



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“LOS HIDRATOS DE METANO, UNA
FUENTE DE GAS NATURAL NO
CONVENCIONAL”**

T E S I S
**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO GEÓLOGO**

PRESENTA:
JULIO CÉSAR HERNÁNDEZ VITE

DIRECTOR DE TESIS
ING. JAVIER ARELLANO GIL



MEXICO DF, JUNIO 2009



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



LIBERTAD NACIONAL
AYUNTAMIENTO DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
60-I-822

SR. JULIO CÉSAR HERNÁNDEZ VITE
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Javier Arellano Gil y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geólogo:

LOS HIDRATOS DE METANO, UNA FUENTE DE GAS NATURAL NO CONVENCIONAL

- I INTRODUCCIÓN**
- II ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS**
- III EXPLORACIÓN**
- IV ESTUDIOS DE HIDRATOS DE METANO A NIVEL MUNDIAL**
- V FORMAS DE EXPLOTACIÓN E IMPACTO ECOLÓGICO**
- VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
- BIBLIOGRAFÍA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
CD. Universitaria, D. F. a 03 de julio de 2008
EL DIRECTOR

MTRO. JOSÉ GONZALO GUERRERO ZEPEDA

JGGZ*BJPYS*srs



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION

Aceptación de Trabajo Escrito

Mtro. José González Cuerrero Zepeda
Director de la Facultad de
Ingeniería de la U.N.A.M.
P r e s e n t e.

En atención a su oficio en el que nos informa que hemos sido designados síndicos del Examen Profesional del señor HERNANDEZ VITE EL TIJOCSAR registrado con número de cuenta 09633528-8 en la carrera de INGENIERÍA en CIENCIAS de Aeronautica nos permitimos manifestarle la aceptación del trabajo desarrollado por el citado alumno.

Atentamente,

ING. MANUEL VILLAMAR VIQUERAS

FECHA DE FIRMA: 14/08/09

ING. JAVIER ARELLANO GIL

FECHA DE FIRMA: 14/08/2009

ING. JOSÉ HERNÁNDEZ MARTÍNEZ
ANDRADI

FECHA DE FIRMA: 14/08/09

DR. RICARDO JOSÉ PADILLA Y
SÁNCHEZ

FECHA DE FIRMA: 14/08/09

ING. GUADALUPE ALVARADO ARIAS

FECHA DE FIRMA: 14-08-2009.

HECHO EN MÉXICO, a 14 de Agosto de 2009.

AGRADECIMIENTOS.

Agradezco infinitamente el esfuerzo, la paciencia y humildad de mis padres, Salvador y Paulina, a quienes dedico con todo cariño este trabajo.

A Janet Anabel por ser motivo, fe, amor, realidad, sueño e imaginación en mi vida.

A mi Universidad, que es semilla de mi libre pensamiento, a mis profesores que me han enseñado lo trascendental de mi formación como profesional y como individuo, al Ing. Javier Arellano Gil por todo su tiempo y compromiso para dirigir esta tesis y a mis sinodales por sus atenciones y sugerencias.

A mis hermanos, a mis abuelos, a mis sobrinos, a mis tíos, a mis primos, a mis amigos, a mis cuñados, a mis conocidos y no conocidos, a mis vecinos, a mis colegas, a mis compañeros, a los ausentes, al SGM,

a mi pueblo

...a Dios.

ÍNDICE.

	pág
RESUMEN	
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.	1
I.1. OBJETIVOS.	3
I.2. RECURSOS ENERGÉTICOS DE GAS NO CONVENCIONALES.	3
I.2.1. GAS DERIVADO DE CAPAS DE CARBÓN (COALBED METHANE CBM).	4
I.2.2. GAS DE ARENAS DE BAJA PERMEABILIDAD (TIGHT GAS).	5
I.2.3. GAS DE LUTITAS (SHALE GAS).	6
I.3. IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LOS HIDRATOS DE METANO.	6
I.4. DESARROLLO HISTÓRICO.	7
CAPÍTULO II. ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS.	10
II.1. COMPOSICIÓN.	10
II.1.1. EL METANO	10
II.1.2. EL AGUA.	13
II.2. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS.	15
II.2.1. ESTRUCTURA MOLECULAR DEL HIDRATO DE GAS.	17
II.3. ORIGEN DEL METANO.	18
II.3.1. ORIGEN BIOGÉNICO.	19
II.3.2. ORIGEN TERMOGÉNICO.	22
II.3.3. FORMACIÓN DEL HIDRATO DE METANO.	24
II.4. ESTABILIDAD P-T DEL HIDRATO DE METANO.	26
II.4.1. HIDRATOS DEL ÁRTICO (PERMAFROST).	28
II.4.2. HIDRATOS MARINOS (OCÉANOS PROFUNDOS).	31
II.5. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS DEPÓSITOS DE HIDRATOS.	34
II.5. 1. ESTRUCTURAS DE LOS DEPÓSITOS DE HIDRATOS DE METANO.	34
II.5. 2. PROPIEDADES FÍSICAS MEDIDAS EN LOS HIDRATOS.	38
CAPÍTULO III. EXPLORACIÓN.	42
III.1. GEOLOGÍA.	42
III.1.1. SECUENCIAS ALMACENADORAS DE HIDRATOS DE METANO	49
III.1.2. TRAMPAS.	50
III.1.2.a. ACUMULACIONES ESTRUCTURALES (TRAMPAS ESTRUCTURALES)	51
III.1.2.b. ACUMULACIONES ESTRATIGRÁFICAS (TRAMPAS	
ESTRATIGRÁFICAS).	53
III.1.2.c. ACUMULACIONES COMBINADAS (TRAMPAS MIXTAS).	53

III.1.3. ROCA SELLO. _____	54
III.2. GEOFÍSICA _____	55
III.2.1. SÍSMICA DE REFLEXIÓN. _____	56
III.2.1.a. CARACTERÍSTICAS DEL BSR Y SU RELACIÓN CON LOS HIDRATOS DE METANO. _____	58
III.2.2. REGISTROS GEOFÍSICOS DE POZOS _____	62
III.3. GEOQUÍMICA. _____	64
CAPÍTULO IV. ESTUDIOS DE HIDRATOS DE METANO A NIVEL MUNDIAL. _____	69
IV.1. DEPÓSITOS DE PERMAFROST EN EL CAMPO MESSOYAKHA, RUSIA., PRUDHOE, ALASKA. Y DELTA MACKENZIE, CANADÁ. _____	69
IV. 2. JAPÓN. _____	77
IV. 2.1. TRINCHERA DE NANKAI. _____	78
IV. 2.2. HOKAIDO. _____	83
IV. 3. CANADÁ. _____	86
IV.3.1. COSTA OESTE DE VANCOUVER. _____	87
IV.3.2. COLD VENTS: _____	94
IV.3.3. MONTÍCULOS DE GAS HIDRATO EN EL CAÑÓN BARKLEY. _____	95
IV.4. ESTADOS UNIDOS (NORTE DEL GOLFO DE MÉXICO). _____	95
IV.4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS YACIMIENTOS DE HIDRATOS DE GAS EN EL NORTE DEL GOLFO DE MÉXICO. _____	97
IV.5. HIDRATOS DE METANO EN AGUAS PATRIMONIALES DE MÉXICO. _____	102
IV.5. 1. MARGEN DEL PACÍFICO MEXICANO _____	102
IV.5. 1.a. TRINCHERA MESOAMERICANA. _____	105
IV.5. 1.b. GOLFO DE CALIFORNIA. _____	108
IV.5. 2. GOLFO DE MÉXICO (SIGSBEE Y CAMPECHE KNOLL). _____	109
CAPÍTULO V. FORMAS DE EXPLOTACIÓN E IMPACTO ECOLÓGICO. _____	111
V.1. PRUEBAS DE PRODUCCIÓN DE HIDRATOS DE GAS. _____	111
V.2. IMPORTANCIA ECONÓMICA DE LOS HIDRATOS DE METANO. _____	113
V.3. IMPACTO ECOLÓGICO POR YACIMIENTOS DE HIDRATOS DE GAS. _____	116
V.3.1. EL GAS METANO Y EL EFECTO INVERNADERO. _____	116
V.3.2. DESESTABILIZACIÓN DE TALUDES. _____	119
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. _____	121
BIBLIOGRAFÍA. _____	124

RESUMEN.

El presente trabajo es un documento que de forma integral trata lo más relevante de los Hidratos de Gas y el marco geológico-geofísico- geoquímico en el que se presentan, partiendo del entendimiento de su origen, propiedades, la geometría y estructura de los depósitos, su distribución regional y global, y la relación con el medio ambiente.

Es un documento de recopilación y análisis de la información más reciente sobre los Hidratos de Metano, para el cual se consultaron diversos libros, artículos, memorias y diversas páginas electrónicas.

En los últimos años, los expertos han colocado a los hidratos de metano como la más grande fuente de energía futura, por encima de todos los yacimientos convencionales y no convencionales juntos; se estima que el promedio de metano secuestrado en los hidratos de metano es enorme, en un rango de 3114 a 7634000 trillones de m^3 (Kvenvolden, 1993; en Collett, 2001), con un factor de expansión al liberarse el metano de la fase sólida a la gaseosa de 164 de metano contra 0.8 de agua, es decir que de $1 m^3$ de hidrato de metano se obtienen $164 m^3$ de gas metano que se encontraba comprimido, y $0.8 m^3$ de agua.

El hidrato de metano es un compuesto clatrático de H_2O y gas, principalmente metano (CH_4), que se origina en dos escenarios geológicos: en las zonas del permafrost y los fondos oceánicos relacionados a las márgenes continentales, en las zonas de subducción y prismas acrecionales; su exploración se basa en la determinación del “Bottom Simulating Reflector”, BSR, que define el límite de estabilidad de la capa de hidratos, que en las secciones sísmicas son reflectores paralelos al piso oceánico (de ahí el derivado de su nombre), aunque esta propiedad es difícil de obtenerse en escenarios geológicos más complejos, como es el caso del Golfo de México, sobre todo por los cambios de profundidad físicos del talud continental.

En nuestro país, las expectativas de encontrar hidratos de metano se restringen a los fondos marinos pertenecientes a la Zona Económica Exclusiva (ZEE), a profundidades donde la columna de agua genere la presión necesaria para que los hidratos sean estables a las temperaturas reinantes; diferentes áreas en las costas mexicanas han sido determinadas con gran potencial tanto en el Océano Pacífico, el Golfo de México y Golfo de California. Estudios regionales hechos en aguas profundas de México, han permitido identificar un área potencial de $19,000 km^2$, en donde hay buenas posibilidades de contener depósitos de Hidratos de metano.

En la porción sureste del Golfo de México y dentro de superficie que comprende la ZEE de México, en las campañas oceanográficas multidisciplinarias R/V SONNE 174 en 2003 y METEOR EXPEDITION 67 Leg M67-2 en 2006, con participación de investigadores de la UNAM en colaboración con los gobiernos de Alemania y Estados Unidos, definieron zonas de importancia económica de yacimientos de gas natural. Estos estudios se realizaron en la provincia de los diapiros de la Sonda de Campeche, se enfocaron a localizar tipos y estructuras que contengan hidratos de metano, su ambiente de formación, así como el “vulcanismo de asfalto”, este tipo de “vulcanismo” ha sido el primero en su tipo que se descubrió en la bahía de Campeche.

Al ser los yacimientos de hidratos de metano una fuente natural de energía, los países desarrollados han destinado gran capital en programas de exploración y explotación de estos recursos; en aguas patrimoniales de nuestro país se encuentran áreas con potencial de contener esta fuente de energía, por lo que es necesario implementar un programa nacional de energía de hidratos de metano, que ayude a delimitar mejor estas áreas y a su vez definir un cálculo del volumen de los yacimientos de hidratos de metano que se encuentran en los fondos oceánicos del Pacífico, Golfo de México y del Golfo de California.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.

En los últimos 100 años, la demanda de combustibles basados en hidrocarburos (aceite y gas) y carbón mineral se ha incrementado exponencialmente, por lo que para hacer frente a esta creciente demanda, la exploración y explotación de vastos recursos de carbón, petróleo y gas convencional han debido avanzar paralelamente; estos recursos, sin embargo, no son renovables y en un futuro cercano, se prevé un severo agotamiento de ellos, condición que se ve reflejada en una baja muy significativa de reservas.

Por otra parte, los estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos realizados en el océano en aguas profundas han permitido definir la existencia de Hidratos de Metano, los cuales son una fuente de gas natural no convencional, que corresponde con la mayor reserva de energía del futuro, y que muy seguramente reemplazará a los hidrocarburos convencionales cuando los yacimientos de este combustible fósil se agoten. Las estimaciones acerca del volumen total de gas metano atrapados en los hidratos de gas son de alrededor de 20, 000 trillones de metros cúbicos (Kvenvolden K, 1993., en Collet T.S., 2001); alrededor del 99% de estos recursos se encuentran en los sedimentos marinos de las márgenes continentales. Los hidratos de metano pueden contener hasta 10 trillones de toneladas de carbono, que representan más del doble del contenido, en los yacimientos de carbón, petróleo y las reservas de gas convencionales del mundo (**Figura 1.1**).

Los hidratos de metano conocidos como “hielos que arden”, presentan una estructura cristalina de gas metano (CH_4) rodeado por moléculas de agua (H_2O), los cuales son estables a bajas temperaturas y altas presiones; el gas es resultado de agentes térmicos que provocan la maduración de la materia orgánica o de la descomposición microbiana de la misma, contenida en los sedimentos ricos en carbono orgánico total. Los hidratos se asemejan físicamente al hielo, tienen propiedades similares y se forman a temperaturas sobre el punto de congelación del agua. El gas es atrapado dentro de pequeñas celdas de agua congelada (H_2O) formando cristales y han sido localizados bajo la capa de suelo congelada de las regiones polares y en sedimentos marinos de los márgenes continentales en aguas profundas en muchas cuencas sedimentarias del mundo recientes como el actual Golfo de México, el Pacífico y el Golfo de California.

Los hidratos de metano son considerados una prometedora fuente para la obtención de gas natural no convencional en grandes volúmenes y su importancia radica en su enorme contenido de metano (CH_4), que es el compuesto principal del gas empleado en la industria y en el consumo doméstico; también son de interés, ya que funcionan como sellos por debajo de las cuales se pueden encontrar trampas con gran acumulación de gas natural que no esta asociado a los yacimientos convencionales de hidrocarburos, por lo que se convierten en una alternativa potencial de gas.

Las exploraciones hechas por organismos científicos de naciones que tienen litorales, utilizando barcos especializados, revelaron la existencia de grandes capas de hielo en el

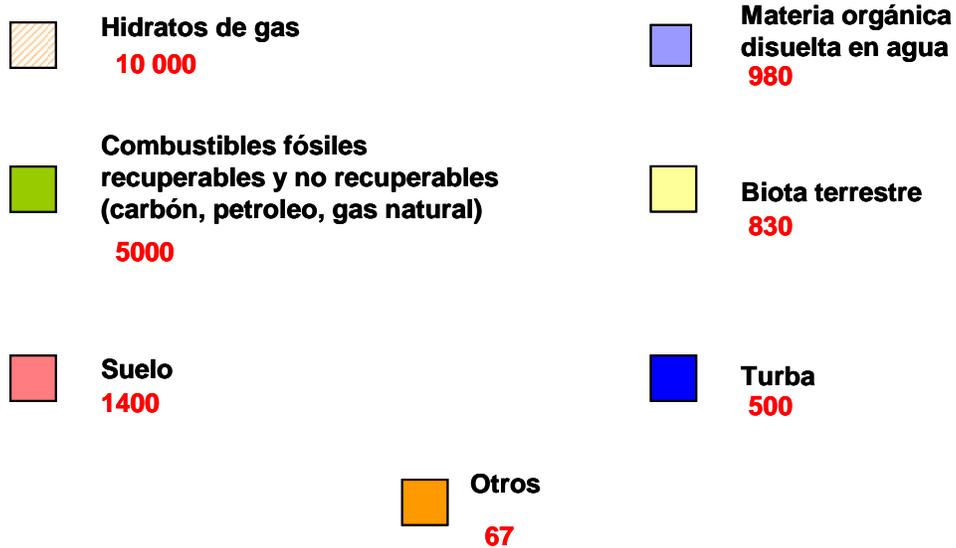
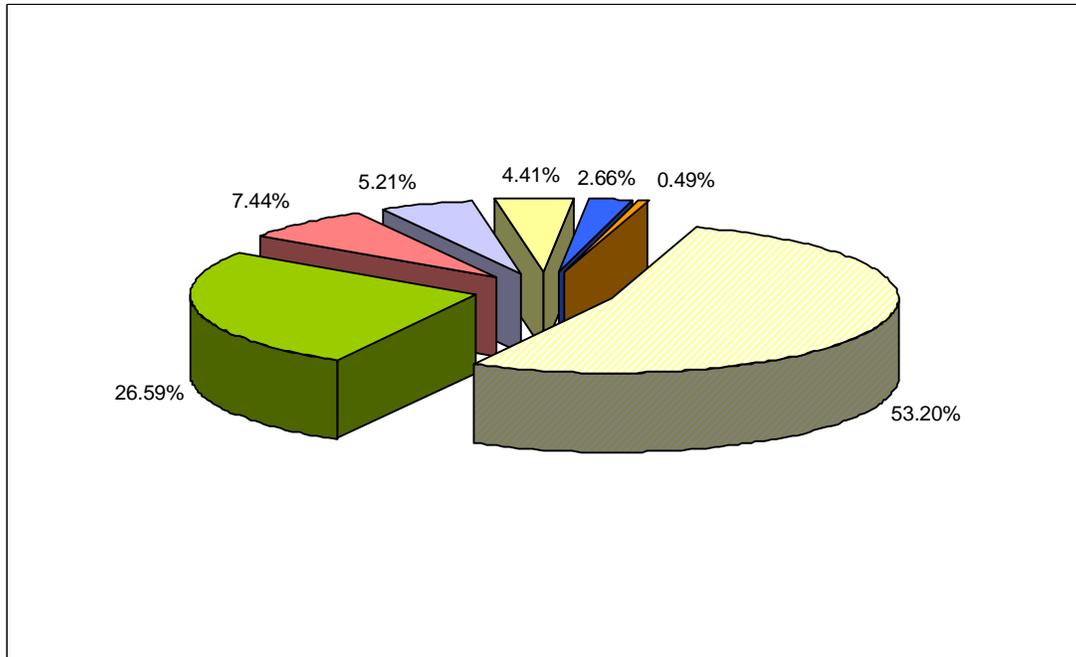


Figura 1.1. Comparación de fuentes de carbono orgánico global (10^{15} g de carbono). El 53% corresponde al contenido en los hidratos de gas; de ahí su importancia (Modificada de [Kvenvolden K; 1993.](#), en [Collet T.S; 2000](#)). Las cantidades corresponden con trillones de toneladas.

subsuelo de los mares profundos que contienen hidratos de metano comprimidos por las grandes presiones propias de esas profundidades, además de las bajas temperaturas.

I.1. OBJETIVOS.

El objetivo primordial de esta tesis es describir de manera integral a los Hidratos de Gas y el marco geológico-geofísico-geoquímico en el que se presentan, partiendo del entendimiento de su origen, propiedades, la geometría y estructura de los depósitos; considerando además cuál es su distribución regional y global.

Documentar la necesidad de implementar un programa nacional de estudio, exploración y explotación futura de los Hidratos de Metano en nuestro país, apoyándose en los conocimientos, en la experiencia y los avances de los países o empresas que encabezan las investigaciones sobre el tema.

Crear un documento de recopilación y análisis de la información más reciente sobre los Hidratos de Metano, puntualizando en las expectativas que se tienen sobre su exploración y explotación.

I.2. RECURSOS ENERGÉTICOS DE GAS NO CONVENCIONALES.

El gas natural contenido en yacimientos no convencionales constituye un importante recurso que está ayudando a responder a las crecientes necesidades del mercado por lo que los avances tecnológicos han convertido a la explotación de este recurso en una opción viable. Las características singulares de los yacimientos de metano en capas sedimentarias no convencionales demandan enfoques novedosos en lo que respecta a construcción de pozos, evaluación de formaciones, fluidos de terminación y estimulación de pozos, modelado y desarrollo de yacimientos entre otros. La exploración y explotación del gas no convencional está tomando una importancia económica relevante de tal forma que en los Estados Unidos representa el 15% de la producción del gas y en Canadá el 40% .

El Gas Metano de interés económico contenido en formaciones de roca de baja permeabilidad o asociado al carbón, se denomina como gas no convencional e incluye al Gas en Mantos de Carbón (Coalbed Methane - CBM), Gas de Lutitas (shale gas), Gas en Arenas de muy baja permeabilidad (tight gas) e hidratos de gas; estos últimos son el tema central de este trabajo de tesis, por lo que a continuación se describen únicamente las características generales de los otros tipos de yacimientos de gas no convencionales.

I.2.1. GAS DERIVADO DE CAPAS DE CARBÓN (COALBED METHANE CBM).

Desde el punto de vista técnico, el gas proveniente de los mantos de carbón, conocido como gas grisú, es considerado una fuente no convencional de producción de gas natural, dado que tanto los procesos de generación como los de producción en el subsuelo son muy diferentes a los que se emplean en los yacimientos convencionales de petróleo y gas natural.

El término carbón (“coal”) hace referencia a las rocas sedimentarias que contienen más del 50% en peso y más del 70% en volumen de materia orgánica, constituida principalmente por carbono, hidrógeno, oxígeno, así como pequeñas cantidades de azufre, nitrógeno y con un cierto grado de humedad; contiene además dióxido de carbono y metano; compuestos aceitosos, como alquitrán y brea, que a su vez contienen amoníaco, tolueno, naftas y creosotas (Diésel, 1986, 1992; Philp, 1994; Clayton, 1998; Chen y Ma, 2002; Wilkins y George, 2002; en Corona E.R., et al., 2006). Por lo general, el metano como constituyente del carbón se presenta en altas concentraciones dependiendo de su composición, la temperatura, la presión y otros factores asociados. Además de todas las especies moleculares atrapadas en el carbón, el metano puede liberarse fácilmente tan solo con la reducción de la presión en la capa que lo contiene. Para producir gas a partir de estos yacimientos se perforan pozos en los mantos de carbón y se reduce la presión al remover el agua de formación; esto permite que el metano se desprenda y éste fluya a través de un sistema de fracturas naturales (cleats) para luego ser explotado a través de pozos.

Su importancia radica en que un pie cúbico de carbón pueden contener seis o siete veces el volumen de gas natural que existe en un pie cúbico de un depósito convencional de areniscas (Fuente: [página principal del NETL de los EUA](#)).

El gas natural derivado del carbón es de origen biogénico o termogénico. El metano biogénico se genera a partir de bacterias en la materia orgánica y suele ser un gas seco, por lo general, se encuentran a profundidades de menos de 1000 pies de distancia de la superficie de la Tierra. El metano termogénico se forma cuando el calor y la presión transforman la materia orgánica en carbón y gas, este tipo de metano es un gas húmedo generalmente y a menudo contiene cantidades traza de vapor de agua, dióxido de carbono, nitrógeno, y en su caso sulfuro de hidrógeno. Por lo general, se encuentran a mayores profundidades (Fuente: [página principal del NETL de los EUA](#)).

Algunas áreas en producción donde se está explotando gas asociado al carbón son la región de la Costa del Golfo de México en EUA, pero se han iniciado actividades relacionadas con los yacimientos de gas en capas de carbón en la Ensenada Cook, Alaska y en EUA; la explotación de estos recursos está progresando a pasos firmes, en los EUA, los precios del gas natural han hecho más atractivas muchas áreas como por ejemplo la región de Green River, la Cuenca Piceance, la Cuenca Arkoma y la Cuenca Cherokee. A nivel mundial, varios países recientemente han comenzado a investigar sus recursos de gas metano asociado al carbón mineral (CBM). La actividad de exploración y explotación crecerá en el corto y mediano plazo por necesidad y gracias al conocimiento del comportamiento de estos yacimientos. Otras regiones con grandes expectativas en cuestión de gas derivado de mantos de carbón son las cuencas Warrior y Central Appalachiana al este de los Estados

Unidos, también hay importantes reservas en las cuencas Uinta y Raton en la región de Rocky Mountain (Fuente: [página principal del NETL de los EUA](#)).

I.2.2. GAS DE ARENAS DE BAJA PERMEABILIDAD (TIGHT GAS).

Las secuencias almacenadoras gasíferas de muy baja permeabilidad presentan un conjunto de características propias que los diferencian de los "yacimientos convencionales".

Algunas de las propiedades que suelen presentarse y hacen diferentes a estos yacimientos, son las siguientes (Crotti A. M., 2008):

- Muy baja permeabilidad (**Figura 1.2**). Los yacimientos de gas en arenas de baja permeabilidad (Tight) presentan permeabilidades promedio menores a 0.1 mD.

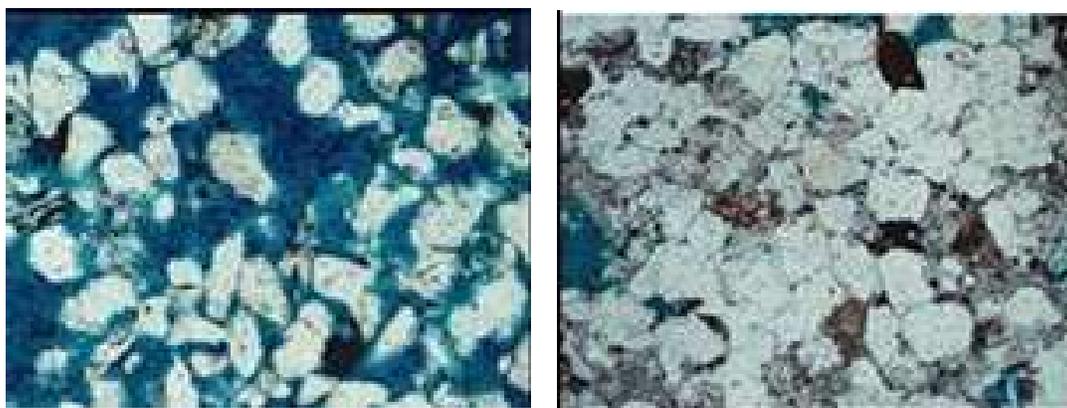


Figura 1.2. Lámina delgada de areniscas. La arenisca convencional (izq) tiene poros bien conectados (azul oscuro). Los poros en la arenisca tight gas (der) están irregularmente distribuidas y pobremente conectados, lo que dificulta la producción del gas atrapado en estas secuencias. (Tomada de [NETL de los EUA; 2008](#))

- Baja porosidad, con posibles sistemas de doble porosidad (matriz y microfisuras).
- Dificultad en la evaluación de las reservas debido a que se encuentran generalmente como yacimientos no inter-conectados.
- Dificultad en la evaluación de la saturación de agua en la matriz arenosa.
- Permeabilidades relativas dominadas por fuerzas capilares.
- Frecuente sobre-presurización.
- Caudales de producción cercanos al límite económico de las explotaciones.

Estas características sumadas conducen frecuentemente a que la principal incógnita a resolver en estos yacimientos sea la relacionada a la reserva de gas. Frecuentemente resulta complejo determinar o predecir adecuadamente, la extensión de los yacimientos, la saturación de agua en la estructura, incluyendo la extensión de la “zona de transición capilar”, la caída de presión media en la estructura y la evolución de la producción.

El departamento de energía de los Estados Unidos están valorando la potencialidad de los yacimientos de este tipo de gas en las cuencas de Greater Green River, Wind River, Uinta, y Anadarko.

I.2.3. GAS DE LUTITAS (SHALE GAS).

Las lutitas, las más abundantes rocas sedimentarias se caracterizan por presentar una permeabilidad extremadamente baja, a menudo se considera una barrera natural para la migración del petróleo y el gas. En las lutitas gasíferas, el gas es generado localmente; la lutita actúa a la vez como roca generadora (roca madre) y como yacimiento. Este gas puede almacenarse intersticialmente en los espacios porosos, en las fracturas de la lutita o ser adsorbido en la superficie de los componentes orgánicos contenidos en la lutita. Las cualidades que son particularmente características de la lutita gasífera incluyen el alcance regional, la falta de un sello y trampa obvios, la ausencia de un contacto gas-agua bien definido, la presencia de fracturas naturales, una recuperación final estimada más baja que la de una acumulación convencional y una matriz de permeabilidad muy baja (Boyer Ch;2006).

Las lutitas gasíferas se caracterizan por el aumento en el valor de los registros geofísicos de rayos gamma, una alta resistividad, una baja densidad volumétrica y un bajo efecto fotoeléctrico, en comparación con las lutitas normales (Boyer, Ch; 2006).

Un ejemplo de este tipo de yacimiento es el gas contenido en las lutitas de la Formación Barnett Shale del centro-norte de Texas, USA.

I.3. IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LOS HIDRATOS DE METANO.

La importancia de estudiar los hidratos de metano se resume en los siguientes aspectos:

- 1) Las grandes cantidades de metano que contienen, los convierten en una potencial fuente de energía, considerando que un metro cúbico de hidrato de gas corresponde a 164 metros cúbicos de gas al disociarse.
- 2) Puede influir en el cambio climático global al ocasionar un efecto invernadero, debido a que puede ser una fuente o sumidero del metano a la atmósfera; tienen un potencial **negativo** de alrededor de 10 veces más que el dióxido de carbono, es relacionado

directamente con el calentamiento global del planeta por la liberación directa de metano a la atmósfera.

- 3) Puede funcionar como una sustancia que permite la consolidación de los sedimentos modificando su estabilidad si se les extrae en algunas condiciones particulares. Los hidratos de metano se localizan en la geoesfera submarina, la cual es un sistema finamente balanceado, en equilibrio con todos sus componentes, entre los que destacan los sedimentos, el agua de los poros, los flujos de fluidos, la presión, la temperatura, el agua que cubre la capa de sedimentos con hidratos, etc. La modificación de cualquier componente en equilibrio puede entonces desestabilizar todo el sistema dando lugar a daños irreparables. Los factores desestabilizantes pueden ser perturbaciones naturales de la Tierra o asociadas con la exploración y explotación de los hidratos; la explotación inadecuada podría afectar potencialmente el clima y el ambiente geológico a una escala global catastrófica.

Por otro lado, los hidratos de metano son una excelente posibilidad de independencia energética para algunos países desarrollados, como EUA y Japón, y en vías de desarrollo como la India y China; lo que ha motivado a esos países a la creación de programas de investigación y desarrollo tecnológico para hacer posible la extracción comercial de gas natural a partir de depósitos de Hidratos de Metano. De acuerdo con estudios preliminares, existen reservas considerables de gas natural en estos tipos de depósitos cerca de las principales áreas de consumo en el mundo, como es el caso de California, Nueva York, Tokio, etc.

Por su parte, estudios regionales hechos en aguas profundas de México en su zona económica exclusiva, han permitido identificar un área potencial de 19,000 km², en donde hay buenas posibilidades de contener depósitos de Hidratos de metano (HMN), ya que en aguas profundas se han recuperado núcleos, cuyos análisis de laboratorio mostraron hasta 99% de impregnación de metano; otros estudios en el Océano Pacífico han detectado y documentado emanaciones constantes (chimeneas) de metano provenientes del lecho marino.¹

Las actividades de investigación y desarrollo tecnológico para la búsqueda y explotación de los hidratos de metano se han incrementado con programas intensivos de Japón, India, Canadá, Reino Unido, Alemania, Brasil, Noruega y Rusia. Si bien es cierto que actualmente los costos de producción de metano a partir de hidratos no son competitivos, se espera que los grupos de investigación alrededor del mundo generen nuevas técnicas para hacer económicamente factible su explotación.

I.4. DESARROLLO HISTÓRICO.

El primer experimento documentado con hidratos de gas es acreditado a Sir Humphrey Davy (1811), quien reportó que bajo ciertas condiciones, el agua y el cloro forman una sustancia cristalina semejante al hielo, pero que se forma por arriba del punto de congelación del agua.

¹ . Primer foro sobre hidratos de gas natural en México. 2004. Introducción.

La historia cronológica en el estudio de los hidratos de gas puede englobarse en cuatro escenarios de investigación que se indican en la **Figura 1.3** y que se describen a continuación:

El primer escenario histórico consistió en una serie de estudios científicos o académicos en el ámbito de la investigación pura. El segundo escenario se remonta en los años 1930's, cuando se descubrió que los hidratos se formaban en las tuberías de transporte de gas natural (gasoductos) bloqueando el flujo del gas; en este punto, las investigaciones dieron un giro para pasar de investigaciones meramente científicas a un enfoque más práctico, enfocando todos los esfuerzos en idear métodos para prevenir la formación de hidratos en las tuberías de gas en las regiones frías, ricas en yacimientos de gas convencional como Siberia, Alaska y Canadá.

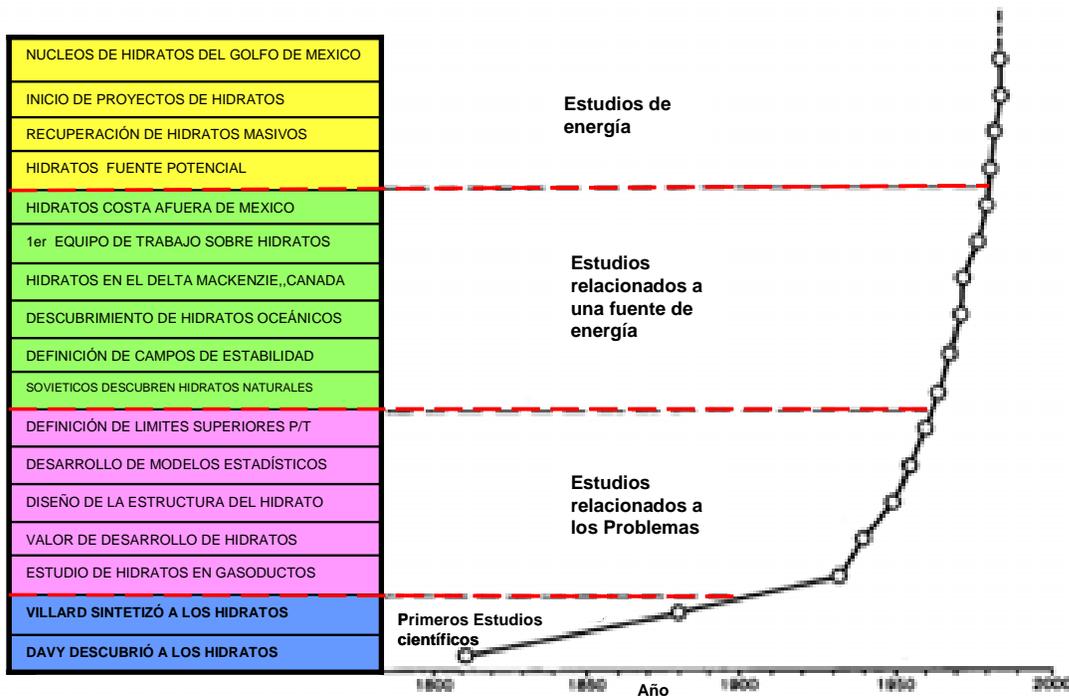


Figura 1.3. Eventos históricos en la investigación de los hidratos de gas (Fuente Departamento de energía de los E.U.A, 1987).

El tercer escenario de investigación comienza en los años 1950's y 1960's, cuando experiencias inusuales en las operaciones de perforación en el Ártico y costa afuera de las márgenes continentales condujeron a especular que los hidratos pudieran existir en la naturaleza y pudieran representar una fuente potencial de gas comercial. Bajo este escenario, los estudios fueron enfocados a definir las propiedades de los hidratos en diagramas de fase, en curvas de presión y temperatura, haciéndose especulaciones acerca de la ocurrencia natural de este tipo de depósitos. A finales de los 1960's es cuando científicos soviéticos anunciaron el descubrimiento y recuperación de cristales de hidratos

en formaciones sedimentarias de Siberia, acontecimiento que marcó el inicio de un cuarto escenario de investigación de hidratos de gas, mismo que puede englobar las investigaciones presentes.

Este cuarto escenario enfoca los esfuerzos para evaluar el potencial de hidratos de gas como una fuente de energía no convencional en el mediano y largo plazo.

En 1972 fue recuperado el primer espécimen presurizado de hidrato de gas de origen natural mediante un pozo exploratorio en el talud continental del norte de Alaska, en el campo petrolero de Prudhoe (Desa E, et al; 2000). En los años 1970's científicos del Observatorio de la Tierra Lamont-Doherty de la Universidad de Columbia encontraron los primeros indicadores de hidratos de metano debajo del piso oceánico a partir de perfiles sísmicos colectados sobre el área de Blake Ridge, a lo largo de la costa sureste de Estados Unidos; desde entonces, la presencia de hidratos de gas ha sido inferida en muchos lugares alrededor del mundo. En los años 1990's se llevaron a cabo las primeras campañas de exploración y perforación para la investigación de hidratos de gas, llevadas a cabo por la Ocean Drilling Program (ODP) dando valiosísimos resultados para mejorar el entendimiento de los depósitos de hidratos. A partir de ello y hasta la fecha, se están llevando a cabo programas más específicos de acuerdo a la ocurrencia global de Hidratos de Metano, programas en los que países como Japón, Canadá, E.U., la India, entre otros, trabajan en conjunto con organismos científicos internacionales como lo fue el Deep Sea Drilling Program (DSDP), la Ocean Drilling Program (ODP) y ahora lo es la Integrated Ocean Drilling Program (IODP), dedicados al desarrollo y producción de tecnología para emplearse en la exploración y explotación de acumulaciones de hidratos de metano. En la actualidad se han recuperado muestras de núcleos con hidratos de gas en diferentes sitios oceánicos, aplicado estudios geológicos-geoquímicos, tomado imágenes infrarrojas, realizado registros geofísicos durante la perforación y tomado videos y muestreo del fondo oceánico por medio de sistemas robotizados. Estos programas internacionales han llevado a caracterizar los depósitos del permafrost en Alaska y Canadá, en donde se tienen programas piloto de producción de gas natural contenidos en los hidratos, como en el pozo Mallik 2002 en el Delta Mackenzie, Canadá.

Varios son los cruceros que documentan las experiencias de las investigaciones de estos organismos en las zonas potenciales de hidratos de gas a nivel global; es relevante enunciar los realizados en aguas patrimoniales de nuestro país, por científicos de la Universidad Nacional Autónoma de México junto con investigadores alemanes, los cuales son nombrados el R/V SONNE 174 en 2003 y METEOR EXPEDITION 67 Leg M67-2 en 2006, cuyo resultado es la obtención de muestras que demuestran su existencia en aguas profundas de las aguas patrimoniales nacionales.

CAPÍTULO II. ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS.

Los hidratos de gas son compuestos químicos sólidos cristalinos que ocurren de manera natural o que se pueden crear en el laboratorio, cuya apariencia asemejan al hielo seco; tienen una estructura clatrática o de jaula, cuya molécula está formada por agua en forma de hielo y una molécula huésped de gas, generalmente metano. Comúnmente todos los gases (exceptuando el hidrógeno, helio y neón) forman hidratos, sin embargo, los más conocidos y abundantes en la naturaleza son los hidratos de metano (Sloan, 1990), puesto que el metano es el gas más abundante que se forma de manera natural por descomposición o transformación de la materia orgánica, durante la diagénesis, catagénesis o metagénesis; en menor proporción puede haber hidratos de etano, propano y butano.

Los hidratos de gas se encuentran en diferentes condiciones, por ejemplo en los sedimentos de las márgenes continentales, en aguas profundas y en las regiones polares (Permafrost), siempre y cuando existan condiciones de temperatura y presión apropiadas para su formación, estas condiciones específicas se describen más adelante. La presión-temperatura de estabilidad de los depósitos de hidratos de metano (Englezos and Bishnoi, 1988; en Spence, et al., 1995), indican que éstos son estables en sedimentos clásticos oceánicos a profundidades de pocos cientos de metros debajo del piso oceánico, donde la profundidad del agua excede los 300 m aunque esto puede variar en función del clima y la profundidad del mar.

II.1. COMPOSICIÓN.

Las características generales de las moléculas que intervienen en la formación de hidratos de metano se mencionan a continuación con la finalidad de mejorar el conocimiento sobre sus propiedades y origen.

II.1.1. EL METANO¹

Vota en 1778 y Henry en 1805, definieron al metano como gas combustible que puede ser diferenciado de otros por sus propiedades físicas y químicas. El principal constituyente del gas natural es el metano que se desprende del cieno de los pantanos o de aguas estancadas procedentes de la putrefacción de sustancias orgánicas, especialmente celulosa; también por la acción de microorganismos, en estos casos se encuentra acompañado de gas carbónico y de nitrógeno y, a veces, de hidrógeno sulfurado; otra fuente muy importante de metano es el

¹ Tomada de: Baltazar M. E., **Apuntes del tema “hidratos de metano”, tema propuesto para la asignatura geología del petróleo, de la carrera de ingeniería geológica.** Tesis profesional. UNAM F.I. 2002.

que procede de la alteración termal de las rocas generadoras ricas en carbono orgánico total (COT), durante la catagénesis y metagénesis.

El metano también se puede formar en el laboratorio por síntesis directa del hidrógeno y el carbono a temperaturas altas mediante el proceso de rompimiento termal: $C + 2H_2 \longrightarrow CH_4$; se origina entre los $1100\text{ }^{\circ}C$ y $2100\text{ }^{\circ}C$ a presiones por encima de las 200 atm; bajo estas condiciones el metano es el único hidrocarburo saturado que se forma. En el enlace molecular del metano, cada uno de los átomos de hidrógeno está unido al carbono por medio de un enlace covalente, es decir, cuando el carbono está unido a otros cuatro átomos de hidrógeno, sus orbitales enlazantes (orbitales sp^3 , formados por mezcla de un orbital s y tres p) se dirigen hacia los vértices de un tetraedro (**Figura 2.1**); esta disposición tetraédrica es lo que permite a los orbitales estar separados al máximo. Para que cada uno de estos orbitales solape al orbital esférico “ s ” de un átomo de hidrógeno con efectividad máxima, formando así un enlace más fuerte, cada núcleo de hidrógeno debe ubicarse en un vértice de este tetraedro.

Las propiedades del metano y de cada uno de los elementos que componen una molécula de metano se enuncian en las **Tablas 2.1 y 2.2**.

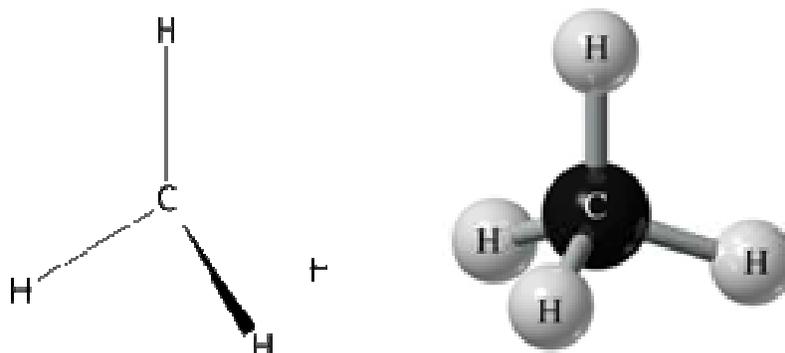


Figura 2.1. Estructura molecular del metano en donde se observa cada uno de los átomos de hidrógeno está unido al carbono por medio de un enlace covalente en los vértices de un tetraedro (Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/CH4>).

El metano es un gas incoloro, inodoro, no es venenoso y se descompone por calor en carbono e hidrógeno. El metano arde en el aire o en oxígeno con una llama generalmente luminosa y al mezclarlo con oxígeno o con aire forma una mezcla muy explosiva, que al reaccionar forman bióxido de carbono y agua.



Tabla. 2.1. Propiedades del gas metano	
<u>Punto de fusión</u>	90.6 K (-182.5 °C)
<u>Punto de ebullición</u>	111.55 K (-161.6 °C)
<u>Punto crítico</u>	190.6 K (-82.6 °C) 46 bar
Calor de fusión ($\Delta_{fus}H$)	1.1 kJ/mol
Calor de vaporización ($\Delta_{vap}H$)	8.17 kJ/mol
Entalpía estandar de formación ($\Delta_f H^0_{gas}$)	-74.87 kJ/mol
Energía libre de Gibbs ($\Delta_f G^0_{gas}$)	-50.828 kJ/mol
Entropía estandar molar (S^0_{gas})	188 J/(mol·K)
Capacidad calorífica molar (C_m)	35.69 J/(mol·K)

Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/CH4>

Tabla 2.2. Características del Hidrógeno, Carbono y Oxígeno.

CARBONO “C”	HIDRÓGENO H”	OXÍGENO “O”
<ul style="list-style-type: none"> •Sólido •Grupo IV en la Tabla Periódica de los elementos •Numero atómico: 6 •Tetravalente (4 valencias) •Masa atómica: 12.0115 •Peso atómico: 12.011 •Porcentaje del “C” en los hidrocarburos: 82-87 % 	<ul style="list-style-type: none"> •Gas •Grupo I en la Tabla Periódica de los elementos •Numero atómico: 1 •Valencia: 1 •Masa atómica: 1.00797 •Peso atómico: 1.0078 •Porcentaje del “H” en los hidrocarburos: 13-18 % 	<ul style="list-style-type: none"> •Gas •Grupo VI A en la Tabla Periódica de los elementos •Numero atómico: 8 •Valencia: -2 •Masa atómica: 15.9994 •Peso atómico: 16 •Porcentaje del “O” en los hidrocarburos: < 2 %

Tomada de: **Baltazar M. E; 2002**

II.1.2. EL AGUA.²

Hasta el siglo XVIII se creyó que el agua era un elemento, fue el químico inglés Cavendish, quien sintetizó agua a partir de una combustión de aire e hidrógeno. Sin embargo, los resultados de este experimento no fueron interpretados hasta años más tarde, cuando Lavoisier propuso que el agua no era un elemento sino un compuesto formado por oxígeno y por hidrógeno, cuya fórmula es:



El agua es la única sustancia que existe a temperaturas ordinarias en los tres estados de la materia: sólido, líquido y gas; es un líquido inodoro e insípido. A la presión atmosférica (760 mm de mercurio), el punto de fusión del agua pura es de 0 °C y el punto de ebullición es de 100 °C. Cuando el agua forma un sólido su sistema de cristalización es hexagonal (**Figura 2.2**), llamándose nieve o hielo según su forma, ya sea esponjosa o compacta. Bajo la solidificación se expande, es decir aumenta de volumen, de ahí que la densidad del hielo sea menor que la del agua y por ello el hielo flota en el agua líquida. El agua alcanza su densidad máxima a una temperatura de 4 °C, que es de 1gr/cm³.

Su capacidad calorífica es superior a la de cualquier otro líquido o sólido, siendo su calor específico de 1 cal/gr, esto significa que una masa de agua puede absorber o desprender grandes cantidades de calor, sin experimentar apenas cambios de temperatura, lo que tiene gran influencia en el clima (las grandes masas de agua de los océanos tardan más tiempo en calentarse y enfriarse que el suelo terrestre). El agua es el compuesto químico más familiar para nosotros, el más abundante y el de mayor significado para nuestra vida. Su excepcional importancia, desde el punto de vista químico, reside en que casi la totalidad de los procesos químicos que ocurren en la naturaleza, tanto en organismos vivos como en la superficie de la tierra, así como los que se llevan a cabo en el laboratorio y en la industria, tienen lugar entre sustancias disueltas en agua, esto es en disolución. Normalmente se dice que el agua es el disolvente universal, puesto que todas las sustancias son de alguna manera solubles en ella.

El agua no posee propiedades ácidas ni básicas, se combina con ciertas sales para formar hidratos, reacciona con los óxidos de metales formando ácidos y actúa como catalizador en muchas reacciones químicas. La molécula de agua libre y aislada, formada por un átomo de Oxígeno unido a otros dos átomos de Hidrógeno es triangular. El ángulo de los dos enlaces (H-O-H) es de 104.5° y la distancia de enlace O-H es de 0.96 Å. Puede considerarse que el enlace en la molécula es covalente, con una cierta participación del enlace iónico debido a la diferencia de electronegatividad entre los átomos que la forman (**Figura 2.3**).

². *Ibidem*.

