 2-19.

5. Bagirov y Lerche, texto principal, referencia 2.



^ Los tres métodos principales considerados para la explotación del hidrato: despresurización, inyección térmica e inyección de un inhibidor.

Retos relacionados con los hidratos

El interés en los hidratos está creciendo y varias de las tecnologías que han mostrado ser eficaces para la exploración convencional de hidrocarburos y para la evaluación de formaciones, se están aplicando al problema de caracterización de los hidratos. Sin embargo, aún quedan enormes retos. Por ejemplo, los especialistas no están de acuerdo en la cantidad de hidratos presentes en las porciones accesibles del subsuelo.

Muchas personas en la industria creen que los enormes cálculos citados de metano en los hidratos de gas son exagerados.²⁵ Por otro lado, aunque se comprobara que los cálculos son verdaderos, si el hidrato se distribuye en forma dispersa en el sedimento en lugar de concentrarse, no podrá recuperarse fácilmente, de un modo económicamente efectivo o sin peligro para el medio ambiente.

Explotación—los hidratos de gas se encuentran agrupados con otros recursos de hidrocarburos no convencionales, tales como capas carboníferas con metano, arenas compactas y lutitas negras. Con la excepción de los hidratos, en la actualidad se está produciendo comercialmente alguna porción del volumen total mundial de estas fuentes no convencionales. En la mayoría de los casos, la evolución de un recurso de gas no convencional y no producible a uno pro-

ducible ha sido una consecuencia directa de una importante inversión de capital y del desarrollo de la tecnología.²⁶

La industria del gas ha trabajado lentamente en el desarrollo de metodologías para extraer el metano de los hidratos. Se encuentran bajo consideración tres métodos principales: la despresurización, la inyección térmica y la inyección de un inhibidor (arriba). En la despresurización, la presión del hidrato de gas se disminuye lo suficiente para provocar disociación. Este método es viable únicamente cuando puede producirse el gas libre asociado para disminuir la presión del depósito de hidrato, como se ha reportado en el campo Messoyakha.

En caso de ausencia de una zona de gas libre por debajo de los hidratos, la inyección térmica o la estimulación, pueden ser una solución viable. Se les agrega calor a los estratos que contienen hidratos de gas a fin de incrementar la temperatura lo suficiente para provocar que el hidrato se disocie. Un ejemplo de esto es la inyección de agua de mar relativamente caliente a una capa de hidratos de gas que yace en una zona marina.²⁷

La inyección de inhibidores, tales como el metanol, modifica el equilibrio presión-temperatura de modo que los hidratos ya no sean estables en sus condiciones normales y el metano sea liberado.

De los tres métodos, la disociación por inyección de agua caliente puede ser la más práctica. No obstante, los hidratos de gas se convertirán en un recurso potencial, únicamente cuando pueda demostrarse que la energía recuperada es mucho mayor que la energía necesaria para liberar el gas metano.

Estabilidad del fondo del mar—La disociación de los hidratos puede ocasionar inestabilidad en los sedimentos del fondo del mar depositados sobre las pendientes continentales. La base de la zona de hidratos de gas puede representar una discontinuidad en la solidez de la columna de sedimentos. La presencia de hidratos puede inhibir la consolidación y compactación del sedimento normal y el gas libre atrapado debajo de la zona de hidratos puede sobrepresionarse. Cualquier técnica propuesta para la explotación de hidratos debería tener éxito sin ocasionar inestabilidad adicional.

Un ejemplo de los problemas que surgen cuando los hidratos se disocian puede encontrarse fuera de las márgenes del Océano Atlántico en los Estados Unidos de Norteamérica. Ahí, la pendiente del fondo del mar es de aproximadamente 5° y como tal, debe ser estable. Sin embargo, se han observado muchas marcas ocasionadas por deslizamientos de bloques submarinos. La profundidad de las

25. Haq BU: "Gas Hydrates: Greenhouse Nightmare? Energy Panacea or Pipe Dream?" *GSA Today* 8, no. 11 (Noviembre de 1998): 1-6.
Hovland M y Lysne D: "Is the Fear and Promise of Gas Hydrates in Deep Water Overstated?" *Compendio de la Conferencia Internacional sobre Oceanología*, vol. 3. Brighton, Inglaterra (1998): 263-271.
26. Collett, referencia 11.