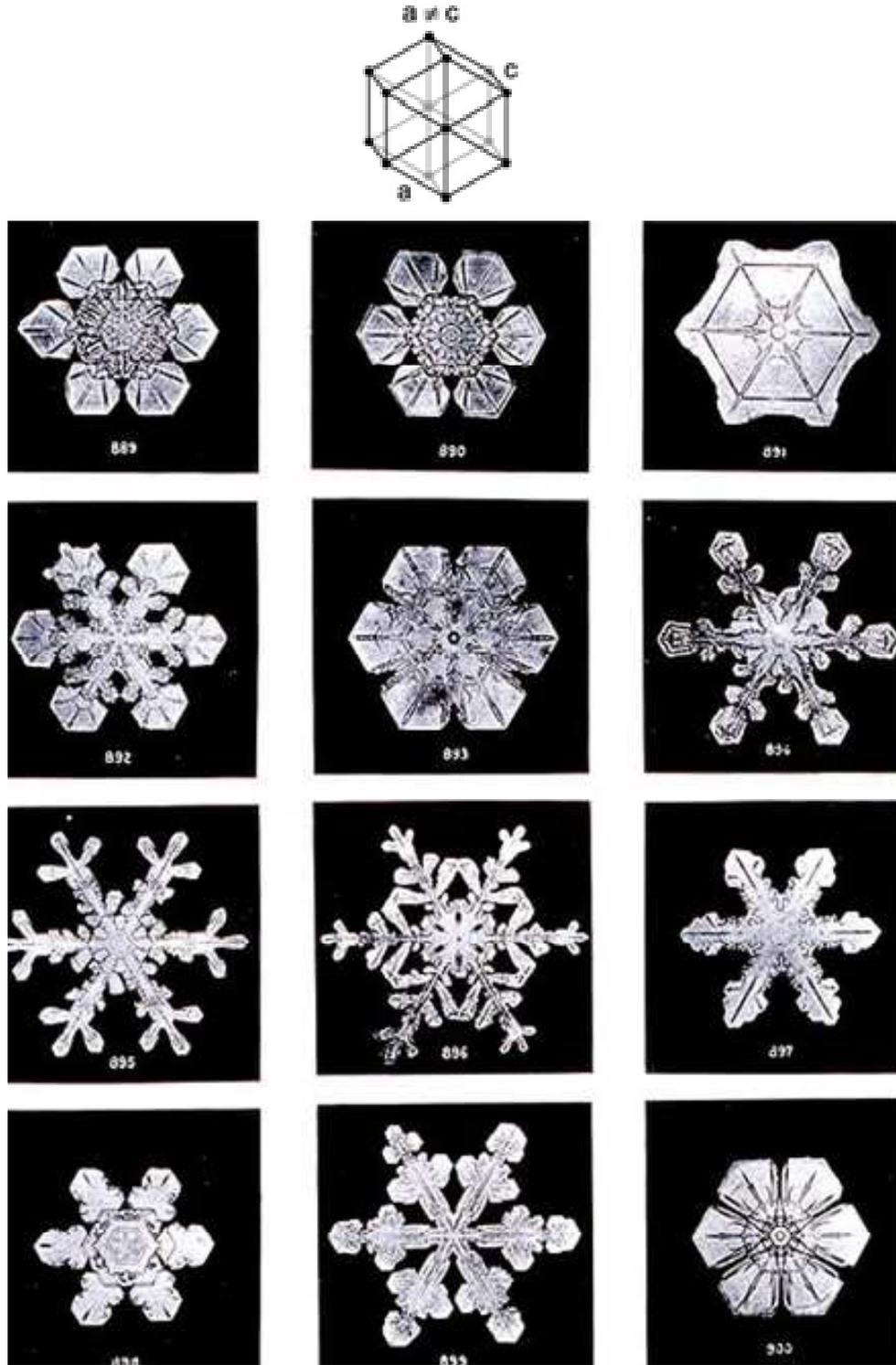


Figura 2.2. Sistema de cristalización del agua. En la parte superior se muestra el sistema hexagonal con cada una de sus caras, en los recuadros las diferentes formas de cristales del hielo (fuente: gta-quimica3a.blogspot.com).

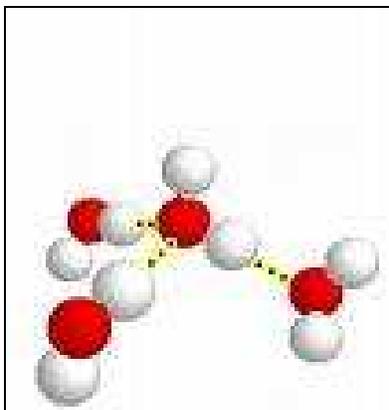


Figura 2.3. Moléculas de agua donde se tiene un enlace covalente entre un átomo de Oxígeno (rojo) con dos de Hidrógeno (Blancos) que en forma de clatratos forman parte en la generación de los hidratos de metano (Fuente: www.monografias.com)

La atracción entre las moléculas de agua tiene la fuerza suficiente para producir un agrupamiento de moléculas, ya que la fuerza de atracción entre el hidrógeno de una molécula con el oxígeno de otra es de tal magnitud que se puede incluir en los denominados enlaces de *punte de hidrógeno*. Estos enlaces son los que dan lugar al aumento de volumen del agua sólida y a su estructura hexagonal.

Una clase interesante de compuestos se forma cuando el agua se congela después de haber sido saturada con un gas compuesto de moléculas pequeñas, tales como Cl_2 , Br_2 , CHCl_3 , H_2S y aun gases nobles como Ar, Kr y Xe. En estas sustancias la molécula pequeña es atrapada en una cavidad o jaula de moléculas de agua, estas sustancias son llamadas *clatratos* (del latín que significa *enjaulado* o *prisionero entre barras*) no son compuestos en el sentido usual, puesto que no hay un enlace directo entre el agua y la molécula atrapada.

La cavidad en la cual la molécula es atrapada varía de un *clatrato* a otro, pero siempre se aproxima a un poliedro natural; muchos de estos poliedros se unen por medio de los puentes de hidrógeno para formar una estructura tridimensional con una molécula atrapada dentro del poliedro.

II.2. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS.

El hidrato de gas se encuentra en la naturaleza en forma cristalina sólida, y está compuesto por gas, principalmente metano (CH_4), que se enlazan a moléculas de agua en estructuras clatráticas o de caja mediante las fuerzas de Van der Waals (**Figura 2.4**). Los hidratos formados de gases incluyen alcanos ligeros (metano a isobutano), bióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, nitrógeno y oxígeno.

La estructura de estos hidratos consiste en jaulas congeladas que pueden absorber pequeñas moléculas de gas. Otro tipo de hidrato forma grandes cavidades que pueden encerrar varias pequeñas moléculas de pentano. Además, las jaulas individuales pueden diferir en las clases de moléculas de gas que capturan.

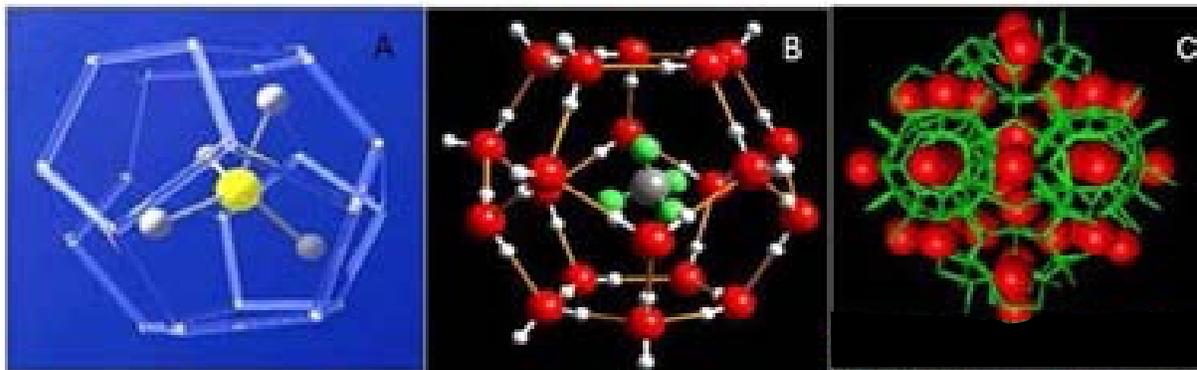


Figura 2.4. A, B. Diferentes representaciones de la estructura clatrática del hidrato de gas mostrando en el centro la molécula de gas metano con un carbono y cuatro hidrógenos. y C. Combinación de estas moléculas para formar hidratos de metano.³

Cuando las presiones son altas, el enfriamiento de moléculas de agua empezará a formar estructuras complejas del sólido a temperaturas significativamente por arriba del punto de congelación. Al contrario del hielo, estas estructuras se caracterizan por formar redes regulares de cavidades grandes, abiertas y son por consiguiente inherentemente inestables. Por enfriamiento continuo, la estructura del hielo se tornará finalmente compacta y estable, cuando una molécula externa de tamaño apropiado entre en la estructura y soporte la cavidad. En la naturaleza, la molécula externa más abundante es el metano (CH₄) de ahí el nombre de hidratos de metano.

En química inorgánica, un *hidrato* es un compuesto estequiométrico (con una composición fija) que tiene moléculas de agua como una parte integral del cristal. Para tales compuestos, se puede escribir una fórmula definida (como por ejemplo, Al₂O₃·3H₂O, es un trihidrato de aluminio que corresponde con un material normalmente usado para fabricar la cerámica). Sin embargo, no puede escribirse una fórmula similar para los hidratos de gas, lo más aproximado que se puede hacer, es representarlo como XCH₄·46H₂O, -con X tan grande como ocho, pero normalmente menor- e incluso esto es incorrecto, ya que otros gases huésped pueden estar presentes. Por consiguiente, los hidratos de gas natural se agrupan como una clase especial de compuestos no estequiométricos llamados *clatratos*.

Los *clatratos* son compuestos que consisten de una red inherente e inestable de moléculas caracterizadas por cavidades abiertas regulares. Las moléculas huésped de tamaño apropiado llenan las cavidades sin enlace, estas son sostenidas por fuerzas de Van der Waals. Cuando un número suficiente de cavidades están ocupadas, se forma una estructura sólida estable

³. U. S. Geological Survey. **Gas Hydrate: What is it?** <http://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/hydrates/what.html>.

(Figura 2.4C). Las fuerzas de Van der Waals es la fuerza de atracción generada entre átomos cuando existe una nube compartida de electrones libres que circula de uno a otro redundando en una unión que -aunque débil y transitoria- los mantiene ligados.

Los hidratos de gas se conforman de moléculas de gas a temperatura y presión estándar, siendo el más común el metano (hidrato de metano), pero muchos gases, incluso el dióxido del carbono, sulfuro de hidrógeno, y los hidrocarburos como el etano y propano, pueden estabilizar las moléculas de agua y pueden formar un *hidrato*. Cuando sólo moléculas muy pequeñas están presentes (hidrógeno o helio, por ejemplo), ningún hidrato se formará porque los invitados disponibles no son lo bastante grandes para apoyar o entramparse en las cavidades (Baltazar, M.E., 2002).

II.2.1. ESTRUCTURA MOLECULAR DEL HIDRATO DE GAS.

Bajo condiciones apropiadas de temperatura y presión, el hidrato de gas usualmente forma una de las dos estructuras cristalinas básicas, conocidas como estructuras-I y estructura-II (sI y sII correspondientemente, Figura 2.5); actualmente se reconoce una tercera estructura conocida como estructura H (sH). La estructura sI (cuerpo cúbico centrado) y sII (enrejado de diamante) se muestran en la Figura 2.5.

Cada celda unitaria de la estructura sI del hidrato de gas consiste de 46 moléculas de agua que forman dos pequeños dodecaedros vacíos y seis grandes tetradecahedros vacíos (Figura 2.5). La estructura sI del hidrato de gas puede solo sostener a pequeñas moléculas de gas como son el metano y el etano, con diámetros moleculares no mayores a los 5.2 Å. La composición química de la estructura-I puede ser expresada como $8(\text{Ar}, \text{CH}_4, \text{H}_2\text{S}, \text{CO}_2) 46\text{H}_2\text{O}$ ó $(\text{Ar}, \text{CH}_4, \text{H}_2\text{S}, \text{CO}_2)5.7\text{H}_2\text{O}$ (Makogon, 1981; en Collett, 2001).⁴

Por otro lado, la celda unitaria de la estructura II (sII) del hidrato de gas consiste de 16 pequeños dodecahedros y 8 grandes hexakaidecahedros vacíos formados por 136 moléculas de agua. Esta estructura puede contener gases con dimensiones moleculares en el rango de 5.9-6.9 Å, como el propano y el isobutano. La composición química de la estructura sII del hidrato de gas puede ser expresada como $8(\text{C}_3\text{H}_8, \text{C}_4\text{H}_{10}, \text{CH}_2\text{C}_{12}, \text{CHCl}_3)136\text{H}_2\text{O}$ ó $(\text{C}_3\text{H}_8, \text{C}_4\text{H}_{10}, \text{CH}_2\text{C}_{12}, \text{CHCl}_3) 17 \text{H}_2\text{O}$ (Makogon., 1981; en Collett., 2001).

La estructura H (sH) fue descubierta en 1897, por Ripmeester y tiene como característica que, para su formación, requiere de dos tipos de gases huésped (uno grande y otro pequeño) para ser estable. La celda unitaria de este doble hidrato, consiste en 34 moléculas de agua produciendo 3 pequeñas cavidades, 12 cavidades ligeramente grandes y una relativamente

⁴. Collet, T.S, 2001. **Natural-Gas hydrates: Resource of the twenty-first century?** In M.W. Downey, J.C. Threet, and W.A. Morgan, eds, Petroleum provinces of the twenty-first century, AAPG Memoir 74, p 85-108.

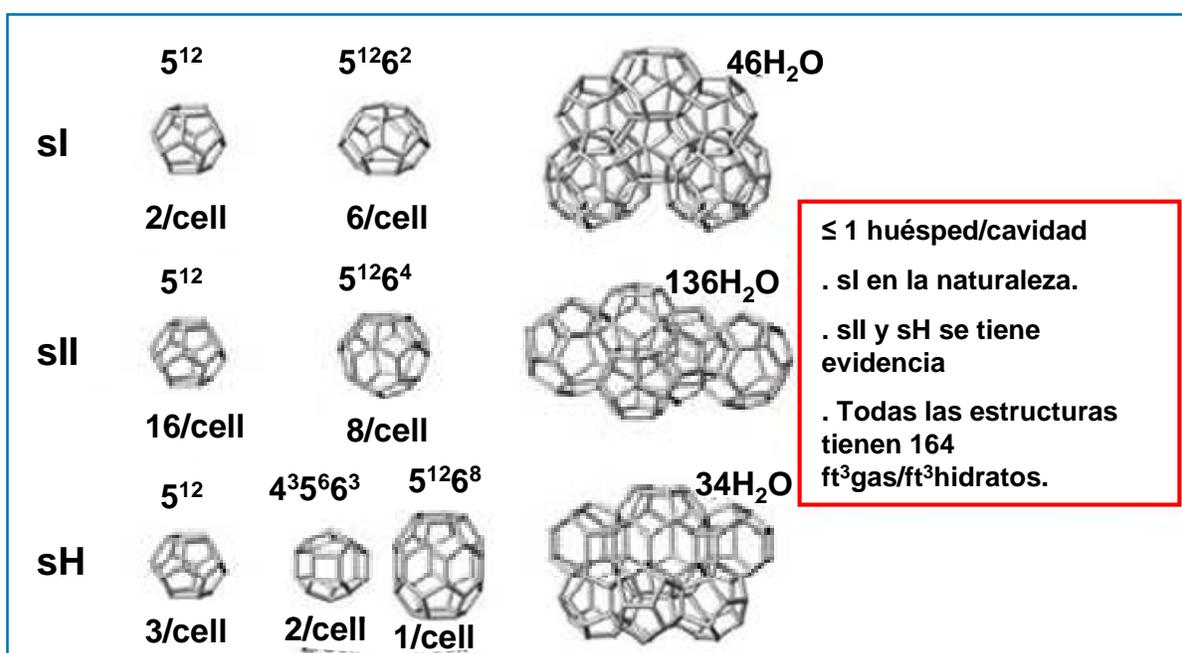


Figure 2.5. Estructuras comunes de hidratos encontradas en la naturaleza, en la cual predomina sI (detallado por Sloan en *Clathrate Hydrates of Natural Gases*, 2nd Ed., Marcel-Dekker, New York, 1998).⁵

enorme, que servirá para incorporar grandes moléculas como las del butano e hidrocarburos más pesados (**Figura 2.5**). La estructura H es rara, pero se sabe que existe en el Golfo de México donde la producción de hidrocarburos termogénicos pesados es común.

En la **Figura 2.6** se muestra, de manera esquemática, los tres tipos de estructuras y la forma de la cavidad que se forma en los hidratos.

II.3. ORIGEN DEL METANO.

El gas natural puede formarse de manera natural durante la diagénesis, la catagénesis y la metagénesis, por lo que se genera a diferentes condiciones de temperatura y presión a diferentes profundidades. El origen del gas metano en los hidratos está relacionado principalmente con un origen biogénico y un origen termogénico, mismos que a continuación se describen.

⁵ . Federal Methane Hydrate Advisory Comitee. 2007. **An Assessment of Methane Hydrate Research Program and An Assessment of the 5-Year Research Plan of the Departmen of Energy**. Report to Congress

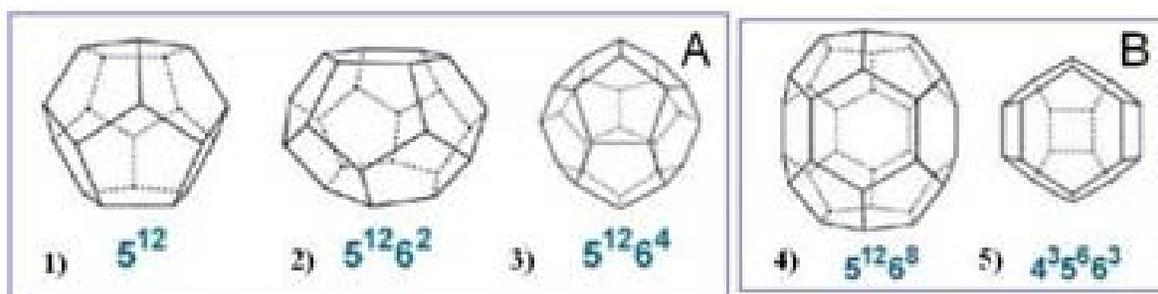
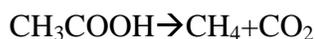


Figura. 2.6. A. Tres tipos de cavidades presentes en sI y sII de los hidratos de metano. **1)** Estructura formada por 12 pentágonos; **2)** Estructura formada por 12 pentágonos y 2 hexágonos; **3)** Estructura formada por 12 pentágonos y 4 hexágonos. **B.** Dos tipos de cavidades de la estructura H. **4)** Estructura formada por 12 pentágonos y 8 hexágonos; **5)** Estructura formada por 3 cuadrados, 6 pentágonos y 3 hexágonos.⁶

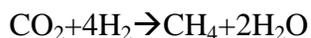
II.3.1. ORIGEN BIOGÉNICO.

En el proceso microbiano los restos orgánicos de los depósitos sedimentarios son descompuestos por una secuencia compleja de metanogénesis realizada por bacterias en un ambiente anóxico. Esta descomposición ocurre por cualquiera de los siguientes dos procesos: a) fermentación de acetato ó b) por reducción de dióxido de carbono (Whiticar., 1986; en Desa, E., 2000).

a) Fermentación de acetato



b) Reducción de Dióxido de Carbono



Bajo condiciones anóxicas, las bacterias fermentan la materia orgánica y producen hidrógeno y CO_2 , esto puede ocurrir en la columna de agua o en los sedimentos. Los isótopos estables de hidrógeno y carbono del metano son fraccionados por este proceso biológico, por lo cual es posible distinguir el metano formado biogénicamente del que es formado termogénicamente durante la catagénesis de la materia orgánica. Cuando las bacterias forman metano por la reducción de CO_2 , éstas consumen preferencialmente $^{12}\text{CO}_2$

⁶. U.S. Department of Energy, **Chemistry of Natural Methane Hydrate.**
http://www.netl.doe.gov/sceng/hydrate/about_hydrates/chemistry.htm.

que es más ligero, que $^{13}\text{CO}_2$, de igual modo consume isótopos de hidrógeno ligeros que los más pesados como el Deuterio.

El origen del metano, marcado por la acción de bacterias anaeróbicas sintetizadoras, se engloba en la etapa de diagénesis (**Figura 2.7**), donde los restos orgánicos en los sedimentos sufren cambios que producen la alteración de la materia orgánica a baja temperatura, habitualmente a temperaturas inferiores a 50°C (122°F) aproximadamente (Peters K. E., et al., 2004; en Boyer Ch, et al., 2006). Durante las primeras fases de la diagénesis se puede incorporar azufre en la materia orgánica, los sulfatos del agua de mar proveen la fuente de oxidantes para la biodegradación de la materia orgánica por las colonias de bacterias sulfato-reductoras; estas bacterias liberan polisulfuros, ácido sulfhídrico (H_2S) y azufre nativo, que pueden recombinarse luego con el hierro de las arcillas para formar piritita (FeS_2), o combinarse con la materia orgánica para formar otros compuestos de organoazufre (Aizenshtat, Z., 1981; en Boyer, Ch., et al., 2006).

El gas seco biogénico es formado en la superficie de los sedimentos a temperaturas por arriba de los 20°C hasta cerca de los 80°C . La generación de metano biogénico cesa en proporción de la población bacteriana (**Tabla 2.3**); a elevadas temperaturas de alrededor de 70°C , y por la disminución de la cantidad de nutrientes. Alrededor de los 1000 m de profundidad de sedimentos es el fin de la generación de metano biogénico (Mitlunt, J., 1996)

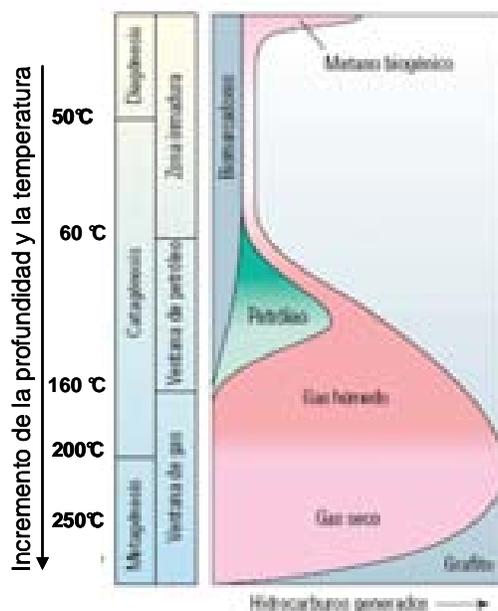


Figura 2.7. Diagrama que muestra las etapas de la transformación térmica del kerógeno. La generación de hidrocarburos en las rocas generadoras es controlada principalmente por la temperatura conforme el contenido de kerógeno pasa de carbono reactivo a carbono muerto. El gas es emitido durante la etapa de diagénesis temprana, fundamentalmente a través de la actividad biológica. La catagénesis tiene lugar al aumentar la profundidad de sepultamiento, en que se libera petróleo y gas. Con el aumento de la profundidad y la temperatura, el petróleo remanente se divide (se craquea), liberando gas (Modificada de Boyer Ch., et al., 2006).

En la **Figura 2.8** se muestra la relación del origen del gas metano respecto a la profundidad del piso oceánico y del diagrama de fase de los hidratos de metano (parte derecha). De 0-10 m debajo del piso oceánico existe una zona reductora que precipita nitratos, manganeso, fierro, sulfatos y carbonatos. El gas biogénico se origina en un rango de 0-600 m debajo del piso oceánico y el gas termogénico a más de 1000 m debajo del fondo oceánico. De acuerdo con el diagrama de fase de los hidratos de metano y considerando que estos se forman a temperatura de alrededor de -9°C a $+15^{\circ}\text{C}$ aproximadamente, el gas biogénico es la principal fuente en la generación de los hidratos de metano.

Tabla 2.3 Población bacteriana aerobia y anaerobia respecto de la profundidad.

Profundidad	Población bacteriana		Ae/An
	Anaeróbica (An)	Aeróbica (Ae)	
0-3 mt.	1.160.000	74.000.000	64:1
66-68mt.	2.300	4.200	2:1

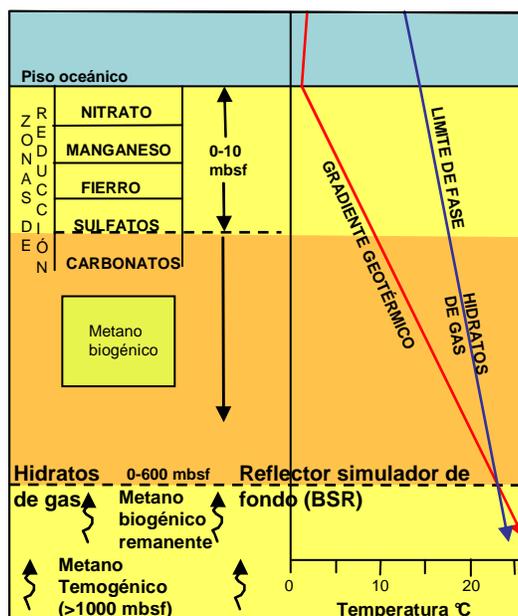
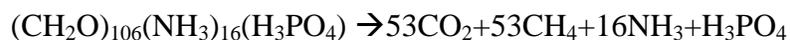


Fig. 2.8. Procesos biogénicos y termogénicos de formación de hidrato de gas; mbsf = metros debajo del piso oceánico ⁷

⁷. Vera, E. E. **Hidratos de Gas Submarinos en el Margen Chileno**, Depto. Geofísica U. de Chile. ppt

La materia orgánica se compone primordialmente de carbón, hidrógeno y fósforo en ratios de 106:16:1, por lo que al ocurrir la descomposición de materia orgánica, resulta en producción de metano como se indica en la siguiente reacción química:



El resultado es que el dióxido de carbono puede seguir reduciéndose, si existe suficiente hidrógeno que lo sustituya, de la siguiente manera:



La composición del gas obtenido de núcleos o muestras recuperadas durante la perforación es expresada comúnmente como C_1/C_2 (Metano/Etano) y comparado contra la profundidad. Este factor es generalmente usado para una obtención rápida de información acerca del origen de los hidrocarburos, como por ejemplo, para distinguir entre gas biogénico y el gas que migró de una fuente más profunda, es decir, gas termogénico. Cuando se tienen altos promedios de $C_1 (>10,000 \text{ ppm})$ y muy altas relaciones de C_1/C_2 , indican que la formación de gas (C_1) ocurrió por procesos biológicos.

Los análisis de las composiciones moleculares e isotópicas de los hidrocarburos indican que la mayoría del metano en los gases hidratados marinos (márgenes continentales) resultan de la alteración de materia orgánica por bacterias en el sedimento, es decir, su origen es biogénico. El metano con este origen se generó en el mismo lugar donde se encontró el hidrato de gas y migró sólo distancias cortas, en otros casos se recicló en el mismo lugar durante la formación y disociación de los hidratos cuando se produjeron depósitos sedimentarios abundantes, cambios de nivel mar, etc. (Paull y otros, 1994; en Bartolome R., 2002).

II.3.2. ORIGEN TERMOGÉNICO.

El origen termogénico del metano es producido por la acción combinada de calor, presión y tiempo de sepultamiento del material orgánico contenido en sedimentos. En el pasado geológico, grandes cantidades de material orgánico fueron preservados dentro de los sedimentos de grano fino, principalmente en ambientes anóxicos donde la acción bacteriana no fue suficiente para su degradación; al ser sepultados estos sedimentos orgánicos, sometidos así a grandes presiones, originaron grandes cantidades de aceite y gas natural, durante las etapas de catagénesis y metagénesis de la materia orgánica. La etapa de catagénesis (**Figura 2.7**) genera la degradación térmica del kerógeno a medida que el incremento de la profundidad de sepultamiento genera más presión, aumentando también la temperatura hasta el rango de aproximadamente 50 a 200 °C a más de un kilometro de profundidad, el kerógeno pierde hidrógeno y se forman hidrocarburos ligeros; se forman hidrocarburos líquidos, algunos de los cuales craquean (descomponen térmicamente) a

⁸. Desa E. 2000. *Submarine Methane hydrates-potencial fuel resource of the 21st century*. Chapter 14, p 517 -571

gaseosos (gas húmedo o gas saturado con hidrocarburos ligeros (C5-C10)); la metagénesis (**Figura 2.7**) es la última etapa en la que el calor adicional y los cambios químicos producen la transformación casi total del kerógeno en gas seco, sucede en un rango de 200 a 250 °C ([Mittlunt, J., 1996](#)) y en ella se forman los hidrocarburos gaseosos.

En general, al proceso de alteración del kerógeno, durante la catagénesis es comúnmente conocido como maduración, produce una serie de moléculas de hidrocarburos progresivamente más pequeñas de volatilidad y contenido de hidrógeno cada vez mayor, llegando finalmente al gas metano. A medida que el kerógeno evoluciona mediante la madurez asociada con la temperatura, su composición química cambia progresivamente, transformándose en un residuo carbonáceo con contenido de hidrógeno decreciente, que finalmente termina como grafito ([Hood, A., et al; en Boyer, Ch., 2006](#)) durante el metamorfismo.

El gas (mayoritariamente metano, pero también etano, propano y butano), junto con el aceite, migran a superficies superiores debido a la densidad relativa del agua junto con otros factores y procesos físicos y mecánicos. Si cantidades suficientes de gas migran y llegan a la zona de estabilidad de los hidratos, y logran combinarse con el agua de la formación, éstos formarán al hidrato de gas que se caracterizará por la presencia de gases más densos, además del metano y composiciones de isótopos de carbón que denotan un origen térmico.

Los gases de los hidrocarburos formados por procesos termogénicos usualmente ocurren a profundidades mayores a los 1,000 m ([Floodgate y Judd, 1992; en Booth, J.S., et al., 1996](#)). Estos gases se generan bajo condiciones de altas temperaturas (etapa de catagénesis y metagénesis) y grandes presiones. Algunos autores mencionan en promedio 2,000 m de profundidad en cuencas sedimentarias donde la temperatura excede los 100° C ([Desa, E., 2000](#)), porque el gradiente geotérmico es mayor a 50°C por cada Km de profundidad.

Es importante mencionar que a nivel global, en sitios donde se ha identificado la presencia de gas termogénico, éste se relaciona a la presencia de fallas u otras discontinuidades del dinámico ambiente geológico, por ejemplo discordancias, fracturas, diapiros, volcanes de lodo, escapes de gas, etc.

La estructura II y la estructura H de los hidratos, en general se asocian a la generación termogénica de éstos, contienen metano y cantidades significativas (>1%) de C₂-C₅ formados por la **pirólisis** de materia orgánica fósil (por ejemplo el kerógeno) o aceite ([Brooks et al., 1984; Sassen y Mac Donald, 1994; en Pohlman, 2006](#)).

El hidrato de gas de origen termogénico ha sido reportado en el Golfo de México ([Brooks et al., 1984 en Pohlman, 2006](#)), en el Mar Caspio ([Ginsburg y Soloviev, 1998; en Pohlman, 2006](#)); más recientemente en el sureste de los altos de Hydrate Ridge, costafuera de Oregon, ([Milkov et al., 2005; en Pohlman, 2006](#)), y la margen norte de Cascadia, costafuera de la isla de Vancouver ([Chapman et al., 2004 en Pohlman, 2006](#)). En todos estos lugares, los hidratos de gas son encontrados cercanos al piso oceánico y están siendo alimentados por un gran flujo de gas alóctono.⁹ Los hidratos de gas termogénicos en el Golfo de México

⁹ . Pohlman John W. 2006. **Sediment Biogeochemistry Of Northern Cascadia Margin Shallow Gas Hydrate Systems**. Tesis doctoral. The Faculty of the School of Marine Science .The College of William and Mary. Virginia

están asociados a rasgos estructurales como diapiros, fallas y fracturas, siendo las dos últimas discontinuidades estructurales que sirven como conductos de migración de fluidos, cuyo origen es una reserva de hidrocarburos en lo profundo (Sassen et al., 1999). El Hydrate Ridge está localizado en el prisma acrecional de Cascadia, donde la presencia de hidratos de gas es asociada mayoritariamente con el origen termogénico. De 55 muestras de hidratos analizadas por el Ocean Drilling Program (ODP) Leg 204, menos del 20 % del contenido total de gas es termogénico (Milkov et al., 2005 en Pohlman, 2006), a pesar de ello, el norte de la margen de Cascadia es considerado como la primer localidad encontrada sobre un margen continental convergente, donde la fuente primaria de los hidratos de gas es termogénico.

II.3.3. FORMACIÓN DEL HIDRATO DE METANO.

El origen del gas enjaulado puede ser indicativo de la distancia de la migración ascendente del gas, antes de que llegue a formar parte de la estructura del hidrato, es decir, un origen termogénico marca una migración ascendente del gas y un origen biogénico es relativamente formado in situ o con migración lateral. Los gases que pertenecen a hidrocarburos biogénicos (principalmente metano) son producidos como una consecuencia directa de la actividad bacteriana y son usualmente generados a pocos metros debajo del fondo oceánico, aunque Parkes y otros (1990), descubrieron como la actividad bacteriana existe de manera limitada en sedimentos de varios cientos de metros debajo del fondo oceánico.

Típicamente, la generación de gas biogénico se asocia a sedimentos de grano fino formado en ambientes reductores debido a sus contenidos elevados de material orgánico inicial.¹⁰

Después de la generación de metano, su transporte en los sedimentos puede ser a través de varios procesos, como son el movimiento del agua de poro conteniendo gas disuelto, flujo de gas libre, y difusión molecular. Cuando las moléculas de metano se encuentran bajo las condiciones de presión y temperatura de estabilidad para la formación de hidratos de gas, el espacio poroso en los sedimentos en presencia de moléculas de agua es ocupado por moléculas de hidrato de metano. Los estudios sobre la formación biogénica de hidratos de metano revelan que estos pueden presentarse in situ en la zona de estabilidad del hidrato (ZEH) y debajo de ésta. Por otra parte, el metano termogénico tiende a migrar de lo profundo de la ZEH hacia la parte superior, regido por el marco geológico-tectónico de la zona.

Las muestras recuperadas de hidratos son estudiadas mediante geoquímica y técnicas isotópicas para identificar el origen del metano en ellas. La precipitación progresiva de los compuestos de hidratos de gas rellenará los espacios porosos de los sedimentos y fracturas, y actuará también como cementante, dando origen así a depósitos masivos, nódulos y vetas. La composición del gas y la presencia de sal y otros componentes en el agua del mar son

¹⁰ . Booth J. S., Rowe M. R., Fischer K. M. 1996. **Offshore Gas Hydrate Sample Database with an Overview and Preliminary Analysis**. USGS Woods Hole Science Center Coastal and Marine Geology Program. Open-File Report 96-272.

factores determinantes en la temperatura y la presión para la estabilidad de los hidratos (Figura 2.9).

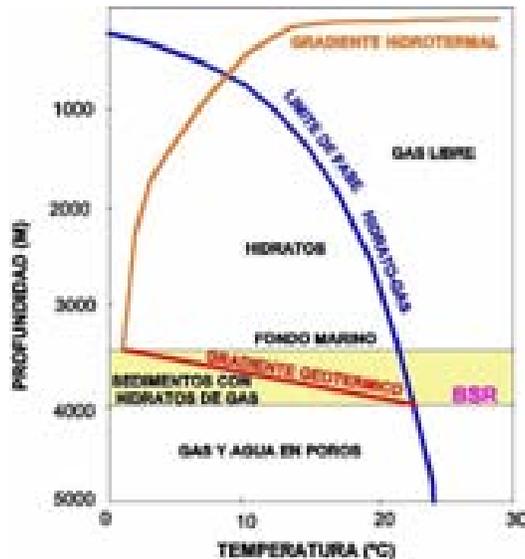


Figura 2.9. Diagrama de fase mostrando el límite entre el gas metano libre y el hidrato de metano para un sistema de agua pura y metano puro (después Kvenvolden; Miles; Modificada de Desa E, 2000).

Para que exista una formación natural de hidratos, la saturación de metano en el agua del poro debe ser elevada; el factor de expansión al liberarse el metano de la fase sólida a la gaseosa, hace que se deba considerar un factor de volumen de 164 de metano contra 0.8 de agua, es decir que de 1 m³ de hidrato de metano se obtienen 164 m³ de gas metano que se encontraba comprimido, y 0.8 m³ de agua (Figura 2.10).

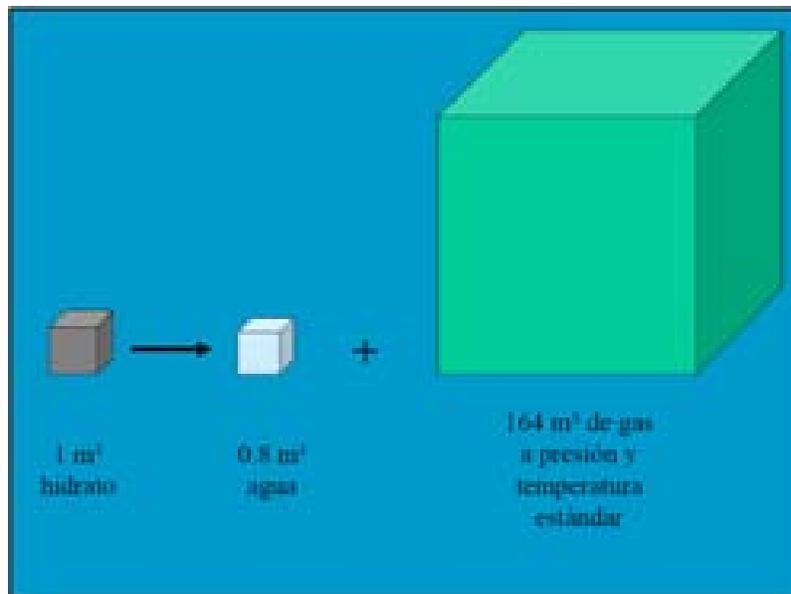


Figura 2.10. Composición proporcional de gas hidrato en la disociación (Tomada de Vera, E; ppt)

II.4. ESTABILIDAD P-T DEL HIDRATO DE METANO.

La ocurrencia del gas hidrato en la naturaleza es controlada por la relación entre los factores de temperatura, presión y composición. El diagrama de fase de la Figura 2.9 muestra el límite entre la capa de gas libre y el hidrato de metano, para el agua pura y un sistema puro de metano en el cual es posible estimar las condiciones de Presión- Temperatura bajo las cuales el hidrato de metano será estable sobre las márgenes continentales.

La presencia de gases con peso molecular mayor al metano (etano o propano) causará que el límite de fase cambie hacia la derecha, permitiendo que el hidrato se forme a bajas presiones. Por ejemplo, en un porcentaje de etano del 10% en la mezcla de gas, los hidratos son estables a 6 atmósferas de presión (aproximadamente 60 metros de columna de agua) y 6° C de temperatura, mientras que los hidratos de metano puros son estables solamente a presiones sobre 40 atmósferas (aproximadamente 400 metros de columna de agua).

En el Golfo de México se ha encontrado la presencia de hidratos desde aguas de profundidad moderada, con temperaturas de hasta 20° C, hasta con tirantes de agua de más de 2000 metros de profundidad. La composición química de los gases de los hidratos juega un papel importante en la estabilidad de éstos a diferentes profundidades.

La presencia de sal en el agua de poro cambia el límite de fase hacia la izquierda, causando un decremento en la zona de estabilidad del hidrato de gas. La intersección del perfil hidrotermal con la curva de límite de fase del hidrato de gas corresponde al mínimo de profundidad del agua bajo el cual los hidratos serán estables. En sedimentos marinos profundos, la temperatura normalmente se incrementa con la profundidad y eventualmente llega a un punto en el cual los hidratos no son estables, a pesar del incremento continuo de la presión con la profundidad. La zona para la cual los hidratos de metano son potencialmente estables es comúnmente de los 400 a los 800 m debajo del piso oceánico sobre el talud continental, y de los 800 a los 1700 metros debajo de áreas del permafrost¹¹ (**Ver Figuras 2.11 y 2.12**). Por otra parte, a medida que crece el depósito de sedimentos, la zona de hidratos de gas desciende a niveles donde la presión y la temperatura los convierten en inestables y los disocia generándose gas metano libre; este metano en fase libre, migrará a capas superiores en donde éste se hará estable para ser parte del hidrato, o en otros casos, se acumulará como gas si el hidrato de gas previamente formado forma un sello en una trampa que formará un yacimiento de gas. Estimando la presión en un área determinada y el gradiente de temperatura, es posible estudiar el régimen de estabilidad de los hidratos de gas en función de la profundidad.

¹¹ . Booth J. S., Rowe M. R., Fischer K. M. 1996. **Offshore Gas Hydrate Sample Database with an Overview and Preliminary Analysis**. USGS Woods Hole Science Center Coastal and Marine Geology Program. Open-File Report 96-272.

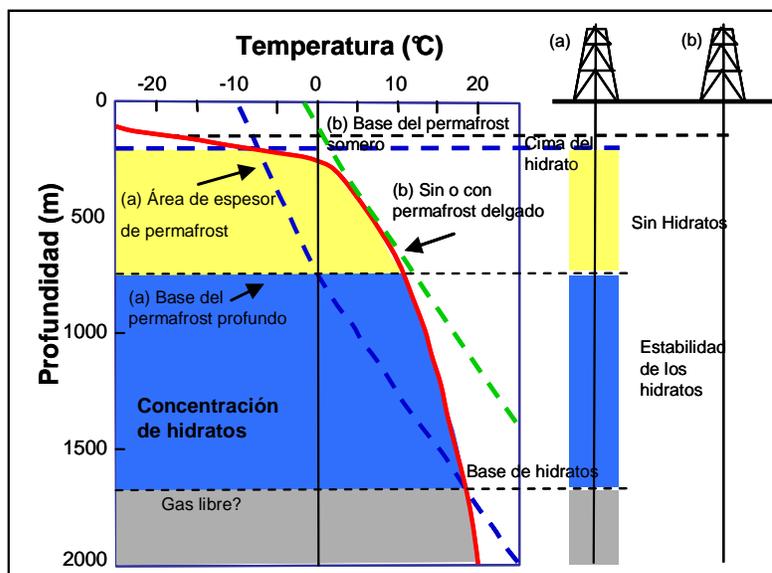


Figura 2.11. La relación temperatura- profundidad es la que delimita la ocurrencia del hidrato de gas en zonas del ártico continental para condiciones frías (espesor del permafrost) y en condiciones más cálidas se requiere una mayor profundidad. Los hidratos tienden concentrarse cercanos a la base del campo de estabilidad.¹²

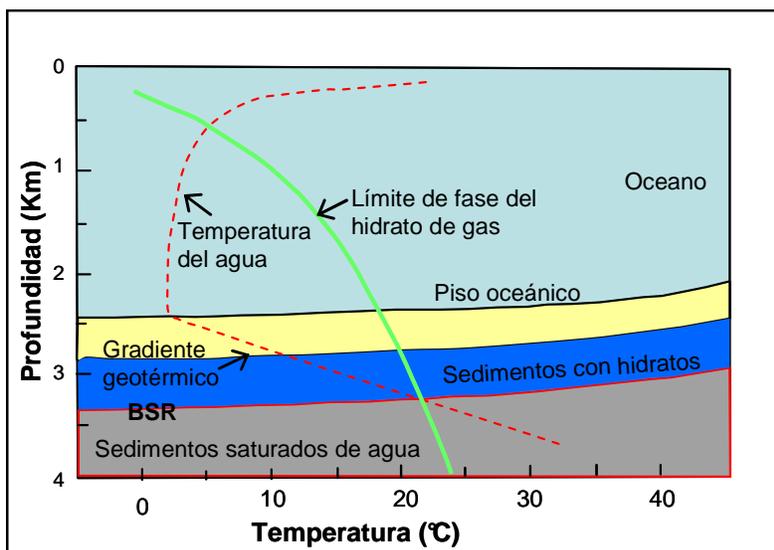


Figura 2.12. Condiciones de Temperatura-Profundidad que indican la estabilidad del hidrato de gas debajo del piso oceánico a latitudes medias en las zonas de las márgenes continentales (Modificada de: Hyndman, R.D y Dallimore, S.R.,2001).

¹² . Modificada de: Hyndman R.D y Dallimore S.R. 2001 **Natural Gas Hydrate Studies in Canada**. Geological Survey of Canada.

II.4.1. HIDRATOS DEL ÁRTICO (PERMAFROST).

Los hidratos de gas han sido encontrados dentro y debajo del permafrost en el Talud Norte de Alaska, en el Ártico de Canadá y en el Norte de Siberia; algunas de estas acumulaciones se presentan en áreas que han sido de gran importancia en el desarrollo de hidrocarburos convencionales. De acuerdo a evaluaciones cuantitativas, los hidratos del Ártico tienen el potencial para llegar a ser una fuente de gas natural económicamente viable en el mediano y largo plazo.

En las regiones de permafrost los hidratos de metano son estables a temperaturas de $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+14\text{ }^{\circ}\text{C}$, que corresponden con profundidades del mar que varían de 200 metros a 1.1 km aproximadamente (**Figura 2.13**).

Las capas del permafrost se forman donde el agua subterránea que ocupa el espacio poroso de la roca y sedimento está permanentemente congelada. El permafrost se desarrolla porque la temperatura media anual del aire es bastante baja, manteniendo una temperatura constante de la superficie por debajo de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; las condiciones son similares en el fondo oceánico donde el agua subterránea se convierte en hielo en invierno y queda exenta del deshielo de verano.

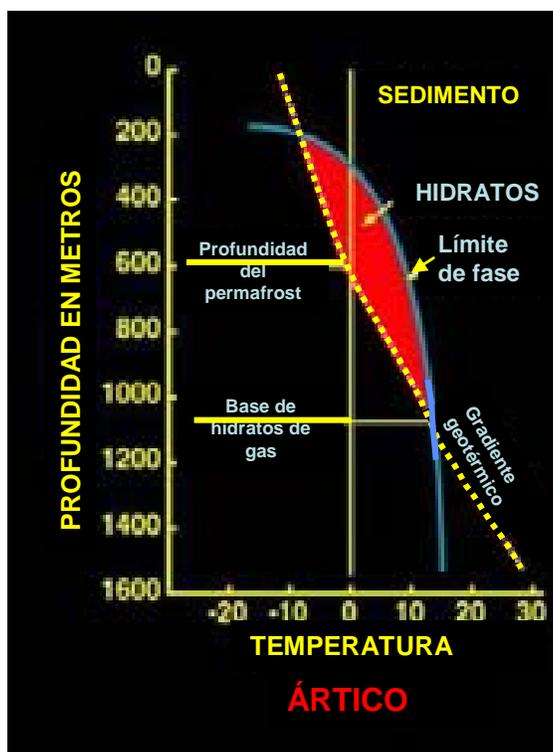


Figura 2.13. Diagrama que muestra la estabilidad del hidrato de gas en zonas del Ártico (Permafrost).¹³

¹³ . Modificada de: Collett T. S. **Geologic Controls on the Energy Resource Potential of Gas Hydrates**. First Forum on Natural Gas Hydrates in Mexico, June 28-30, 2004, Mexico City, Mexico.

Aproximadamente el 20% del área emergida en el Hemisferio Norte es de permafrost, el cual presenta espesores variables de menos de uno a varios cientos de metros. La asociación que existe entre la zona del permafrost y la presencia de hidratos de metano se define siempre a partir de las condiciones de estabilidad presión-temperatura y de la existencia de metano, es decir, que en zonas del permafrost existirán los hidratos de metano siempre y cuando se tengan las condiciones apropiadas para la formación de éstos. En las regiones polares frías, el gradiente geotérmico normal, con temperaturas en la superficie es de alrededor de $-12\text{ }^{\circ}\text{F}$, aunque pueden persistir a las profundidades de 600 metros o más.

Las regiones del Ártico que presentan las condiciones de presión y temperatura favorables para tener acumulaciones de hidrato de gas se muestran en la **Figura 2.14**, en la que se observa que tres provincias se encuentran en América del Norte y cuatro en Rusia.

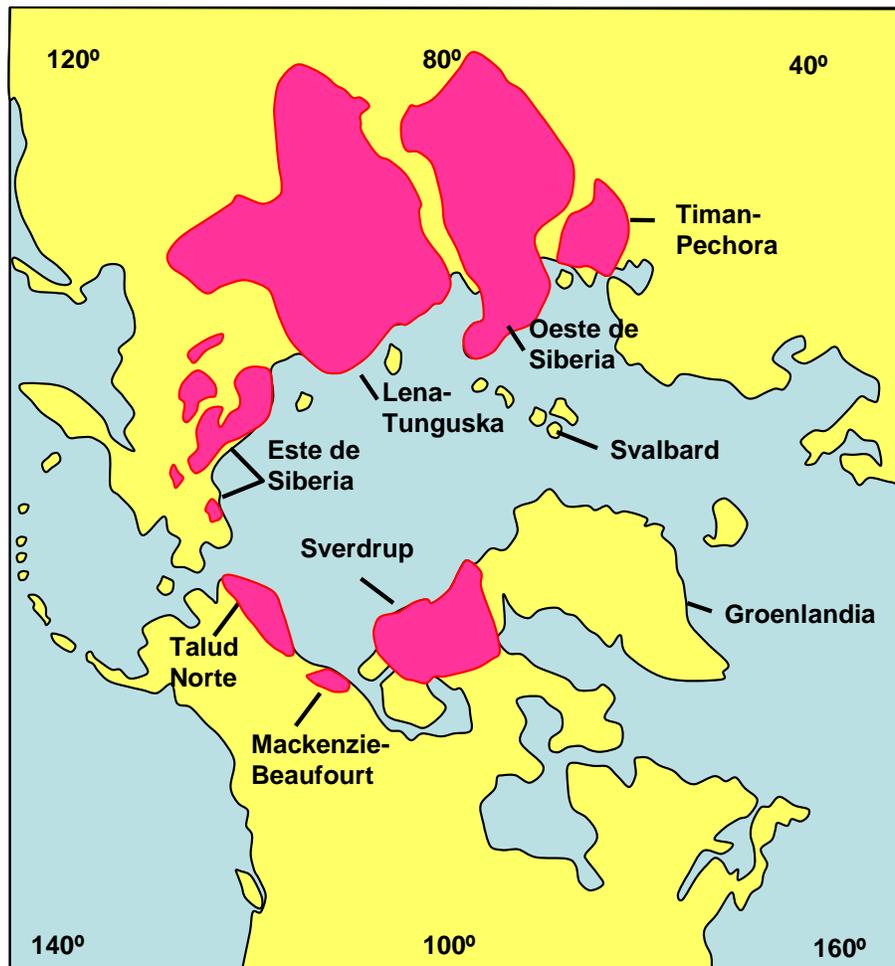


Figura 2.14. Cuencas sedimentarias en el Hemisferio Norte que pueden contener hidratos de gas susceptibles de ser explotadas con rendimiento económico.¹⁴

¹⁴. Modificada de: U.S. Department of Energy, **Arctic Regions**.
http://www.netl.doe.gov/seng/hydrate/about_hydrates/arctic-regions.htm.

En la **Tabla 2.4** se enlistan las zonas del permafrost en las que se tienen evidencias de la presencia de hidratos (Kvenvolden, 1988; en Sloan, 1990) correspondientes a la **figura 2.14**, además se considera que la zona del archipiélago de Svalbard (Noruega) y el basamento sedimentario bajo el casquete de hielo de Groenlandia (Dinamarca), también tiene potencial de contener hidratos de metano. Mediante la perforación de más de 1000 pozos en el Ártico por parte de organismos como la Ocean Drilling Program (ODP), se tiene evidencia directa e indirecta de la existencia de hidratos de gas en estas regiones; la mayor parte de la información ha venido de la actividad de perforación en Alaska, Canadá, y Siberia. La evidencia directa para la existencia de hidrato de gas se tiene de núcleos que se recuperaron en pozos en el área Prudhoe Bay, en la Cuesta Norte de Alaska en 1992, y en el Delta de Mackenzie en 1998. También se tienen evidencias indirectas de registros geofísicos de pozos, pruebas de perforación, de producción, estudios de fondo de pozos, datos cromatográficos de gas y muestras de agua.

Tabla 2.4. Localización de hidratos de gas en zonas del Ártico (Kvenvolden, 1988; en Sloan, 1990).

LOCALIZACIÓN	EVIDENCIA	REFERENCIA
Talud Norte, Alaska	Registros	Collett (1983)
	Muestras	Collett & Kvenvolden (1987)
Delta Mackenzie, Canadá	Registros	Bily & Dick (1974)
Islas del Artico, Canadá	Registros	Davidson et al. (1978)
		Judge (1982)
Provincia Timan-Pechora, ex-Unión Soviética	Gas	Cherskiy et al. (1985)
Campo Messokayha, ex-Unión Soviética	Muestras	Makogon et al. (1972)
Cratón Siberiano Este, ex-Unión Soviética	Gas	Cherskiy et al. (1985)
Noreste de Siberia, ex-Unión Soviética	Gas	Cherskiy et al. (1985)
Kamchatka, ex-Unión Soviética	Gas	Cherskiy et al. (1985)

II.4.2. HIDRATOS MARINOS (OCÉANOS PROFUNDOS).

A partir de las muestras recuperadas de hidratos de metano en sedimentos de zonas marinas, y con el control de la perforación de pozos, se sabe que éstas provienen de pocos metros del fondo oceánico en un rango de profundidad respecto al piso oceánico de 0 a 400 m. Las provincias fisiográficas en las cuales han sido encontradas, incluyen morfologías de segundo orden como son las márgenes continentales y las trincheras de mar profundo; hasta formas de tercer orden como son los cañones submarinos, taludes continentales, márgenes de sierras y cuencas entre el talud y la cuenca.

De un estudio realizado por Booth J.S et al. (1996) sobre hidratos de metano marinos, se describen algunas de sus características a partir de muestras recolectadas en diferentes proyectos; estas características son:

1. Los hidratos de metano marinos son frecuentemente situados cercanos a la posición determinada en el diagrama de fase regional.
2. Los hidratos son encontrados principalmente en áreas con predominio estructural de fallas u otros indicadores del dinámico ambiente geológico.
3. Las zonas de sedimentos con hidratos de gas tienden a ser de decenas de centímetros a decenas de metros de espesor, pero las zonas con menores espesores solo son un constituyente menor.

La mayor parte de los océanos del mundo por debajo de los 500 metros de profundidad (100 m de agua marina \approx 1 MPa) tienen bajas temperaturas y altas presiones, condiciones necesarias para formar los hidratos de metano. En las altas latitudes donde la temperatura del agua es menor, se requiere menor presión por lo que la profundidad de estabilidad del hidrato es más somera.¹⁵

Las condiciones adecuadas para que se formen hidratos de metano en sedimentos del borde de plataforma y en el talud continental corresponden con temperaturas que están en el rango de 0 °C a 16 °C, que corresponden con profundidades de 1200 a 1500 m (**Figura 2.15**).

La localización de los hidratos marinos profundos a nivel mundial se muestra en la **Figura 2.16**, donde se observa una asociación directa con las zonas de trinchera, en los límites de placas y en los sedimentos de los prismas acrecionales como es el caso de Nankai en Japón y la costa oeste de la Isla de Vancouver en Canadá.

¹⁵ . Booth J. S., Rowe M. R., Fischer K. M. 1996. **Offshore Gas Hydrate Sample Database with an Overview and Preliminary Analysis**. USGS Woods Hole Science Center Coastal and Marine Geology Program. Open-File Report 96-272.

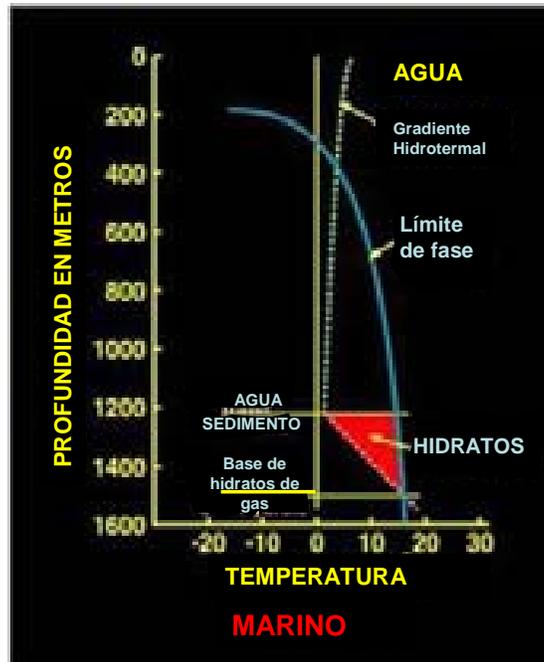


Figura 2.15. Estabilidad del hidrato de gas en zonas de los márgenes continentales marinos (Modificada de: Collet T.S., 2004).

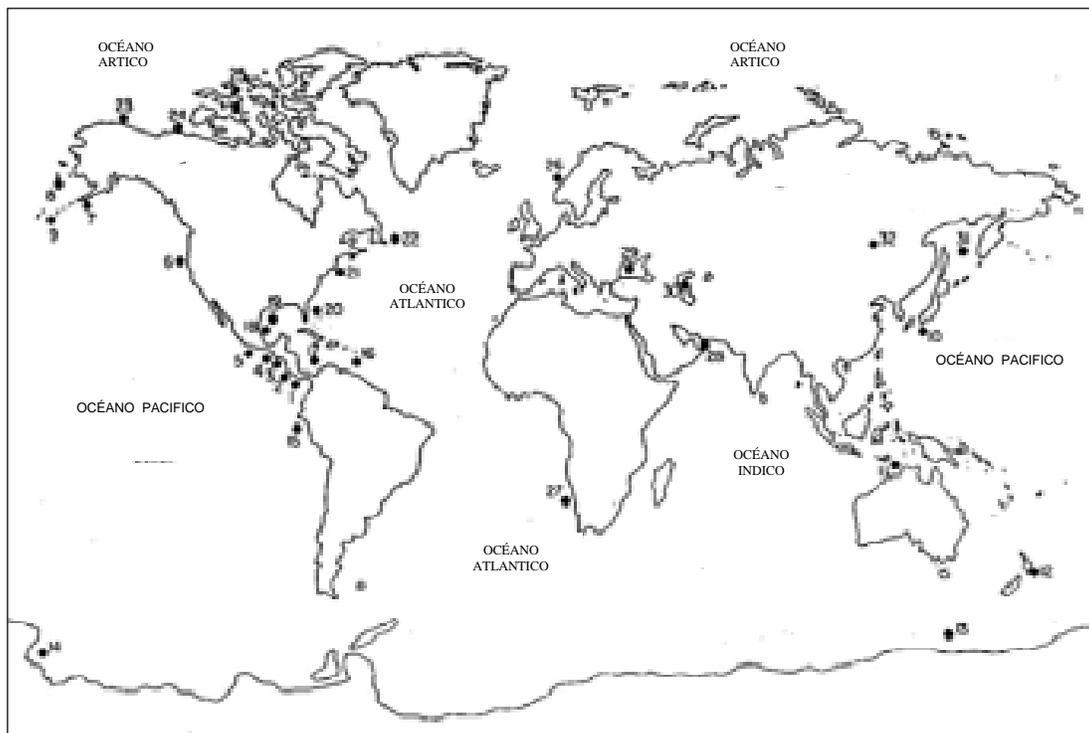


Figura 2.16. Presencias conocidas e inferidas de los hidratos de metano en el Océano, ver Tabla 2.5 (Kvenvolden., 1988; modificada de Sloan., 1990).¹⁶

¹⁶ . Sloan E. Dendy, 1990. **Clathrate Hydrates of Natural Gases**. Ed. Marcell Dekker, Inc. New York and Basel.

En la **Tabla 2.5** se indica la localización con hidratos de metano marinos a nivel mundial, mostrados en la **Figura 2.16** y otras en las que se infiere su presencia, mediante el análisis del “Bottom Simulating Reflection” (BSR) pertenecientes a secciones sísmicas del fondo marino.

Tabla 2.5. Localización de hidratos de gas en los océanos (Kvenvolden., 1988; modificada de Sloan., 1990)

NÚMERO EN LA FIGURA	LOCALIZACIÓN	EVIDENCIA	REFERENCIA
1	Océano Pacífico de Panamá	BSR,	Shiplely et al. (1979)
2	Trinchera de Costa Rica (Centroamérica)	BSR,	Shiplely et al. (1979)
3	Trinchera de Nicaragua (Centroamérica)	Muestras	Kvenvolden & McDonald (1985)
4	Trinchera de Guatemala (Centroamérica)	BSR	Shiplely et al. (1979)
		Muestras	Harrison & Curiale (1982)
		Muestras	Kvenvolden & McDonald (1985)
5	Trinchera de México (Norteamérica)	BSR	Shiplely et al. (1979)
6	Cuenca Eel River de California	BSR	Field & Kvenvolden (1985)
		Muestras	Kennicut et al. (1989)
7	E. Aleutian Trinchera de Alaska	BSR	Kvenvolden & vonHeune (1985)
8	Beringian Margen de Alaska	BSR	Marlow et al. (1981)
9	Trinchera de Alaska	BSR	McCarthy et al. (1984)
10	Comedero Nankai en Japón	BSR	Aoki et al. (1983)
11	Comedero Timor en Australia	Gas	McKirdy and Cook (1980)
12	Comedero Hikurangi en Nueva Zelada	BSR	Katz (1981)
13	Margen Wilkes Land en Antartida	BSR	Kvenvolden et al. (1987)
14	Oeste del Mar Ross en Antartida	Gas	McIver (1975)
15	Trinchera Perú-Chile en Perú	BSR	Shepard (1979)
		Muestras	Kvenvolden & Kastner (1988)
16	Complejo Ridge Barbados en Barbado	BSR	Ladd et al. (1982)
17	Basamento Colombia en Panamá y Colombia	BSR	Shiplely et al (1979)
18	Oeste del Golfo de México en México	BSR	Shiplely et al (1979)
			Hedberg (1980)
19	Golfo de México en USA	Muestras	Brooks et al. (1984)
20	Blake Outer Ridge , Sureste de USA	BSR	Markl et al. (1970),
			Shiplely et al. (1979)
			Dillon et al. (1980)
		Muestras	Kvenvolden & Barnard (1983)
21	Rise Continental en Este de USA	BSR	Tucholke et al. (1977)
22	Shelf Labrador en Newfoundland	BSR	Taylor et al. (1979)

23	Mar Beaufort en Alaska	BSR	Grantz et al. (1976)
24	Mar Beaufort en Canadá	Registro	Weaver & Stewart (1982)
25	Cuenca Svedrup en Canadá	Registro	Judge (1982)
26	Pendiente Continental Oeste de Noruega	BSR	Bugge et al. (1987)
27	Pendiente Continental Suroeste de África	Descensos	Summerhayes et al. (1979)
28	Margen Makran, Golfo de Omán	BSR	White (1979)
29	Mar Negro, ex Unión Soviética	Muestras	Yefremova y Zhizhchenko (1972)
30	Mar Caspio, ex-Unión Soviética	Muestras	Yefremova y Gritshina (1981)
31	Mar Okhotsk, ex-Unión Soviética	Muestras	Makogon (1988b)
32	Lago Baikal, ex-Unión Soviética	Muestras	Makogon (1988b)

Tabla 2.5. (Continuación).

II.5. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS DEPÓSITOS DE HIDRATOS.

II.5. 1. ESTRUCTURAS DE LOS DEPÓSITOS DE HIDRATOS DE METANO.

A partir de los núcleos recuperados en las perforaciones con fines de investigación, se sabe que la forma de las estructuras sedimentarias de los hidratos de metano son en diversas modalidades, las cuales se pueden relacionar al tipo de sedimento en el cual son encontrados; su ocurrencia suele ser de forma diseminada a masiva.

En sedimentos de granos gruesos, con buena porosidad, el hidrato de metano se encuentra de forma diseminada o llenando los espacios porosos, en cambio, tratándose de sedimentos de grano fino como las arcillas y limos, los depósitos aparecen como nódulos y vetas llegando a ser masivos o pueden formar capas (ver Figuras 2.17 y 2.18).¹⁷

¹⁷ . Thomas C.P. 2001. **Methane Hydrates: Major energy source for the future or wishful thinking?** Idaho National Engineering and environmental laboratory.

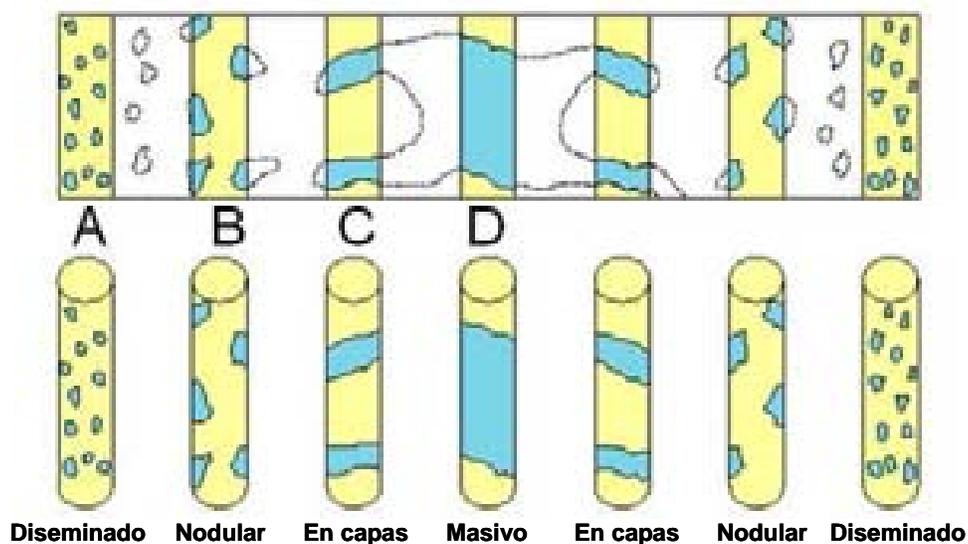


Figura 2.17. Representación de ocurrencias potenciales de hidratos de gas y su configuración (Collett., 2001; en Thomas, C.P., 2001)

Existen, como anteriormente se ha mencionado, cuatro tipos distintivos de estructuras de los depósitos de hidratos de gas: (A) diseminados, (B) nodulares, (C) en capas, y (D) masivas (**Figuras 2.17 y 2.18**). Los de tipo diseminado y nodulares son más comunes, mientras que los depósitos en capas y masivos se presentan en menor frecuencia. Se ha postulado que el proceso distribución espacial de los depósitos de hidratos de gas ocurre de la siguiente manera: son depositados en forma diseminada primero, pero como el gas es adherido al sistema, los cristales diseminados actúan como núcleo para el posterior crecimiento de más cristales (proceso de nucleación); al persistir la nucleación y por tanto el crecimiento de los depósitos, los hidratos diseminados formarán nódulos de mucho mayor tamaño los cuales serán dispersados a través de la matriz; la expansión de los depósitos generan fracturas dentro de los sedimentos que permiten el crecimiento lateral de los hidratos que con el tiempo y con el suficiente contenido de agua y gas, estos nódulos pueden interconectarse y formar capas de hidratos ubicadas entre las capas de los sedimentos relleno de fracturas o zonas de falla. Los depósitos de hidratos de gas masivos se forman entonces partiendo de una nucleación de cristales diseminados hasta formar capas y nódulos que seguirán creciendo siempre y cuando se tenga una saturación de agua y gas en los sedimentos.

Se han reconocido diferentes texturas en los núcleos con hidratos recuperados de los cruceros de investigación de las márgenes continentales; estas texturas se relacionan directamente con la existencia de hidratos de metano en la formación; son texturas llamadas *moussy and soupy* (**ver Figura 2.19**), en las cuales debido a la disociación del gas de los hidratos por el cambio de presión y temperatura en las que éstos son estables y a la dificultad de mantenerse a condiciones de yacimiento, se genera en la superficie del núcleo una textura como de vórgulos como los que se observan en la **Figura 2.19**. La naturaleza textural de los hidratos de metano en el yacimiento y su distribución, controlarán las características de la acumulación del gas hidrato y la potencialidad de la producción (Collet, T.S., 2001).

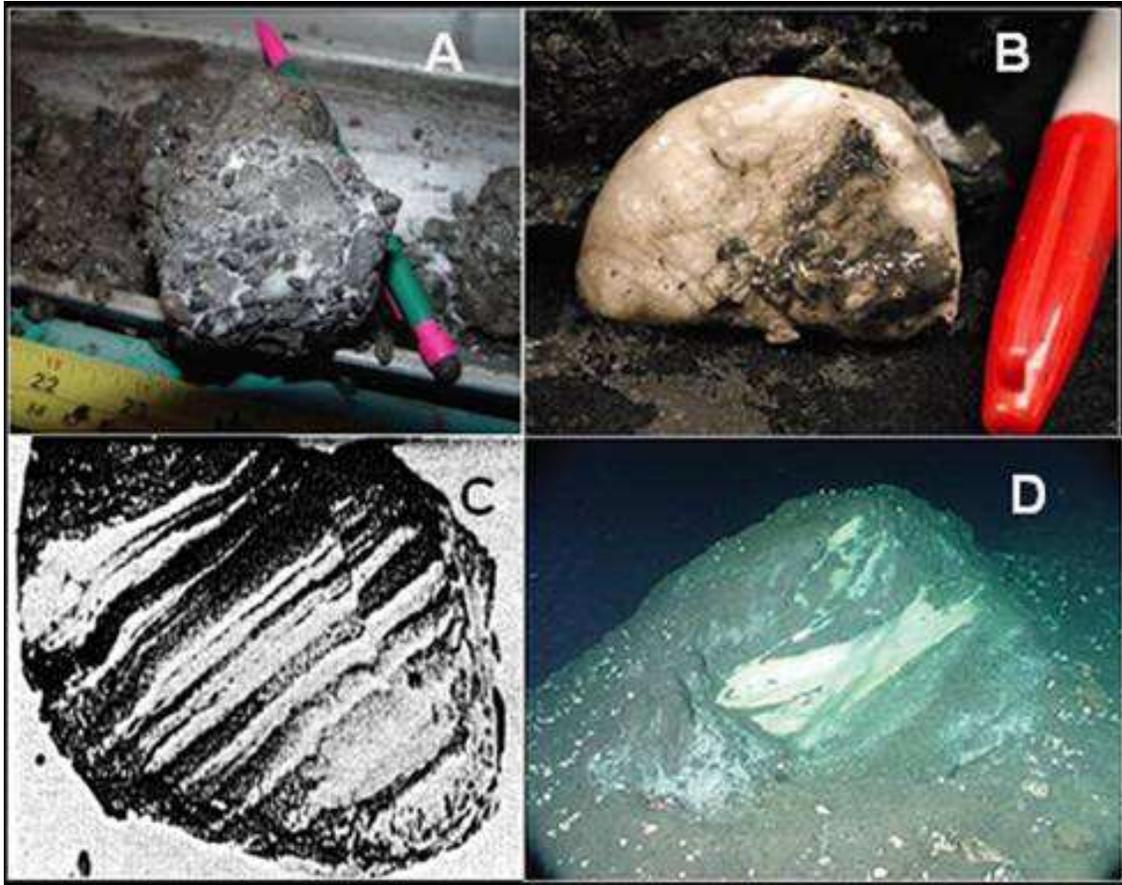


Figura. 2.18. Estructuras típicas de hidratos de metano. **A.** Ejemplo de hidrato de metano diseminado (blanco) dentro de areniscas porosas y permeables del Ártico en el sitio Mallik, al NW de Canadá. **B.** Ejemplo de hidrato de metano nodular en una zona de intensa deformación de sedimentos de grano fino (Expedition 01, India). **C.** Ejemplo de hidrato de metano en capas, **D.** Ejemplo de montículo masivo del piso oceánico de la costa de la Isla de Vancouver¹⁸

¹⁸ . Boswell R and Collett T. 2006 **The Gas Hydrates Resource Pyramid**. Fire in the ice, Fall 2006. NETL. pag. 5-7.

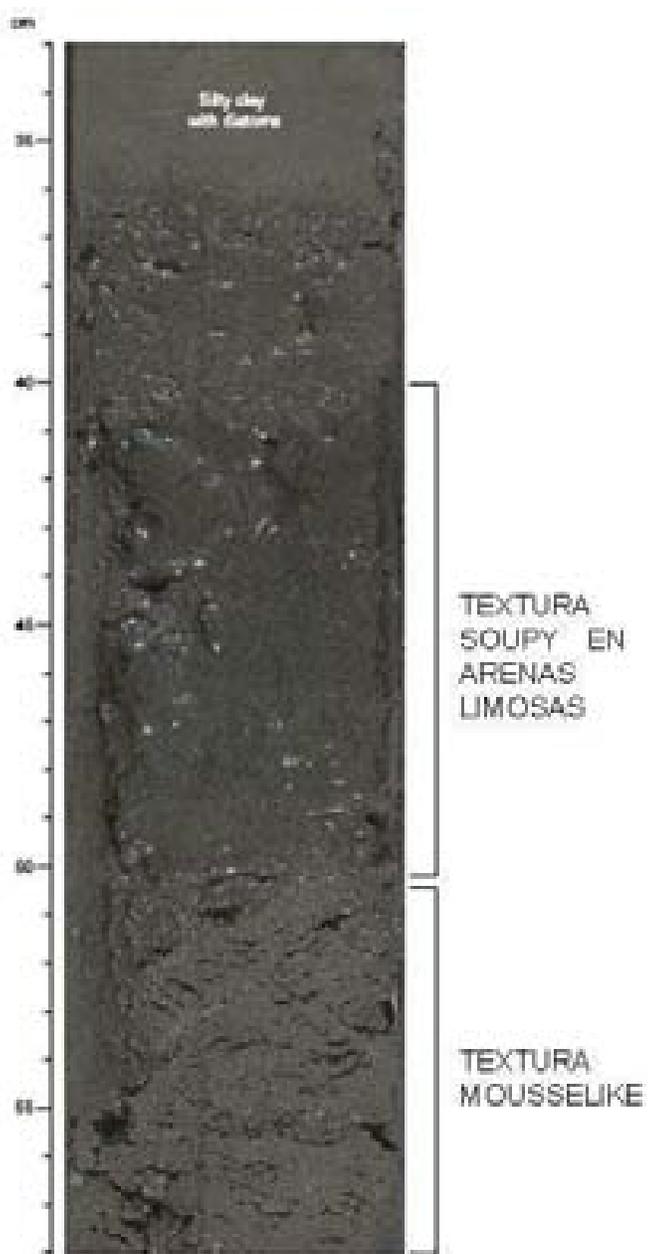


Figura. 2.19. Texturas en sedimentos que contienen hidratos de metano característicos (Moussy and soupy textures), en un núcleo recuperado en los márgenes de la costa de Vancouver. Site U1328.¹⁹

¹⁹ . Riedel, M., Collett, T.S., Malone, M.J., et al. 2006. **Expedition 311 summary**. Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program, Volume 311. doi:10.2204/iodp.proc.311.101.2006. http://publications.iodp.org/proceedings/311/101/101_.htm.

II.5. 2. PROPIEDADES FÍSICAS MEDIDAS EN LOS HIDRATOS.

Las propiedades físicas de los hidratos de gas que han servido para su estudio, entendimiento y su futura explotación, han sido obtenidas a partir de estudios de hidratos realizados en el laboratorio en las muestras recuperadas de las perforaciones en mar profundo, de los registros geofísicos de pozos, de secciones sísmicas; así como de estudios magnéticos. Aunque se han obtenido muestras directas de hidratos de metano en los núcleos recuperados de los pozos perforados en mar abierto, así como en secuencias sobre el piso oceánico, muchos de los conocimientos acerca de la cantidad y distribución de los hidratos de gas están basados en evidencias indirectas.

La principal identificación de los hidratos de metano se hace a partir de reflectores sísmicos, que se encuentran en sedimentos cementados por los hidratos; representan un depósito con muy alta velocidad de propagación (aproximadamente 3,3 km/seg, alrededor del doble de la del agua salada). Debajo de las zonas con hidratos las velocidades son menores debido a que los sedimentos infrayacentes contienen en sus poros sólo agua (con velocidad de alrededor de 1,5 km/seg) o les infrayace una capa de gas libre atrapado; el hidrato funciona como un excelente sello dada su baja permeabilidad. El contraste de velocidad creado entre ambas zonas produce una reflexión muy fuerte cuya traza es paralela a la del fondo marino, por lo que fue denominada “Reflexión simuladora del fondo” o en inglés “*Bottom Simulating Reflection*” o BSR.

Otra característica significativa de los sedimentos que albergan hidratos es el *blanking* o reducción de la amplitud (fuerza) de las reflexiones, aparentemente causada por la cementación por los hidratos que origina homogenización en las capas que forman reflectores. Este efecto se produce a lo largo de toda la zona que aloja a los hidratos y puede ser cuantificada para estimar la cantidad de hidratos presentes.

La variación en las propiedades físicas de los hidratos de metano (conductividad eléctrica, densidad, velocidad acústica, impedancia, etc.), se explica por las variaciones de acuerdo a su composición (metano, etano, propano, butano, etc.), además hay que sumar la complejidad que resulta al combinar esas propiedades físicas con las propiedades petrofísicas de las rocas que los contienen. Como un rasgo distintivo está documentado que los hidratos de gas aumentan drásticamente los valores de las resistividades eléctricas y las velocidades elásticas de los sedimentos que los contienen; el valor de la densidad del hidrato de metano en sí es de 0.91 g/cm³, los valores de porosidad de los sedimentos almacenados pueden ser de hasta 30%, y las saturaciones medidas pueden llegar a ser del 60%, aunque pueden ser muy variables en el mismo yacimiento.²⁰

²⁰ . Marshall A.P. 2002. **Un potencial recurso de la Plataforma Continental Argentina Los hidratos de metano.** Petrotecnia, p 72-76

Los cálculos que permiten identificar hidratos con perfiles eléctricos, requieren un tratamiento especial, ya que para calcular la resistividad del agua (R_w) hay que tener en cuenta que al cristalizar los hidratos hay un descenso de la salinidad en el agua congénita, lo que da lugar a incertidumbres en cuanto a los valores base de salinidad del agua. Como en toda evaluación, los factores de porosidad y saturación de agua son cruciales, por lo que cabe recordar que al ser los hidratos sólidos cristalinos, la cantidad de metano alojado en los mismos, y por lo tanto en los poros de la roca almacén, es mucho mayor que en un yacimiento convencional. El factor de expansión al liberarse el metano de la fase sólida a la gaseosa, hace que se deba considerar un factor de volumen de entre 160 y 184, es decir que de un volumen unitario de hidrato sólido se obtienen 160 a 184 volúmenes de metano en fase gaseosa (Collet, 1998; Max *et al.*, 1997). Este rango de valores se explica por la variación en la estructura cristalina ante la posible presencia de otros gases, que puede traducirse de manera semejante a los hidratos de metano.

En la **Tabla 2.6** se muestran las propiedades físicas más importantes del hielo y del hidrato gas, pero debe tomarse en cuenta que estas propiedades suelen cambiar en los sedimentos en diferentes escenarios geológicos.

Tabla 2.6. Propiedades físicas del hidrato de gas metano y el hielo. (Davidson, 1983; Prenskey, 1995; Sloan, 1998).²¹

Propiedad	HIELO	HIDRATO
Densidad (g/cm^3)	0.916	0.912
Constante dieléctrica a 273K (32°F)	94	58
Conductividad térmica a 263K (14°F)(W/m-K)	2.23	0.49
Compresibilidad adiabática a 273K (32°F)(10^{-11} Pa)	12	14
Módulo de Young isothermal a 268K (29°F)(10Pa)	9.5	8.4
Módulo de volumen a 272K (30°F)	8.8	5.6
Módulo de Cizalla a 272K (30°F)	3.9	2.4
Radio de poisson	0.33	0.33
Velocidad de V_p/V_s a 272K(30°F)	1.88	1.95
Velocidad acústica longitudinal a 273 K(32°F)		
Velocidad (Km/s)	3.8	3.3
Tiempo de tránsito ($\mu\text{s/ft}$)	80	92

²¹. Tomada de Burger J., Gupta D., Jacobs P., and Shillinglaw J. 2006. **Overview on hydrate coring, handling and analysis topical report – final.** DE-FC26-02NT41327.

En la **Tabla 2.7.** se muestran los valores publicados en U.S. Department of Energy, “Physical Properties of Gas Hydrates” (modificados de Anderson en 1992); también se muestra la relación de las principales propiedades acústicas en hidratos puros, sedimentos saturados de agua, sedimentos de hidratos de gas y sedimentos de gas a presión. Comparando los datos, se observa un aumento en la velocidad (V_p y V_s) en los sedimentos que contienen hidratos de gas y una densidad semejante con respecto a sedimentos con saturación de agua (**Figura 2.20**).

Tabla 2.7. Propiedades Acústicas de los hidratos de metano.²²

PARAMETRO	AGUA-SATURADA	HIDRATOS-PRESIÓN	HIDRATOS PUROS	GAS-PRESIÓN
Onda compresional V_p (km/s) tiempo de tránsito ($\mu\text{s}/\text{ft}$)	1.6-2.5 190-122	2.05-4.5 149-68	3.25-3.6 94-85	0.16-1.45 1910-210
Onda transversal V_s (km/s) tiempo de tránsito ($\mu\text{s}/\text{ft}$)	0.38-0.39 800-780	0.14-1.56 2180-195	1.65 185	—
Densidad (gr/cm^3)	1.26-2.42	1.26-2.42	—	—

En la **Figura 2.20** (izquierda) se muestra el efecto del gas libre sobre los parámetros elásticos V_p , V_s y la densidad por debajo del BSR; en esta figura se observa que debajo del BSR se tiene un pequeño porcentaje de saturación de gas (< 10% del 60% de la porosidad de referencia) que reduce significativamente la velocidad de las ondas compresionales. Esta caída es debida al fuerte incremento en la compresibilidad en el medio causada por la introducción del gas. La velocidad en las arcillas se incrementa fuertemente y más si el radio V_p/V_s presenta un cambio abrupto. En la parte derecha se observan las mismas propiedades para los hidratos sólidos, en la que se puede observar fácilmente el cambio en estas propiedades respecto a la capa de gas libre, es decir debajo del BSR.

En la **Tabla 2.8** se muestran los valores de las principales propiedades físicas obtenidas de los registros geofísicos de pozos; la velocidad acústica medida por el registro sísmico aumenta, la resistividad aumenta, la densidad disminuye relativamente, y la porosidad medida a partir del registro de neutrón disminuye por el porcentaje menor de arcillas.

²² . U.S. Department of Energy. **Physical Properties of Gas Hydrate.** http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about_hydrates/physical-properties.htm, en Baltazar M. E., **Apuntes del tema “hidratos de metano”, tema propuesto para la asignatura geología del petróleo, de la carrera de ingeniería geológica.** Tesis profesional. UNAM F.I. 2002.

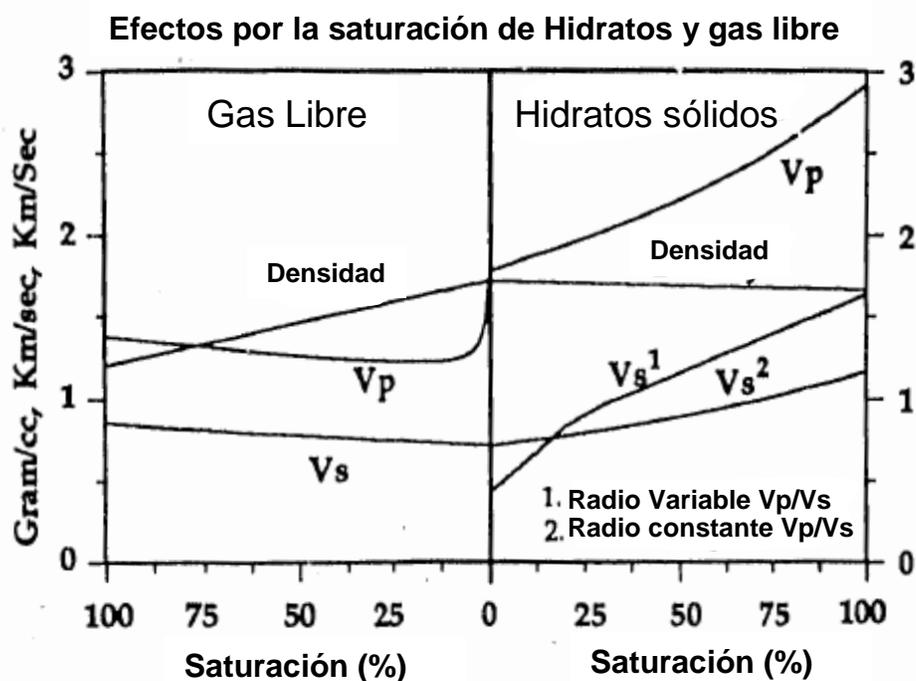


Figura 2.20. Parámetros elásticos V_p , V_s y de densidad en sedimentos con hidratos y con gas libre. En la parte izquierda se muestra el efecto de la saturación de gas debajo del BSR en la que se observa un rápido decremento de la velocidad (V_p , V_s en proporción al radio V_p/V_s).²³

Tabla 2.8. Propiedades Físicas obtenidas de registros geofísicos de pozos.²⁴

PROPIEDAD	HIDRATOS DE METANO	AGUA-SATURADA (PROMEDIO)
Velocidad Acústica		
- V_p (km/s)	3.6	1.5-2.0
- tiempo de transito (μ s/ft)	84.7	203-152
Resistividad (ohm-m)		
-Aparente	150	1-3
-Corregida	175	
Densidad (aparente) (gr/cm^3)	1.04-1.06	1.75
Porosidad Neutrón (porcentaje, unidades de lutitas)	50-60	70

²³ . Foley, J.E., Bums, D.R. 1992. **The Sensitivity of Seismic Responses to Gas Hydrates**. DOE/MC/28079-92/C0029.

²⁴ . U.S. Department of Energy, **Physical Properties of Gas Hydrates**,

http://www.neftl.doe.gov/scng/hydrate/about_hydrates/physical-properties.htm, en Baltazar M. E., Apuntes del tema "hidratos de metano", tema propuesto para la asignatura geología del petróleo, de la carrera de ingeniería geológica. Tesis profesional. UNAM F.I. 2002.

CAPÍTULO III. EXPLORACIÓN.

Los hidratos de gas son un recurso energético que ocurre en las regiones polares y en la zona costa afuera en aguas profundas, la profundidad depende de la temperatura sobre el piso oceánico y de la composición del gas. De acuerdo a las investigaciones realizadas a nivel mundial sobre los hidratos de metano, es posible englobar su estudio en tres ciencias importantes de análisis y exploración, que son: Geología, Geofísica y Geoquímica. Gracias a programas de exploración implementados por las naciones con un poder económico importante, es que se ha llegado a entender mejor el comportamiento de los hidratos, por lo que en los últimos años se ha desarrollado tecnología moderna para determinar con mayor eficacia la presencia de éstos en el fondo marino. Los siguientes apartados definen aspectos importantes dentro de estas tres ciencias que en conjunto pueden aportar un mayor conocimiento de los hidratos de metano y su relación con los procesos geológicos que los formaron.

III.1. GEOLOGÍA.

Los primeros estudios para conocer la geología en las localidades con hidratos de metano fueron de manera indirecta, con métodos geofísicos, con el propósito de obtener datos que permitieron a los investigadores entender las características de los depósitos y desarrollar criterios para definir las reservas y su geometría. Sobre estos aspectos, se fue avanzando sobre el conocimiento de las características de formación, concentración y localización de hidratos, es decir se fue conociendo el escenario geológico en el que se presentan.

Los estudios sobre hidratos han documentado únicamente dos ambientes donde se encuentran en grandes cantidades, estos son:

1) Bajo la capa del piso oceánico congelado permanentemente ("permafrost"), en el Ártico, bajo condiciones de presión a profundidades de algunos cientos de metros y de temperaturas relativamente bajas. Los hidratos de gas ubicados en el continente fueron reconocidos por primera vez en los años 1960's en las regiones polares de Rusia (Makogon, 1981; en Kvenvolden, 1993), en el campo Messoyakha, al Oeste de Siberia.

2) En sedimentos marinos de los márgenes continentales bajo condiciones de mayor presión (profundidades de 1-4 km) y mayor temperatura. Los hidratos de gas marinos están relacionados en algunos casos con las zonas de subducción y en otros a los prismas acrecionales de las márgenes continentales (Ver Figura 3.1), condiciones tectónicas que a lo largo de la historia geológica han sido factores importantes en la ocurrencia de hidratos de gas y que en el pasado han existido bajo condiciones semejantes a las presentes y que solo varían en su distribución global debido al movimiento de las placas tectónicas en el planeta. También se encuentran abundantemente en el talud continental de las márgenes continentales pasivas.

Las aguas profundas donde se encuentran los hidratos pueden ser clasificadas como:

- Mares de aguas profundas interiores.
- Márgenes continentales pasivos estables.
- Márgenes continentales pasivos inestables.
- Límites tectónicos activos.

Las márgenes pasivas son zonas tectónicamente estables que se ubican a lo largo de los márgenes continentales, por tal motivo se presenta un mejor ordenamiento de sedimento. En el lecho de los ríos y a lo largo de la zona costera se depositan los sedimentos conformados por arenas, las cuales pueden alcanzar la plataforma, el talud continental o las aguas profundas donde hay abanicos submarinos o turbiditas; mientras que los lodos de

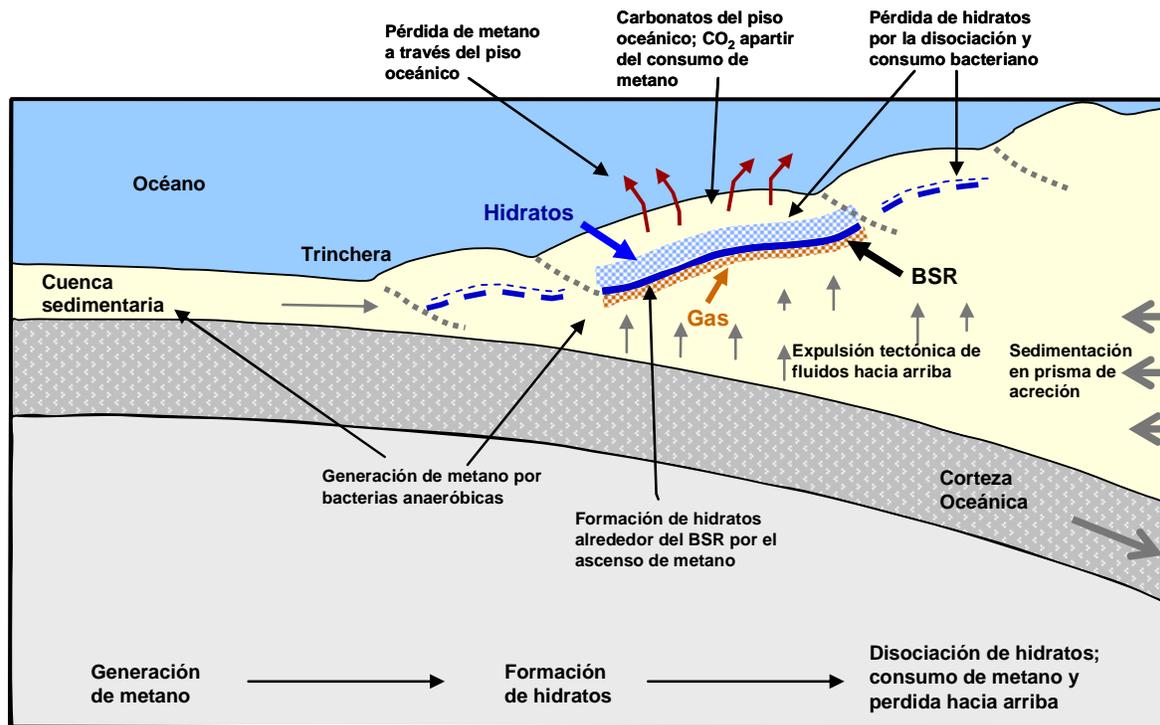


Figura 3.1. Escenario geológico en las márgenes continentales. Ilustración esquemática de la concentración de hidratos de gas en prismas acrecionales distribidos en Zona de Estabilidad del Hidrato de Gas (ZEHG) (Modificada de Hyndman and Davis, 1992).¹

¹ . M. Riedel, E.C. Willoughby, M.A. Chen, T. He, I. Novosel, K. Schwalenberg, R.D. Hyndman, G.D. Spence, N.R. Chapman, y R.N. Edwards, 2006. **Gas hydrate on the northern Cascadia margin: regional geophysics and structural framework.** Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program, Volumen 311

grano fino (limos y arcillas) son transportados suspendidos en el agua hasta alcanzar el océano profundo. Como resultado, el sedimento en el agua profunda en las márgenes pasivas es generalmente lodo homogéneo predominando las arcillas. Aunque este lodo posee una porosidad alta, su naturaleza de grano fino origina una muy baja permeabilidad lo cual no permite hidratar la formación y es la causa principal de las concentraciones bajas de hidrato en estos sedimentos distales (típicamente 2% a 6%) (Baltazar, 2002).

Las perspectivas de acumulación de hidratos de metano en márgenes pasivas pueden aumentar si el margen es inestable debido a la presencia de estructuras como los diapiros de sal o de arcilla, como es el caso del Golfo de México, en donde estas estructuras provocaron fracturas y conductos que facilitan la migración ascendente de metano termogénico, hacia la zona de estabilidad del hidrato.

Es importante resaltar que las secuencias sedimentarias en que se presentan los Hidratos pueden ser turbidíticas, en los cuales se tuvo un gran aporte de sedimentos; en el caso del Golfo de México las secuencias de grano fino se asocian con las rocas generadoras de hidrocarburos Miocénicas.

También hay evidencias de la expulsión de fluidos (incluyendo metano) desde zonas de subducción, estas son: (1) grado de pérdida de porosidad y consecuente expulsión de fluidos desde las secuencias sedimentarias que han sido acrecionadas al prisma en una zona de subducción, (2) plumas de gas evidenciadas mediante ecosondas de alta resolución, (3) existencia de anomalías de metano en la columna de agua, (4) existencia de anomalías de temperatura en la columna de agua, (5) presencia de colonias bentónicas y (6) presencia de precipitados químicos inorgánicos. A continuación se revisan estos criterios (según Morales, sin fecha):

1) Grado de Porosidad de Rocas Sedimentarias del Prisma de Acreción.

Como producto de la acreción de sedimentos y rocas sedimentarias a un prisma de un margen convergente, la deformación y compactación involucradas hacen disminuir el grado de porosidad de los sedimentos y de las rocas. Este proceso, a su vez, induce a la expulsión de los fluidos que en esos poros estaban contenidos. Estos fluidos suelen migrar hacia arriba en dirección a la superficie del fondo del mar, siguiendo las superficies de fallas y fracturas; arrastran consigo el metano que se ha formado allí también. Por ende, zonas en que las secciones sísmicas muestren gran pérdida de porosidad (lo cual se refleja por aumentos de la velocidad de las ondas sísmicas) pueden estar asociadas a potenciales fuentes activas de metano.

2) Plumas de Gas Evidenciadas Mediante Ecosondas de alta Resolución

El ascenso de burbujas de gas desde el fondo marino también ha podido ser evidenciado en ecogramas obtenidos con ecosondas de alta resolución, como los usados para la detección de cardúmenes de peces. En estos ecogramas la pluma de gas que emerge desde el fondo marino se asemeja a una gigantesca llama (Figura 3.2).

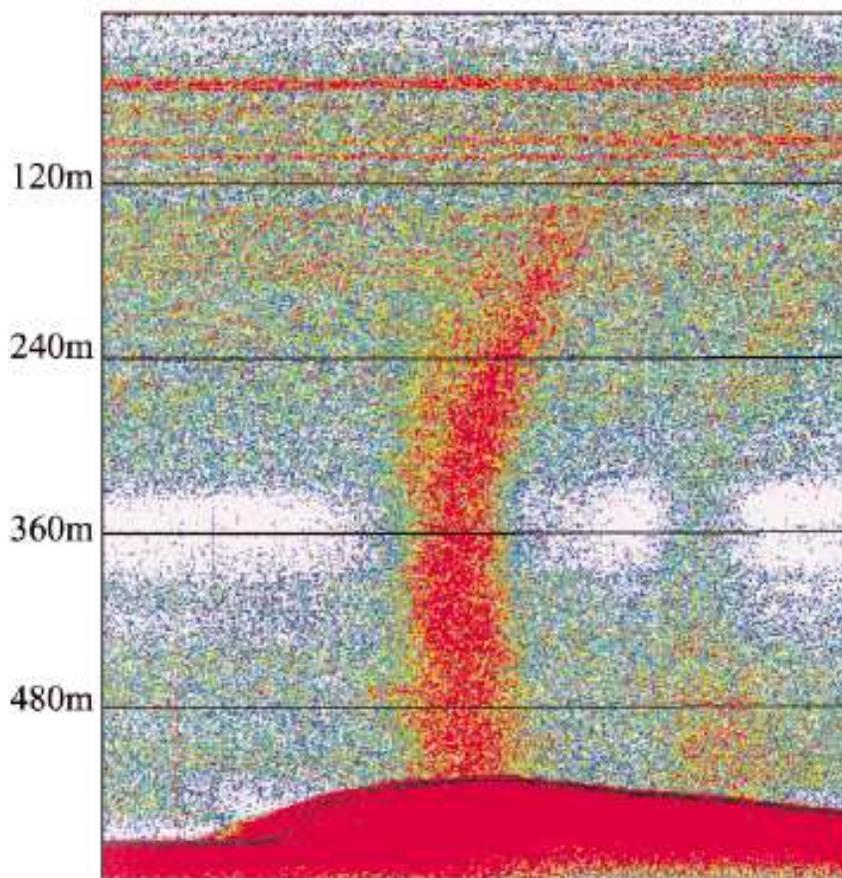


Figura.3.2 Pluma de gas registrada acústicamente en el sitio GC 185 (Golfo de México). La pluma se eleva cercana a la superficie del mar desde aproximadamente 540 m de agua profunda.²

Anomalías acústicas asociadas con descargas de gas submarinas y localidades de hidratos de gas fueron identificados en el Mar Okhotsk (Ginsburg, et al., 1993; Soloviev y Ginsburg., 1997; en Mazurenko, L.L., 2003), costa afuera de Oregon (Trehú et al., 1999; Suess et al., 2001; en Mazurenko, L.L., 2003) y en el Golfo de México (MacDonald et al., 1990; en Mazurenko, L.L., 2003).

3) Anomalía de Metano en Columna de Agua.

² Sassen, R., Joye S., Sweet, S.T., DeFreitas, D.A., Milkov, A.V., MacDonald, I.R., 1999. **Thermogenic gas hydrates and hydrocarbon gases in complex chemosynthetic communities, Gulf of Mexico continental slope.** *Organic Geochemistry* 30 (7): 485- 497.

http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V7P-3WXP299-2&_user=945819&_coverDate=07%2F31%2F1999&_alid=766575041&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_cdi=5848&_sort=d&_docanchor=&_view=c&_ct=1&_acct=C000048981&_version=1&_urlVersion=0&_userid=945819&_md5=ac554c70c24105b73d118975a39f1ef3

La distribución de metano en la columna de agua muestra un máximo cerca de la superficie del mar con concentraciones decrecientes sobre el rango aproximado de profundidad de la zona de mínimo oxígeno. Este patrón refleja producción de metano durante la alimentación del zooplancton y ciclos biogeoquímicos durante la descomposición de material particulado (Angelis y Lee, 1994; Tilbrook y Karl, 1995, según Morales).