27. Okuda Y: "Introduction to Exploration Research on Gas Hydrates in Japan," *Bulletin of the Geological Survey of Japan* 49, no. 10 (1998): 494-500.
28. Kvenvolden KA: "Potential Effects of Gas Hydrate on Human Welfare," *Compendio de la Academia Nacional de Ciencias* 96 (Marzo de 1999): 3420-3426.
29. Licking E: "The World's Next Power Surge," *Business Week* (Diciembre 14, 1998): 79-80.
30. Kvenvolden, referencia 7.

31. Haq, referencia 25.
32. Gudmundsson JS, Andersson V y Levik OI: "Hydrate Concept for Capturing Associated Gas," artículo de la SPE 50598, presentado en la Conferencia Europea del Petróleo de la SPE, La Haya, Holanda, Octubre 20-22, 1998.
33. Gudmundsson JS, Andersson V y Levik OI: "Gas Storage and Transport Using Hydrates," *Compendio de la Conferencia Mediterránea Marina [OMC 97]* vol. 2. Ravenna, Italia (Marzo 19-21, 1997): 1075-1083.

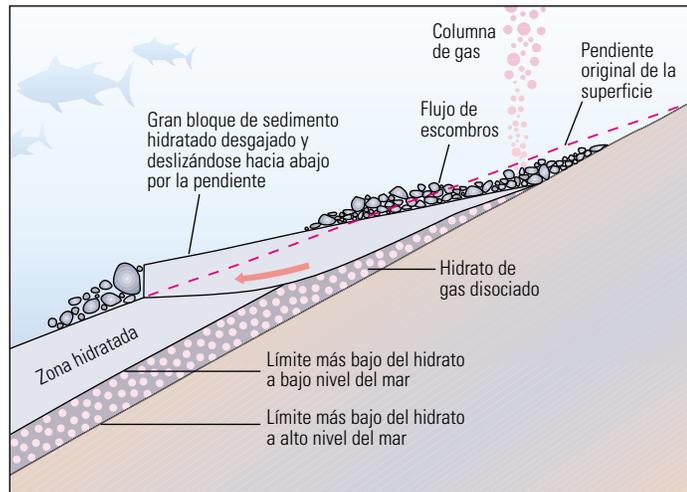
marcas es de aproximadamente el límite somero de la zona de estabilidad de los hidratos. Los BSR son más débiles en las áreas que presentan deslizamientos de tierra, indicando quizá que los hidratos no están presentes actualmente y que pueden haber escapado. Los científicos creen que si disminuye la presión en los hidratos, como sucedería con una caída en el nivel del mar durante un período glacial, entonces los hidratos pueden disociarse en la profundidad y ocasionar que los sedimentos saturados de gas se deslicen (derecha).²⁸

Tales zonas han sido detectadas cerca de la costa de Carolina del Sur, EUA. En una sección sísmica de una región donde ocurrió un enorme deslizamiento de tierra submarino de 40 millas [60 km] de ancho, se observa una formación masiva de hidratos en ambos lados del deslizamiento de tierra, sin embargo, no se observan hidratos debajo del deslizamiento.