Generalmente, las plumas de metano están confinadas a la parte profunda de la columna de agua. Las anomalías de entre 50 y 150 nl/l no son tan altas como las de las dorsales centrooceánicas (Horibe et al., 1986; Lilley et al., 1993, en Morales, sin fecha), pero sí son significativamente más altas que el trasfondo oceánico. Un rasgo característico es que las muestras más profundas por encima del fondo oceánico usualmente contienen menos metano que las muestras superiores. Esto probablemente indica que la fuente no está directamente debajo de la columna de agua, sino más bien hacia un lado, o como ha sido más recientemente postulado, puede significar la existencia de pulsos de corta duración de inyecciones verticales de metano sucedidas de mezcla (Radlinski y Leyk, 1995; en Morales, sin fecha).

4) Anomalía de Temperatura en la Columna de Agua

Si bien, no existen evidencias absolutamente inequívocas de anomalías positivas de temperatura en el agua de fondo que rodea a fuentes activas de metano, sí se ha asociado generalmente a altos flujos de calor con colonias de organismos de las fuentes (Henry et al., 1992; en Morales., sin fecha), y altas temperaturas de los sedimentos, por ejemplo, de 20°C en exceso que han sido registradas en un volcán de lodo frente a Barbados (Henry et al., 1996, en Morales., sin fecha). Suess et al. (1998), además, mostraron evidencia de una ligera anomalía de temperatura en la columna de agua, y máximos de temperatura en las crestas de dos dorsales del prisma de acreción en la zona de subducción de las Aleutianas.

5) Colonias Bentónicas

El indicador más característico de fuentes activas es la ocurrencia de organismos filtradores, estos consisten en tapices de bacterias, pogonóforos, vestimentíferos y grandes colonias de bivalvos. En promedio las colonias de almejas no superan un área de un metro cuadrado, pero pueden contener entre 150 y 200 individuos por metro cuadrado. La ruta nutricional de estas comunidades es claramente quimiotrófica, y en algunos organismos específicamente metanotrófica (**Figura 3.3**).

6) Precipitados Químicos Inorgánicos

Los hidratos de gas juegan un papel importante para los organismos bentónicos del océano profundo sólo cuando los hidratos alcanzan a aproximarse hasta muy cerca de la superficie del fondo del mar. Estas son zonas de extensión muy reducida, desde unos 10 hasta máximo 100 m. La continua salida de metano desde los hidratos de gas hacia el agua de fondo representa un medio ideal para la vida: el metano (CH_4) se oxida, en tanto que el sulfato (SO_4) del agua de mar se reduce, dando como productos dióxido de carbono (CO_2) y ácido sulfhídrico (H_2S). Este proceso microbiano es de gran importancia, ya que así se produce ácido sulfhídrico (H_2S), éste influye dramáticamente en la distribución de



Figura 3.3. Colonias bentónicas: A. Gusanos tubulares (*Lamellibrachia luymesii* y *Seepiophila jonesii*), corales (predominantemente *Callogorgia americana delta*), y fauna asociada en carbonatos autígenicos en Green Canyon, Golfo de México bloque 234 a 540 m de profundidad. B. Acercamiento a almejas *Bathymodiolus childressii* en Green Canyon, GOM bloque 233 a 630 m de profundidad en el talud superior de Louisiana. Los crustáceos *Alvinocaris stactophila* y *Munidopsis* spp. son organismos filtradores comunes.³

³ Fisher, C., Roberts, H., Cordes, E., Bernard, B., 2007. **Cold seeps and associated communities of the Gulf of Mexico.** *Oceanography* 20 (4): 118-129.

http://www.tos.org/oceanography/issues/issue_archive/issue_pdfs/20_4/20.4_fisher_et_al.pdf

organismos del fondo marino. Para algunos el H_2S es venenoso, y entonces estos organismos no pueden vivir en estas condiciones. Para otros organismos, aquéllos que viven en simbiosis con bacterias, el H_2S representa una fuente de energía y por ende una fuente para vivir (quimioautótrofos). Un ecosistema típico asociado a hidratos de gas es tal que, al ascender ya sea fluidos ricos en metano o metano como gas, precipitan hidratos de gas sobre los sedimentos del fondo marino, formando pequeños montículos (**Figura 3.4**). Eventualmente puede formarse un pequeño cráter.



Figura 3.4. Montículo de hidratos de metano en el que interactúan flora y fauna.⁴

A través del proceso microbiano se genera CO_2 , el cual induce la precipitación de carbonato. El H_2S , con concentraciones del orden de hasta mili molar (mM), es tan abundante en estos ecosistemas que en estos casos únicamente se encuentran "tapices" de bacterias sobre los hidratos de gas. Entre éstas se cuentan bacterias del género *Beggiatoa*, que son muy similares a las del género *Thioploca* que, a su vez, son comunes en zonas de surgencia costera. Junto a éstas se encuentran moluscos de los géneros *Calyptogena* y *Acharax*. Además de estos organismos quimioautótrofos existen muchos más grupos endémicos de las fuentes activas de metano.

La influencia de los hidratos de gas queda así circunscrita al ecosistema inmediato a los hidratos. No existe un efecto conocido de los hidratos sobre la biota a una escala de

⁴ Deborah R. Hutchinson Pat Hart Myung Lee Brandon Dugan **Seismic Evidence for Subsurface Gas Hydrate in the Northern Gulf of Mexico**. Chevron-Texaco WesternGeco. http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/publications/Hydrates/conference_pdfs/JIP_USGS_GeoEvidence.pdf

kilómetros, siempre se encuentran en áreas restringidas. Tampoco se sabe de un efecto que pudiera tener el metano proveniente de los hidratos sobre la columna de agua y los organismos que allí viven. El metano que escapa naturalmente del fondo se propaga tan rápidamente que aún no se sabe bien qué destino tiene el mismo, solo que forma parte del ciclo del carbono.

En el capítulo II se definieron varios de los parámetros requeridos para la formación de los hidratos de gas en las zonas prospectivas, así como sus estructuras de depósito, por lo que en este apartado nos enfocaremos a describir los aspectos más importantes en la exploración de hidratos de metano, como un hidrocarburo no convencional.

III.1.1. SECUENCIAS ALMACENADORAS DE HIDRATOS DE METANO

Algunos factores determinantes para la existencia de altas concentraciones de los hidratos de metano en las secuencias sedimentarias, tanto de las áreas del permafrost y de las márgenes continentales y de talud, son:

- a) La porosidad y permeabilidad.
- b) El grado de litificación del sedimento.

Considerando esto, si una roca o sedimento tiene buena porosidad y buena permeabilidad se considera como una roca con potencial almacenador de hidratos de metano.

La acumulación de hidratos de metano se define como la localización de la ocurrencia de hidrato de gas en los sedimentos relacionados a la geología estructural y/o a una trampa estratigráfica. Muchas de las acumulaciones de hidratos dentro de una cuenca son consideradas como provincias de hidrocarburos no convencionales. La migración del fluido (gas y agua) bajo la zona de estabilidad del hidrato de gas (ZEHG) juega un rol crítico en la formación y acumulación del hidrato de gas, es decir, es necesario que el transporte del gas sea rápido para que este pueda concentrarse en los sedimentos permeables en donde cristaliza.

Se han reconocido tres tipos principales de acumulaciones (trampas) de hidratos de gas: Estructurales, estratigráficas y combinadas; el tipo de yacimiento depende de la migración del fluido y la concentración del gas dentro de ZEHG (**Figura 3.5 y Figura 3.6**).

Las acumulaciones estructurales ocurren en sistemas de fallas y alrededor de volcanes de lodo y otras estructuras geológicas que facilitan el rápido transporte del fluido de lo profundo hacia la ZEHG. En la acumulación estratigráfica, el hidrato de gas cristaliza en estratos relativamente permeables, su procedencia es in situ, por la acción bacteriana

principalmente, aunque puede también ser suministrado de grandes profundidades como gas catagénico o metagénico.⁵

III.1.2. TRAMPAS.

Se denomina trampa petrolera a aquellas zonas de la corteza terrestre que debido a su configuración geométrica presentan condiciones favorables para acumular y retener en su interior hidrocarburos (HC's), cualquiera que sea su forma o su causa; las trampas de HC's están controladas por numerosos factores geológicos que las hacen variables y es así que puede decirse que no se podrán encontrar dos trampas exactamente iguales, en general, toda anomalía geológica de origen tectónico, estratigráfico o litológico puede constituir una trampa.

Las trampas que contienen hidratos de metano son muy variadas, su forma y geometría están controladas principalmente por la estructura geológica, el tipo de sedimento, la pendiente y forma del piso oceánico (**Figura 3.5**).

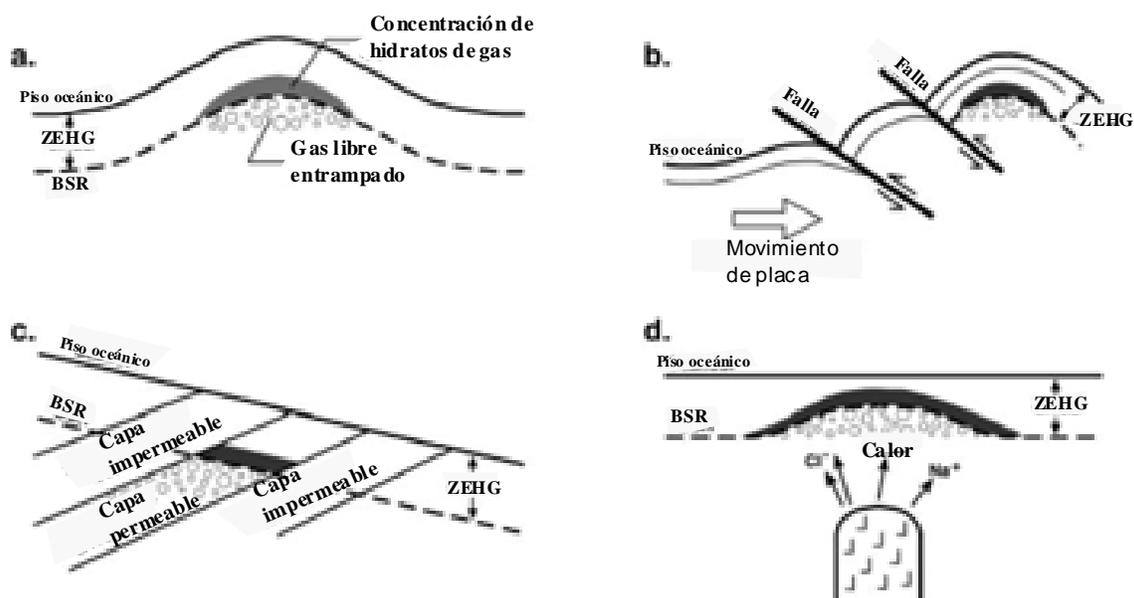


Figura 3.5. Ejemplos diagramáticos de los tipos de trampas de gas libre que se encuentra debajo de la ZEHG (Dillon y Max, 2001)⁶

⁵. Milkov A.V., Sassen R. 2002. **Economic geology of offshore gas hydrate accumulations and provinces**. Marine and Petroleum Geology 19 (2002)1-11. Elsevier. www.elsevier.com/locate/marpetgeo.

⁶ Thomas C.P. 2001. **Methane Hydrates: Major energy source for the future or wishful thinking?** Idaho National Engineering and environmental laboratory

La **Figura 3.5** muestra un conjunto de esquemas de los tipos de trampas de gas metano, asociados a los depósitos de hidratos de gas, quienes actúan a su vez como roca sello. En ella se puede observar a) un montículo sobre el piso oceánico donde la base de ZEHG, es marcada por el BSR, que tiende a ser paralelo al piso oceánico, b) un montículo similar a (a) pero formado por pliegues dislocados por fallas inversas, c) una secuencia inclinada de sedimentos estratificados que estén cubiertos discordantemente por una capa de hidratos de metano, d) una secuencia deformada por la acción de una intrusión salina, donde los sedimentos superiores estén cementados por los hidratos de metano.

La producción de gas de las trampas selladas por hidratos puede ser una manera fácil de extraer el gas del hidrato porque la reducción de presión causada por la producción puede comenzar una movilización de hidratos y recargar la trampa con el gas.

III.1.2.a. ACUMULACIONES ESTRUCTURALES (TRAMPAS ESTRUCTURALES)

Las acumulaciones estructurales ocurren en escenarios donde el régimen advectivo del flujo de fluidos es elevado, generalmente ocurren a diferentes profundidades de agua y en marcos geológicos diferentes. Es común que se formen montículos y ventilas en el piso oceánico con alto contenido de hidratos de metano, como por ejemplo en el Golfo de México. En sedimentos someros, el hidrato de gas principalmente ocurre como lentes, nódulos, montículos, vetas-filonos masivos, en fracturas y como relleno del espacio poroso como la matriz. Las concentraciones de hidratos de gas en los sedimentos son relativamente altas, debido al rápido transporte de gas de lo profundo a través de conductos de alta permeabilidad como fracturas y fallas. Las estructuras sI y sII del hidrato de gas cristalizan a partir del gas de origen termogénico, bacteriano y mixto. Las acumulaciones de hidratos de gas asociadas con este tipo de acumulaciones son localizadas alrededor de fallas activas, en márgenes convergentes y cráteres de volcanes de lodo. La presencia de gases de HC's pesados incrementan significativamente los espesores de la ZEHG (Milkov y Sassen, 2002). Las altas temperaturas se asocian principalmente con el fluido advectivo y puede totalmente eliminar la Zona de Estabilidad del Hidrato de Gas (ZEHG) en las áreas de mayor flujo de fluido (Ginsburg et al., 1999; en Milkov y Sassen, 2002). Los reflectores simuladores de fondo (BSR's por sus siglas en inglés) no son comunes o son discontinuos y desplazados en estas acumulaciones estructurales (Kastner, 2001; en Milkov y Sassen, 2002), esto como resultado de la acumulación vertical de los hidratos de gas, es decir no se tiene la capa de gas libre debajo de la capa sello de hidrato de gas, lo cual hace que varíe la base de ZEGH al no ser paralela al piso oceánico (**Figura 3.6**). Aunque estas acumulaciones ocurren en grandes partes de mundo, la mayoría de ellas tienden a ser localizados sobre las márgenes convergentes (**ver Figura 2. 16 cap. 2 y Figura 4.1 cap.4**), en donde la actividad tectónica facilita la migración ascendente y lateral del gas (fluido). Kastner (2001) (Milkov y Sassen, 2002) estima que el 60-65% de la fuente global del hidrato de gas es situada en estos márgenes convergentes. La deformación de los sedimentos de las márgenes activas puede provocar un aumento de las vías para la migración de fluidos, entre ellos el metano; con este proceso aumenta el reciclado de metano de la disociación del hidrato.

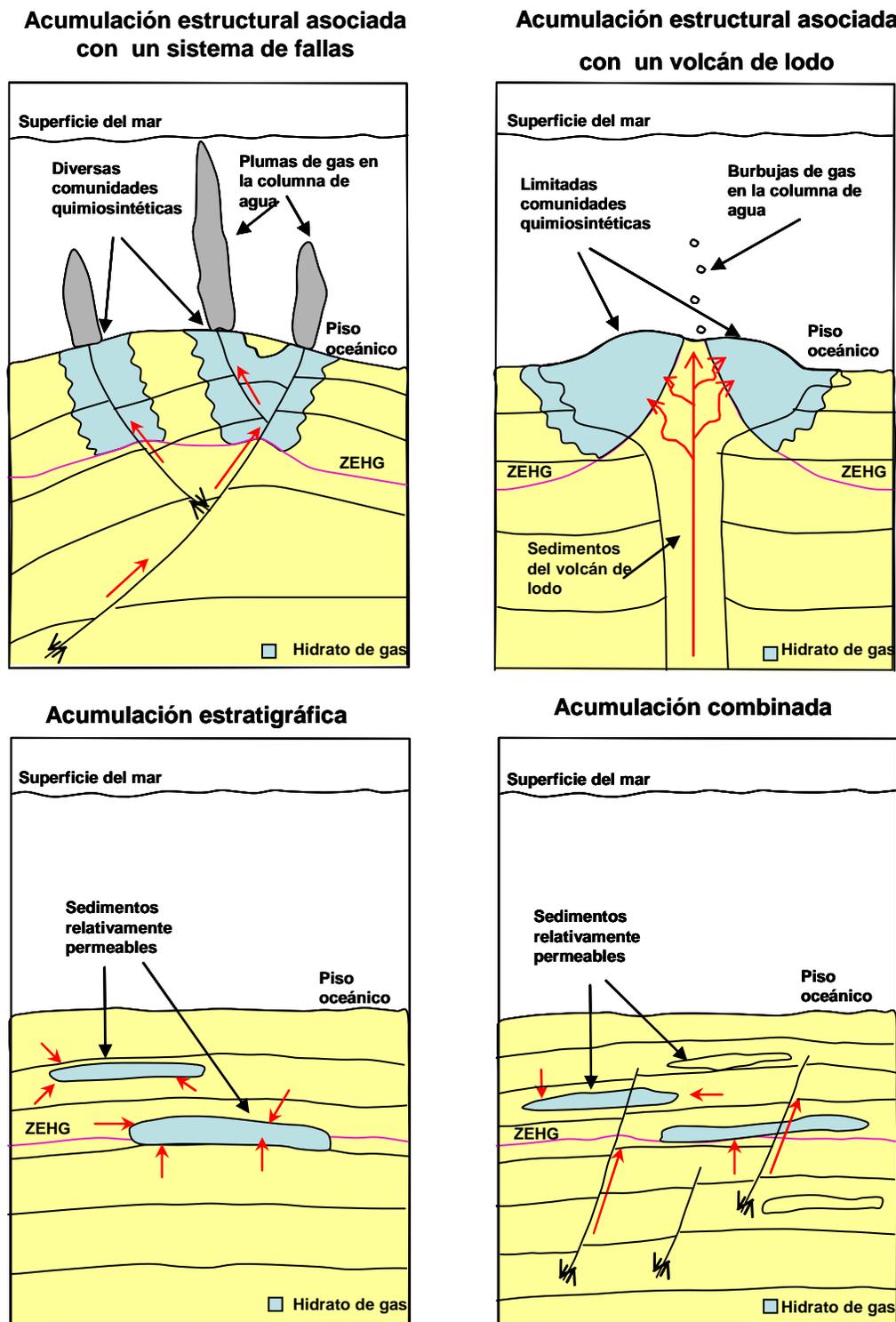


Figura 3.6. Cuatro tipos posibles de acumulaciones de hidratos de metano (vista sección cruzada). Las flechas señalan la dirección de migración del fluido (Milkov A.V., Sassen R, 2002).

III.1.2.b. ACUMULACIONES ESTRATIGRÁFICAS (TRAMPAS ESTRATIGRÁFICAS).

El régimen de flujo de fluidos en las acumulaciones en trampas estratigráficas (**Figura 3.6**) que contienen hidratos de gas generalmente es advectivo o de difusión molecular (Xu y Ruppel, 1999; en Milkov y Sassen, 2002). Estas acumulaciones ocurren en estratos relativamente permeables en donde el hidrato de gas cristaliza en el espacio poroso, llegando a formar nódulos y lentes. El hidrato de gas tiende a ser diseminado a través de la ZEHG, presentándose en concentraciones bajas, aunque existen excepciones como en la trinchera de Nankai, Japón, donde el hidrato de metano ocupa arriba del 82 % de los poros en delgadas pero muy permeables capas de arenas. El hidrato de gas cristaliza principalmente como sI, cuyo origen es relacionado con las bacterias; se cree que estas acumulaciones de hidratos de gas se generan in situ, teniendo escaso suministro de capas más profundas (gas termogénico). El hidrato de gas se encuentra en sedimentos de grano grueso (Ginsburg y Soloviev, 1998; en Milkov y Sassen, 2002) que facilitan la migración del gas y cuentan con espacio para la nucleación (Clennell et al., 1999; en Milkov y Sassen, 2002); además el hidrato parece estar concentrado en capas delgadas cercanas a la ZEHG. Los BSRs ocurren con frecuencia en la base de la acumulación estratigráfica del hidrato de gas debido a su gran área de extensión y a la presencia de la capa de gas libre debajo de la ZEHG (Hovland, 2000; Laherrere, 2000; en Milkov y Sassen, 2002).

III.1.2.c. ACUMULACIONES COMBINADAS (TRAMPAS MIXTAS).

En las acumulaciones combinadas, el hidrato de gas ocurre en estratos relativamente permeables, pero el gas es rápidamente suministrado de lo profundo a través de fallas activas o diapiros (**Figura 3.6**). En las márgenes pasivas, los sedimentos se depositan siguiendo un patrón ordenado, se acumulan arenas en el lecho de los ríos y a lo largo de la orilla del mar; los únicos granos capaces de quedarse suspendidos mucho tiempo en el agua hasta alcanzar el océano profundo son lodos de grano fino (limos y arcillas). Como resultado, el sedimento depositado en aguas profundas en las márgenes pasivas es generalmente lodo homogéneo. Aunque este lodo posee una porosidad alta, su naturaleza de grano fino origina una muy baja permeabilidad, lo cual no permite hidratar la formación y es la causa principal de las concentraciones bajas de hidrato (típicamente 2% a 6%).

Las perspectivas de acumulación de hidratos de metano en márgenes pasivas pueden aumentar si el margen es inestable, esto se debe a la presencia de diapiros de sal que generan fracturas que facilitan la migración ascendente de metano termogénico hacia la zona de estabilidad del hidrato (**Figura 3.7**).

En varios sitios, en donde se ha determinado la existencia de hidratos de gas, se cree que se presenta una acción combinada de procesos de acumulación, por lo que es necesario realizar mayores estudios detallados para definir completamente los factores de control de la ocurrencia de hidratos de gas en los diferentes escenarios geológicos.

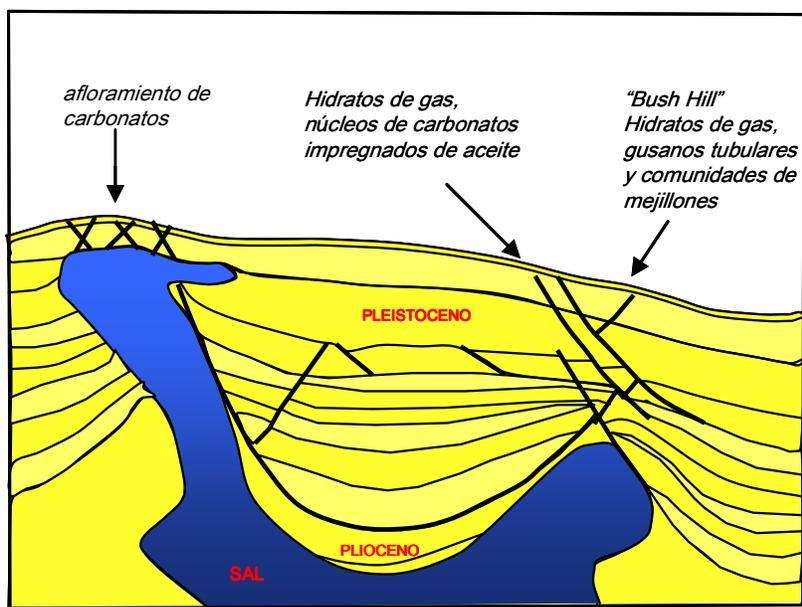


Figura 3.7. Estructuras de sal con fracturamiento en las capas superiores en Green Canyon (USA).⁷

III.1.3. ROCA SELLO.

Las **rocas sello** son aquellas que por su escasa permeabilidad o por contener poros de tamaño subcapilar, no permiten el paso de hidrocarburos, sirviendo como cierre a su migración o desplazamiento. Para que una roca sea considerada desde el punto de vista práctico, como impermeable, esta no debe poseer fracturas interconectadas; las rocas sello deben tener comportamiento plástico, de manera que en regiones tectónicas activas respondan a los esfuerzos mecánicos deformándose en el campo dúctil, formando pliegues en lugar de fracturas en el campo frágil.

El hidrato de metano suele actuar como cemento en los sedimentos de grano grueso (arenas y gravas), endureciendo así la matriz y al sedimento, esto también puede ocurrir en el espacio intersticial, sin afectar en forma importante la rigidez del sedimento. Cuando los hidratos de gas se acumulan en los espacios intersticiales del sedimento consolidado, el hidrato sólido, en lugar del agua líquida, ocupa los espacios intersticiales por lo que los procesos diagenéticos de consolidación y cementación mineral se inhiben en gran medida.

⁷ . U.S. Department of Energy, **Physical Properties of Gas Hydrates**, http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about_hydrates/physical-properties.htm, en Baltazar M. E., **Apuntes del tema "hidratos de metano"**, tema propuesto para la asignatura **geología del petróleo, de la carrera de ingeniería geológica**. Tesis profesional. UNAM F.I. 2002.

Cuando los gases hidratados rellenan los poros de los sedimentos, reducen la permeabilidad, es decir, se convierten en sellos efectivos que favorecen la formación de trampas de gas libre; estas trampas de gas bajo los hidratos causan una extraordinaria concentración de depósitos de hidrocarburos; el gas contenido en las trampas tiende a migrar hacia la superficie rellorando los poros de los sedimentos y haciendo la trampa cada vez más efectiva. De este modo se consiguen altas concentraciones de metano en yacimientos convencionales e hidratos de metano (no convencionales).

El metano libre puede ser gas termogénico que ha emigrado de gran profundidad de la corteza de la Tierra, o puede ser gas biogénico de una capa previa de hidrato pero que ahora cambio de fase.⁸

III.2. GEOFÍSICA

Las anomalías observables en los registros geofísicos de pozos realizados en las regiones conocidas con presencia de hidratos, pueden ser atribuidas a la presencia de éstos en los sedimentos; aunque para definir la presencia de hidratos de gas en zonas no conocidas o inexploradas se requiere en primera instancia de estudios específicos de geología y de geofísica sumados a las características sísmicas que hacen posible definir la posible presencia de hidratos en el subsuelo. Los registros geofísicos de pozos proveen medidas de la temperatura de la formación, presión, porosidad, etc. Han sido varios los indicadores de acumulaciones de hidratos de gas en las márgenes continentales y límites de talud, lo que se ha corroborado por las perforaciones en el fondo marino y por el muestreo de núcleos. El reflector simulador de fondo (BSR) es el indicador más importante en la investigación geofísica de exploración de hidratos de gas, y éste ha sido localizado en los perfiles sísmicos tomados en diferentes ambientes marinos de separadas áreas del mundo (por ejemplo, Golfo de Oman, Mar Negro, Golfo de México, Mar de Bearing, Mar Beaufort, Costa Atlántica de E.U, Costa del Pacífico de E.U, entre otros sitios).

El método geofísico empleado en la exploración marina es la sísmica de reflexión que nos permite definir la posible localización de hidratos de gas en las capas de sedimentos marinos debajo del piso oceánico.

⁸ . Desa Erhlich, 2000. **Submarine Methane Hydrates – Potential Fuel Resource of the 21st Century**, Gas Hydrates Research Group National Institute of Oceanography Goa, India. Workshop on Mineral Resources of the International Seabed Area. Kingston, Jamaica 26-30 June 2000.

III.2.1. SÍSMICA DE REFLEXIÓN.

La sísmica de reflexión es una técnica ampliamente utilizada en exploración geofísica que permite obtener información del subsuelo controlando los tiempos de llegada de ondas elásticas (pulsos), generadas artificialmente mediante explosiones, impactos mecánicos o vibraciones cerca de la superficie; el retorno de estas ondas elásticas a la superficie después de reflejarse en las distintas interfases, se registra en sismógrafos (geófonos e hidrófonos). El objetivo básico de la sísmica de reflexión es obtener información sobre la arquitectura y tipos de rocas del subsuelo, también permite deducir más información valiosa en la exploración (por ejemplo, propiedades mecánicas), acerca de las estructuras secundarias en profundidad; especialmente de las distintas capas que constituyen la columna estratigráfica, todo lo anterior se interpreta, a partir de los tiempos de llegada de las ondas sísmicas; lo que permite construir una imagen representativa del subsuelo.⁹

La sísmica de reflexión estándar consiste en la generación de un frente de ondas acústico controlado, y un equipo de registro que detecte la energía acústica propagada a través de un medio; esta metodología se puede aplicar en medios marinos y terrestres, aunque es sustancialmente diferente.

La utilización a gran escala de la sísmica de reflexión marina data de los años 60 del siglo pasado, y su impulso se debió fundamentalmente a la exploración petrolera de yacimientos convencionales. Una de las grandes ventajas de la sísmica de reflexión marina es la posibilidad de realizar adquisición de datos que continúan a lo largo de perfiles previamente determinados.

En los años 90 del siglo pasado, la generación de una fuente acústica con fines de exploración de hidratos, se hizo a bordo de un buque oceanográfico, aunque en las últimas décadas se ha propuesto y utilizado diferentes métodos que van desde explosiones controladas, pasando por inyección de vapor de agua (vaporchoc, steam gun), generación de una diferencia de potencial eléctrico elevada (sparker), hasta los conocidos cañones de aire comprimido (airgun); estos últimos son los de mayor éxito por su inocuidad y eficacia. Actualmente se ha pasado de la utilización de un “simple” cañón de aire (**Figura 3.8 y 3.9**), a lo que se conoce como una ristra de cañones sincronizados que permiten no solo aumentar la cantidad de energía sino **conseguir un pulso “estrecho” (quasi delta de dirac)** que garantiza la utilización de los nodos principales de la energía liberada. El diseño de estas ristras depende del tipo de experimento a realizar, pero de manera genérica estos se disponen en la popa de buque a una cierta distancia (5-10 m) para evitar el ruido de cavitación. Con el objetivo de mejorar el contenido de frecuencias se suelen utilizar cañones con distintas cámaras de aire comprimido; la sincronización de los distintos

⁹ . Bartolomé De laPeña. R. 2002. **Evolución tectónica del margen continental oeste de México: fosa Mesoamericana y Golfo de California**. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Tesis doctoral

cañones se realiza para conseguir una interferencia constructiva de la señal, lo que permite una mayor energía y por tanto una mayor penetración en el subsuelo.



Figura 3.8. Esquema del cañon de aire. La fuente más común empleada en la sísmica de reflexión en la exploración marina (Elements of 3D Seismology. Por Chris Liner.ppt).

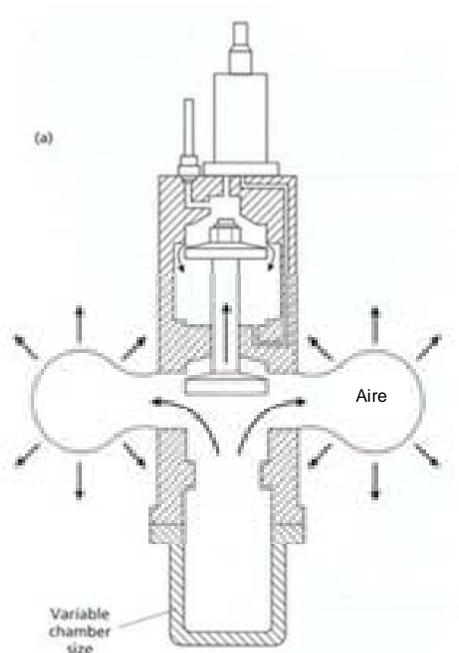


Figura 3.9. Cañon de aire (air gun) empleado en la sísmica de reflexión para generar un frente de ondas acústicas (Tomada de Kearey, Brooks, and Hill, 2002., en Chris Liner.ppt).

Otro elemento básico en la adquisición de sísmica de reflexión marina es el cable registrador conocido como “streamer”, este consiste en una serie de grupos de hidrófonos (canales) convenientemente espaciados que registran la señal acústica procedente del suelo y subsuelo marino. Tanto el número de canales como el espaciado puede ser variable

dependiendo de los objetivos a alcanzar (Ver figura 3.10), por lo general los *streamer* utilizados en el mundo académico oscilan entre 2.4 km y 4.5 km de longitud, lo que supone 96 canales espaciados 25 m, hasta 360 canales con un espaciado de 12.5 m; naturalmente entre estos dos extremos existen múltiples combinaciones que dependen de los objetivos. Para evitar ruidos superficiales (oleaje, motor, etc) el cable registrador suele ir entre 5 y 10 m por debajo de la superficie del mar, debido a que los hidrófonos registran los cambios de presión del agua que se ocasionaron por el paso del frente de ondas acústicas generadas por las explosiones en un número de puntos regularmente espaciados a lo largo de un perfil que pasa por el punto de tiro. El aspecto general de la señal registrada (traza) es la de un sismograma, similar al que se produce por un terremoto.

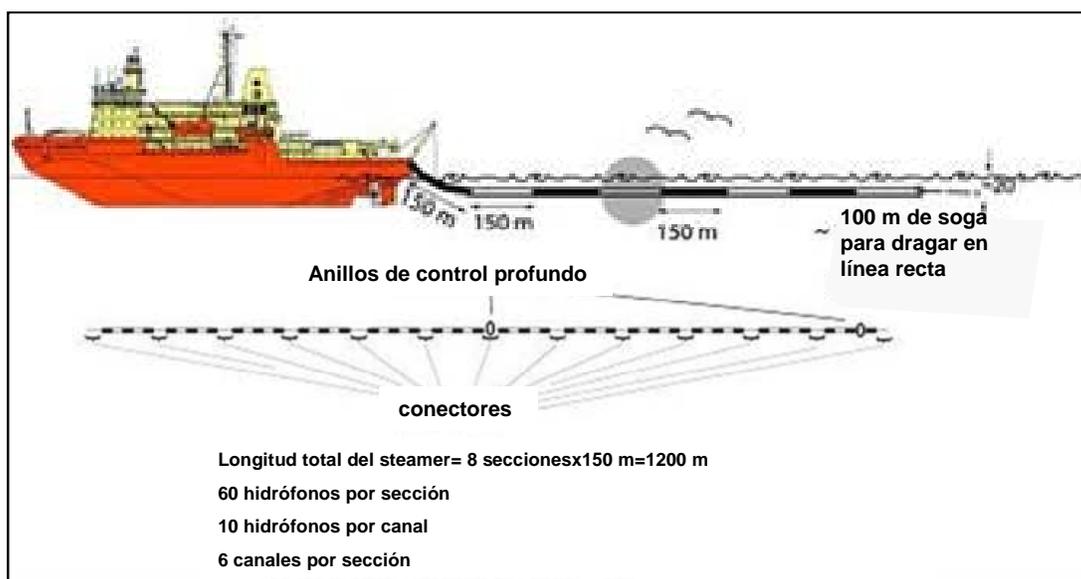


Figura 3.10. Configuración del Streamer (Elements of 3D Seismology. Por Chris Liner.ppt).

III.2.1.a. CARACTERÍSTICAS DEL BSR Y SU RELACIÓN CON LOS HIDRATOS DE METANO.

El cambio en las propiedades físicas de los sedimentos debido a la presencia de hidratos, respecto a la de una capa de gas libre que le subyace, permite detectar y semi-cuantificar la concentración de éstos en determinada área de estudio; estas propiedades primarias son la velocidad sísmica y la resistividad eléctrica. La velocidad en sedimentos con inclusión de hidratos se incrementa fuertemente, mientras que en un medio con concentraciones de gas la velocidad disminuye sustancialmente. Por otra parte, debido a que la formación de hidratos excluye salinidad, la resistividad eléctrica de los sedimentos aumenta. Existe también un contraste en la impedancia ante la presencia de hidratos debidas a la velocidad.

Para la exploración de hidratos de gas marinos, el principal indicador de su localización es el reflector simulador de fondo (BSR). El BSR ocurre en el campo de presión-temperatura (P-T) de estabilidad del hidrato de gas, es por ello que la identificación de los hidratos de

metano en el subsuelo se hace a partir del análisis de líneas sísmicas, que en los sedimentos cementados por los hidratos representan un depósito con muy alta velocidad y por debajo de las zonas con hidratos las velocidades son menores debido a que los sedimentos infrayacentes contienen en sus poros sólo agua y/o gas libre atrapado por los hidratos dada su baja permeabilidad. El BSR es un reflector que simula acústicamente la superficie del fondo oceánico, detectado por métodos sísmicos, a una profundidad equivalente de 0.5 s Two Way Time (TWT) por debajo de éste. Su origen es debido a la discontinuidad que se produce entre los sedimentos que contienen hidratos de gas (encima del BSR) y los que contienen gas libre (bajo el BSR). Se identifica en las secciones sísmicas debido a un cambio de polaridad respecto de la reflexión del fondo marino, consecuencia de un salto negativo de la impedancia acústica (White, 1977; MacKay y otros, 1994 en Bartolome de la Peña, 2002) (Figura 3.11). Las isotermas son aproximadamente paralelas al piso oceánico, y la base de estabilidad comúnmente es paralela también al piso oceánico.

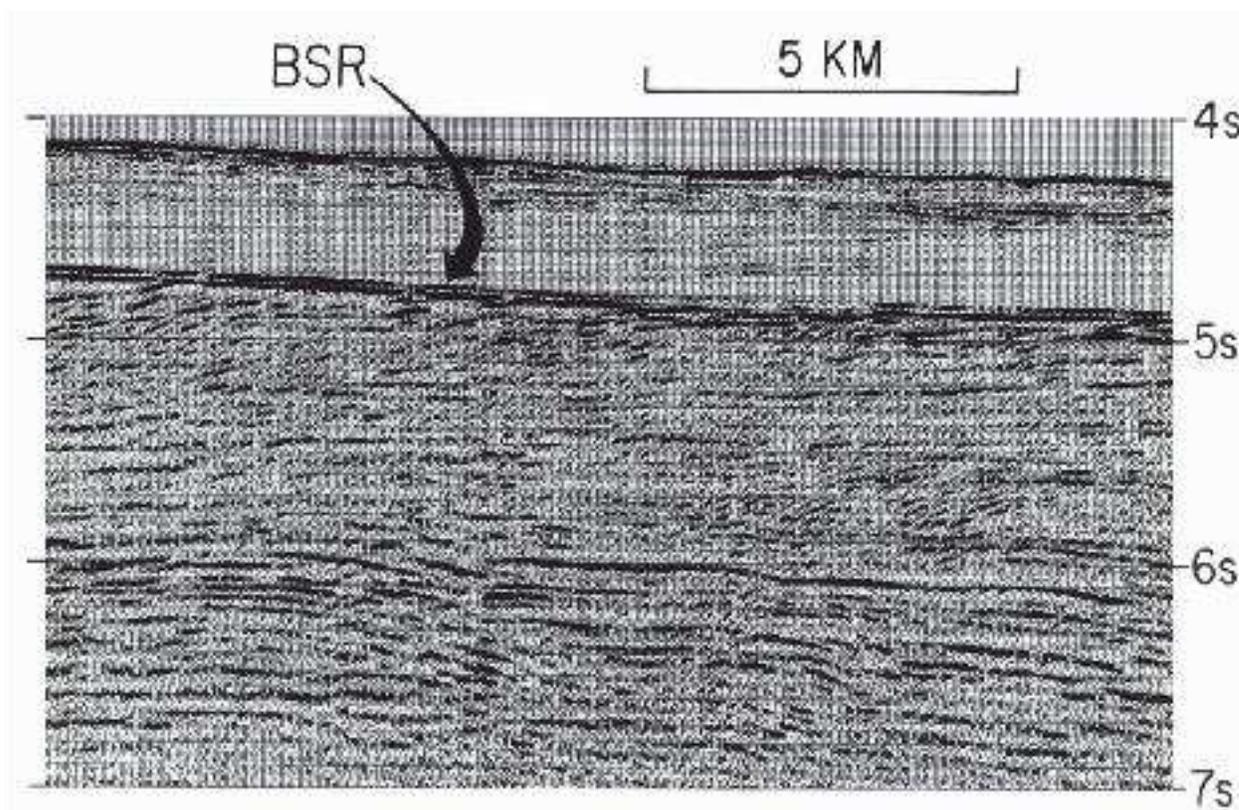


Figura 3.11. Perfil sísmico marino del Blake Ridge, del Sureste de la costa de USA, donde se observa un fuerte BSR que semeja al piso oceánico, asociado con la presencia de Hidratos de gas (Tomada de Keith A. Kvenvolden and Thomas D. Lorenson, 2000).

Anteriormente se pensaba que los BSRs no eran más que ruidos del proceso de adquisición sísmica y por tanto eran tratados de depurarse. Ahora se sabe que son producidos por la impedancia negativa contrastante entre altas velocidades de los sedimentos conteniendo hidratos de gas y las bajas velocidades de los sedimentos conteniendo gas libre (Figuras 3.11 y 3.12). Los BSRs pueden ser reflexiones fuertemente anómalas que cortan completamente las secciones estratigráficas (Figura 3.13).

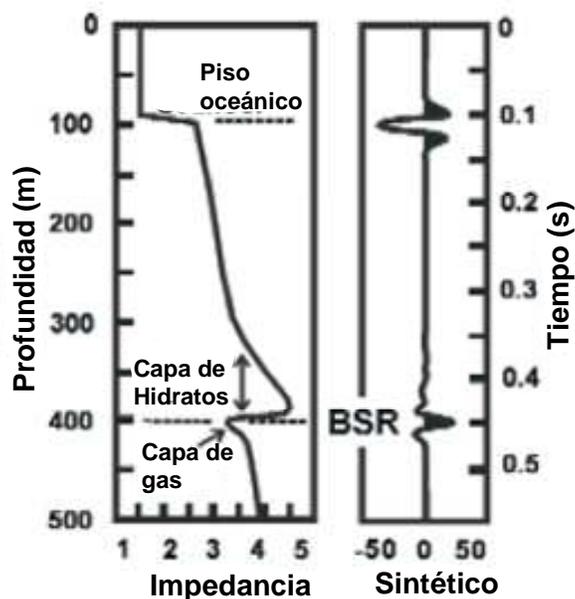


Figura 3.12. Sismograma sintético simple que reproduce el principal rasgo de los BSRs, nótese el cambio en la impedancia entre el hidrato y la capa de gas libre (Hyndman R.D y Dallimore S.R., 2001).

Los hidratos de gas pueden estar presentes donde no existe el BSR y por el contrario el BSR puede ocurrir donde el contenido de hidrato de gas es poco y solo existen pequeños porcentajes de gas libre en la capa suprayacente. En áreas del Ártico (permafrost), los hidratos de metano han sido detectados principalmente con métodos de exploración convencional, especialmente por las altas velocidades determinadas en los registros sísmicos, altas resistividades en los registros eléctricos, y alto contenido de gas en el lodo; el BSR es raramente generado en estas áreas.¹⁰

Así, se ha identificado el BSR en numerosos márgenes continentales de Norteamérica, en el Mar Negro, en el margen continental Pacífico de México, Guatemala, Nicaragua, Costa Rica y Panamá; los márgenes continentales atlánticos al sureste de los Estados Unidos (Blake Outer Ridge) y en el Golfo de México; en el océano Ártico (Alaska y mar de Bering), islas Aleutianas, Japón, en el norte de Australia, en el margen atlántico de Angola y en el Golfo de Omán.

¹⁰. Hyndman R.D and Dallimore S.R., 2001. **Natural Gas Hydrate Studies in Canada**. Geological Survey of Canada.

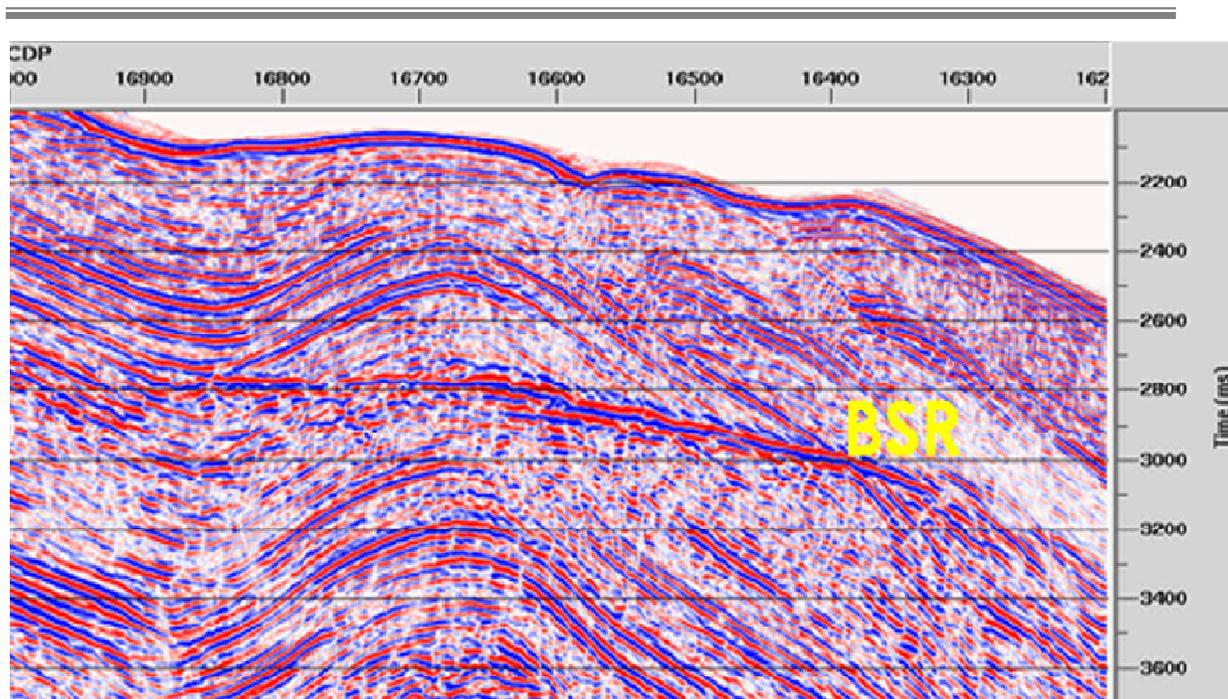


Figura 3.13. Sección sísmica de la costa de Andaman, India, mostrando un fuerte BSR que corta a la secuencia sedimentaria.¹¹

Otras técnicas geofísicas que tienen el potencial para identificar y cuantificar los hidratos de gas y el contenido de gas libre en los sedimentos, y que han sido también empleadas en las exploraciones de los hidratos de metano son los sondeos eléctricos (e.g., Edwards, 1997; Yuan and Edwards, 2000; Weitemeyer et al., 2005), *seafloor compliance* (Willoughby y Edwards, 1997; Willoughby et al., 2005).¹²

En el estudio del piso marino profundo donde los hidratos ocurren, la herramienta comúnmente empleada es el *side-scan sonar*. El sonar inspecciona utilizando el eco-sonoro para proporcionar información detallada sobre la topografía y reflectividad del piso oceánico; estos datos pueden proporcionar los indicios iniciales de la presencia de hidratos cerca de la superficie a través de la identificación de rasgos anómalos del piso marino, incluyendo las depresiones y deslizamientos, fracturas, diapiros y los volcanes de lodo.

¹¹ . Jain A.K., 2008. **Challenging Task of Gas Hydrate Exploration: Indian Scenario.** Oil and Natural Gas Corporation Ltd. India., in Hidratos de Metano: La fuente de gas natural mas importante del futuro. Memorias técnicas.

¹² . Anne M. Tréhu, Carolyn Ruppel, Melanie Holland, Gerald R. Dickens, Marta E. Torres, Timothy S. Collett, David Goldberg, Michael Riedel, and Peter Schultheiss. 2006. **Gas Hydrates in marine sediments.** Oceanography Vol. 19, No. 4

III.2.2. REGISTROS GEOFÍSICOS DE POZOS

En la investigación de hidratos de metano, los registros geofísicos de pozos toman un papel importante en su descripción y localización, siendo los más usados el de resistividad, el sísmico y el de neutrones. Las características de los hidratos de gas en el subsuelo muestran una rápida velocidad acústica, una resistividad eléctrica relativamente alta, porosidad de neutrón alta y aparentemente una baja densidad; el registro eléctrico de resistividad proporciona información sobre la saturación de agua intersticial y salinidad debido a que el agua salada tiene una baja resistividad. La rapidez en la velocidad acústica refleja la habilidad de material rígido (hielo y roca) para propagar fácilmente la energía compresiva. La alta porosidad del registro de neutrón indica que muchos poros están llenos con hidrato de gas, por otro lado una baja densidad significa una densidad más baja del hielo comparada con el agua.

Mediante los registros geofísicos de pozos se puede calcular valores muy exactos de porosidad del sedimento y niveles precisos de saturación de hidrato.

Los sedimentos marinos conducen la corriente eléctrica a través de los fluidos salinos presentes en los poros interconectados y fracturas, en tanto que los hidratos de metano, así como el hielo, están eléctricamente aislados. La presencia de hidratos en los sedimentos limita el flujo de la corriente eléctrica, que se traduce en el incremento de la resistividad medida por la herramienta de adquisición del registro en la roca. La relación empírica entre la resistividad de la formación, R_f , y la porosidad, Φ , se estipula en la ley de Archie, que dice que $R_f = a R_w [(1 - S) \Phi]^{-m}$, donde a es el coeficiente de tortuosidad, R_w es la resistividad del agua de poro, S es la fracción del poro con hidrato, y m es el coeficiente de cementación del sedimento. Se asume que en sedimentos hidratados la fracción de volumen de fluido, de hidrato y de material sólido corresponde a $(1 - S) \Phi$, $S\Phi$, y $1 - (1 - S)\Phi$ respectivamente. El parámetro S y $(1 - S)$ representan la fracción del espacio de poro Φ relleno con hidrato y agua respectivamente. Estos parámetros pueden ser obtenidos en el laboratorio. La cantidad de hidratos presentes en el espacio poroso puede, así, ser directamente relacionado a la resistividad.¹³

La **Figura 3.14** muestra que las respuestas simultáneas de los registros geofísicos de pozos corroboran la interpretación de hidratos, es decir, una correlación en las propiedades definirán una zona con potencial presencia de hidratos, en la cual se observa que el tamaño del diámetro del pozo aumenta por la disociación del gas (véase registro Caliper de la figura), la porosidad aumenta (véase registro Neutrón y la relación con el SP de la figura), y el aumento de la resistividad se interpreta de los registros de resistividad (sónico, inducción etc.).

¹³ . Yuan J, Edward R.N. **Towed seafloor electromagnetics and assessment of gas hydrate deposits**. Department of Physics, University of Toronto, Toronto, ON, M5S 1A7, Canada.

Los principales registros geofísicos de pozos que se pueden utilizar para interpretar la presencia de hidratos de metano son los siguientes (Baltazar, 2002):

-Registro de hidrocarburos: es más sensible a los hidratos, pero su respuesta puede ser no muy diferente de un registro para gas libre. En los registros de hidrocarburos la disociación de hidratos causa un incremento significativo de gas en el lodo de perforación, el cual es encontrado en la parte alta del pozo; sin embargo hay que considerar que los fluidos fríos o densos pueden ocultar la disociación resultando un gas más ligero.

-Registro de resistividad eléctrica (Doble Inducción). En este registro que es de penetración superficial, se obtiene una pequeña respuesta con relación a la zona de gas libre debido a la disociación del hidrato. El registro de inducción profunda muestra alta resistividad por lo que es posible interpretar la presencia de un posible yacimiento de hielos de metano.

-Registro de Potencial Espontáneo. Comparado con los registros que permiten identificar la zona de gas libre, existe en los registros de potencial espontáneo una desviación relativamente menor; la curva de registro potencial espontáneo para el hidrato de gas podría ser similar al de una secuencia portadora de hielo, la correlación directa es con el registro gamma que tiene similar comportamiento.

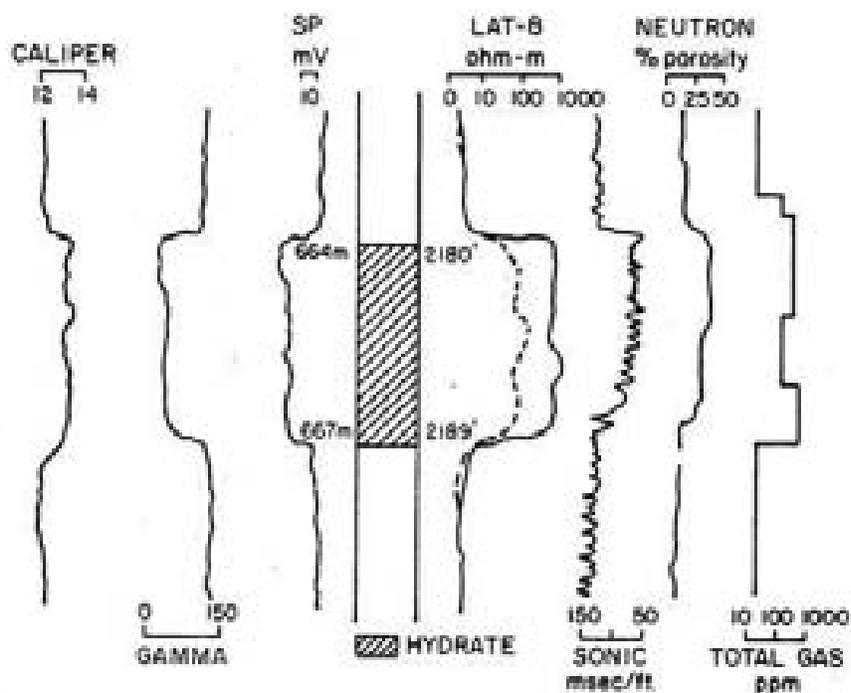


Figura 3.14. Ejemplos de respuestas típicas de registros de pozos en presencia de hidratos.¹⁴

¹⁴. Sloan E. Dendy, 1990. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. Ed. Marcell Dekker, New York, en Baltazar 2002.

-Registro Caliper. Un agujero de perforación agrandado puede formarse por la disociación de hidratos, esto puede también ocurrir con hielos sin hidratos del permafrost.

-Registro de Tiempo de Tránsito Acústico. Dentro de una secuencia con hidratos de gas existe una disminución en el tiempo de tránsito acústico en comparación con una unidad saturada con agua o gas puro. Sin embargo, el tiempo de tránsito acústico del hielo es similar al de hidrato de gas, el registro acústico no identifica los hidratos de gas dentro de una sucesión de hielo en el permafrost.

-Registro de Porosidad por Neutrón. En una acumulación de hidratos de gas existe un incremento relativo de la porosidad de neutrón; esta respuesta contrasta con la reducción aparente en la porosidad de neutrón en una zona libre de gas.

-Registro de Densidad. Dentro de una zona con contenido de hidratos de gas existe una disminución aparente en la densidad en comparación a una unidad saturada con agua, debido a que la densidad del hielo es similar al del hidrato de gas; el registro de densidad no puede identificar una acumulación de hidratos de gas dentro del permafrost, ya que la densidad decrece aparentemente con hidratos y puede ser distinguido del agua pero no del hielo sin hidratos.¹⁵

Por otro lado, la velocidad de perforación de los pozos también decrece en la región de hidratos debido a la naturaleza sólida del hidrato de gas con relación al sedimento saturado de fluidos, pero no es significativamente diferente de horizontes portadores de hielo sin hidratos.

III.3. GEOQUÍMICA.

Para definir la naturaleza física de los hidratos de gas, los científicos se han apoyado en los estudios geoquímicos realizados en las muestras obtenidas de aguas profundas y zonas del permafrost. El muestreo de los sedimentos del mar es uno de los métodos que más se ha usado en la búsqueda de hidratos de metano; los investigadores pueden ocasionalmente recuperar las muestras de núcleo con hidrato intacto. Sin embargo, comúnmente la disociación de los hidratos durante la recuperación de las muestras da como resultado la recuperación de una mezcla de sedimento, agua, y gas metano libre; los análisis geoquímicos en dicha agua, sirven para determinar la presencia y cantidad de hidratos de metano ya que del análisis de las concentraciones características de elementos específicos, iones, e isótopos pueden revelar si el agua era recientemente parte del hidrato sólido o no.

El grado de salinidad (concentración de iones de sal disuelta) del agua del poro de las muestras es un primer indicador de la presencia de hidratos, ya que el agua donde se forman los hidratos típicamente contiene una gran cantidad de sales disueltas (específicamente, sodio e iones de cloruro); cuando la formación del hidrato se presenta,

¹⁵ . Baltazar M. E., **Apuntes del tema “hidratos de metano”, tema propuesto para la asignatura geología del petróleo, de la carrera de ingeniería geológica.** Tesis profesional. UNAM F.I. 2002.

estos iones son excluidos de la estructura del hidrato. Aunque esto producirá temporalmente un incremento de la salinidad del agua remanente de los poros, con el tiempo la circulación normal de fluidos del poro devolverá la salinidad normal del agua. Por consiguiente, la disociación del hidrato durante la recuperación de las muestras producirá una entrada de agua fresca que diluye la salinidad de fluidos del poro. Los análisis geoquímicos que identifican zonas de agua más dulce de la esperada en los poros (disminución de la cantidad de iones de cloruro (**Figura 3.15**), permiten interpretar la presencia de hidratos. Si la salinidad original del agua del poro es conocida, la cantidad de disolución de cloruro puede ser directamente traducida en la cantidad de hidrato de gas que existió en la muestra.

Además de medir la salinidad, se analizan las moléculas de agua tomadas de las muestras del mar profundo para determinar la proporción de varios isótopos de oxígeno y de hidrógeno. Los geoquímicos han observado que los procesos que construyen las celosías del hidrato seleccionarán preferentemente ambos isótopos más pesados de oxígeno e hidrógeno. Por la medición del enriquecimiento y/o disminución de estos isótopos en el agua recuperada con las muestras del sedimento, los geoquímicos pueden estimar si el hidrato pudo haber estado presente, y en que concentración.

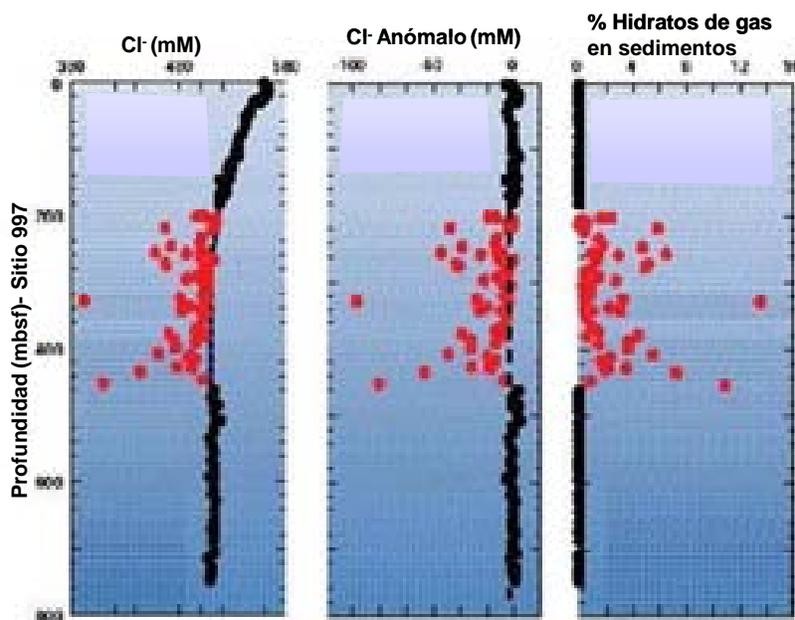


Figura 3.15. Gráficas mostrando la relación entre la concentración de iones de cloro en el agua de los sedimentos recuperados y el porcentaje promedio de hidratos de gas presentes antes de la disociación.¹⁶

¹⁶ .Tomada del sitio web: <http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/FutureSupply/MethaneHydrates/about-hydrates/geochem.htm>

Los análisis geoquímicos de metano presente en las muestras permiten determinar el origen del metano. Un factor importante en la geoquímica del metano contenido en los hidratos de gas natural, es la composición de isótopos de carbono que permiten determinar la naturaleza microbiana (según Bernard et al., 1976; en Kvenvolden, 1996) o termogénica del gas. La medición más común es la relación de los isótopos carbono-12/carbono-13.

En lugares donde el metano esta siendo generado por procesos microbianos dentro de una sección sedimentaria (zona de metanogénesis o diagénesis), existe una relación de isótopos de carbono entre el metano y el CO₂ (Figura 3.16). Esta relación es evidente en sedimentos de la Sierra Blake Outer (Galimov y Kvenvolden, 1983; en Kvenvolden, 1996) del Sitio 533 del Deep Sea Drilling Program (DSDP). En esa localidad los valores de $\delta^{13}\text{C}$ del metano llegan a ser más fuertes con la profundidad, de aprox. -94‰ en sedimentos superiores a aprox. -66‰, reflejando una deflexión sistemática pero no lineal de ¹²C con la profundidad. Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ en CO₂ también se incrementan con la profundidad de los sedimentos, de aprox. -25‰ a aprox. -4‰, mostrando una deflexión de ¹²C cercanamente paralelo a la tendencia de la composición isotópica del metano. La diferencia del -60‰ entre la composición isotópica del metano y el CO₂ semejantes con la profundidad se cree que es resultado del efecto cinético de metanogénesis microbiana (Figura 3.16). El metano que se origina del decaimiento bacteriano de la materia orgánica se enriquece típicamente con carbono 12.

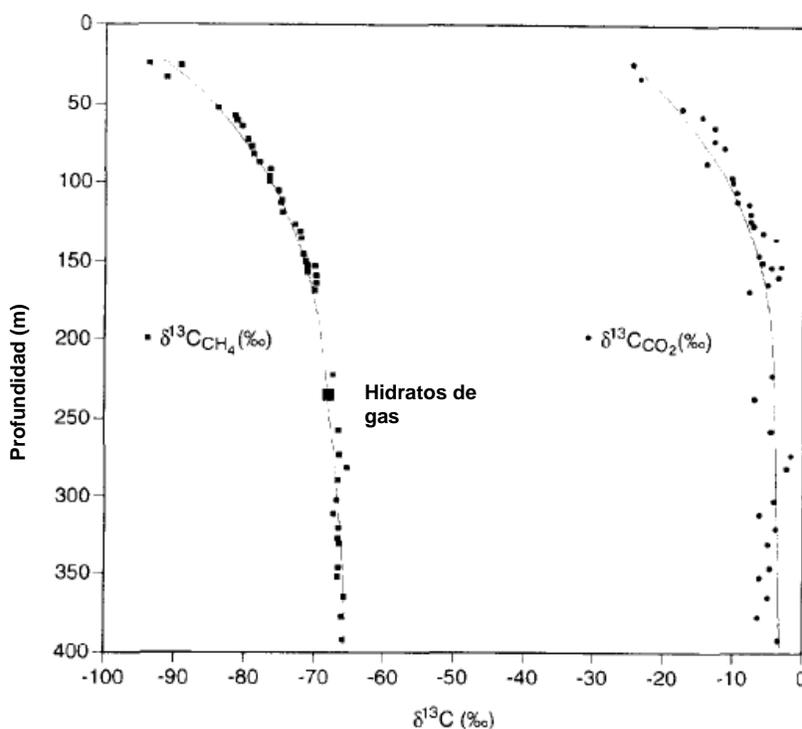


Figura 3. 16. Distribución con la profundidad de la composición de isótopos de carbono del metano y dióxido de carbono en el Leg 76 del DSDP Sitio 533, Blake Outer Ridge, costa afuera del sureste de los Estados Unidos. *Modificada de Galimov y Kvenvolden, 1983; en Kvenvolden, 1996.*

En el Golfo de México y en el Mar Caspio se ha encontrado que el metano de los hidratos es de origen tanto biogénico como termogénico (Brooks et al., 1986; Ginsburg et al., 1992; Sassen y MacDonald, 1994; en Kvenvolden, 1996), aunque se tiene también el proceso microbiano. En muestras tomadas en Green Canyon y Mississippi Canyon, el contenido de metano en los hidratos es del 62-78% con rangos de $\delta^{13}\text{C}$ de -43.2% a -56.5%; en Bush Hill los hidratos de gas contienen el 21.2% de metano, teniendo valores de $\delta^{13}\text{C}$ -29.3%. Estos valores caen dentro de los campos de composición molecular e isotópica diagnosticados como metano de origen termogénico (Figura 3.17). El metano de fuentes termogénicas tiene típicamente niveles más altos de carbono 13.

La composición del gas en núcleos o muestras recuperadas es expresada comúnmente como C_1/C_2 (Methane/Ethane) y graficado contra la profundidad. Este radio es generalmente usado para una obtención rápida de información acerca del origen de los HC's, como por ejemplo, para distinguir entre gas biogénico y el gas que migró de una fuente más profunda de HC's termogénicos. Cuando se tienen altos promedios de C_1 (>10,000 ppm) y una relación muy alta de C_1/C_2 , indican la formación de un gas (C_1) por procesos biológicos. La relación de C_1/C_2 con la temperatura del sedimento (Figura 3.18) es un criterio para evaluar la naturaleza "normal" Vs "anormal" en la génesis de los hidrocarburos.

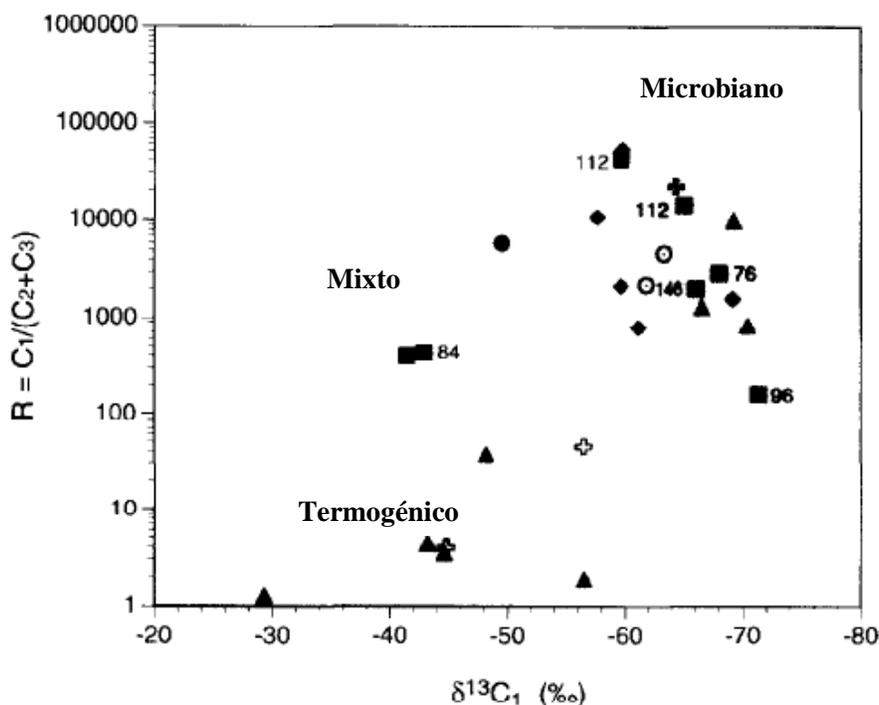


Figura 3.17. Origen del metano a partir de los valores de $\text{C}_1/(\text{C}_2+\text{C}_3)$ contra $\delta^{13}\text{C}$ de C_1 . Modificado de Kvenvolden 1996.¹⁷

¹⁷ Kvenvolden K. 1996. A review of the geochemistry of methane in natural gas hydrate. *Org. Geochem.* Vol. 23. No. 11/12. pp. 997-1008. Publicada por Elsevier Science

La composición de gas medida a partir de las perforaciones en el campo Messoyakha (zona continental) fue determinada como: C₁, 98.6%; C₂, 0.1%; C₃, 0.1%; CO₂, 0.5%; N₂, 0.7% (Resumido de Sloan, 1990; en Kvenvolden, 1996). El ratio de gas hidrocarburo C₁/(C₂+C₃) es de 490 y la composición de C del 99.8% posiblemente explica una fuente mixta de hidratos de gas continentales (Figura 3.17).

Anomalías bajas de C₁/C₂ sugiere la presencia de hidrocarburos termogénicos que han migrado de las zonas profundas de la corteza (Ocean Drilling Program, 1992; en Tréhu, A. M., et al., 2006). Como consecuencias de la disociación de los hidratos de metano, al estar compuestos de CH₄ y H₂O primariamente, se tiene:

- 1) La liberación de un gran volumen de metano (1H₂O/164 CH₄ m³) (Davidson et al., 1978; Sloan, 1990)
- 2) La liberación de agua dulce y
- 3) El agua dulce liberada contiene valores de isotopos más pesados de oxígeno e hidrógeno que el fluido de poro con el cual se mezcla.

El comportamiento de los isotopos durante la formación de los hidratos de gas es cercanamente análogo a la formación de hielo de mar en los polos.

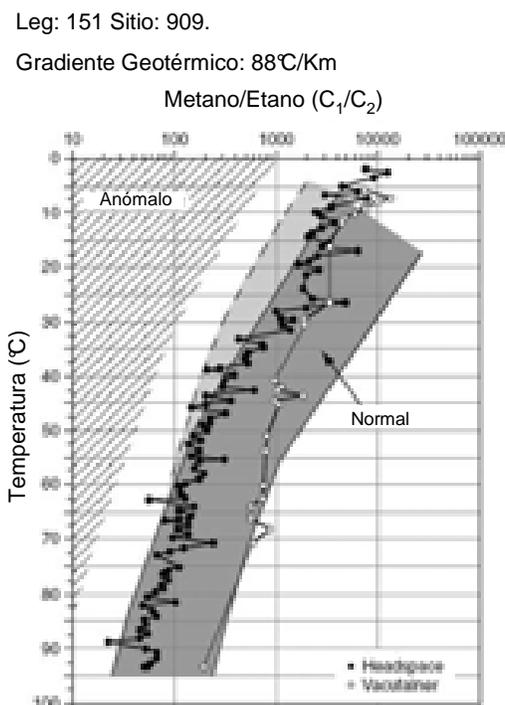


Figura 3.18. Diagrama C₁/C₂ ratios vs. Temperatura del sedimento en el sitio 909. ¹⁸

¹⁸ . Pimmel, A., Claypool, G., 2001. **Introduction to shipboard organic Geochemistry on the joides Resolution.** ODP Tech. Note, 30. <http://www-odp.tamu.edu/publications/tnotes/tn30/>

CAPÍTULO IV. ESTUDIOS DE HIDRATOS DE METANO A NIVEL MUNDIAL.

En los últimos diez años los hidratos de metano han sido reconocidos como una fuente potencial de energía que se puede obtener a partir del gas no asociado a los yacimientos convencionales de petróleo, esto se debe en parte a la gran cantidad de volumen de gas que se almacena en un yacimiento de hidratos en comparación con los otros yacimientos. Las expectativas para su explotación han ido en ascenso y en la actualidad se están realizando las primeras pruebas de producción de gas a partir de los hidratos de metano.

Por otro lado, los hidratos de metano son una excelente posibilidad de independencia energética para algunos países desarrollados, como EUA, Canadá y Japón, y también para los países en vías de desarrollo como la India y China; lo que ha motivado a esos países a la creación de programas de investigación y desarrollo tecnológico para hacer posible la extracción comercial de gas natural a partir de los depósitos de Hidratos de Metano. De acuerdo con estudios preliminares, existen reservas considerables de gas natural en estos tipos de depósitos y su distribución global (**Figura 4.1 y Tabla 4.1**) se presenta cerca de las principales áreas de consumo en el mundo, como es el caso de California, Nueva York, Tokio, etc.

Las actividades de investigación y desarrollo tecnológico para la búsqueda y explotación de los hidratos de metano se han incrementado con programas intensivos de Japón, India, Canadá, Reino Unido, Alemania, Brasil, Noruega y Rusia; programas que en este capítulo son abordados de manera sistemática para explicar el conocimiento sobre la investigación de esta fuente de energía y que por sus características geológicas pueden correlacionarse con las áreas de yacimientos de hidratos de metano en aguas patrimoniales de nuestro país, en el Océano Pacífico y en el Golfo de México. Primero se describen de manera general los yacimientos que históricamente han sido estudiados en las zonas del permafrost de Rusia, Alaska y Canadá; posteriormente se tratan los países que presentan modelos de yacimiento similares a los yacimientos en nuestro país y que geológicamente pueden colaborar en el entendimiento de las regiones potenciales de contener hidratos en los océanos profundos de México, y por último, concluyendo en la descripción general de los depósitos reportados y estudiados en el Golfo y Océano Pacífico de México.

IV.1. DEPÓSITOS DE PERMAFROST EN EL CAMPO MESSOYAKHA, RUSIA., PRUDHOE, ALASKA. Y DELTA MACKENZIE, CANADÁ.

El primer ejemplo conocido de producción de gas atribuido a los hidratos se presentó en el campo Siberiano de gas **Messoyakha** (**Figura 4. 2**), descubierto en 1968 y estudiado con las nuevas tecnologías a para mediados de la década de los ochentas del siglo pasado, tiempo en el que se descubrieron más de 60 campos de gas en esta cuenca que contienen conjuntamente aproximadamente 22 trillones m^3 , es decir, un tercio de las reservas de gas en el mundo. Antes de la producción, se calculó que el **campo de Messoyakha** contenía 79 millones de m^3 de gas, un tercio del cual se encuentra contenido en los hidratos que recubren el intervalo de gas libre en el campo ([Collett, T.S., 2000](#)) (**Figura 4.3**).

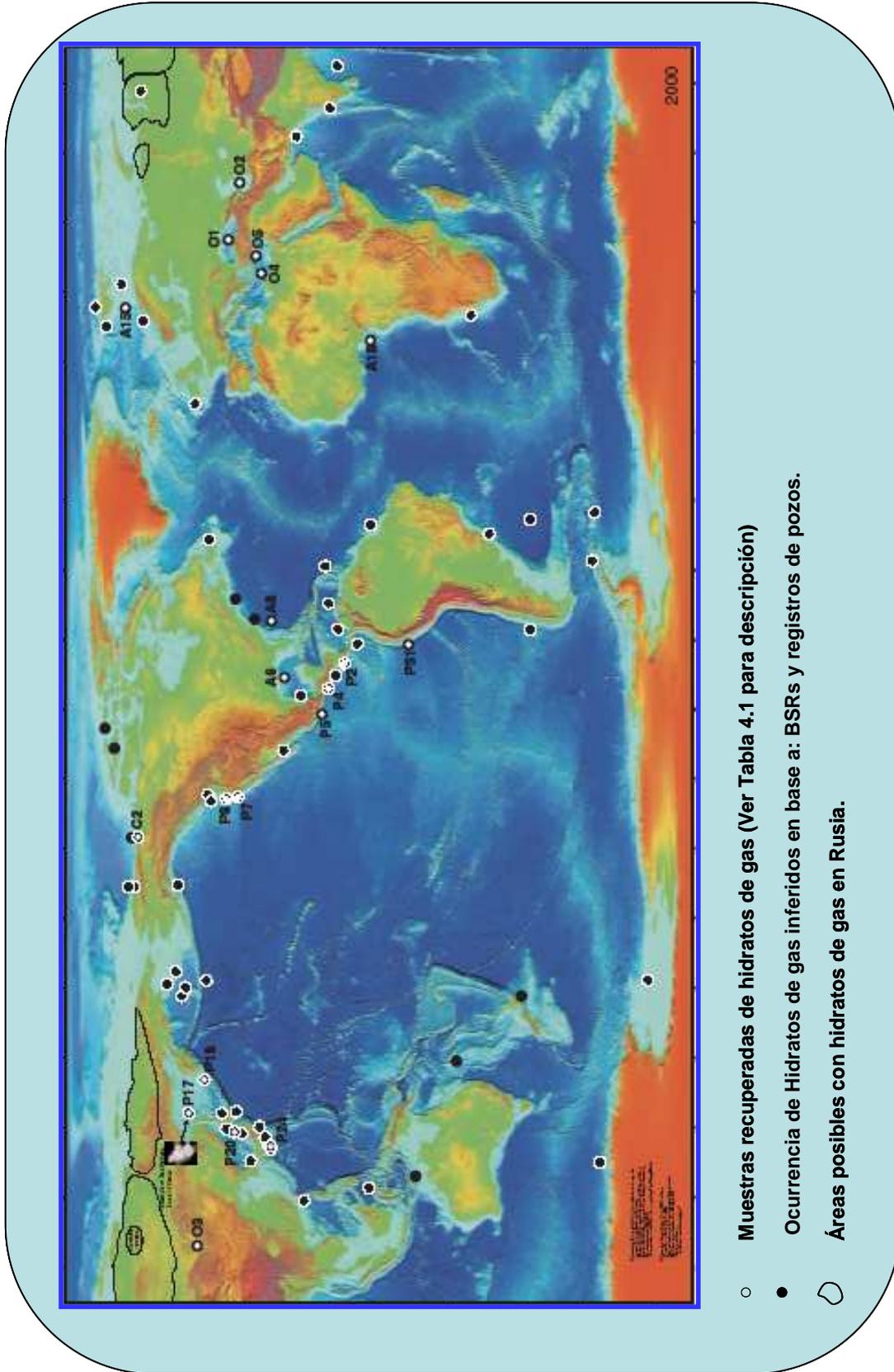


Figura 4.1. Localización mundial de yacimientos de hidratos de metano. Tomada de [Kvenvolden y Lorenson; 2000](#)

TABLA 4.1. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE YACIMIENTOS MUNDIALES DE HIDRATOS DE METANO		
CODIGO	LOCALIZACIÓN	DESCRIPCIÓN
P2	Trincheras Mesoamericana (Costa Rica)	
	DSDP Leg 84, Sitio 565	Inclusiones en lodos y arenas lodosas
	ODP Leg 170, Sitio 1041	Diseminados y laminares
P4	Trincheras Mesoamericana (Guatemala)	
	DSDP Leg 67, Sitio 497	Inclusiones en sedimentos
	Sitio 498	Cementante en arenas gruesas vitricas
	DSDP Leg 84, Sitio 568	Inclusiones en mudstones
	Sitio 570	Cenizas laminadas; nucleos masivos
P5	Trincheras Mesoamericana (México)	
	DSDP Leg 66, Sitio 490	Cenizas laminadas y lodo
	Sitio 491	Inclusiones en lodo.
	Sitio 492	Cenizas laminadas
P7	Cuenca del rio Eel (California)	Capas y nodulos en lodo
P8	Cuenca de Cascadia (Oregon)	
	DSDP Leg 146, Sitio 892	Agregados, capas en limos
	Hydrate Ridge	Capas , masivos en carbonatos
P17	Mar Okhotsk (Rusia)	
	Isla Paramushir	Capas
P18	Mar Okhotsk (Rusia)	
	Isla Sahkalin	Capas en limos y arcillas
P20	Mar de Japón (Japón)	
	ODP Leg 127, Sitio 796	Cristales en arenas con arcillas
P24	Trincheras de Nankai (Japón)	
	ODP Leg 131, Sitio 808	Fragmentos en núcleos lavados
P31	Trincheras de Perú-Chile (Perú)	
	ODP Leg 112, Sitio 685	Fragmentos en lodos
	Sitio 688	Granos en lodos
A6	Golfo de México (Texas y Louisiana)	
	DSDP Leg 96, Sitio 618	Nodulos, cristales en lodo
	Nodulos del Green Canyon	capas en escombros
	Nodulos del Garden Banks	capas en escombros
	Cañon del Mississippi	Piezas en sedimentos grueso
	Monticulos de Bush Hill en el piso oceánico	
A8	Blake Ridge (Sureste de USA)	
	DSDP Leg 76, Sitio 533	Fragmentos en lodos
	ODP Leg 164, Sitio 994	Fragmentos en arcilla
	Sitio 996	Nódulos, vetas en lodos
	Sitio 997	Núcleos masivos (aprox. 30 cm)
A15	Haakon-Mosby	
	(Norway) Inclusiones y placas	
A18	Delta de Niger (Nigeria)	Nódulos, dispersados en arcillas
O1	Mar Negro (Rusia)	Vetas en arcillas limosas
O2	Mar Caspio (Rusia)	Laminados en limos-arcillas
O3	Lago Baikal (Rusia)	Diseminados en arenas, limos
	Mar Mediterraneo	
O4	Amsterdam	Volcanes de lodo no descritos
O5	Kula	Volcanes de lodo no descritos
C2	Delta Mackenzie (Canadá)	Dispersos en arenas y gravas

Fuente: Kvenvolden; 2000

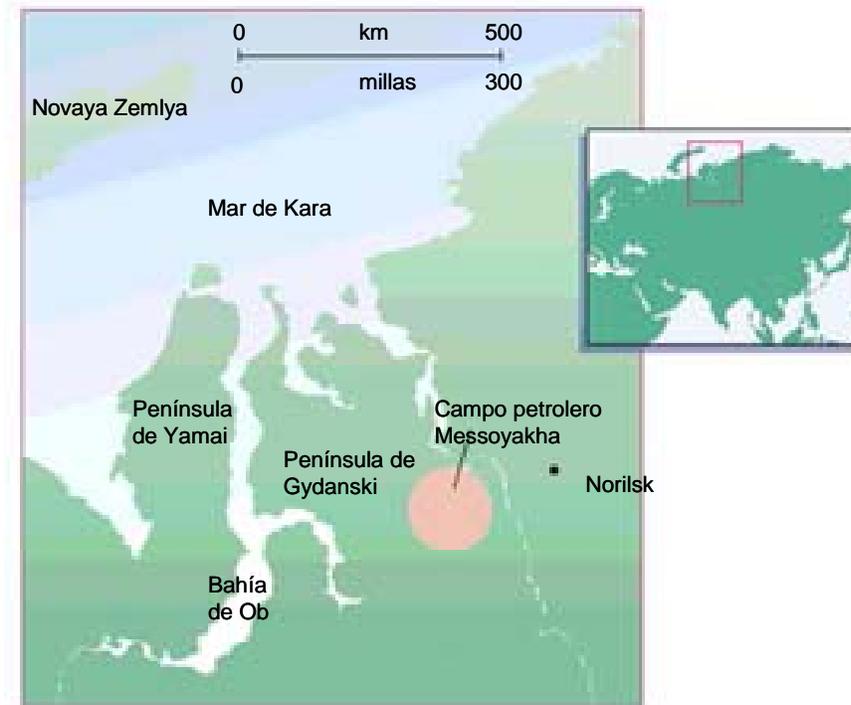


Figura 4.2. Localización del campo petrolero Messoyakha en Rusia, en el cual mucha de la producción de gas en este campo se asocia a la disociación de hidratos de metano. Tomada de Collett T. S., Lewis R., Uchida T; 2000.

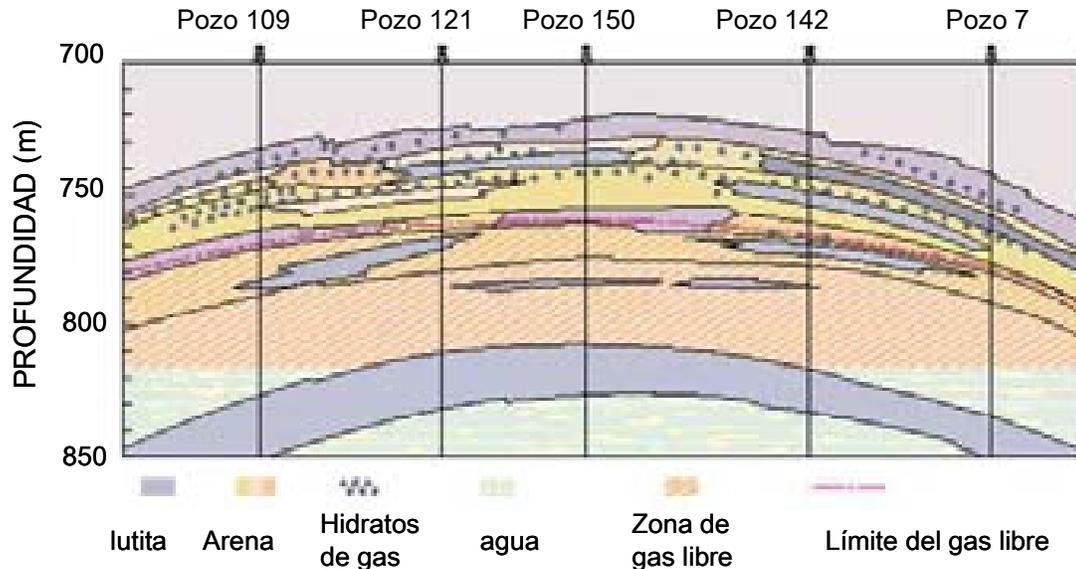


Figura 4.3. Sección del campo Messoyakha cuya variación en la presión provoca la disociación de los hidratos y por tanto una producción en la capa de gas libre a partir de ellos. Tomada de Collett T. S., Lewis R., Uchida T, 2000.

La producción empezó en 1969 desde la zona de gas libre del yacimiento y por un par de años las presiones disminuyeron como se esperaba. Posteriormente, en 1971 se midieron presiones y obtuvieron producciones mayores a lo esperado que fueron atribuidas a la producción de gas

proveniente de la capa de hidrato, es decir, la disminución de la presión en la capa de gas libre provocó una despresurización en la capa de hidrato liberándose así grandes cantidades de gas aumentando así la producción. Aproximadamente 36%, o 5 mil millones m^3 , del gas producido del **campo Messoyakha** se ha atribuido a la disociación de hidratos de gas (Collett, T.S, 2000).

Este método de despresurización para producir gas a partir de los hidratos funciona cuando hay gas libre asociado con la acumulación del hidrato, por lo que este proceso puede funcionar para los campos del Río Kuparuk-Bahía de Prudhoe en Alaska.

En el yacimiento de hidratos en el área del **Río Kuparuk-Bahía de Prudhoe en Alaska** (Figura 4. 4), en 1972, se recuperaron hidratos de gas en barriles cilíndricos presurizados del pozo de exploración Northwest Eileen 2 (ARCO y Exxon), en el talud norte de Alaska.

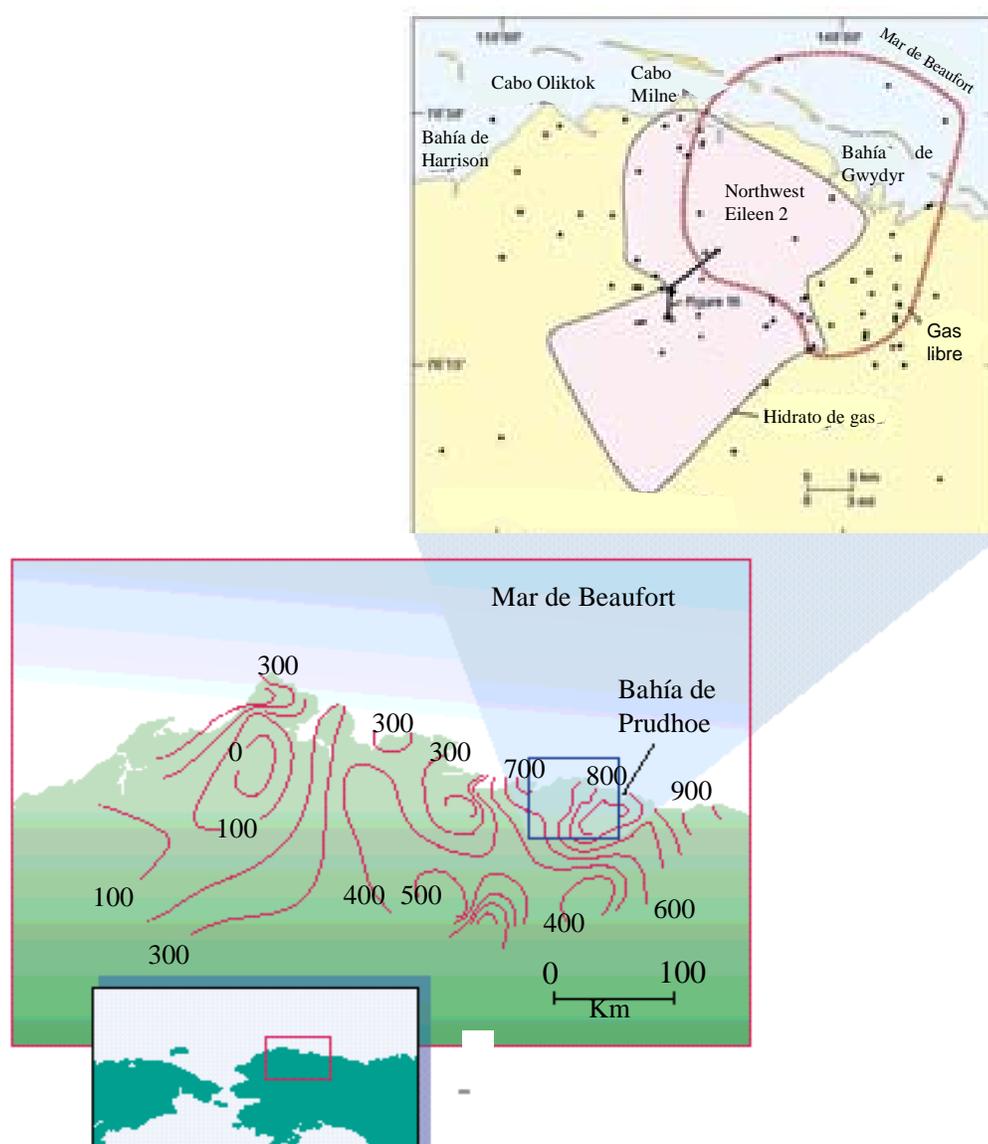


Figura 4.4. Hidratos en la región de Bahía de Prudhoe, pendiente norte de Alaska. Los intervalos de las curvas de contorno batimétrico se presentan en metros (Tomada de Collett, T. S. et al., 2000 y National Petroleum Council, 2007).

El espesor de la zona de estabilidad del hidrato de gas para el área de la **Bahía Prudhoe-Kuparuk** pudo calcularse a partir de los gradientes de temperatura y presión en la región. El análisis de los datos de registros de los 445 pozos en el talud 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. Éstos 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 indicativos de hidrocarburos. El incremento en el gas medido mediante el registro del lodo de perforación fue el mejor indicador de hidratos, pero su respuesta no era muy diferente al de un registro obtenido en una zona de gas libre (**Figura 4.5**). 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 (**Collett T.S., 2000**).

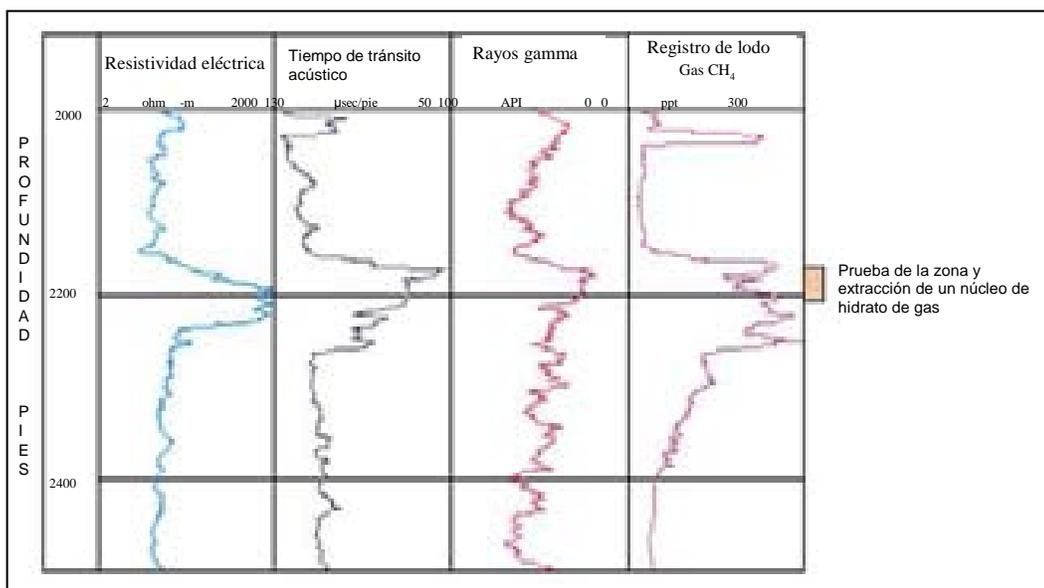


Figura 4.5. Registros obtenidos en el pozo Northwest Eileen 2 (ARCO y Exxon). Nótese el aumento en la velocidad sónica (carril 2) a lo largo de la zona de hidrato, como lo haría en una capa de hielo. La resistividad (carril 1) sufre un aumento debido al metano; el registro del lodo (carril 4) muestra un incremento en el gas de trasfondo, similar a la respuesta observada durante la perforación en una zona de gas libre (**Collett, T. S., Lewis, R., Uchida, T., 2000**).

A raíz de la necesidad de investigación específica del comportamiento del hidrato de gas, fue perforado el pozo de investigación **Mallik 2L-38** con la participación de organismos como: Japan National Oil Corporation (JNOC), the Geological Survey of Canada, Japan Petroleum Exploration Company (JAPEX) y la USGS; el pozo **Mallik 2L-38** alcanzó una profundidad de 1150 m sobre la costa norte del **Delta Mackenzie, Canadá** (**Ver figura 4.6 para su localización**).

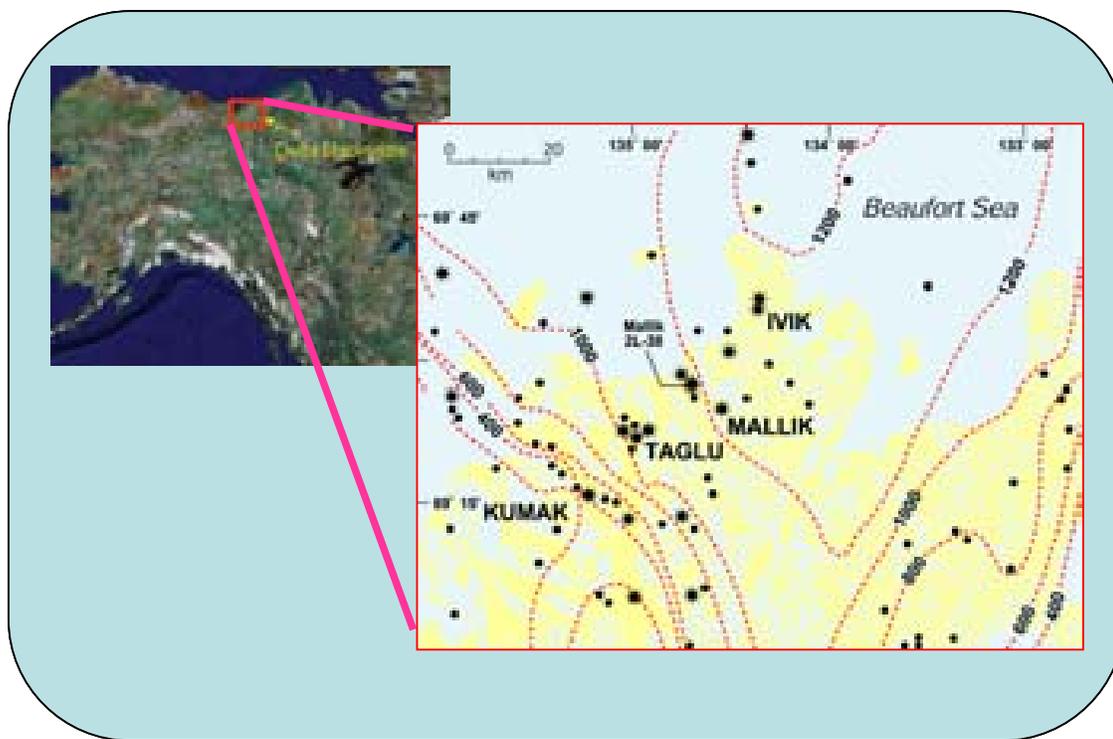


Figura 4.6. Localización del pozo de exploración y producción de hidratos de metano Mallik en el Delta Mackenzie, Canadá, mostrando líneas batimétricas. Tomada de [Timothy S. Collett, 2004](#).

Como parte del programa de investigación se obtuvieron muestras de núcleos, registros geofísicos de pozos y perfiles sísmicos verticales y compensados (VSP) (**Figura 4.7.**). El pozo permitió delimitar el concentrado de hidrato de gas el cual se pudo identificar perfectamente, y recuperó cantidades significativas de éste. Las capas de hidrato en esta región del permafrost exceden 110 m de espesor, en algunas partes tienen 80% de saturación de poro por hidrato (**Figura 4.8**). La cantidad total de gas insitu dentro de la estructura de Mallik se estima de aproximadamente 100 mil millones m^3 ([Dallimore et al., 1999](#); en [Hyndman, 2001](#)). Un segundo pozo de investigación (Mallik 2002) cercano al descrito fue perforado en el año 2002, en el que se realizaron pruebas de producción y se definieron las características geotécnicas de los hidratos de gas y su estabilidad a los cambios climáticos.

Las evaluaciones de hidratos de gas en la región del **Mar Beaufort- Delta Mackenzie** ([Smith y Judge;1995](#) en [Hyndman R.D et.al;2001](#)) demostraron que el 17% de 145 pozos terrestres perforados en el área evidencian la presencia de hidrato de metano, que está contenido en rocas sedimentarias clásticas de las secuencias de Kugmallit, bahía Mackenzie, y de Iperk. Por otra parte resulta relevante conocer que el contenido evaluado de hidratos en pozos marinos fue aún mayor, el 63% de 55 pozos. Smith y Judge (1995) han estimado en la región un contenido de gas natural en forma de hidratos de 16 trillones m^3 .

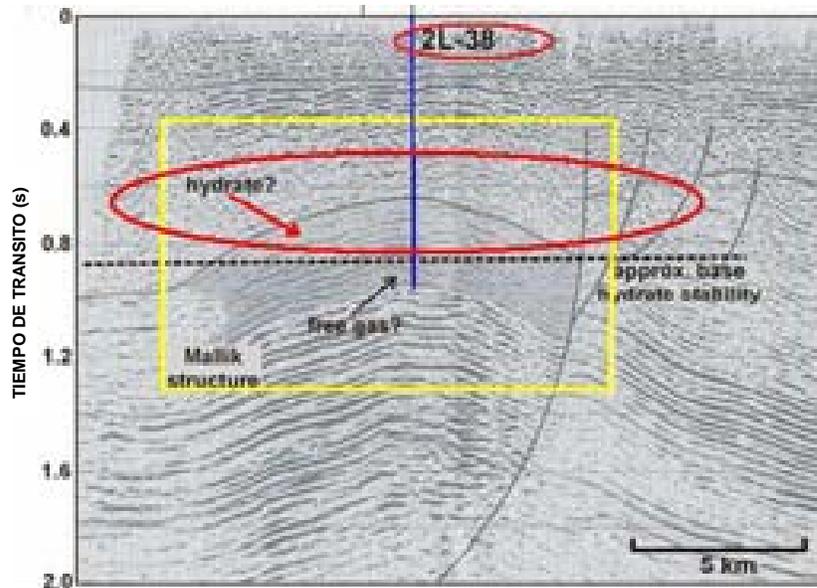


Figura 4.7. Sección sísmica que cruza la estructura de Mallik mostrando la localización del pozo de investigación que atraviesa la zona de estabilidad del hidrato de gas y alcanza la capa de gas libre (Hyndman;2001).

Pruebas de producción en el ártico (**Figura 4.9**) pueden también servir como un primer y relativo indicador de bajo costo de como la más grande fuente potencial de gas natural puede ser producida de los hidratos marinos (Working Document of the NPC Global Oil & Gas Study, 2007).