Las plataformas y los ductos marinos también están sujetos a deslizamientos de tierra marinos relacionados con los hidratos. Las compañías de exploración y producción de petróleo y gas que operan en áreas de aguas profundas están interesadas en encontrar formas para detectar las áreas del fondo del mar propensas a la inestabilidad, a fin de evitar la colocación de estructuras en suelo inestable.²⁹

Efecto invernadero—Alrededor del mundo, los hidratos contienen metano en cantidades mucho mayores a las actualmente encontradas en la atmósfera. El metano incrementa el efecto invernadero aproximadamente 20 veces más drásticamente que un peso equivalente de dióxido de carbono [CO₂].³⁰ Los científicos del clima sugieren que la disociación de los hidratos durante un período glacial con bajo nivel del mar liberaría el metano hacia la atmósfera y calentaría la tierra, posiblemente ejerciendo una acción estabilizadora del clima.³¹ Por ejemplo, durante la última glaciación, se estima que ocurrió un descenso en el nivel del mar de 120 m [390 pies]. Esto pudo haber incrementado la base de la zona de estabilidad del hidrato en 20 m [66 pies], desestabilizando los sedimentos, ocasionando hundimiento y liberación de metano a la atmósfera y a la vez ocasionando el calentamiento de la atmósfera. El calentamiento podría haber derretido los glaciares, terminando con el período glacial del Pleistoceno.

Por otro lado, el metano liberado desde las capas de permafrost en el Ártico durante un período de calentamiento global podría calentar más aún la atmósfera, exacerbando el calentamiento climático, y en consecuencia desestabi-



▲ Disociación de hidratos responsable de un deslizamiento de un bloque submarino. Una disminución de la presión en la zona de hidratos les permitiría disociarse en la profundidad y ocasionar que los sedimentos no consolidados encima de ellos se deslizaran. [Adaptado de Kvenvolden KA: "Efectos Potenciales del Hidrato de Gas sobre el Bienestar Humano", Compendio de la Academia Nacional de Ciencias 96 (Marzo de 1999): 3420 – 3426].

lizar el clima. Los científicos están investigando, cuál de los procesos geológicos podría afectar en mayor proporción la estabilidad de los hidratos en los sedimentos y así controlar la posible liberación de metano a la atmósfera.

La conversión a los hidratos

Ya sea que los hidratos formados naturalmente se conviertan o no en la próxima fuente de combustible del mundo, es posible encontrar otros usos para el conocimiento adquirido acerca de la formación de hidratos. Los investigadores de la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología (NTNU, por sus siglas en Inglés) en Trondheim están analizando la posibilidad de almacenar y transportar gas natural en su estado de hidrato a presión atmosférica.³² Experimentos realizados en la NTNU demostraron que una vez que se forma el hidrato de gas a presión atmosférica, no se disociará si se lo mantiene en o por debajo de los -15°C [5°F]. Aplicaciones potenciales de esta tecnología abundan. Entre ellas, se pueden mencionar:

- El gas producido en los campos petroleros podría convertirse en hidrato de gas sólido y transportarse en tanques de transporte o mezclarse con petróleo crudo refrigerado y transportarse como pasta aguada en tanques de transporte o a través de tuberías.
- El hidrato congelado, así como el gas natural líquido, (LNG, por sus siglas en Inglés), puede transportarse a través de grandes distancias cuando no se dispone de ductos.

- Cuando sea necesario el almacenamiento de gas, el gas natural puede convertirse en hidratos y almacenarse refrigerado a presión atmosférica.
- El nitrógeno, el dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno pueden separarse del metano mediante la formación de hidratos.
- Las sales y los materiales biológicos pueden separarse del agua mediante el proceso de formación de hidratos.
- El dióxido de carbono puede eliminarse de la atmósfera y almacenarse en forma de hidrato sólido para ser transportado y eliminado en aguas profundas.

A medida que más países restringen la quema de gas y que algunos productores no están dispuestos a construir ductos, la conversión de gas a la forma de hidrato podría proporcionar convenientes alternativas de eliminación y transporte.³³

Gran parte de la incertidumbre en la viabilidad de los hidratos de gas como un recurso, recae en la falta de conocimiento de la naturaleza de las acumulaciones de hidratos. Las transformaciones físicas y químicas similares a las de los procesos naturales y de manufactura están alentando a los proponentes y oponentes de los hidratos a contribuir al conocimiento mutuo. Las oportunidades existen para los investigadores y los especialistas en operaciones de campo para que dediquen más experticia al problema y que continúen incrementando nuestro conocimiento sobre los hidratos de gas. —LS