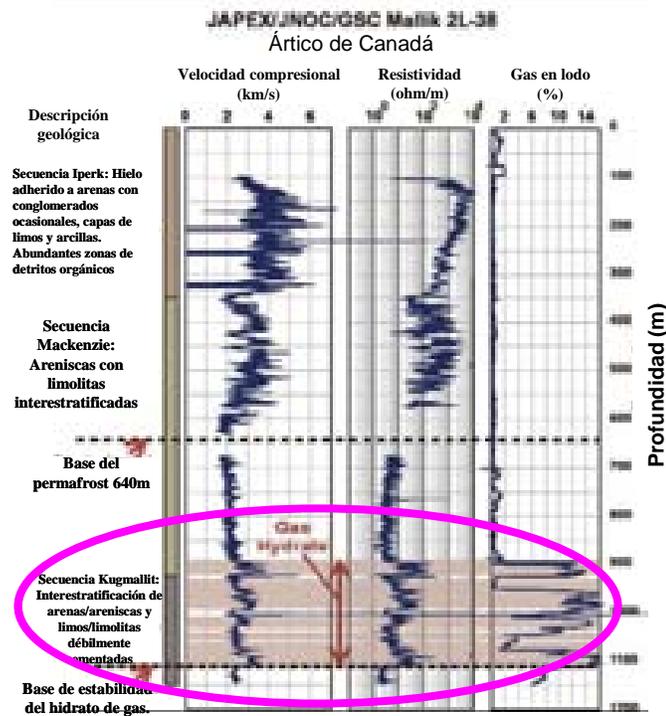


Figura 4.8. Registros geofísicos de pozos (sónico, de resistividad y del lodo de gas) del pozo de investigación Mallik. Obsérvese que tanto la velocidad y la resistividad aumentan con la presencia de hidratos. (Hyndman, 2001)



Figura 4.9. Pozo de investigación- producción de hidratos de metano, Mallik 2002, Delta Mackenzie, Canadá (Tomada de Ray Boswell, verano de 2005. [Fire in the ice](#)).

La arquitectura de los depósitos marinos puede diferir de los depósitos del Ártico, no obstante elementos de la tecnología de producción del Ártico, posiblemente pueden ser transferibles a escenarios marinos ([Working Document of the NPC Global Oil & Gas Study, 2007](#)).

IV. 2. JAPÓN.

Japón es uno de los países vanguardistas sobre el tema de exploración y explotación de hidratos de metano, debido a que es uno de los países desarrollados que no cuenta con reservas de hidrocarburos convencionales y que ve en estos yacimientos una alternativa de independencia de combustibles fósiles.

En los límites convergentes activos donde la generación de la tasa de sedimentos es alta, se tiene uno de los escenarios geológico-tectónicos donde se presentan una importante acumulación de yacimientos de hidratos de gas.

Con respecto al origen y evolución de los prismas acrecionales, la cuantificación y el aporte de los sedimentos juegan un rol importante. De acuerdo a estudios de prismas acrecionales modernos, existen dos tipos básicos: prismas acrecionales con dominio de clastos de grano grueso (arenas y limos) y prismas acrecionales dominados por arcillas. Cascadia (Canadá), Makran, Aleutianas, Manila, Sunda, Mesoamérica al sur de México, y sur de Barbados son ejemplos donde existen prismas acrecionales modernos con dominio de clastos gruesos, siendo

dominados por turbiditas y sedimentos hemipelágicos. El segundo tipo que es relativamente raro está dominado por sedimentos pelágicos/hemipelágicos con pocas turbiditas.

En la historia del Deep Sea Drilling Program DSDP, tres prismas acrecionales han sido investigados: Norte de Barbados, Mesoamérica y Nankai. El norte del prisma acrecional de Barbados fue perforado durante el Leg 78A (Biju-Duval, Moore et al; 1984, en XX) y 110 (Moore et al., 1988; Mascle y Moore et al., 1988; en Taira, A. et al., 1991), con buena penetración del décollement (detachment zone). Los resultados de estos estudios proveen importante información en la estructura e hidrogeología de un prisma arcilloso. En el Pacífico Mexicano en la trinchera mesoamericana se ha perforado el Leg 66 (Watkins., Moore., et al., 1982; en Taira, A. et al., 1991), enfocado en la evolución estructural de prismas acrecionales clásticos.

IV. 2.1. TRINCHERA DE NANKAI.

El escenario tectónico de la isla de Japón esta determinada por los límites convergentes de las placas Filipina, Europea, Pacífico y Norteamericana (**Figura 4.10**). Más particularmente, la trinchera de Nankai es una de las zonas importantes donde se tiene documentado la existencia de hidratos de Metano relacionado a una zona de subducción.

La trinchera de Nankai es una manifestación topográfica del límite de la zona de subducción entre la Cuenca de Shikoku y el Suroeste del Arco de Japón (**Figura 4.10**). La cuenca de Shikoku forma parte de la placa oceánica Filipina, la cual tiene dirección de movimiento al noroeste. Hacia el este, la trinchera converge entre los límites entre las islas Honshu y el arco Izu-Bonin (**Figura 4.10**). Las rocas del basamento al Suroeste del Arco de Japón están compuestos por prismas acrecionales antiguos de edad Paleozoica a Terciaria (Taira et. al; 1989 en Taira A et. al; 1991), intrusionadas y cubiertas por rocas ígneas del Mesozoico al Holoceno (**Figura 4.11 y Figura 4.12**)

En la **Figura 4.11** se muestran los sitios de exploración y perforación del Deep Sea Drilling Program y la Ocean Drilling Program desarrollados en la Trinchera de Nankai; Sitios: 582, Leg 87; 808, Leg 131; y 1173 a 1177, Leg 190.

La trinchera de Nankai es somera, con una máxima profundidad del agua de 4900 m (**Figura 4.13**), la cual puede ser atribuida a dos factores: la edad (Oligoceno-Mioceno) de la cuenca de Shikoku y el espesor de los sedimentos en la trinchera.

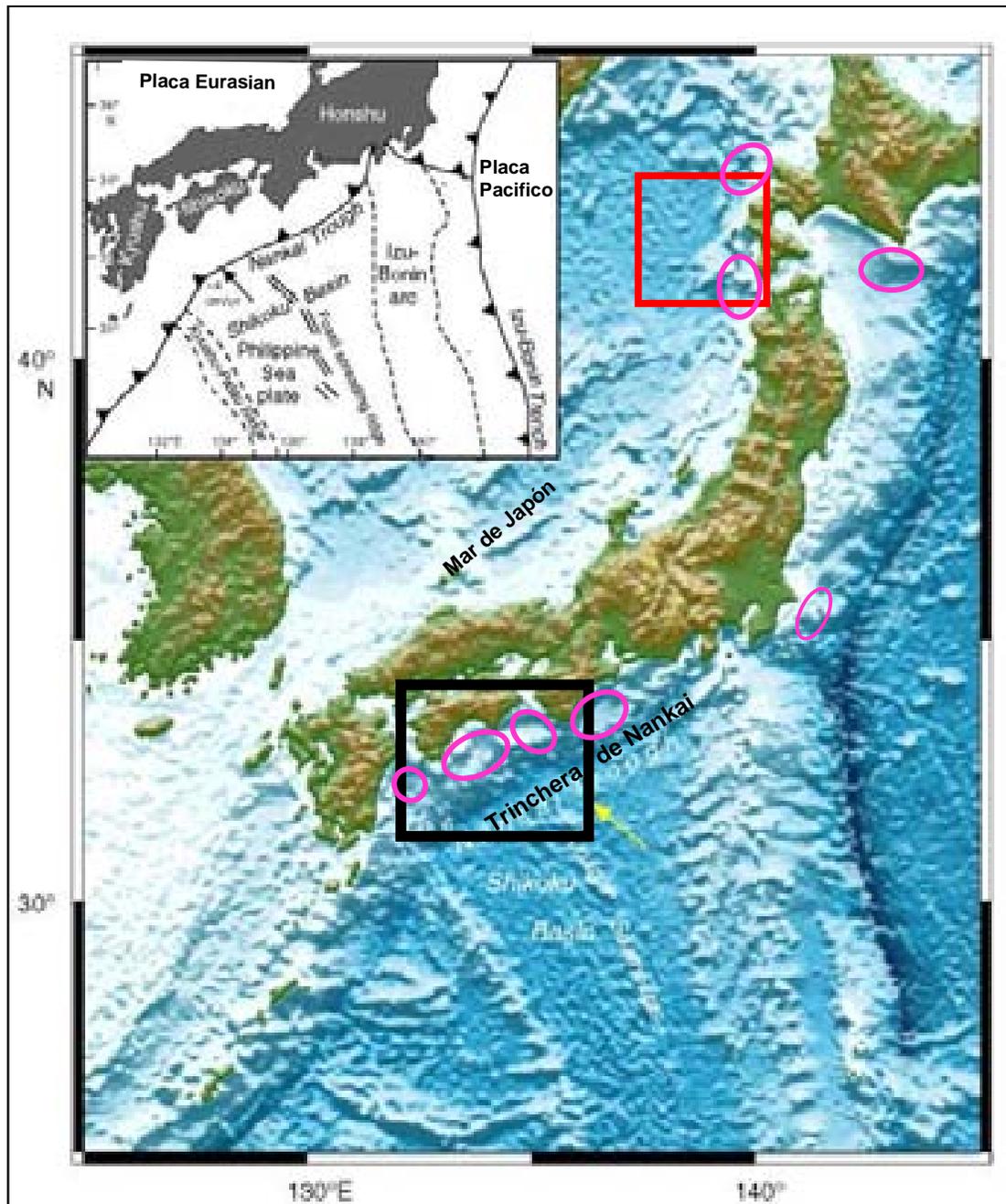


Figura 4.10. Mapa tectónico de la región del mar Filipino que incluye la trinchera de Nankai y el occidente de Hokaido. Los recuadros delimitan las áreas estudiadas por los organismos internacionales Deep Sea Drilling y Ocean Drilling Program, en aguas patrimoniales del Japón; el recuadro violeta delimita el área estudiada de la Trinchera de Nankai al Suroeste de Japón (Sitios mostrados en la **Figura 4.11**) y el recuadro rojo la región de Hokaido (Sitios mostrados en la **Figura 4.18**). La flecha muestra la dirección de convergencia de la Cuenca Shikoku debajo de Japón y las áreas en rosa muestra la distribución del BSR (Tomada de Moore, G. F., Taira, A., et al., 2001).

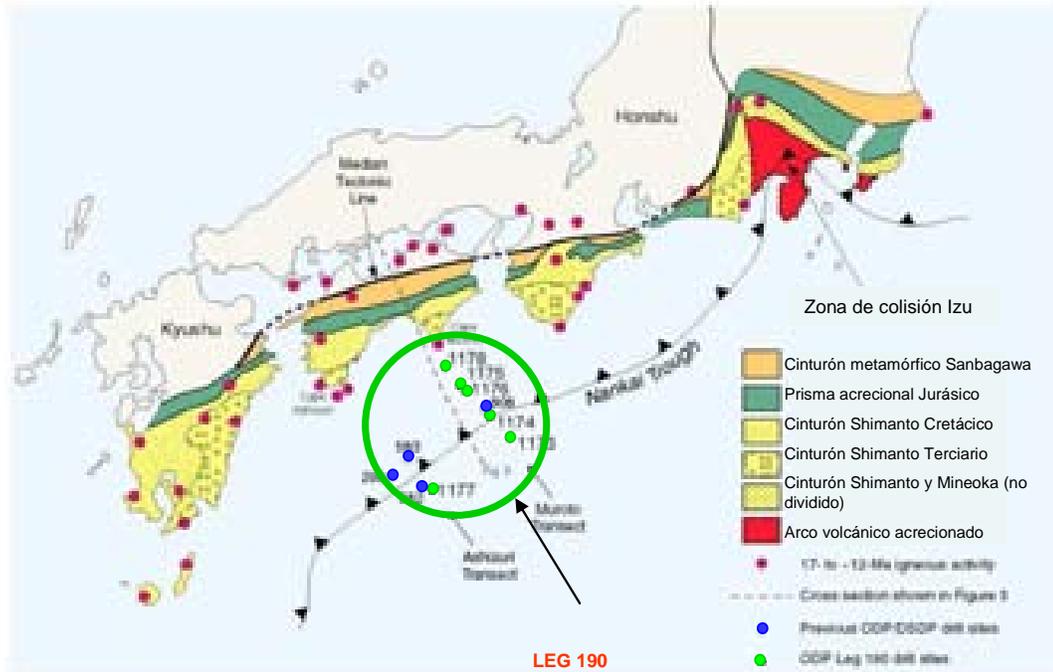


Figura 4.11. Mapa geológico del suroeste del frente de arco de Japón, donde se observan los sitios de perforación del Deep Sea Drilling Project y Ocean Drilling Program. Note la extensión de la actividad volcánica de 17 a 12 Ma, debida probablemente a la subducción inicial de la joven litosfera de la cuenca oceánica de Shikoku (Tomada de Moore, G. F., Taira, A., et al., 2001).

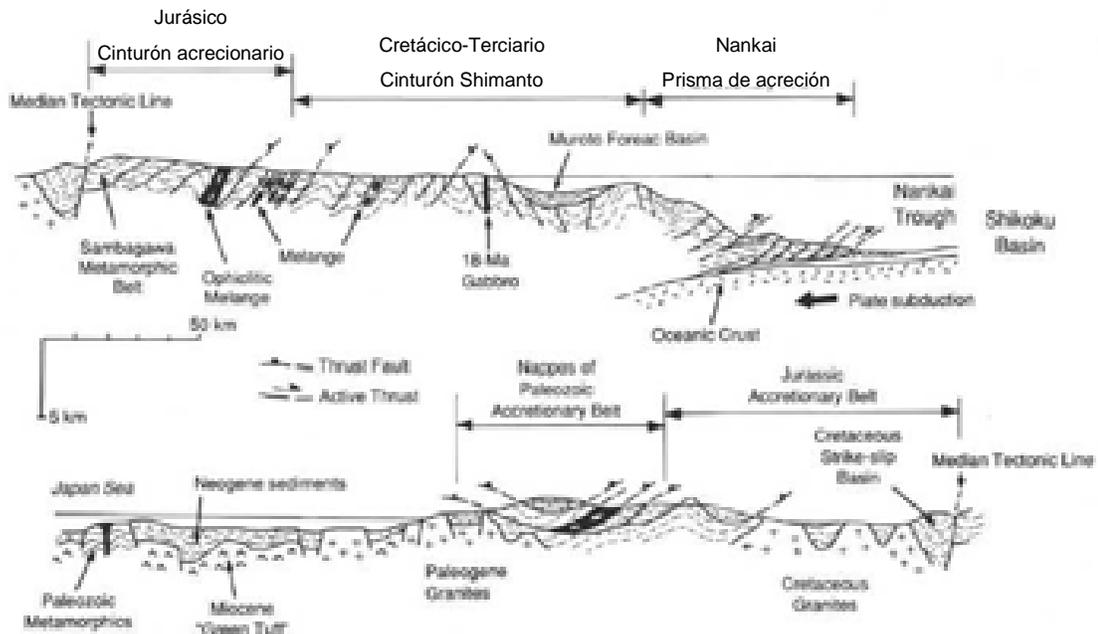


Figura 4.12. Sección geológica que cruza el suroeste del arco de Japón entre la isla de Honshu y la Cuenca de Shikoku las cuales están compuestas de pilas imbricadas del complejo acrecional del Paleozoico al Terciario. La línea tectónica media separa las rocas del basamento del arco del Suroeste de Japón, como el cinturón interior (lado del mar de Japón) y el exterior (lado del Pacífico). Los intrusivos graníticos del Cretácico-Paleógeno están solo presentes en el cinturón interior (después Taira et al., 1989; tomada de Taira, A., Hill, L., Firth, J., et al., 1991.)

Debajo de la cubierta sedimentaria, el basamento oceánico se encuentra a profundidades de 6000 m. Los resultados de los Legs 87 (Sitio 582) y 131 (Sitio 808) indican que la estratigrafía del piso de la trinchera esta compuesta de las siguientes unidades litológicas en orden descendiente: turbiditas de trinchera (Holoceno-Pleistoceno), transición de turbiditas a hemipelagitas (Pleistoceno), hemipelagitas con capas de tefra (Pleistoceno inferior a Plioceno superior), hemipelagitas masivas (Plioceno medio a Mioceno medio), volcanoclásticos ácidos (15 Ma), y pillow lavas (16 Ma).

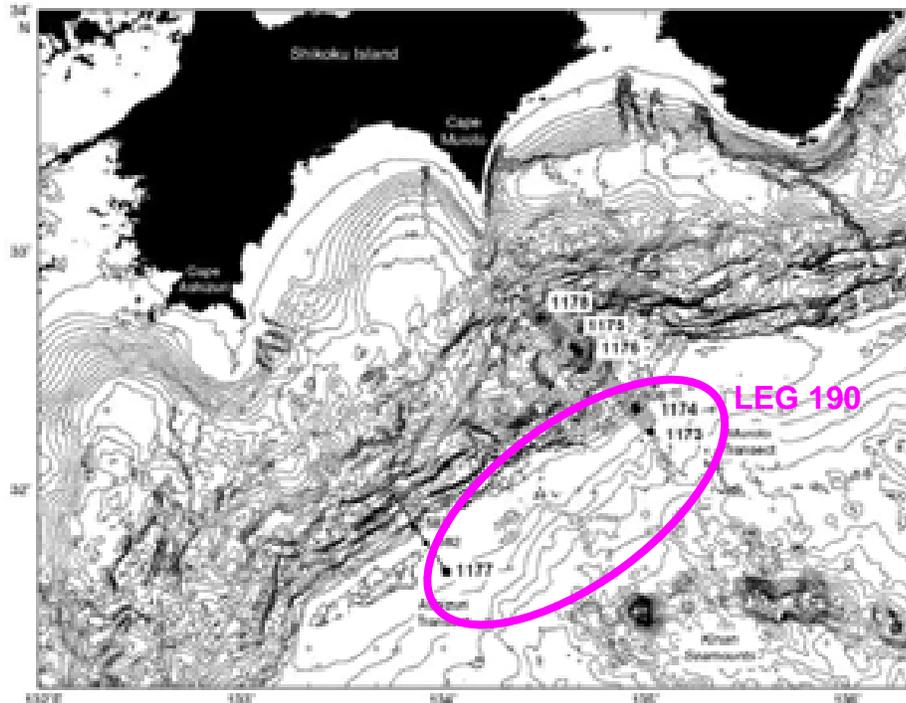


Figura 4.13. Mapa batimétrico en la trinchera de Nankai en donde se observan los sitios perforados por la Ocean Drilling Program. El intervalo de contornos va cada 100 m (Modificada de Moore, G. F., Taira, A., et al., 2001).

Los estudios geofísicos, geológicos y geoquímicos en la región de Nankai son muy completos; particularmente los estudios de sismica de reflexión/refracción (Aoki et al., 1982; Karing, 1986; Moore et al., 1990, 1991; Stoffa et al., 1992; Park et al., 1999; Park et al., 2000; Kodaira et al., 2000), batimetría completa y cubrimiento de side-scan (Le Pichon et al., 1987; Ashi y Taira, 1992; Taira y Ashi, 1993; Okino y Kato, 1995; Tokuyama et al., 1999), análisis de flujo de calor (Kinoshita y Yamano; 1986, Ashi y Taira; 1993), además de los legs del Deep Sea Drilling Project (DSDP)/Ocean Drilling Program (ODP) 31, 87, y 131, así como reciente adquisición de datos sísmicos 3-D (Ewing 9907/9908) (Bangs et al., 1999; Moore et al., 1999) hacen de esta área una de las más estudiadas en relación a la presencia de hidratos de metano marinos.

Los datos sísmicos proveen excelentes imágenes del decollement, y varios dominios estructurales del subsuelo; la batimetría y los datos del side-scan revelan rasgos superficiales que son útiles también para la localización de sitios para la perforación de pozos.

El estudio sísmico tridimensional realizado en el prisma de acreción occidental de Nankai de Muroto tuvo éxito en la proyección de la imagen de la estructura geológica y el detalle de la distribución del BSR (**Figura 4.14**) observándose una estructura geológica del área compuesta básicamente de imbricación, que está generalmente presente en un prisma acrecionario primario (**Figura 4.15**).

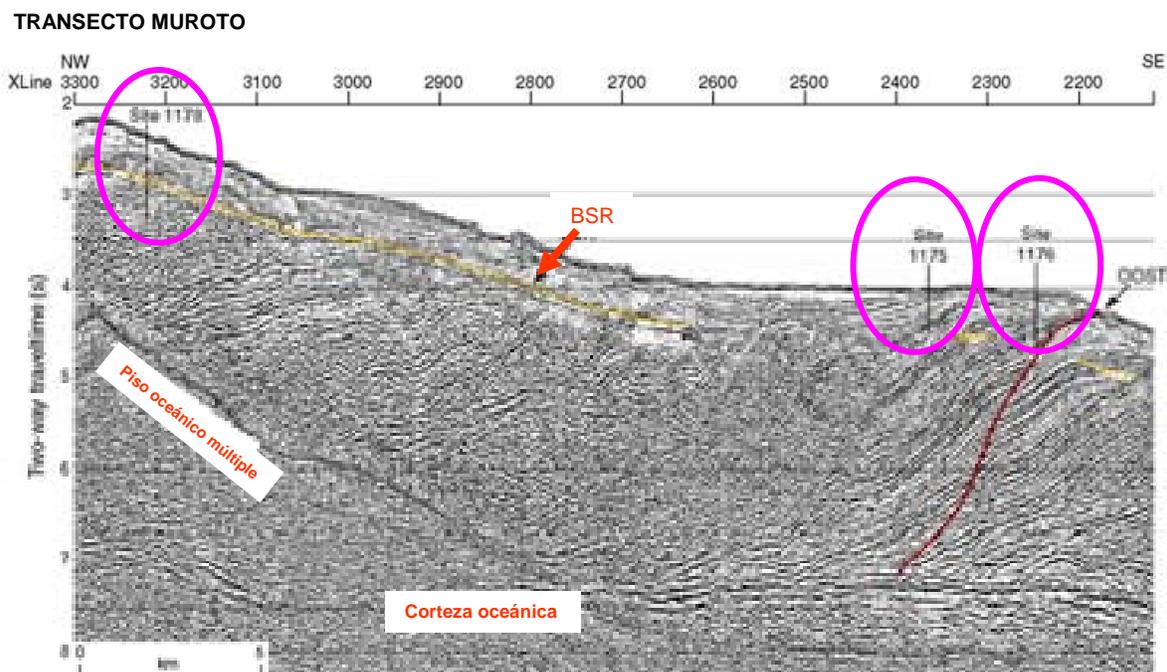


Figure 4.14. Perfil de sísmica de reflexión a través del transecto Muroto, Trinchera de Nankai., sitios 1175, 1176 y 1178 a partir de los datos 3-D de Bangs et al (1999) y Moore et al (1999). Fuente: Moore, G. F., Taira, A., et al; 2001

La topografía y la estructura geológica tienen influencia en la distribución del BSR en el área de estudio, los valores del flujo de calor calculados a profundidad del BSR indican una convección fluida más intensa que ocurre hacia la base del prisma de Nankai (**Figura 4.15**), estos fluidos emigran generalmente hacia arriba a lo largo de las capas porosas en los estratos y los planos de falla, y es probable que el volumen importante de líquido sea proveído a partir del empuje hacia delante en los bloques de falla (**Figura 4.15**).

En esta área, son factores la topografía y la estructura geológica en la distribución y la profundidad de BSR. La ocurrencia del BSR y la formación de los depósitos del hidrato de gas se pueden relacionar con las variaciones críticas en la estructura geológica.

El reflector de simulación de fondo (BSR) se considera como el fondo de estabilidad del hidrato del gas y es sello de una capa de gas libre hacia la base. Se sabe a partir de los estudios anteriores realizados en el prisma de acreción de Nankai del suroeste de Japón, que el BSR tiene una amplia distribución dentro de este prisma.

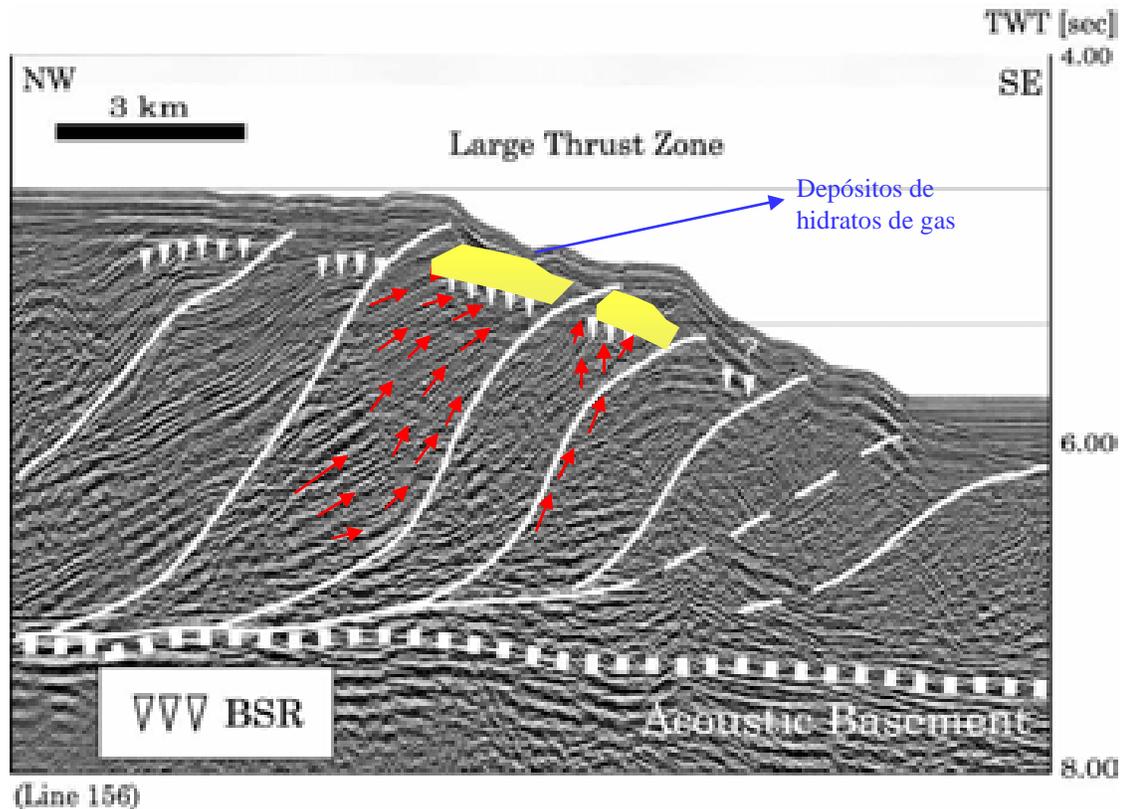


Figure 4.15. Perfil sísmico del prisma de acreción de Nankai, Japón., con la ocurrencia del BSR a lo largo de la zona de empuje. Las flechas rojas muestran la dirección de migración de fluidos a través de las capas porosas y los planos de fallas para dar origen a depósitos de hidratos en el frente de empuje (Tomada de Sumito Morita, sin fecha).

IV. 2.2. HOKAIDO.

El leg 127 del Ocean Drilling Program perforó satisfactoriamente las rocas volcánicas que sobreyacen a la cuenca profunda del mar de Japón. En la región de Hokaido (**Figura 4.16**), se han recuperado muestras de hidratos de metano en la Sección 127-796-12H-4 del Sitio 796. Una muestra sólida de este hidrato de gas, se mantuvo aislado para su análisis y el agua remanente después de su disociación fue analizada por iones mayores.

El análisis de la contribución del agua salina (agua de mar y agua de poro), basada en la salinidad, Na, y datos de contenido de Cl, promedió alrededor del 35% del hidrato investigado; la salinidad del agua pudo haberse debido a la contaminación durante la recuperación del núcleo o durante el crecimiento de los cristales del hidrato de gas (Taira, A. et al., 1991).



Fig.4.16. Mapa de localización del área correspondiente al sitio 796 mostrando los rasgos batimétricos. Los intervalos batimétricos son cada 500 m (tomada de Tamaki, K., Pisciotta, K., Allan, J., et al; 1990)

Usando las concentraciones de Mg, Li y sulfato, la proporción de agua marina y agua de poro puede ser estimada. Los rangos de contaminación de agua marina esta en rangos de 20 a 40% del componente salino del hidratos, mientras que el agua de poro de la muestra contribuye en un 60% a 80% en el contenido de iones del agua.

En la salinidad observada, las anomalías de Na y Cl generalmente se asocian con la ocurrencia de hidratos de gas (Jenden y Gieskes, 1983; Hesse et al., 1985; en Taira A. et al; 1991) los cuales son estables por debajo de 1km de profundidad de agua (Kvenvolden y Barnard, 1983; en Taira A. et al, 1991); por encima de esta profundidad éstos comienzan a descomponerse. La estabilidad del hidrato de gas también depende de la temperatura. Asumiendo un gradiente geotérmico de 173°C/km para el sitio 796, la temperatura entre 21 ° y 23° C debe ser alcanzada a la profundidad de 115- 135 mbsf. Este rango de temperatura puede impedir la existencia de hidratos en profundidades mayores (Kvenvolden y McDonald, 1985; en Taira A. et al, 1991). La salinidad, las anomalías Na y Cl son centradas inmediatamente alrededor de este rango (Figura 4.17). Otro prerrequisito para la formación de capas masivas de hidratos de metano puede ser la presencia de un buen espacio poroso, el suficiente para el crecimiento cristalino de los clatratos.

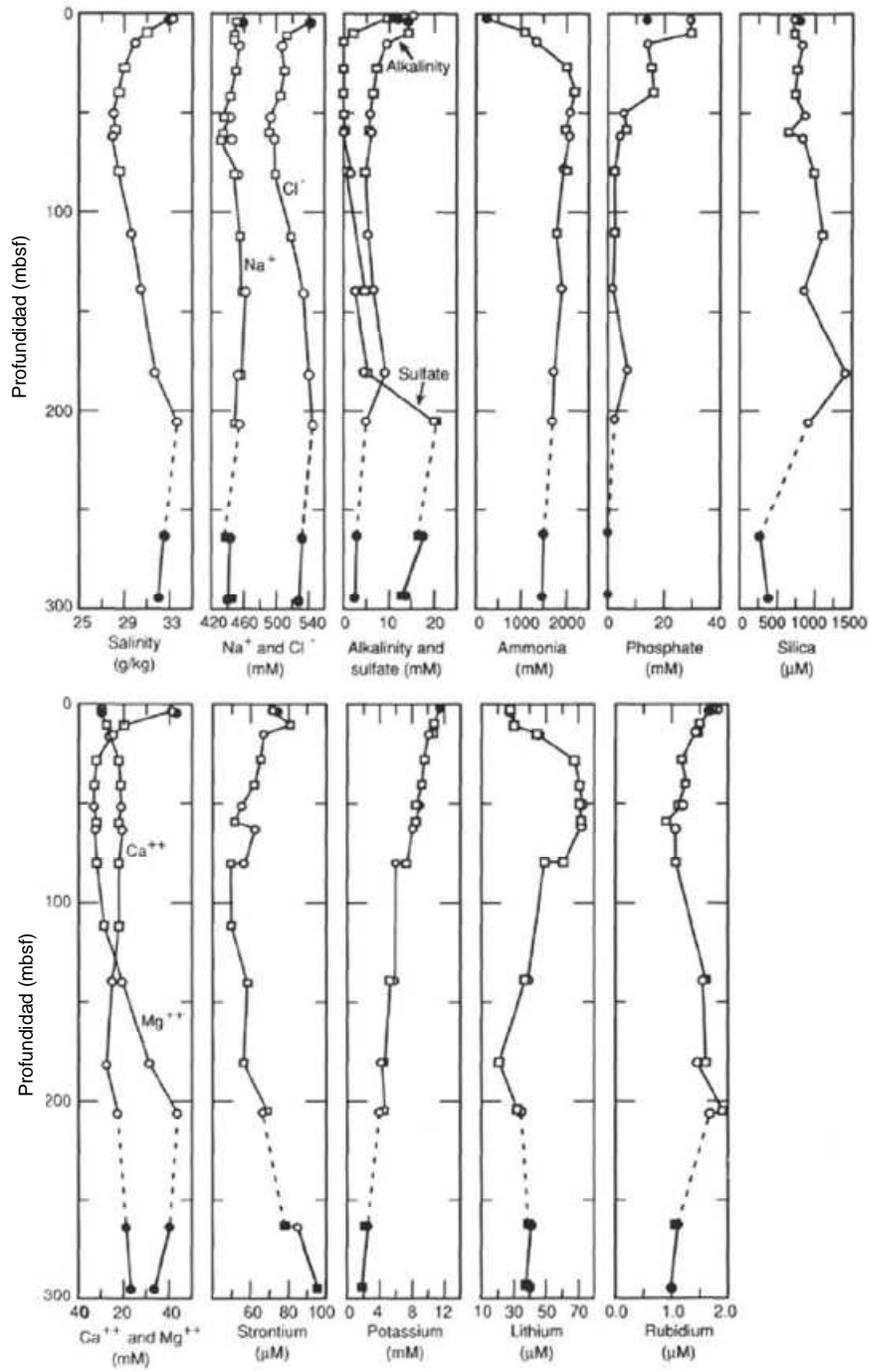


Figura 4.17. Perfiles a profundidad de la salinidad, sodio, cloro, sulfato, alcalinidad, amonio, forfato, silice, calcio, magnesio, estroncio, potasio, litio y rubidio, de los pozos 796 A (puntos blancos) y 796B (puntos negros) de la Ocean Drilling Program en la region de Hokaido, Japón. [Tamaki, K., Pisciotta, K., Allan, J., et al., 1990](#)

Las arenas recuperadas en este sitio de perforación representan sitios ideales para la formación masiva de hidratos de gas, la química del agua de poro de más arriba de 100 m en el sitio 796, reflejan la presencia de hidratos de gas, los cuales producen la salinidad y anomalía de NaCl

centrada alrededor de 50 mbsf. La ocurrencia de hidratos de metano resulta de la ausencia de sulfatos en profundidades relativamente someras (14mbsf) seguida de la metanogénesis.

Dos muestras de hidratos de gas fueron recuperadas en sedimentos arenosos del pozo 796 en aproximadamente 90 mbsf; una muestra fue el hidrato contenido en granos de arenas y otra muestra aparentemente en forma cristalina, de aproximadamente 5 mL en volumen.

El hidrato de gas encontrado en el sitio 796 parece ser muy disperso en los sedimentos, por lo que no fue identificada ninguna capa de hidrato ni la presencia del Bottom Simulating Reflector (BSR).

Los resultados geoquímicos indican concentraciones de metano de entre 7,300 y 820,000 ppm y niveles de etano que varían de entre 8 y 421 ppm, no encontrándose moléculas de hidrocarburos pesados en las muestras recuperadas; el ploteo de C1/C2 con la profundidad en el sitio 796 se muestra en la **figura 4.18**. La distribución de metano es más elevada hasta el límite de 175 mbsf de sedimento, donde el valor de C1/C2 radio de 1000 indica una fuente de gas biogénica, el cual también es soportado por los perfiles de sulfatos en el agua de poro.

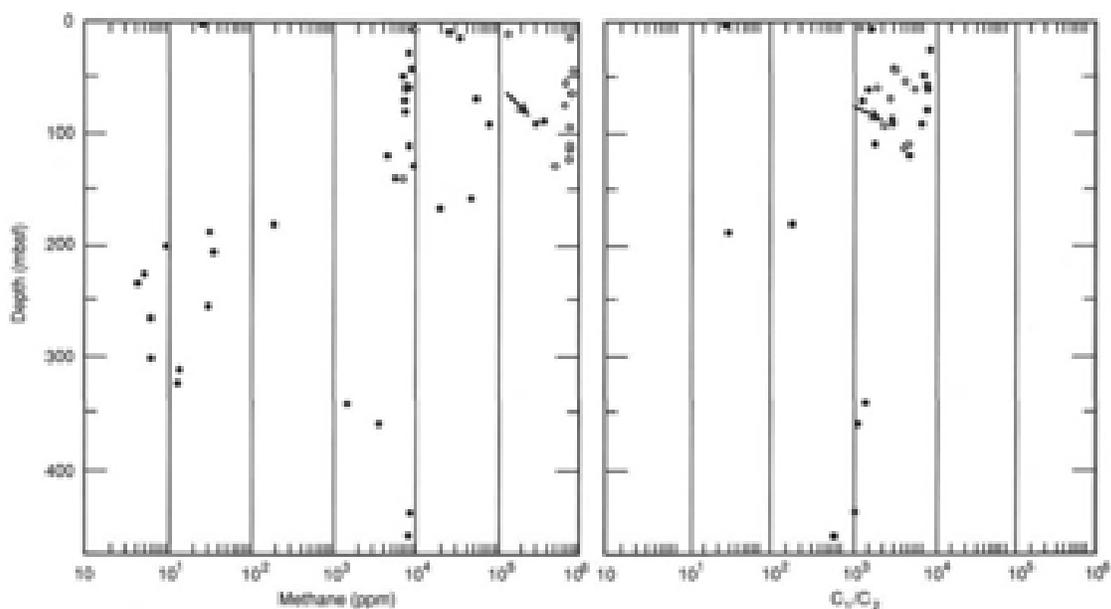


Figura 4.18. Concentraciones de metano (ppm) y ploteo de radio C1/C2 con la profundidad de dos muestras obtenidas en el sitio 796, Hokaido, Japón. Las flechas indican los valores obtenidos de dos muestras de hidratos de gas. (Tamaki, K., Pisciotta, K., Allan, J., et al., 1990).

IV. 3. CANADÁ.

Canadá es otro de los países desarrollados que ha destinado gran presupuesto económico a programas de exploración y explotación de hidratos de metano, y cuyos investigadores participan en asociación con sociedades científicas internacionales como el United States Geological Survey (USGS) y el Japan Petroleum Exploration Company (JAPEX).

En los mares patrimoniales y cercanos a la zona ártica de Canadá, se tienen documentados dos zonas con presencia de hidratos de gas: uno en la Costa Oeste de la isla de Vancouver y Norte de Cascadia, y el segundo en la región del permafrost del Ártico, Delta Mackenzie, en el Mar Beaufort (**Figura 4.19**).



Figura 4.19. Localización de pozos con evidencia de hidratos de gas en el Delta Mackenzie y Oeste de la isla de Vancouver, Canadá

IV.3.1. COSTA OESTE DE VANCOUVER.

La investigación sísmica en la costa Oeste de Canadá, al Norte de Cascadia ha determinado la presencia de hidratos de gas a partir de la detección de BSR delimitados con datos de multicanales sísmicos. La región ha sido de gran interés de investigación y se han realizado perforaciones como parte del programa Ocean Drilling Program (*ODP site 889 y 890 ;Leg 146*) en 1993 para la exploración de hidratos (**Figura 4.20**) y posteriormente cuatro sitios (U1325, U1326, U1327, y U1329) (**Figura 4.20**) que cruzan el margen norte de Cascadia fueron establecidos durante la Expedición 311 en el año de 2006, dentro del programa de la Integrated Ocean Drilling Program (IODP) para estudiar la ocurrencia y formación de hidratos de gas en complejos acrecionales. Sumado a estos sitios, fue establecido el sitio (U1328) en un cold vent con flujo activo de fluidos (**Figura 4. 20 y Figura 4.26**).

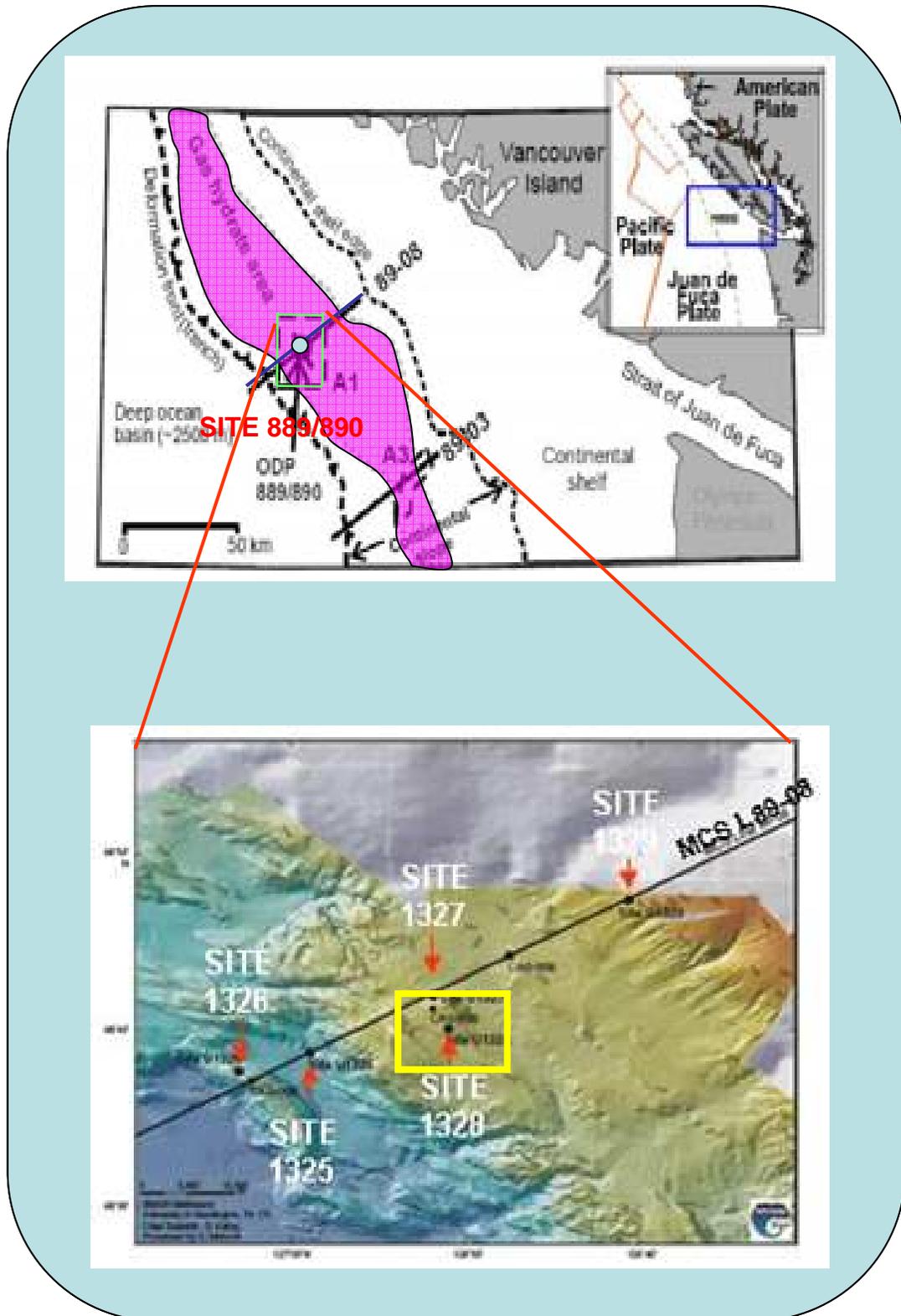


Figura 4. 20. Mapa de localización de los sitios 889/890 (ODP), U 1325-U1329 (Expedition 311). El sitio U1328 (recuadro amarillo) corresponde a un cold vent con hidratos de metano (Tomada de Hyndman R.D; 2001, y Collet; 2006)

Los registros geofísicos de bajo del pozo, realizados por la ODP y el análisis de núcleos han revelado la presencia de concentraciones de hidratos de gas y gas libre en los sitios perforados (**Figura 4. 21**). Los estudios sísmicos, descritos por Westbrook et al. (1994), revelan un BSR a la profundidad de 220 m que está asociado con depósitos de hidratos de metano que fueron intersectados por los pozos 889/890 de la ODP. La concentración de hidrato ha sido estimada por Hyndman et al. (1999) a partir de registros de resistividad bajo el pozo y datos de laboratorio, y por Fink y Spence (1999) basado en datos de reflexión sísmica. Sobre datos sísmicos convencionales de multicanales (baja frecuencia) se observó un BSR de aproximadamente 20-30 km a lo largo de muchos de los 250 Km de longitud del talud continental de la Isla de Vancouver ([Hyndman R.D, 2001](#)) (**Figura 4.21**).

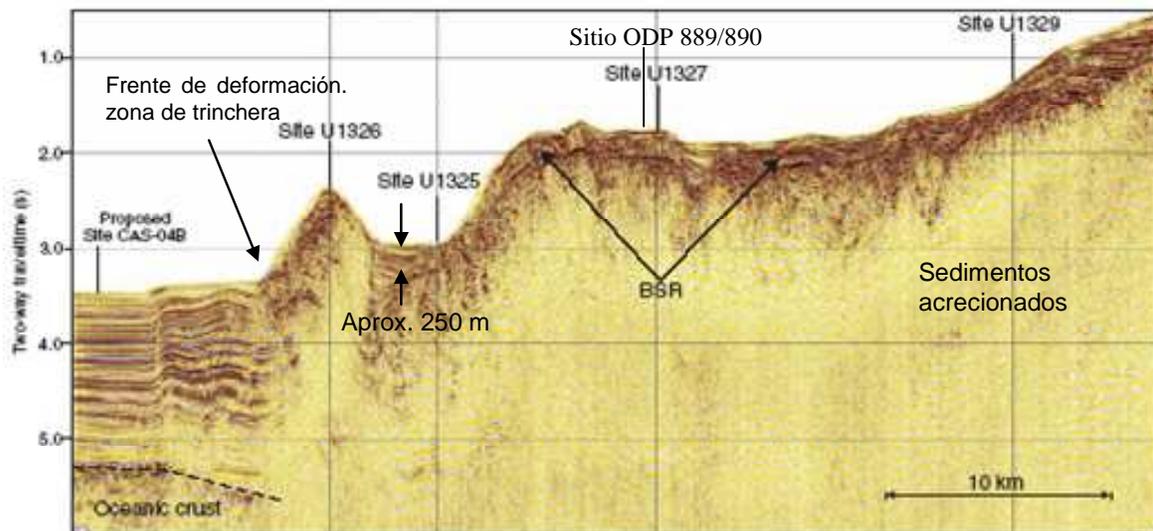


Figura 4.21. Perfil de multicanal sísmico línea MCS 89-08 (ver figura 4.20), que cruza el margen Norte de Cascadia, mostrando los sitios de exploración de hidratos de gas Expedition 311 (Sitios U1326, U1325, U1327, y U1329) y ODP 889/890. Obsérvese el marcado BSR en una extensión de 20-30 Km ([Modificada de Riedel, M., Collett, T.S. et al., 2006](#)).

Por encima del BSR la velocidad sísmica se incrementa alcanzando valores cercanos a los 1900 m/s, indicando la presencia de hidratos en los poros.¹ Por extrapolación de las velocidades más profundas en los sedimentos, se percibe que en el BSR los hidratos producen un incremento en la velocidad de alrededor de 250 m/s. El registro sónico a partir del ODP Site 889 (Westbrook, et al; 1994) provee información detallada de la velocidad en el rango de 50 mbsf a los 225 mbsf donde se encuentra el BSR. (**Figura 4.22**).

¹ Riedel M., Hyndman R.D., Spence G D., Chapman R., Novosel I. **Marine Gas Hydrates off Canada's West Coast**. Geological Survey of Canada, Pacific Geoscience Centre, Sidney, BC.

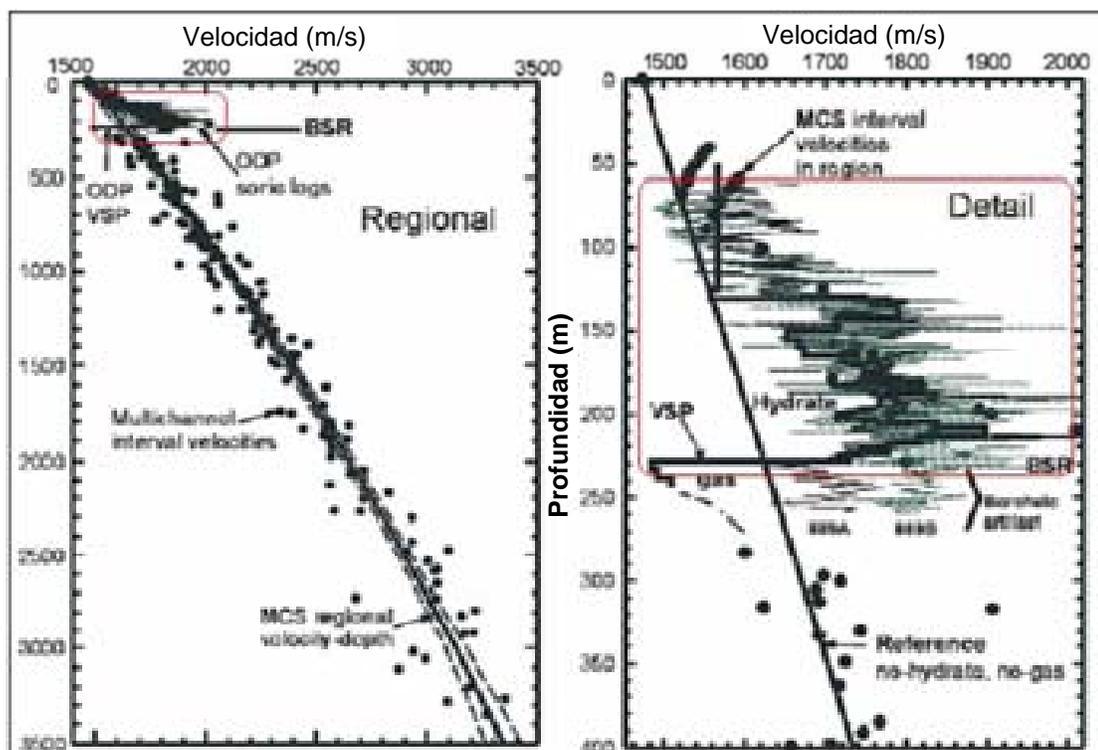


Figura 4.22. Velocidades en un intervalo del multicanal sísmico en el área del Sitio 889/890 de la ODP, comparado con el registro sísmico del pozo (Tomada de Hyndman, 2001).

La estimación de la concentración de hidratos de gas fue obtenida usando velocidad sísmica y resistividad eléctrica. Dos diferentes modelos han sido usados para relacionar la velocidad sísmica con la concentración de hidratos: a) Reducción de la porosidad debido al relleno del espacio de poro por hidrato (Yuan et al, 1996), y b) El tiempo promedio aproximado en una mezcla de hidrato, agua y sedimento (Yuan et al., 1996,1999; Lee et al., 1993). Ambos modelos determinan concentraciones similares de alrededor 20-30% del espacio de poro (10-15% de volumen total) sobre 100 m cercanos al BSR, y una capa subyacente de 10-20 m con menos del 1% de gas libre. (Figura 4. 23).

Durante la expedición 311, un total de 1217.76 m de núcleos de sedimento fueron recuperados por sofisticados sistemas de barrenación. Evidencias indirectas de la presencia de gas hidrato incluyen resistividad eléctrica y velocidad de ondas P en registros de pozos (Figura 4.22) y baja salinidad intersticial, numerosos puntos fríos en los infrarrojos (Figura 4. 24), así como texturas sedimentológicas moussy/soupy en núcleos recuperados.

El Hidrato de metano fue observado directamente en los núcleos recuperados y más de 31 muestras de gas hidrato fueron preservadas en nitrógeno líquido para las pruebas en laboratorio.

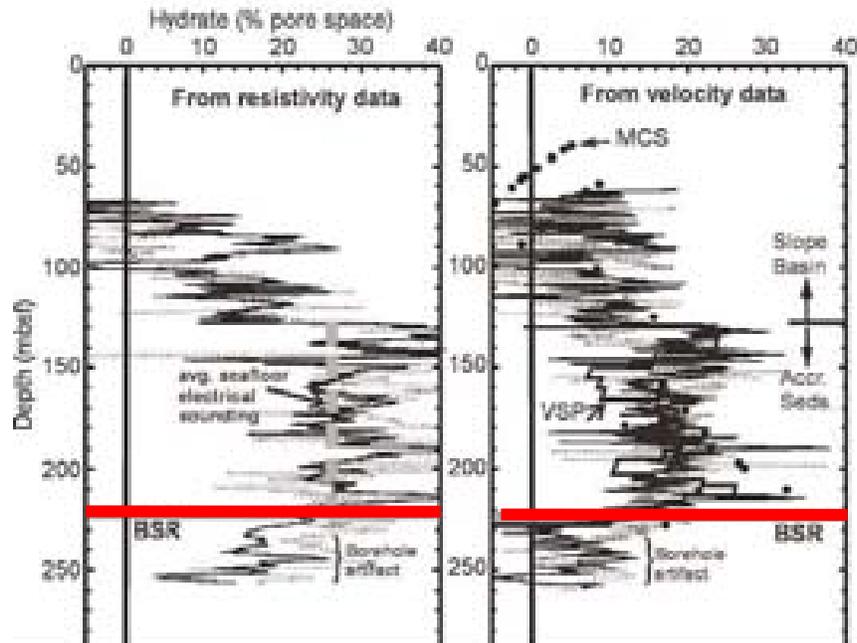


Figure 4.23. Estimación de la saturación de hidratos en el sitio 889/890 de la ODP a partir del registro eléctrico y sísmico (Hyndman, 2001).

Las observaciones realizadas demuestran que el hidrato de gas de estos sitios ocurren principalmente dentro de arenas turbidíticas de grano grueso y limos.

La ocurrencia del gas hidrato parece ser controlada por varios factores importantes, que hacen variar significativamente la concentración de hidratos de gas en los sedimentos a lo largo del margen; estos factores son:

- 1) La solubilidad local del metano ligada con la salinidad del agua de poro.
- 2) Proceso de advección de fluido/gas y
- 3) Aporte de sedimentos adecuados (sedimentos de grano grueso).

En modelos previos de formación de hidratos en prismas acrecionales, se especulaba que la mayor concentración de hidratos de gas ocurría cerca de su zona de estabilidad (ZEHG), sobre el BSR, con concentraciones gradualmente decrecientes hacia arriba como resultado de la advección del fluido controlado por el régimen tectónico. Los resultados de la expedición muestran que las mayores concentraciones ocurren en el tope de su zona de ocurrencia, en un punto donde el promedio de metano en el fluido de poro excede el rango de solubilidad local del hidrato. Esta condición fue más evidente en el Sitio U1326 (**Figura 4.25a**) y U1327 (**Figura 4.25 b**), en donde se observa, a partir de secciones, que el hidrato de gas tiene espesores de varias decenas de metros a profundidades aproximadas de 50 y 100 metros debajo del piso oceánico (mbsf) respectivamente; las concentraciones exceden el 80 % del volumen de poro.

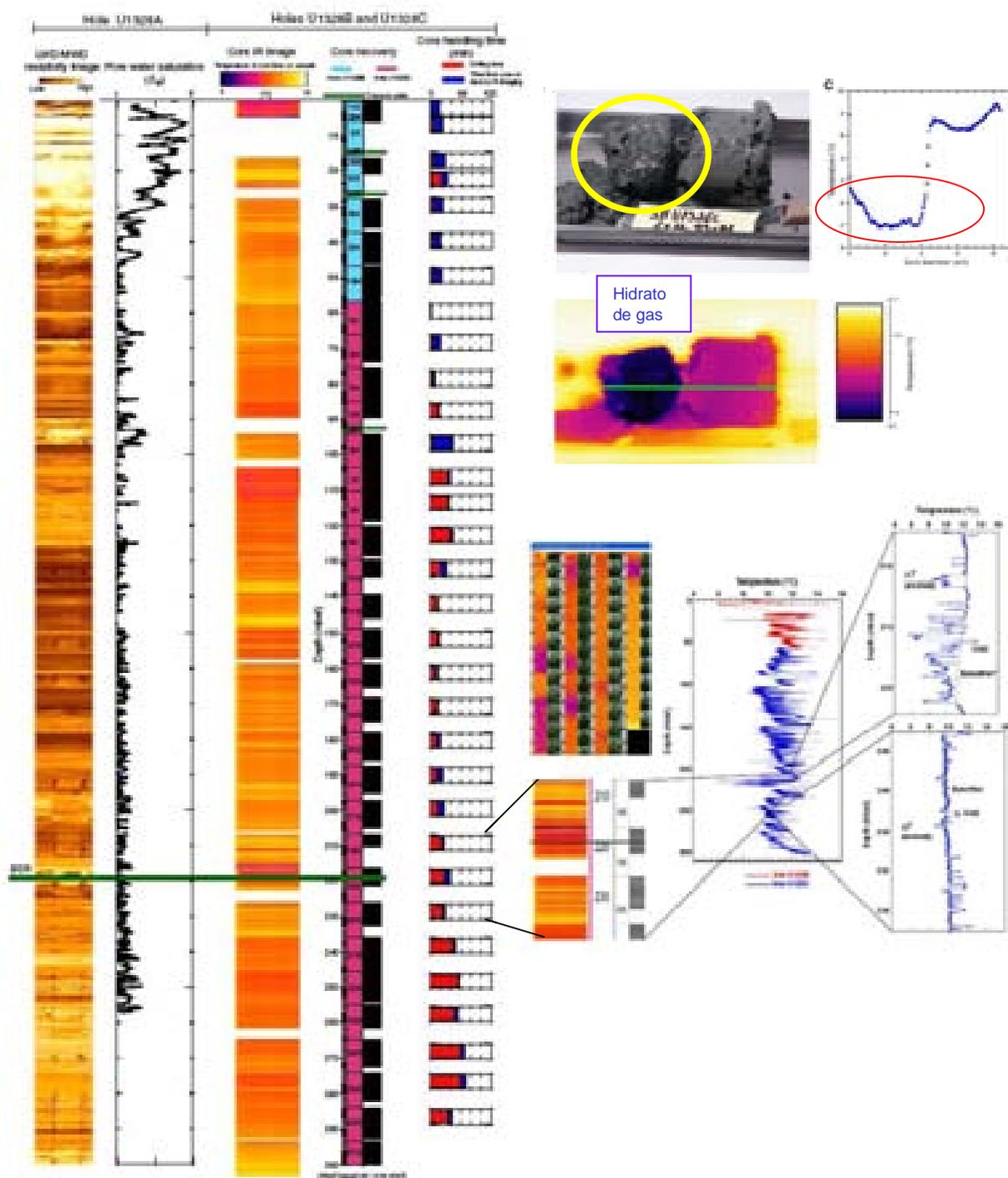


Figura 4.24. A Correlación de estudios en el sitio U1328 (Canadá) donde se define la base del BSR a 220 mbsf. Los puntos fríos en las imágenes infrarrojas marcan la presencia de cuerpos de hidratos de metano. B. Fotografía, Imagen infrarroja, y perfil de temperatura de una muestra de hidrato de gas (muestra 311-U1326C-6X-4, 83–96 cm) recuperada del sitio U1326 (Canadá) (Riedel, M., Collett, T.S. et al., 2006).

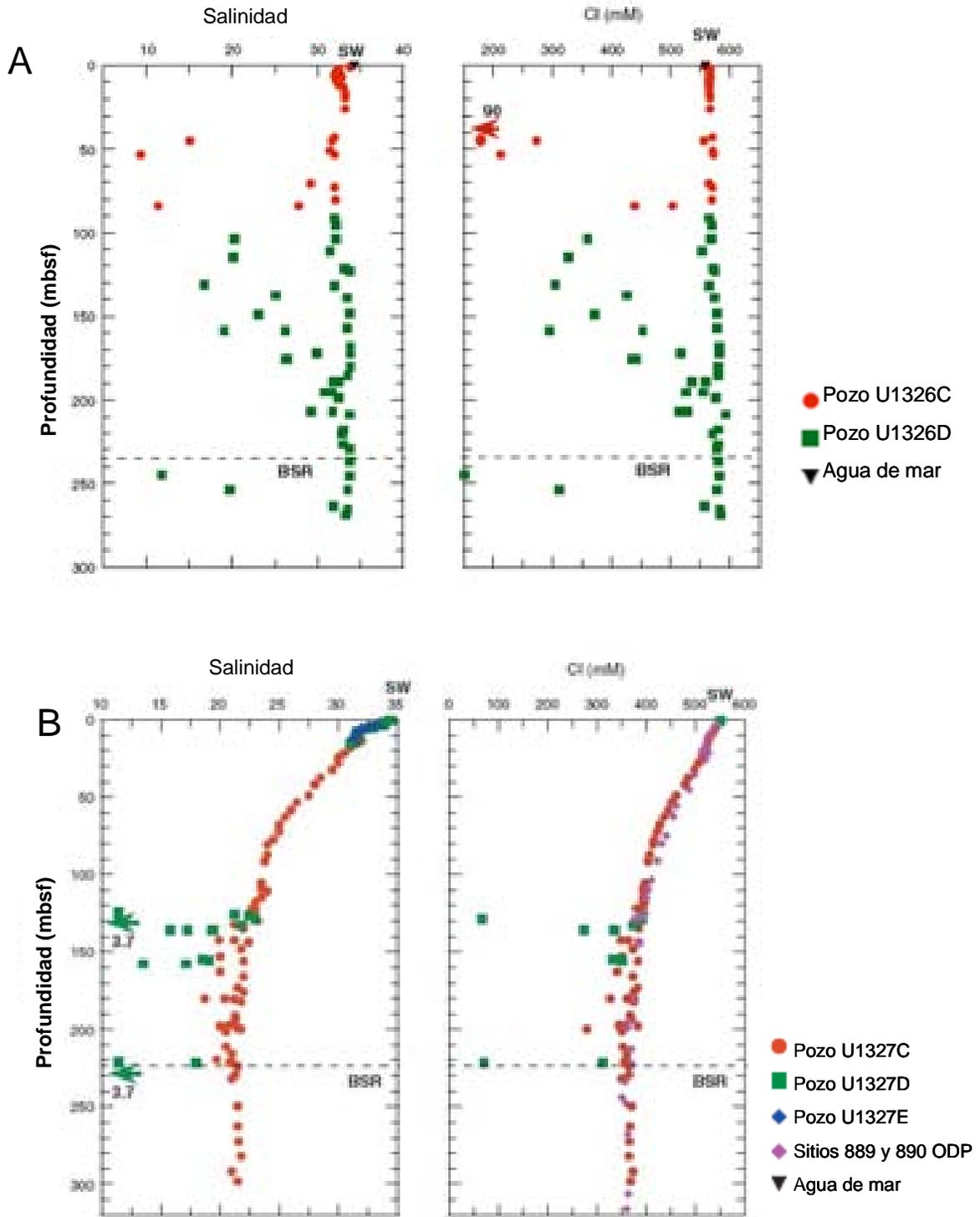


Figura 4.25. Perfiles de concentración vs. profundidad, de la salinidad y cloro en agua intersticial por encima del BSR, en los sitios de la expedición 311 en la Costa Oeste de Canadá. A. Sitio U1326, y B. Sitio U1327 (Riedel, M., Collett, T.S. et al., 2006).

IV.3.2. COLD VENTS:

Recientemente las investigaciones están enfocadas a una región denominada cold-vent field cercano a los ODP 889/890 en el sitio U1328 donde las capas contienen formas masivas de gas hidrato ocurriendo en la parte más alta (aprox. 40 m) con concentraciones que exceden el 80 % del espacio de poro resultado de la migración de fluido/gas. La investigación en los últimos 5 años incluye: imagen sísmica 3D, piston coring y observaciones de video profundo ROV, y muestras del piso oceánico (Riedel et.al., 2002, Novosel et al., 2003). A partir del perfil sísmico fueron observadas varias Blank Zones (**Figura 4. 26**) sobre un rango de frecuencia de 20 Hz a 4 Hz, con un promedio de 80 a 100 m de ancho. Estas zonas representan conductos de migración ascendente de fluidos y gas, que se cree que son principalmente el resultado del incremento de formación de hidratos en lentes dentro de las fallas. El efecto de las Blank zones es realizado localmente por el esparcimiento de carbonatos en el piso oceánico. La zona uno, es casi circular con un diámetro de alrededor de 400m en la que su morfología difiere de la del piso oceánico mostrándose como un montículo de lodo carbonatado y es probablemente asociado con la expulsión de gas libre.

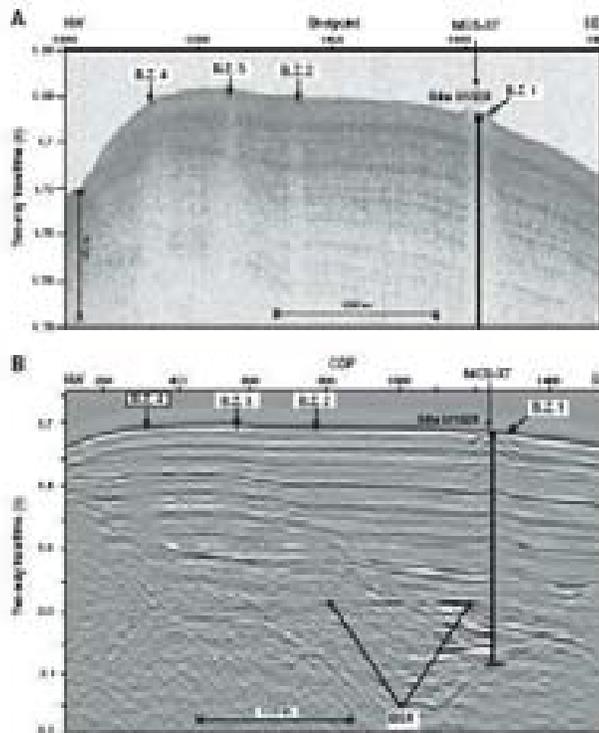


Figura 4.26. A) Perfil sísmico del fondo a 3.5 kHz. B) Perfil de multicanal sísmico (MCS) a lo largo de la línea 27 del cold vent en la costa oeste de Canadá. Notense las distintas expresiones del piso oceánico en las blank zone 1 y la fuerte difracción en los cuerpos de las blank zones (BZ) en las cuales se infiere la concentración de hidratos de gas (Riedel, 2001; en Collet, 2006).

IV.3.3. MONTÍCULOS DE GAS HIDRATO EN EL CAÑÓN BARKLEY.

La formación de hidratos de gas masivos en el piso oceánico del Cañón Barkley fue descubierta en agosto del 2002, en la costa de la Isla de Vancouver, en aguas profundas de alrededor de 800 m usando un vehículo de control remoto (ROPOS). En este lugar los hidratos fueron accidentalmente dragados por un barco pesquero en el verano del 2000, del cual 1.5 toneladas de gas hidrato del peso neto de pescado fueron traídos a la superficie (Spence et al., 2001). Las observaciones del piso oceánico ROV revelaron la formación de hidratos junto con filtraciones de aceite. La formación de hidratos está cubierta por una capa delgada de lodo de 1-5 mm y esta rodeada por colonias de almejas (clam) (**Figura 4.27**).

Los primeros análisis geoquímicos de las piezas de hidratos recuperados determinaron la presencia de hidratos con estructura tipo II con abundantes hidrocarburos pesados, por lo que se relacionan con un origen termogénico del gas, por lo que este sitio esta siendo motivo de recientes investigaciones en la costa de Vancouver.



Figura 4.27. Montículo de hidrato de gas “Pingo”. Una capa delgada de sedimento con comunidades de almejas y bacterias cubren la cima y la base del montículo cuyas dimensiones son de aproximadamente 2 m de alto y 4 m de largo (Tomada de Pohlman J, 2006).

IV.4. ESTADOS UNIDOS (NORTE DEL GOLFO DE MÉXICO).

El Golfo de México se ha reconocido como una de las zonas más importantes en la producción de hidrocarburos convencionales (petróleo y el gas); en los últimos 15 años la investigación de yacimientos de hidratos de metano en la parte Norte del Golfo de México (**Figura 4. 28**) indica que estos depósitos yacen en aguas profundas de alrededor de 400 a 2000 m, cumpliendo con

las condiciones presión, temperatura, contenido de gas cercano a la superficie, entre otras cosas, para la formación de hidratos de gas. Estos depósitos generan morfologías como montículos masivos en varias partes de el norte del Golfo, incluyendo las regiones del Cañon del Mississippi, Atwater Valley, Green Canyon y Keathley Canyon (e.g., Anderson et al., 1992, en Copper, A. et al., 1998).



Figure 4.28. Mapa mostrando la localización de los sitios relacionados a hidratos de gas y ocurrencias de aceite en el norte del Golfo de México. Los contornos de profundidad del agua esta dada en metros (Tomada de Milkov y Sassen, 2001).

Estados Unidos cuenta con el programa Methane Hydrate Research and Development (R&B Program), del departamento de energía (DOE) dentro del cual se encuentra el plan de exploración marina Chevron JIP (Joint Industry Project), concentrado específicamente en el estudio de hidratos de gas en el Golfo de México.

La USGS ha realizado tres cruceros de investigación de hidratos en el Golfo de México en el transcurso de los últimos años, de los que ha obtenido información de la presencia de hidratos de metano en diferentes áreas de las cuáles ha ido precisando el interés de investigación en algunas de ellas. En usos de esos cruceros (junio de 1998), en conjunción con el Marine Minerals Technology Center de la Universidad de Mississippi, la USGS colectó datos sísmicos usando varios sistemas de adquisición (high resolution seismic) a lo largo de los flancos del Cañon del Mississippi, donde ya se ha reportado la presencia de hidratos de gas (Neurauter y Bryant, 1989; en Cooper et al., 1998), con la finalidad de detallar las estructuras (geometría) y el análisis estratigráfico basado en los datos acústicos (propiedades físicas) (Cooper et al., 1998; USGS Cruise ID M1-98-GM). En Abril de 1999, la USGS realizó la expedición en las regiones de Garden Banks y Green Canyon (**Figura 4.28**), al norte del Golfo de México descrito en Cooper en el informe del crucero **USGS ID G1-99-GM**. Los datos de multicanales sísmicos, datos de navegación, etc, de estos dos cruceros pueden ser consultados en línea en <http://geopubs.wr.usgs.gov/open-file/of02-368/>.

Cooper y Hart (2002) interpretaron la presencia de hidratos de gas en el piso oceánico y la asociación con el gas libre. A partir de ello se realizó en julio de 2002 un tercer crucero de investigación en el que se colectaron pistones y cajas de núcleos, datos del flujo de calor (Lorenson et al., 2002) de ambas zonas. En el intervinieron la United States Geological Survey (USGS) y the Institut Polaire Francais, Paul Emile Victor (IPEV), con la participación de científicos de Canadá, Francia, Alemania, Grecia, Japón, Holanda, México, Rusia, y E.U. Tan solo en la región del Norte del Golfo de México se estima un volumen de hidratos de metano de $0.012 \times 10^{12} \text{ m}^3$ para una superficie de $59\,000 \text{ km}^2$ (Milkov y Sassen, 2001), y de $0.12 \times 10^{12} \text{ m}^3$ para esta superficie con una saturación del 5 % de hidratos en el espacio poroso (Jeffery, B., Klauda y Stanley, I., 2003) (**Figura 4.29**).

IV.4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS YACIMIENTOS DE HIDRATOS DE GAS EN EL NORTE DEL GOLFO DE MÉXICO.

La cuenca del Golfo de México es un mar intercontinental profundo que cubre un área mayor de 1.5 millones de Km^2 y alcanza un máximo de profundidad del agua de aproximadamente 3700 m (**Figura 4.30**). El Golfo es una compleja cuenca sedimentaria con gran acumulación de sedimentos detríticos y carbonatos masivos que son afectados tectónicamente por intrusiones de sal (Roberts et al., 1999; en Canet, C. et al., 2006).

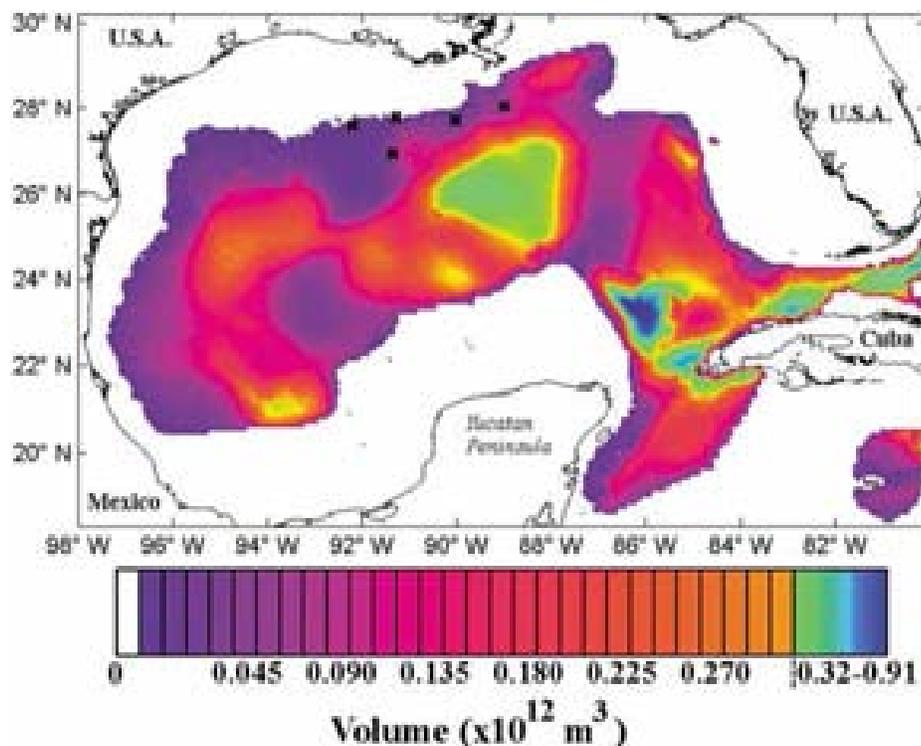


Figura 4.29. Modelo del volumen de hidratos de gas en el Golfo de México considerando una temperatura del piso oceánico de 4°C (Antonoy et al; 1998) y un rango de sedimentación de 13 cm kyr⁻¹ (Romankevich; 1984) con un 5% de hidratos en el espacio poroso. Las más altas concentraciones de hidratos de metano son localizadas en el centro del Golfo de México y Noreste de la Península de Yucatán con un total de volumen de $1.4 \times 10^{15} \text{ m}^3$ (Tomada de: Klauda, J.B., Stanley I, 2003).

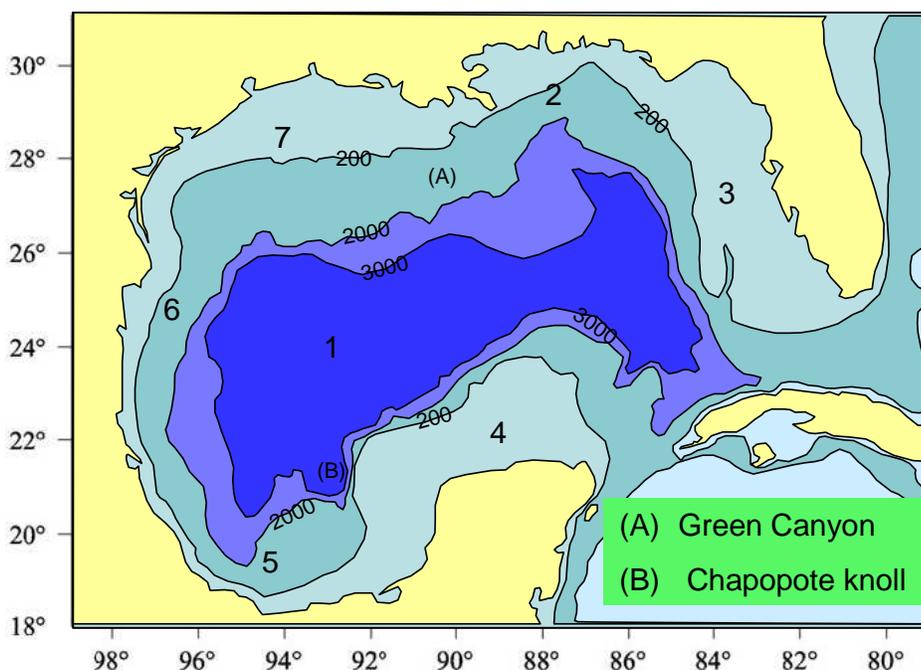


Figura 4.30. Mapa del Golfo de México mostrando las provincias geológicas establecidas por Antoine (1972): 1) Cuenca del Golfo de México, 2) Noreste del Golfo de México, 3) Plataforma y talud continental del sur de Florida, 4) Bancos de Campeche, 5) Bahía de Campeche, 6) Plataforma y talud continental del Este de México, y 7) Norte del Golfo de México (Tomada de Canet, C. et al., 2006).

La apertura del paleo-golfo de México inició en el Triásico Tardío al Jurásico Medio como consecuencia de un proceso de rift de la corteza. Grandes espesores de sal en el Calloviano fueron depositadas (Formación Louann) durante el proceso de Rift el cual jugo un rol importante durante las etapas tardías de la evolución de la cuenca del Golfo de México. La sedimentación Post-rift construyó una secuencia sedimentaria compuesta principalmente de sedimentos siliciclásticos. El rápido depósito durante el Cenozoico causó una deformación masiva de la sal autóctona de la formación Louann produciendo diapiros (Weimer et al., 1998; en Milkov, A.V. et al., 2001). Un diagrama esquemático del Norte del Golfo de México es mostrado en la **Figura 4.31**, basado en perfiles sísmicos y datos batimétricos (e.g. Peel et al., 1995; Rowan et al., 1999; en Milkov, A.V. et al., 2001).

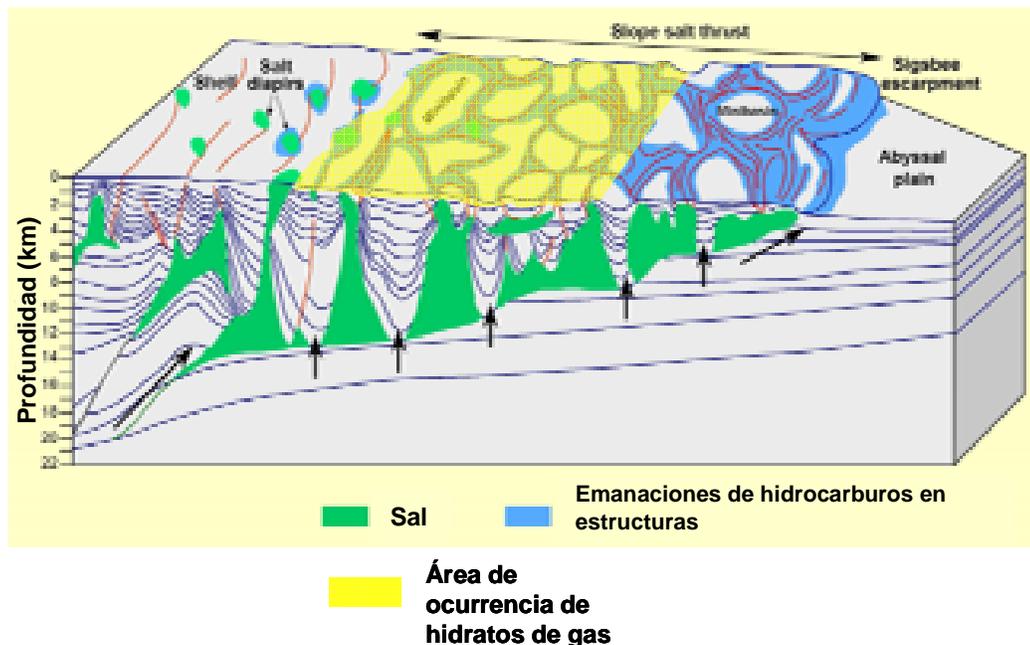


Figura 4.31. Diagrama esquemático mostrando la estructura del talud continental del Norte del Golfo de México (Peel et al; 1995 y Rowan et al;1999, en Sassen 2001) en el cual se ilustra el modelo conceptual de la ocurrencia regional de los hidratos de gas; el gas termogénico se asocia a las estructuras salinas que permiten la migración ascendente de fluidos hacia la zona de estabilidad del hidrato de gas (zonas azules) (Modificada de Sassen, 2001).

Los cuerpos salinos alóctonos y las minicuevas rellenas de sedimentos son los rasgos más notables de la geomorfología regional. Su geometría, distribución, y evolución estructural a través del tiempo influyen la ocurrencia de hidratos de gas en el Golfo de México, los cuales ocurren a lo largo de los rims de minicuevas y asociados a domos salinos en los que la deformación salina y las fallas activas proveen conductos eficientes para la migración de fluidos desde la subsuperficie profunda del sistema petrolero hacia la Zona de Estabilidad del Hidrato de gas (ZEHG).

El Golfo de México es una provincia de hidratos de metano de origen biogénico y termogénico. y se presentan en el piso oceánico como grandes montículos dominados por la baja temperatura y el régimen tectónico estructural provocado por las intrusiones salinas, así como relleno

intersticial y de fracturas en los sedimentos someros (<6m) (Sassen, Joyce, Sweet, De Freitas, Milkov y MacDonald, 1999; en Milkov, 2000); los hidratos de metano son caracterizados por el dominio de metano, pero con significativos promedios de etano, propano, butano y menormente pentanos (Sassen et al., 1999; en Milkov, 2000).

De acuerdo con la zonación de los yacimientos de hidratos de gas, éstos ocurren en un rango de profundidad del agua de aproximadamente 440 a más de 2400m (Figura 4.28).

Varios son los parámetros que se han seguido en la investigación de yacimientos de hidratos de metano en el Golfo de México, principalmente en la parte Norte correspondiente a los Estados Unidos; los estudios geofísicos regionales han servido principalmente para definir el régimen estructural de la cuenca (Figura 4.32) dominado por una alta sedimentación siliciclástica y una compleja dinámica de fallas provocadas por los domos salinos; para la región del Golfo de México el Reflector simulador de fondo (BSR) no es perceptible debido a la compleja geología estructural del área.

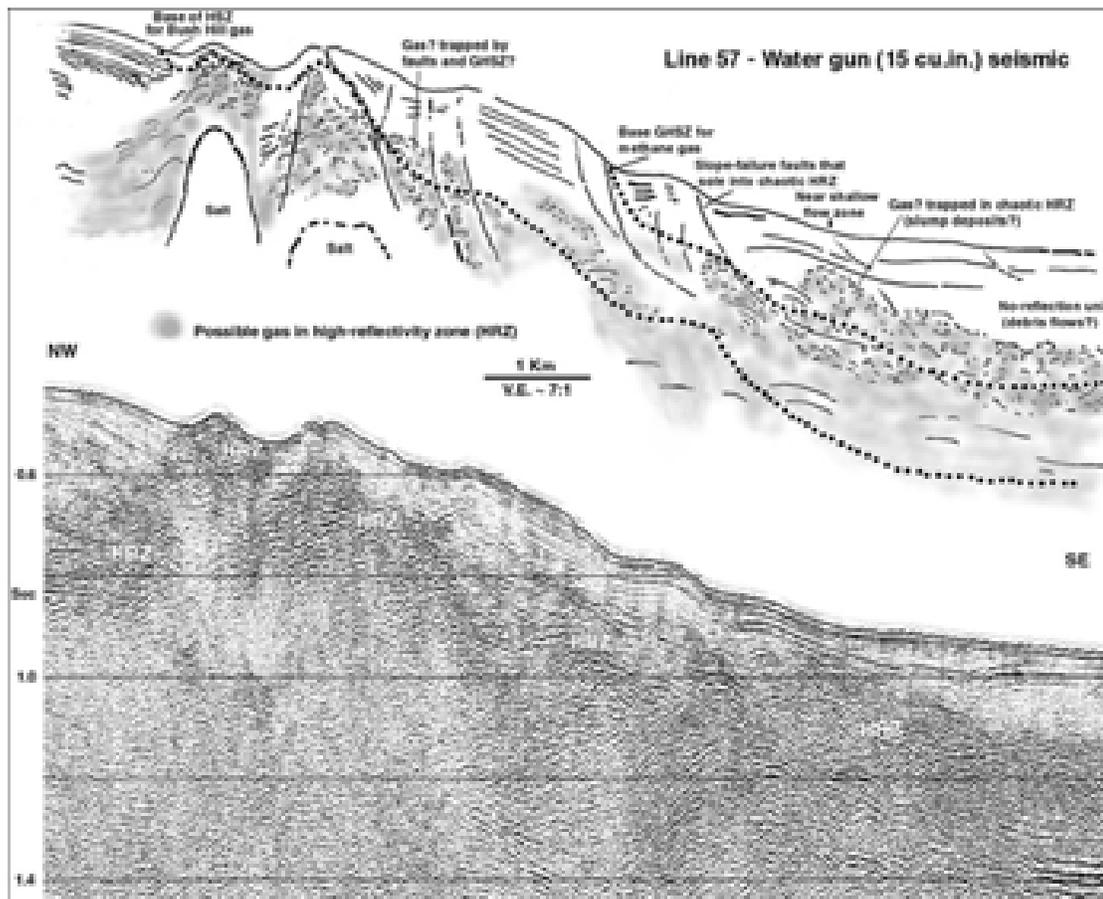


Figura 4.32. Perfil sísmico de reflexión de alta resolución cruzando el talud continental superior, en el área de Green Canyon en el sitio de Bush Hill (Cooper, A., 2003).

Por otro lado, mediante sistemas robotizados de toma de muestras del piso oceánico y la toma de fotografías ha permitido la ubicación de complejas comunidades quimiosintéticas (Figura

4.33); asociadas directamente con los hidratos (**ver capítulo 3**), en el talud continental del Golfo de México y en áreas caracterizadas por sedimentos que contienen gas libre de hidratos de gas, aceite oxidado por bacterias ricos en hidrocarburos aromáticos y carbonatos autigénicos en aguas profundas de 600 a 700 m (Kennicutt et al., 1985).



Figura 4.33. Fauna quimiosintética (gusanos tubulares y mejillones) en el escarpe de Florida, 3300 metros de profundidad de agua de mar (Sassen, 2004).

En la región del Cañon del Mississippi por ejemplo fue descubierto un montículo (**Figura 4. 34**) sobreyaciendo a un cuerpo salino somero en los límites norte-sur del bloque MC 852 y 853 (**Figura 4. 28**) (Sassen et al., 1999; en Milkov, 2000), además se tienen perfiles de ventilas de gas que se asocian con la generación de hidratos (**Figura 4.35**).



Figura 4. 34. Bloque de Hidrato (aprox 6x2x1.5m) en el área del cañon del Mississippi Sitio MC118 (McGee T y Macelloni L, 2006).

Es importante mencionar que los depósitos de hidratos en el Golfo de México se encuentran diseminados en lodos, relleno de fracturas y en la porosidad tipo vuggy de rocas carbonatadas autógenas.

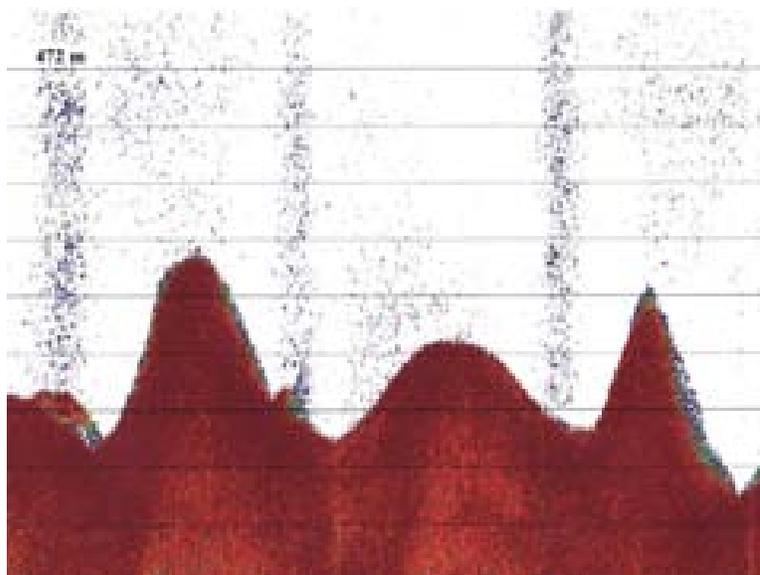


Figura 4.35. Imágenes de ventilas de gas en la región de Green Canyon 234 a tres repeticiones de 38 kHz (McGee T., y Macelloni, L., 2006).

IV.5. HIDRATOS DE METANO EN AGUAS PATRIMONIALES DE MÉXICO.

Dentro de la zona económica exclusiva de México (ZEE), se tienen documentadas varios sitios con potencial de contener hidratos de metano, en varios de los cuales se han recuperado muestras de hidratos en las perforaciones profundas del Deep Sea Drilling Program (Sitios 490, 491 y 492; Leg 66 Trinchera Mesoamericana), así como se han inferido mediante estudios geofísicos a través de la detección del Bottom Simulating Reflector (BSR) frente las costas de Puerto Vallarta (Bartolome, 2002). Sumada a estas áreas se infiere la presencia de hidratos en toda la zona de trinchera del Pacífico, en el Golfo de California, y en el Golfo de México enfrente de la Plataforma de Campeche y en el talud continental frente a la costa de Veracruz (Figura 4.36).

IV.5. 1. MARGEN DEL PACÍFICO MEXICANO

Dos tipos de márgenes continentales han sido reconocidos en el Pacífico Mexicano, incluso antes de la irrupción de la tectónica de placas, los márgenes atlánticos y los pacíficos. El tipo atlántico usualmente tiene una amplia plataforma continental, un talud y una extensa plataforma externa hasta llegar a las llanuras abisales. Debido a su escasa actividad sísmica, son denominados asísmicos o márgenes pasivos. Su formación se produjo cuando los continentes se separaron y formaron nuevos océanos, provocando el completo aislamiento debido al *rifting* y

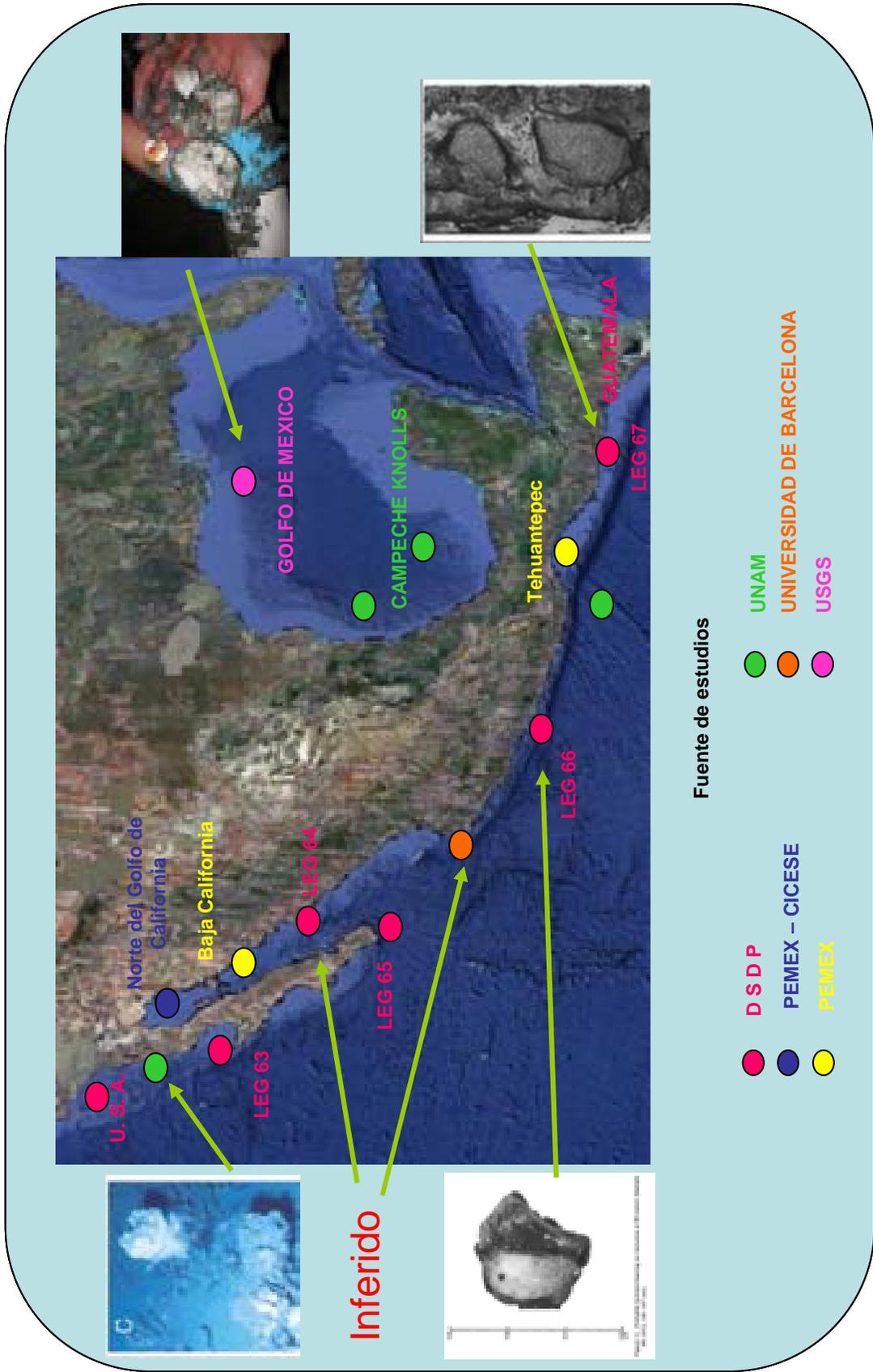


Figura 4.36. Distribución de zonas potenciales de contener hidratos de metano en las aguas patrimoniales de México, basada en las fuentes de recopilación publicadas (imagen tomada de google earth; 2009).

dando lugar a los nuevos continentes, donde el continente y el fondo oceánico adyacente forman parte de la misma placa (Bartolome, 2002).

El tipo margen pacífico tiene una fosa al pie del talud continental reemplazando la plataforma externa y son comúnmente denominados márgenes sísmicos o activos dada la elevada ocurrencia de terremotos. Su formación se debe a la colisión de dos placas, que en el caso del Pacífico se trata de una placa oceánica que es consumida bajo una placa continental en la zona de subducción. También pertenecen a este grupo los márgenes asociados a arcos de islas, formados en el límite entre dos placas oceánicas.

El contexto geodinámico y tectónico del margen oeste de México se engloba dentro del régimen general de subducción de la placa oceánica del Pacífico bajo el continente Norteamericano (margen activo) que se extiende, desde la entrada del Golfo de California ($\approx 20^\circ$ N) hasta Panamá ($\approx 10^\circ$ N). El oeste mexicano comprende, de norte a sur, un margen transformante formado por un conjunto de zonas de expansión. El conjunto de fallas transformantes dextrales son la continuación hacia el sur y bajo las aguas del Golfo de California (o Mar de Cortés) de la falla de San Andrés. Este enjambre de fallas supone el límite de las placas Pacífico-Norteamericana entre los 32° N y los 23° N. Al oeste del Golfo de California, se localiza primero la península de Baja California, y al oeste de ésta un paleomargen convergente cuya actividad cesó hace aproximadamente unos 10 Ma (Lonsdale, 1989). En el extremo meridional del Golfo de California, el rasgo estructural más notable es la falla transformante de Tamayo, de 70 km de longitud (Lonsdale, 1989; en Bartolome, 2002), que conecta hacia el sur con la zona de acreción oceánica de la dorsal Pacífico-Rivera (*Pacific Rivera Rise*, PRR). Esta dorsal confina el límite entre las placas de Rivera y Pacífico, que se desarrolla entre los 23° N y los 19° N con una velocidad relativa de convergencia de 2.0 cm/año (Pardo y otros, 1995; en Bartolome, 2002). El extremo SW del PRR, o punto triple de Rivera, es en donde convergen la Placa de Rivera y del Pacífico junto con la zona transformante de Rivera. Un poco más hacia el sur, la acreción de nueva corteza oceánica marca el límite entre la Placa de Cocos y el Pacífico. Entorno a los 21° N y al este de la placa Rivera se encuentra el extremo septentrional de la fosa mesoamericana (*Middle America Trench*, MAT) que forma el margen convergente activo del oeste mexicano donde se alcanzan profundidades de 6000 m. La fosa mesoamericana marca de norte a sur la zona de colisión y subducción de la microplaca de Rivera y la placa de Cocos respectivamente (Bartolome, 2002).

La reorganización de los movimientos de las distintas placas litosféricas en la zona ha supuesto una historia geodinámica muy compleja en los últimos 25 Ma. La zona de estudio engloba básicamente cuatro elementos claves: el golfo de California, la placa de Rivera, la Fosa Mesoamericana (MAT) y la placa de Cocos.

Así, de manera simplificada, tres episodios fundamentales predominan en la cinemática de placas hasta llegar a la configuración actual de las mismas. La sucesión de los episodios se inicia partiendo de la antigua placa de Farallón que se fracturó y evolucionó, primero, como la placa de Guadalupe (anomalía 7, 26 Ma; Mammerickx y Klitgord, 1982; en Bartolome, 2002) y posteriormente se segmentó en las actuales placas de Rivera y de Cocos. Por otra parte, la posición relativa de la dorsal oceánica del Pacífico, originalmente (12.5-11 Ma) situada en la dorsal Pacífico-Matemáticos (Figura 4. 37), se propaga en dirección norte a lo largo de la

actual dorsal Pacífico-Rivera y aparentemente queda desconectada del segmento sur (dorsal Pacífico-Matemáticos); posteriormente durante el mioceno-medio (6.5-3.5 Ma) sufre un cambio brusco (salto en dirección) como consecuencia del desarrollo de la zona de fractura de Rivera, situándose en su posición actual de la dorsal del Pacífico Este (EPR), al sur de zona de fractura Rivera (Mammerickx y Klitgord, 1982; en Bartolome, 2002).

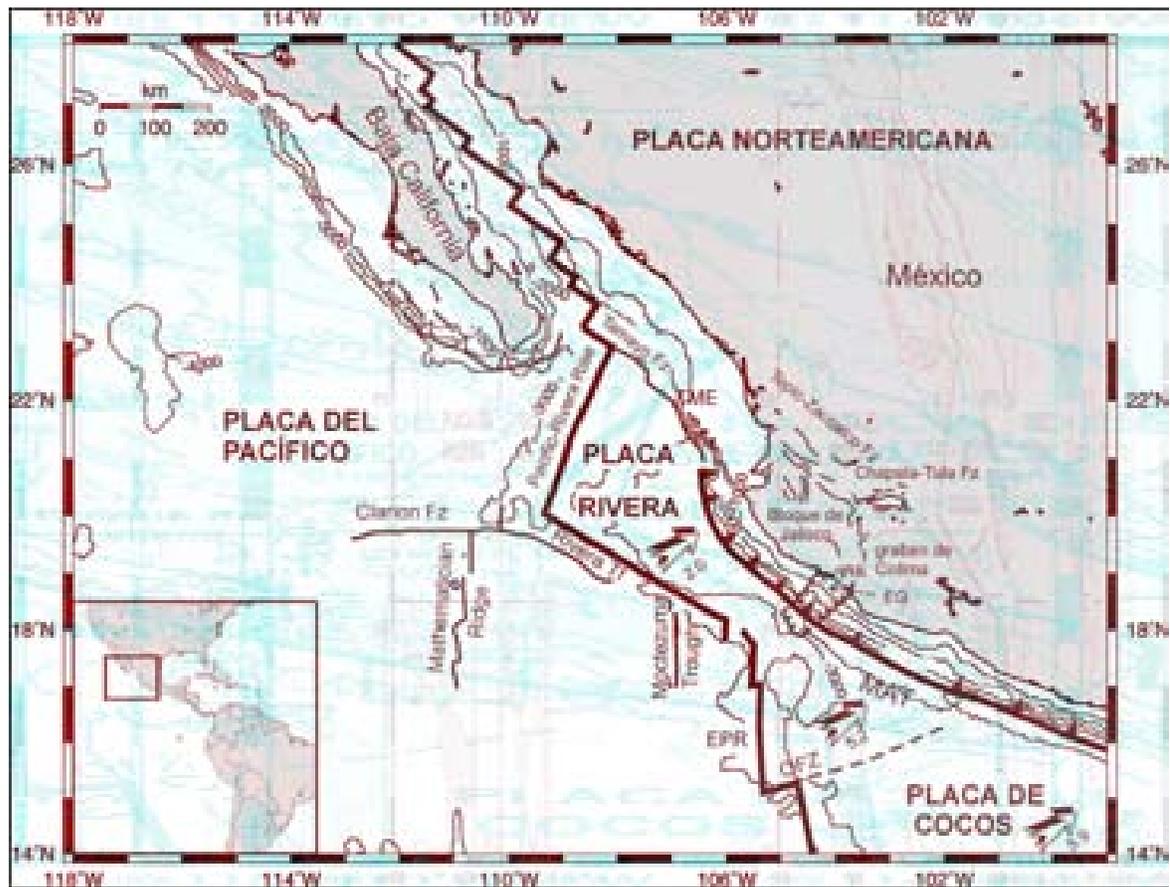


Figura 4.37. Tectónica de placas en la región del Pacífico mexicano: placas de Rivera y Cocos en subducción bajo la placa Norteamericana y la zona de fallas transformantes dentro del Golfo de California. Las velocidades relativas de convergencia (cm/año) entre las placas oceánica y continental se indican con las flechas (Pardo y otros, 1995). EPR: East Pacific Rise; MAT: Middle America Trench; OFZ: Zona de Fractura de Orozco; TME:Tres Mariás Rise; EG:Graben de El Gordo (Bartolome, 2002).

IV.5. 1.a. TRINCHERA MESOAMERICANA.

Para este segmento, de acuerdo con el análisis del DSDP en el Leg 66 (Figura 4. 38) en los sitios 490, 491, y 482 se reportó la presencia de hidratos de gas, determinándose un contenido de materia orgánica elevado (COT de 2 a más de 4%); en el talud continental son grandes cantidades de gas que se han liberado. En exploraciones realizadas por el DSDP, en la región sur del estado de Guerrero (Ometepec) en el talud continental (comprende el prisma acrecionario), se han detectado manifestaciones de hidratos de metano, a profundidades entre 2000 y 3000 m (Figura 4.38).

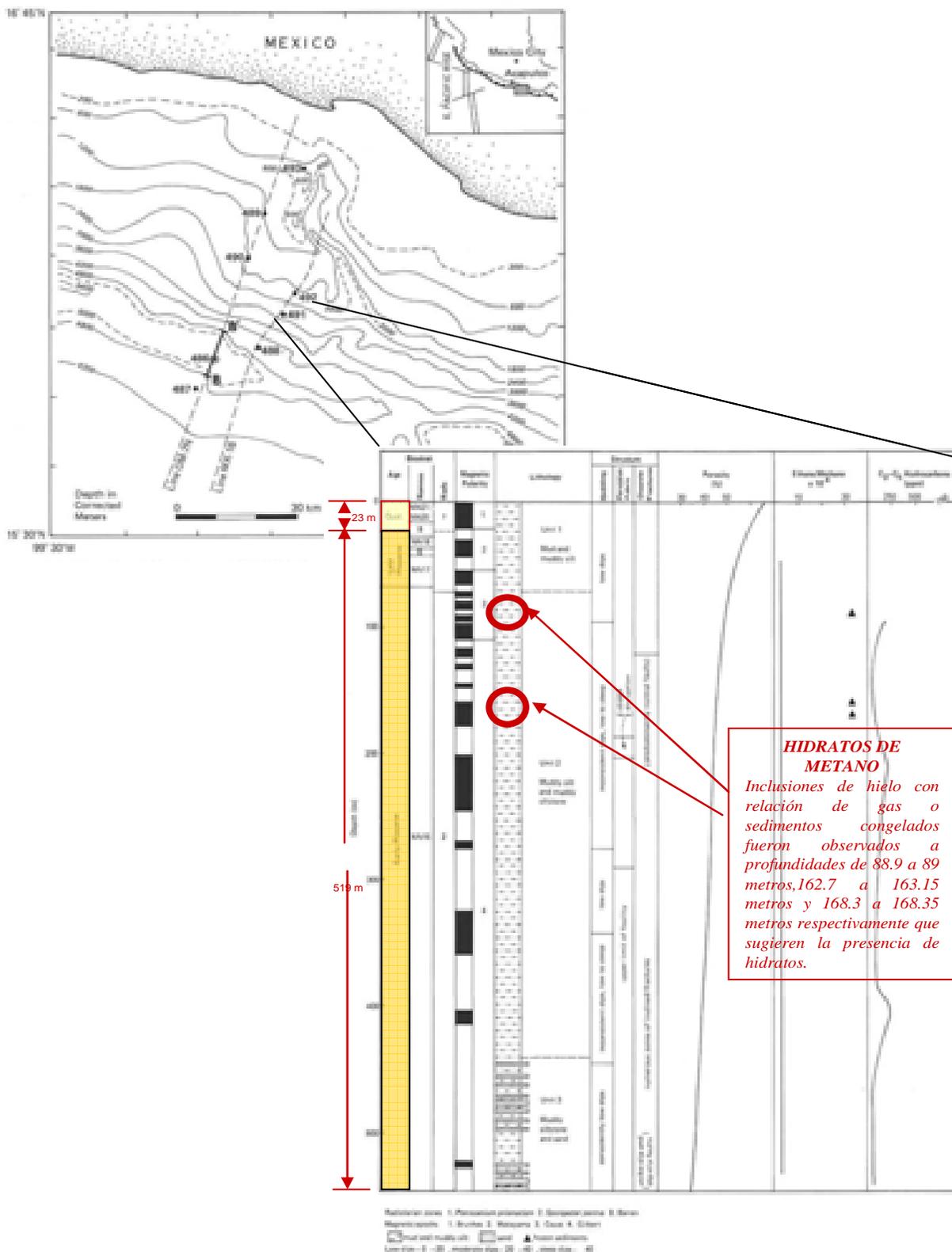


Figura 4.38. Batimetría y mapa de localización del Leg 66 en la Trincherá mesoamericana, en la margen del Pacífico, mostrando el pozo 491 del que se reportó la recuperación de hidratos de metano (ver columna litológica parte inferior) (Fuente: Moore, J. C., Watkins, J. S. et al., 1982).

De acuerdo con Bartolome (2002), la red de perfiles sísmicos profundos muestran un potente reflector que presenta unas características, a priori, similares a las del BSR (**Figura 4.39**); estos perfiles sísmicos fueron adquiridos frente a la costa de Puerto Vallarta, México, durante la campaña geofísica CORTES-P96, nominados desde el 201 y hasta el 205.

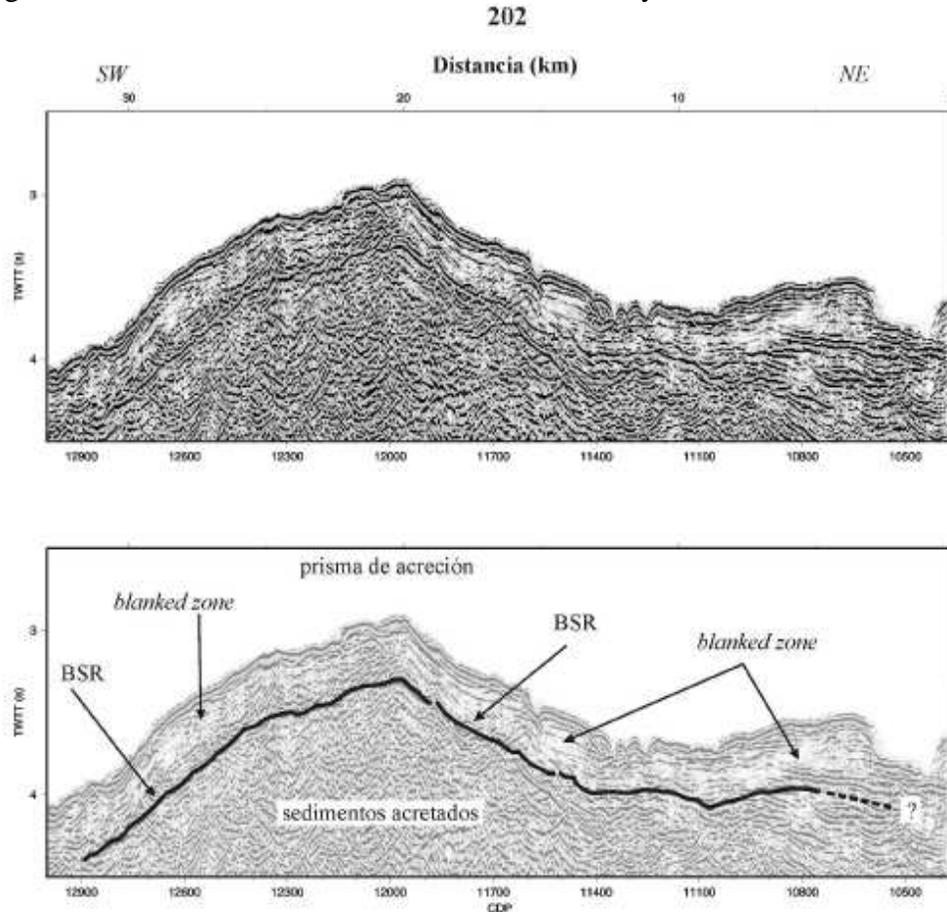


Figura 4. 39. Perfiles sísmicos profundos adquiridos frente a la costa de Puerto Vallarta, México, durante la campaña geofísica CORTES-P96 con un fuerte BSR que infiere la presencia de Hidratos de metano (Bartolome, 2002).

La distribución de los perfiles sísmicos en aguas afuera de Bahía Banderas en Puerto Vallarta, han permitido localizar el BSR, es una zona de importantes aportes sedimentarios fluviales que han ocasionado una importante erosión, como se observa en la compleja batimetría de los cañones submarinos de Puerto Vallarta.

En la **Figura 4.40** se muestran los perfiles sobre la batimetría de alta resolución, en la que se han marcado las zonas donde se ha localizado con claridad el reflector sísmico BSR; en el margen Oeste de la zona de Vallarta se identifican, mediante anomalías de expansión oceánica, la corteza relativamente joven (10- 8 Ma) generada en la dorsal del pacífico.

La localización del BSR, se puede agrupar tanto en el muro interno de la fosa como en la plataforma continental, entre 40 y 100 km de distancia de la costa de Puerto Vallarta (20°24'N, 105°42'W).

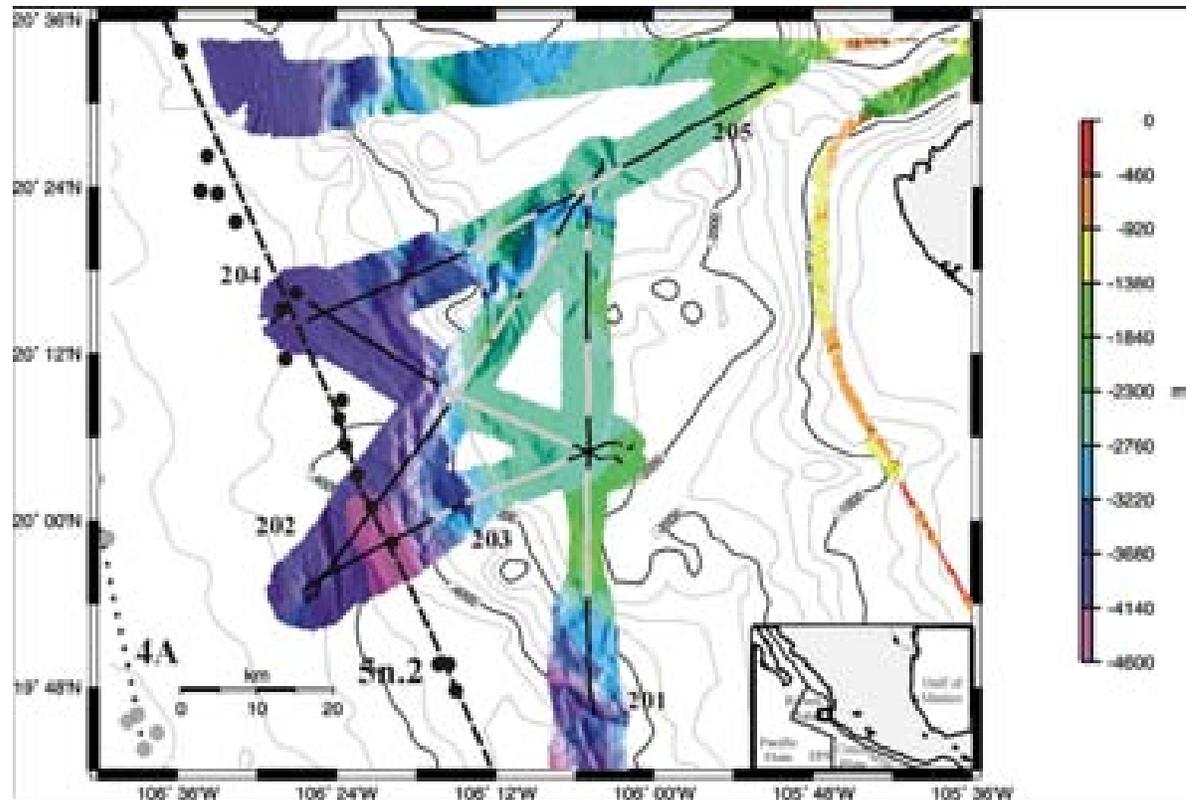


Figura 4.40. Localización de los perfiles 201-205 sobre la batimetría de alta resolución adquirida en la campaña CORTES-P96. Las secciones donde se ha identificado el BSR están marcadas por segmentos grises. La referencia de edad del fondo oceánico está definida por la anomalía magnética 5n.2 (9.92 Ma), señalada con segmentos discontinuos negros, y más hacia el Oeste por la anomalía magnética 4A (8.75 Ma) (isócronas magnéticas según de DeMets y otros, 2000) (Bartolome, 2002).

Al sur de este segmento frente a las costas de Guatemala estudios del DSDP Leg 67 sitios 498, 399 y 400 reportan en la zona de talud grandes manifestaciones de hidratos de metano, zona que puede extrapolarse a la zona de la plataforma de Tehuantepec, en México.

IV.5. 1.b. GOLFO DE CALIFORNIA.

Esta región es prácticamente inexplorada en cuanto a la investigación de hidratos, contándose solo con información tectónica estructural y estratigráfica, no suficiente para la definición precisa de zonas de hidratos de metano. En el Golfo de California se infiere la presencia de hidratos de metano a partir de los rasgos estructurales de esta zona. Esta definida como cuencas activas tipo pull-a-part con piso oceánico (<3.5 Ma). Las zonas potencialmente favorables para la ocurrencia de gas no asociado se ubican principalmente en las cuencas profundas del norte del Golfo de California, en áreas con subsidencia activa y altas tasas de sedimentación.

IV.5. 2. GOLFO DE MÉXICO (SIGSBEE Y CAMPECHE KNOLL).

En la porción sureste del Golfo de México y dentro de la superficie que comprende la ZEE de México, en las campañas oceanográficas multidisciplinarias R/V SONNE 174 en 2003 y METEOR EXPEDITION 67 Leg M67-2 en 2006 (**Figura 4.41**), con participación de investigadores de la UNAM en colaboración con los gobiernos de Alemania y Estados Unidos, se definieron zonas de importancia económica de yacimientos de gas natural. Estos estudios se realizaron en la provincia de los diapiros de la Sonda de Campeche, los cuales se enfocaron a localizar tipos y estructuras que contengan hidratos de metano, su ambiente de formación, así como el vulcanismo de asfalto que es el primero en su tipo descubierto en la bahía de Campeche.

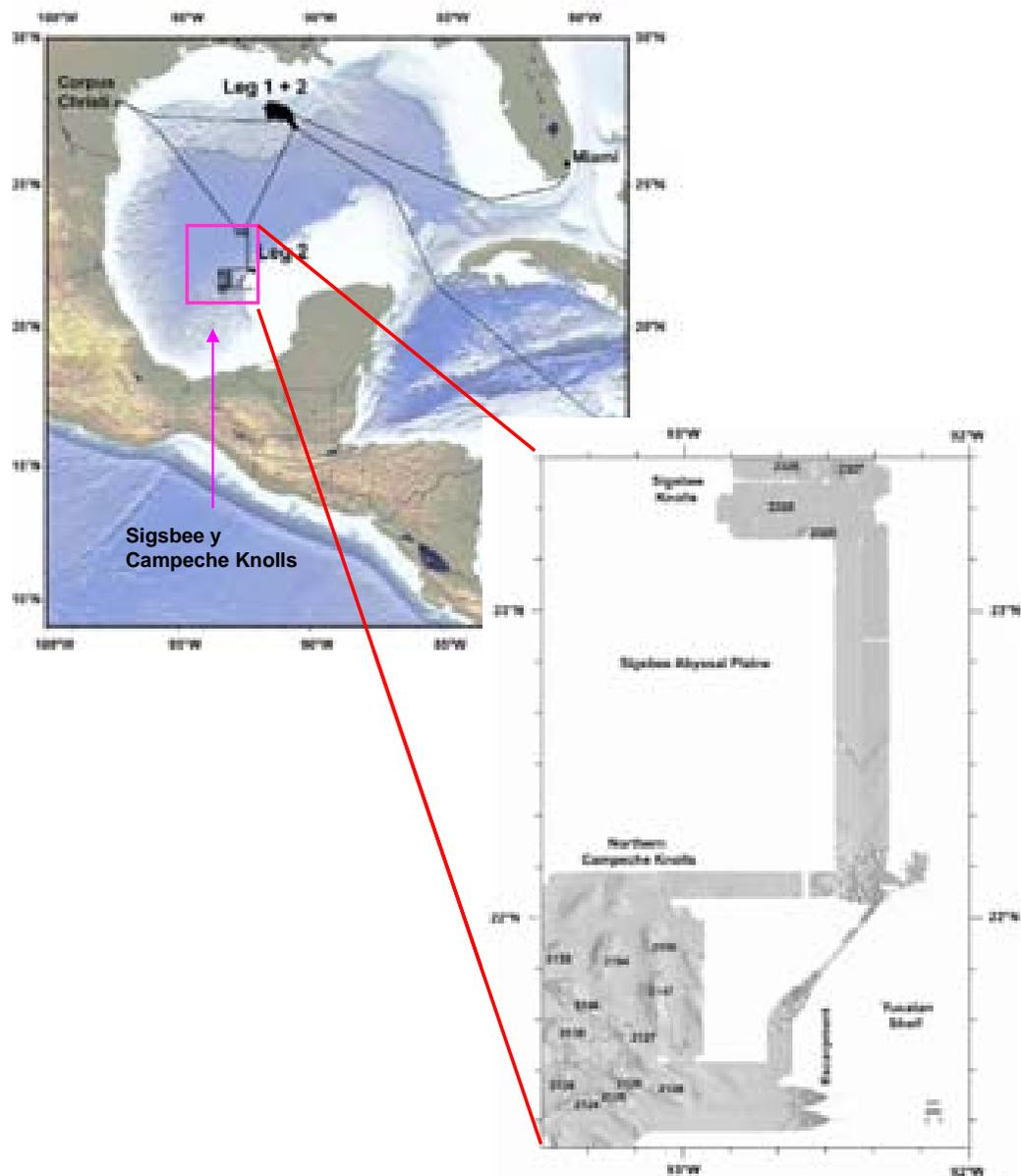


Figura 4.41. Crucero R/V Sonne SO174 (OTEGA-II) en Sigsbee y Campeche Knolls (Bohrmann G y Schenck S, 2004).

La presencia del hidrato de gas ha sido detectada entre 2950 m a 3,700 m de profundidad en las zonas centro y suroeste del Golfo de México, cuya presencia está asociada a la presencia de reflectores sísmicos (BSR) a profundidades de agua de 1,500m a 2,700m en el margen suroeste del oeste del Golfo de México. La presencia de estructuras como diapiros, fallas de crecimiento y plegamientos del piso oceánico están asociados a la migración de los gases formados en las zonas profundas termogénicas y de eficiente metanogénesis microbial.

En el Golfo de México se han identificado algunas zonas con potencial para almacenar hidratos de gas metano, encontrándose en México; la Planicie Abisal Sigsbee, el talud de Campeche (**Figura 4.41**), el talud de Veracruz, Las Cordilleras Mexicanas, y el Talud Este de México son sectores con gran potencial de contener hidratos de metano.

En la zona de Campeche y Sigsbee, en México, se detectaron hidratos de gas asociados a carbonatos, lodo y aceite en las muestras recuperadas durante las campañas oceanográficas multidisciplinares R/V SONNE 174 en 2003 y METEOR EXPEDITION 67 Leg M67-2 en 2006, un ejemplo de ello es el sitio 2135 del Norte de Campeche Knolls en el muestreo TVG6 (Lat. / Long. 21°54.00/93°26.4) (**Figura 4.42**).

Además se ha identificado esta sustancia en la Lengua de Veracruz, las Cordilleras Mexicanas y el Talud este de México.

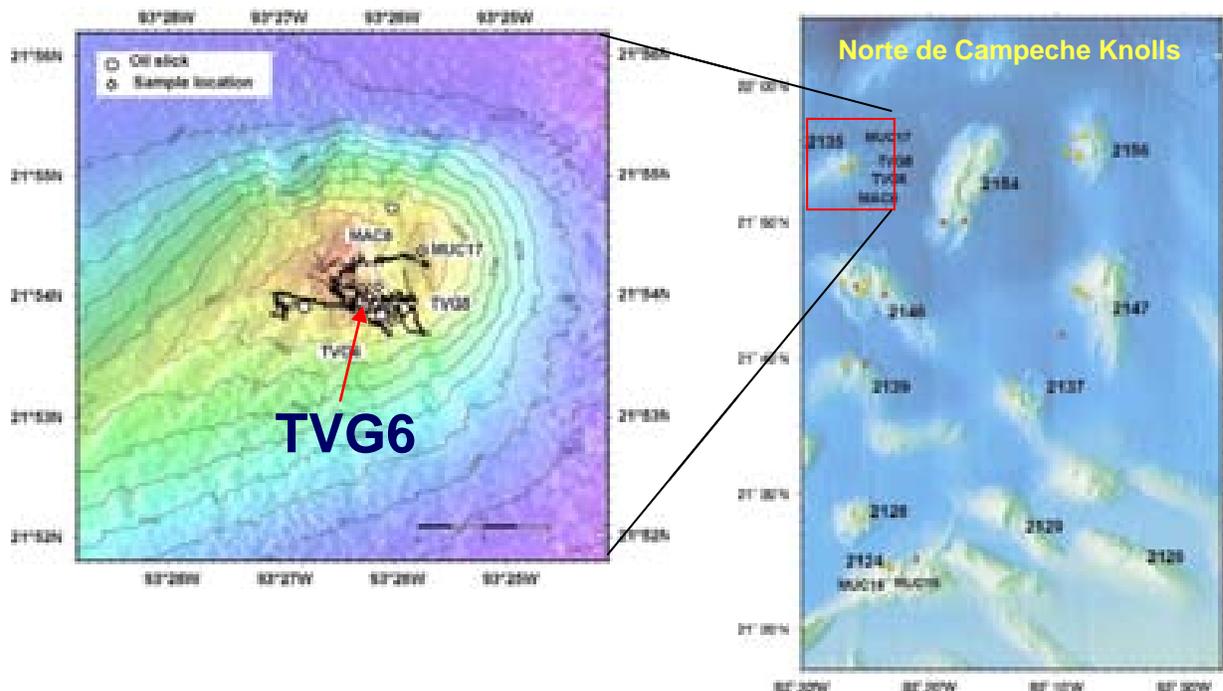


Figura 4.42. Localización del sitio 2135 del Norte de Campeche Knolls donde se recuperaron Hidratos de gas, carbonatos, lodo y aceite en el muestreo TVG6 (Lat. / Long. 21°54.00/93°26.4) (Bohrmann, G y Schenck, S, 2004).

CAPÍTULO V. FORMAS DE EXPLOTACIÓN E IMPACTO ECOLÓGICO.

V.1. PRUEBAS DE PRODUCCIÓN DE HIDRATOS DE GAS.

Programas internacionales han llevado a caracterizar los depósitos del permafrost en Alaska y Canadá, en donde se tienen programas piloto de producción de gas natural contenidos en los hidratos. En estos lugares se están poniendo a prueba los diferentes métodos para lograr la disociación de los hidratos, los cuales son:

- Por calentamiento.
- Por despresurización.
- Por inhibición química.

Estas pruebas conllevan a un avance significativo en el conocimiento del comportamiento de los hidratos de metano y su depósito, además de pronosticar la posible producción comercial en los próximos 20 años ([National Petroleum Council, 2003](#)).

Los numerosos campos de investigación de los proyectos en Canadá, Alaska, Japón, India y los Estados Unidos, están enfocados en trabajar con las tecnologías necesarias para reconocer y caracterizar los depósitos de hidratos de gas en ambientes del ártico y aguas profundas.

Pruebas de producción en el ártico pueden también servir como un primer y relativo indicador de bajo costo, como una enseñanza de cómo la más grande fuente potencial de gas natural puede ser producida de los hidratos marinos ([Working Document of the NPC Global Oil & Gas Study, 2007](#)).

La arquitectura de los depósitos marinos puede diferir de los depósitos del Ártico, no obstante elementos de la tecnología de producción del Ártico, posiblemente pueden ser transferibles a escenarios marinos ([Working Document of the NPC Global Oil & Gas Study, 2007](#)).

Los métodos propuestos para la recuperación de gas a partir de los hidratos de metano (**Figura 5.1**) usualmente concuerdan con la disociación o fundición in situ del hidrato de gas, mediante: 1) calentamiento del yacimiento por encima de la temperatura de formación hasta la disociación del hidrato inyectándole agua caliente o vapor de agua, 2) decremento de la presión de equilibrio del hidrato de gas por bombeo, especialmente dentro de la zona de gas libre. El hidrato puede entonces disociarse al descender a la capa de gas de baja presión, 3) inyección de un inhibidor al yacimiento, tal como el metanol o glicol, para disminuir la estabilidad del hidrato, ó (4) sustituyendo el metano en el hidrato por CO₂, posiblemente inyectando el CO₂ del gas de invernadero en los depósitos naturales del hidrato del metano.

Los primeros modelos de producción por computadora de estimulación térmica, han sido desarrollados para evaluar la producción de hidratos de gas a partir de agua caliente o inmersión de vapor, los cuales han demostrado que el gas puede ser producido de los hidratos en rangos suficientes para hacer a los hidratos de gas técnicamente una fuente recuperable (Sloan, 1998; en Collett, T.S, 2001). Una limitante para el uso de las técnicas de recuperación de gas antes mencionadas es el costo económico asociado, por ejemplo el uso de inhibidores en la producción de gas en los hidratos han demostrado ser técnicamente factible (Sloan, 1998; en Collett, T.S, 2001), no obstante, el uso de grandes volúmenes de químicos como lo es el metanol conlleva a una elevación en los costos económicos; entre las varias técnicas de producción de gas natural de hidratos de gas in situ, la más factible económicamente hablando es la despresurización, aún cuando la extracción de gas sea obstaculizada por la formación de hielo y/o la reformación de hidratos de gas resultando de la naturaleza endotérmica de la disociación de los hidratos.

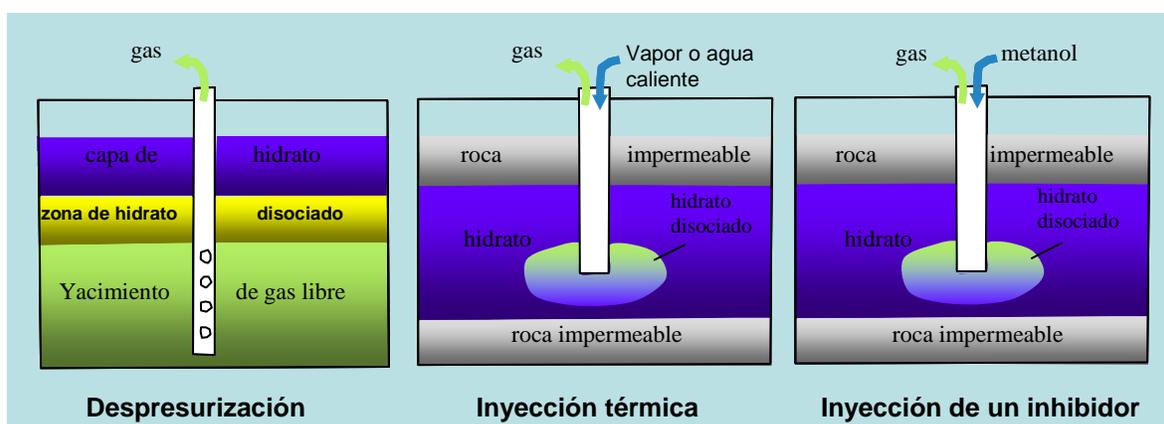


Figura 5.1. Métodos de producción de gas en yacimientos de hidratos (Modificada de Collett, T.S, 2000).

El campo de gas Messoyakha en la parte norte de la Cuenca Oeste de Siberia es un ejemplo de una acumulación de hidrocarburos de la cual la producción de gas ha sido generada a partir de los hidratos de gas in situ (Makogon, 1981; en Collett, T.S, 2001). La historia de producción del campo demuestra que los hidratos de gas son una fuente inmediata de producción de gas natural y que la producción puede iniciarse y mantenerse utilizando los métodos convencionales de explotación; se presume que la producción de gas en el campo Messoyakha por los hidratos es bajo un esquema simple de despresurización. Por otra parte se estima que alrededor del 36% (alrededor de 5 millones de m³) del gas obtenido en este campo se atribuye a la liberación de gas por la disociación de hidratos (Makogon, 1981; en Collett, T.S, 2001).

De acuerdo con las características de concentración de hidratos en la mayor parte de los yacimientos marinos en el mundo hace que se eleven los requerimientos de las técnicas de producción de gas natural, debido a que los hidratos se presentan en los sedimentos en forma diseminada y en la mayoría de los casos, los hidratos de gas marinos se han encontrado en secciones sedimentarias ricas en arcillas y no consolidadas cuya permeabilidad es muy baja; la mayoría de los modelos existentes para la producción de

hidratos de gas son confiables a partir de la determinación de los patrones de permeabilidad de la formación. Por tanto es posible que en cuencas donde se tiene gran aporte de sedimentos siliciclásticos de grano grueso, como es el caso del Golfo de México o a lo largo del margen este de la India, los hidratos de gas tengan una mayor concentración (Collett, 2001).

George J. Moridis y Timothy S. Collett (2003) mencionan que los depósitos de hidratos tienen características geológicas individuales que permiten definir el empleo de los métodos de producción pertinentes. Un primer tipo de depósito (Clase 1) es una acumulación que comprende dos zonas: un intervalo de hidratos, que generalmente exhibe una muy baja permeabilidad efectiva debido a la gran saturación de hidratos en el espacio de poro, sobreyacente a una zona de dos fases de fluidos en la cual se presenta una fase de gas libre; en esta clase de depósito el fondo de estabilidad de la zona de hidratos usualmente coincide con el fondo del intervalo de hidratos. En términos de producción de gas, esta es la clase más atractiva para su explotación porque solo es necesario un pequeño cambio en la presión y/o temperatura para inducir la disociación de los hidratos de gas. El segundo tipo de depósito (Clase 2) engloba dos zonas: un intervalo de hidratos que sobreyace a una zona de agua móvil, como puede ser un acuífero. El tercer tipo de depósito (Clase 3) se caracteriza por la ausencia de la zona de gas libre, y la formación permeable esta compuesta de una sola zona, el intervalo de hidratos. En general, en depósitos de clase 1 la mejor estrategia de producción es la despresurización, mientras que para la clase 2 es necesaria una combinación del método de despresurización y de inyección térmica. Debido a la muy baja permeabilidad de los sedimentos con hidratos, el método de despresurización en la clase 3 se ve limitado, y la simulación térmica a través de sistemas sencillos de pozos parece ser la mejor estrategia en regímenes de alta saturación de hidratos de gas (Moridis G.J. et al., 2003).

Para los operadores que perforan en aguas profundas, encontrar a los hidratos de gas sólidos durante la perforación puede ocasionar un problema de control en el pozo, en particular si grandes cantidades de hidratos entran en el fondo del agujero y se despresurizan. Además, la circulación de fluido caliente dentro del fondo del pozo puede aumentar la temperatura en los sedimentos circundantes ricos en hidratos, llevando al derretimiento de los hidratos y a la desestabilización de los sedimentos que sostienen el pozo. El calor liberado durante la solidificación del cemento en la terminación de los pozos petroleros también puede desestabilizar la formación productiva de hidratos. Algunos sistemas especiales de cemento diseñados para minimizar el calor liberado pueden ayudar a prevenir la disociación de los hidratos (Collett T.S. et al., 2000).

V.2. IMPORTANCIA ECONÓMICA DE LOS HIDRATOS DE METANO.

El interés por la explotación de los hidratos está creciendo, y varias de las tecnologías que han demostrado ser eficaces para la exploración convencional de los hidrocarburos y para la evaluación de formaciones, se están aplicando al problema de caracterización de los hidratos; sin embargo, aún permanecen enormes desafíos (Collett T.S. et al., 2000).

Los hidratos de metano son considerados una prometedora fuente para la obtención de gas natural no convencional en grandes volúmenes y su importancia radica en su enorme contenido de metano (CH_4), que es el compuesto principal del gas empleado en la industria y en el consumo doméstico; el factor de expansión al liberarse el metano de la fase sólida a la gaseosa, hace que se deba considerar un factor de volumen de 164 de metano contra 0.8 de agua, es decir que de 1 m^3 de hidrato de metano se obtienen 164 m^3 de gas metano que se encontraba comprimido, y 0.8 m^3 de agua.

Es difícil el planteamiento de cuando se iniciará la comercialización de gas a partir de los hidratos de metano, Graul (2001), predice que la producción de hidratos de gas continentales será en el 2015 y el de las márgenes continentales y océanos profundos después del 2030. Bil (2000) estima que la comercialización de gas de los hidratos será en el 2015 y 2060 para las áreas del permafrost y las márgenes continentales, respectivamente (Milkov A, 2002).

Lo inhóspito del medio marino y la difícil accesibilidad hacia estas profundidades son factores que se deben considerar en la evaluación de explotación de gas contenido en los hidratos, a lo que hay que sumar las características especiales de este gas encerrado en las redes cristalinas del hielo, que hacen que su manejo sea difícil y peligroso (Baltazar Montes, 2002).

Se especula que el promedio de metano secuestrado en los hidratos de metano es enorme, en un rango de 3114 a 7634000 trillones de m^3 (Kvenvolden, 1993; en Collett, 2001) (Figura 5.2). Estimaciones mundiales del promedio de gas natural en los depósitos de hidratos es de 14 trillones a 34, 000 trillones de m^3 para áreas del permafrost y de 3100 trillones a 7, 600, 000 trillones de m^3 en los sedimentos oceánicos (Modificada de Kvenvolden, 1993; en Collett, 2001) (Tabla 5.1). El volumen de gas entre un depósito y otro puede variar considerablemente, por ejemplo, recientes estimaciones del volumen de gas para el yacimiento de Blake Ridge contenido en los hidratos y en la capa de gas libre asociada, es de 70 trillones de m^3 de gas en un área de $26\,000 \text{ Km}^2$ (Dickens et al., 1997; en Collett, 2001) y puede llegar a 80 trillones de m^3 de gas en un área de $100\,000 \text{ Km}^2$ (Holbrook et al., 1996; en Collett, 2001). Esto sugiere que el volumen de gas que puede estar contenido en una acumulación de hidratos depende de cinco factores del yacimiento (Modificado de Collet, 1993; en Collett, 2001): 1) la extensión del área de ocurrencia de los hidratos de gas, 2) el espesor del yacimiento, 3) porosidad de los sedimentos, 4) grado de saturación de hidratos de gas y 5) el parámetro volumétrico, el cual define cuanto gas libre es almacenado dentro del hidrato. La tabla 5. 2 muestra los parámetros antes mencionados, en las áreas del Blake Ridge (ODP Sitios 994, 995, y 997), a lo largo del margen continental de Cascadia (ODP Sitio 889), en el Talud Norte de Alaska (Noroeste de Eileen) y en el Delta Mackenzie (Mallik 2L-38), necesarios para calcular el volumen de gas asociado a los hidratos.

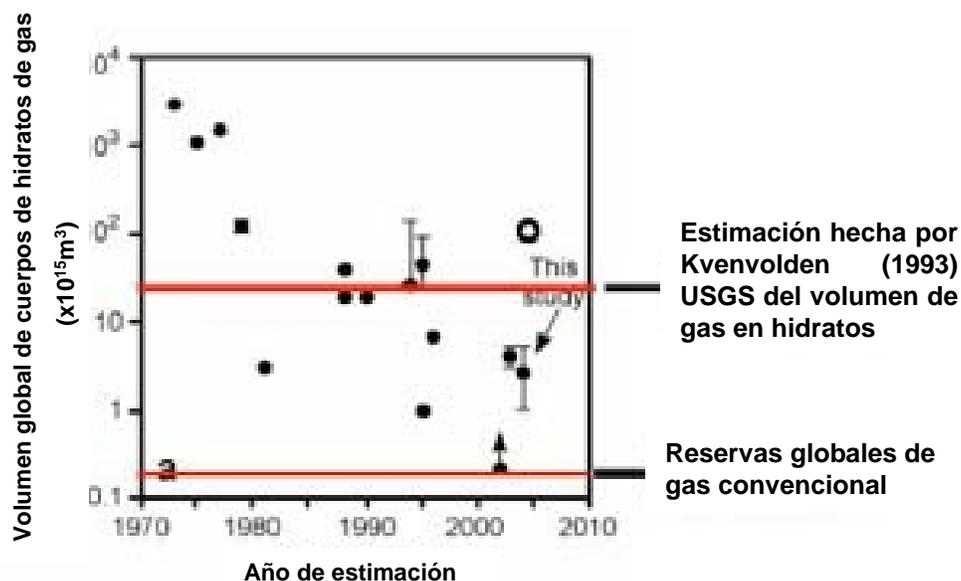


Figura 5.2. Estimación del volumen global de hidratos (puntos negros) (Milkov A.V, 2004; en NPC, 2007), incluyendo la estimación reciente (circulo en blanco) de Klauda y Sandler (2005). Éstas son comparadas a las reservas probadas de gas convencional (línea horizontal inferior en rojo) (Energy Information Agency; 2004 en NPC, 2007) (Modificada de Milkov, 2004; en National Petroleum Council, 2007).

Yacimientos de gas natural en hidratos continentales	
Volume (m ³)	Reference
1.4 × 10 ¹²	Meyer (1981)
3.1 × 10 ¹³	McIver (1981)
5.7 × 10 ¹³	Trofimuk et al. (1977)
7.4 × 10 ¹⁴	MacDonald (1990)
3.4 × 10 ¹⁶	Dobrynin et al. (1981)

Yacimientos de gas natural en hidratos oceánicos	
Volume (m ³)	Reference
3.1 × 10 ¹³	Meyer (1981)
5–25 × 10 ¹³	Trofimuk et al. (1977)
2 × 10 ¹⁴	Kvenvolden (1988)
2.1 × 10 ¹⁵	MacDonald (1990)
4 × 10 ¹⁶	Kvenvolden and Claypool (1988)
7.6 × 10 ¹⁷	Dobrynin et al. (1981)

Tabla 5.1. Estimación mundial del contenido de gas dentro de los hidratos (Kvenvolden, 1993; en Collett, 2001).

V.3. IMPACTO ECOLÓGICO POR YACIMIENTOS DE HIDRATOS DE GAS.

La relación natural del medio ambiente con los yacimientos de hidratos de gas es un factor importante a considerar en la futura explotación de toda esta fuente de energía. Los cambios climáticos a lo largo de toda la historia geológica de la Tierra y uno de los temas más nombrados en los últimos años, el calentamiento global, son puntos que definieron y definen en la actualidad un panorama de desestabilización y disociación de grandes cantidades de hidratos de gas y consecuentemente la liberación de metano a la atmósfera.

La liberación de grandes cantidades de gas invernadero a la atmósfera provocaría serios cambios climáticos a nivel global (Dickens, 2003; en Bohrmann et al., 2004); los cambios en la temperatura y presión del agua de fondo pueden desestabilizar los depósitos de hidratos, y potencialmente pueden resultar en una masiva descarga de metano (Paull et al., 2003; en Bohrmann, G., Schenck, S., 2004), por ejemplo, durante la última glaciación, se estima que ocurrió un descenso en el nivel del mar de 120m; esto pudo haber levantado la base de la zona de estabilidad del hidrato en 20 m, desestabilizando los sedimentos, ocasionando la liberación de metano a la atmósfera y a la vez causando el calentamiento de la misma. El calentamiento podría haber derretido los glaciares terminando con el período glacial del Pleistoceno.

Se considera también, que la disociación de los hidratos modificarán las condiciones de estabilidad del talud y borde de plataforma, por lo que los fondos marinos también tendrían cambios geomorfológicos.

Otro aspecto importante a considerar es la afectación directa al ecosistema que se deriva a partir de la generación de hidratos de metano.

V.3.1. EL GAS METANO Y EL EFECTO INVERNADERO.

El metano es un constituyente natural de la atmósfera de la Tierra y en los últimos años su concentración ha aumentado considerablemente por la contaminación ambiental. Es producto del decaimiento de la materia orgánica en los pantanos, basureros, y los tractos digestivos de animales; la actividad industrial, así como la producción, exploración y transporte de petróleo y gas, también producen descargas de metano en la atmósfera (Baltazar Montes, 2002). No obstante, la cantidad de metano proveniente de estas fuentes no es suficiente para impactar significativamente el clima global. Las recientes investigaciones sugieren que el aumento rápido de metano en la atmósfera es debido a la disociación y descarga de hidrato de metano natural.

Por otra parte, el bióxido de carbono (CO₂) es el principal compuesto que determina el calentamiento global, emanado a la atmósfera en mayor cantidad a partir de la desmesurada actividad humana al quemar grandes cantidades de combustible fósil y arrasar con los bosques. El segundo gas invernadero que le sigue es el metano (CH₄); el nivel de metano en la atmósfera es muchísimo menor en comparación al CO₂ (1.72 partes por millón contra

354ppm); sin embargo, su concentración actual está aumentando al doble de la velocidad que el CO₂ (Baltazar Montes, 2002).

Existen reguladores físico- químicos y biológicos del metano atmosférico, las reacciones químicas en la tropósfera se encargan de evitar la inyección de 500 millones de toneladas anuales de metano, las reacciones fotoquímicas en la estratósfera y los microbios contribuyen con otras 45 millones de toneladas; por lo antes dicho en la medida que las fuentes antropogénicas de metano sigan creciendo, sus contrapartes no lograrán compensar su crecimiento. Pese a que la descomposición del metano produce CO₂, que es el principal gas invernadero, se estima que el metano es una fuente energética ecológica, al menos mucho más que el petróleo o el carbón, debido a que por cada 20 moléculas de metano que se descomponen se libera sólo una molécula de CO₂, además el metano dura menos que el CO₂ en la troposfera (12 años contra 100 años). (Baltazar Montes, 2002).

El principal problema es cómo mantener bajo control las emisiones originadas por el hombre. El 50% de las emisiones de metano están asociadas a la producción de alimentos para la población (cultivo de arroz y ganadería). Bangladesh, China, India, Mongolia, Filipinas, Corea, Tailandia y Vietnam aportan el 84% de las emisiones totales de metano de Asia. La mitad de la población del mundo vive en Asia y en este continente se cultiva el 90% del total del arroz del planeta. En los arrozales y pantanos el proceso de descomposición se realiza bajo el agua, o sea con poco oxígeno, por lo tanto el desprendimiento de metano es mayor que el de CO₂ (Baltazar Montes, 2002).

Los depósitos de hidratos de gas natural mantienen inmensos volúmenes de metano en la proximidad a la superficie de la Tierra. Si este metano entra en la atmósfera de algún modo, residirá allí bruscamente durante 10 a 20 años, durante ese tiempo actuará como un gas invernadero muy eficaz; la liberación de grandes cantidades de gas invernadero a la atmósfera provocaría serios cambios climáticos a nivel global; el gas metano tiene 10 veces más capacidad de almacenar calor que el bióxido del carbono (CO₂), es el gas invernadero más conocido (Dickens, 2003; en Bohrmann et al., 2004).

En el Continente Antártico, dado que la temperatura de las aguas favorecen la estabilidad de los hidratos, expediciones geofísicas españolas, americanas e italianas ya han descubierto importantes acumulaciones de hidratos, entre las más importantes están los de la Península Antártica y en las islas Shetland del Sur, donde se ubican las bases científicas españolas. La desestabilización de los hidratos en estas áreas entre Tierra del Fuego y el continente antártico, puede ser un factor añadido para el calentamiento global, ya que coinciden con el agujero de ozono estable y una de las mayores zonas potenciales de fusión de casquetes polares del planeta como es el Mar de Weddell.

Los científicos que estudian el clima sugieren que la disociación de los hidratos durante un periodo glacial con bajo nivel del mar, liberaría el metano hacia la atmósfera y calentaría la tierra, posiblemente ejerciendo una acción estabilizadora del clima. Por ejemplo, durante la última glaciación, se estima que ocurrió un descenso en el nivel del mar de 120m; esto pudo haber levantado la base de la zona de estabilidad del hidrato en 20 m, desestabilizando los sedimentos, ocasionando la liberación de metano a la atmósfera y a la vez causando el

calentamiento de la misma. El calentamiento podría haber derretido los glaciares terminando con el período glacial del Pleistoceno (Collett T.S. et al., 2000).

La evidencia geológica, incluso los remanentes de hielo del pasado y los análisis químicos de aire antiguo atrapados en los bloques de hielo espesos de Groenlandia y Antártica, confirma que el clima global de la Tierra ha cambiado significativamente y continuamente a través del tiempo; en el pasado geológico, estos cambios han sido marcados por las glaciaciones periódicas. La mayoría de los científicos explican estos cambios como los resultados de perturbaciones regulares en la órbita de la Tierra y la inclinación de su eje en relación al sol. Sin embargo, es difícil de explicar por qué las edades de hielo aparecían gradualmente y por qué acababan abruptamente. Los análisis de núcleos de hielo indican que los contenidos atmosféricos de CO₂ y de metano muestran el mismo modelo; la reducción lenta al ataque de las glaciaciones y el rápido incremento de la edad de hielo. Actualmente, la mejor explicación del aumento rápido del metano en la atmósfera es la disociación de gran potencia y descarga de metano de hidrato de metano natural.

Se han analizado núcleos de hielo extraídos de pozos profundos excavados en Groenlandia y en las proximidades del polo Antártico. Se perforaron dos pozos en la cima del más importante monte de hielo de Groenlandia situada a 3,235 m sobre el nivel del mar y en la Antártida central a una altura de 3,490 m sobre el nivel medio del mar. El espesor del hielo se acerca a los 3,700 m, de manera que toda la masa está constituida por hielo depositado durante varios cientos de miles de años. El pozo tiene una profundidad de 3000 m y el núcleo extraído ha permitido analizar los dos últimos ciclos climáticos.

Cuando la neviza se transforma en hielo, el aire atmosférico queda encapsulado en burbujas. En consecuencia, al examinar el aire del núcleo se puede descubrir la composición de la atmósfera del pasado, en particular el contenido de gases de invernadero. El análisis del núcleo extraído de pozos profundos muestra que en el punto culminante de la edad glacial de Valdai la concentración de CO₂ era un 25% inferior a la del Holoceno (190-200 y 260-280 partes por millón en volumen), siendo el primer nivel característico de las edades glaciales y el último de los intervalos cálidos (Baltazar Montes, 2002).

El metano (CH₄), compuesto del carbono que formaba parte de la antigua atmósfera, está asimismo estrechamente vinculado a la temperatura. Se produjeron fuertes cambios de la concentración de metano en las dos transiciones interglaciales: hace 150,000-135,000 años y 18,000-19,000 años. Durante esos períodos, la concentración se elevó bruscamente pasando de 0.35 partes por millón en volumen en el momento álgido de las épocas glaciales a 0.6-0.7 partes por millón en volumen durante los períodos óptimos interglaciales. La edad glacial de Valdai se caracteriza por cuatro concentraciones máximas de CH₄ durante intervalos relativamente cálidos de manera más brusca que los cambios de CO₂. La diferencia se debe muy probablemente al origen del CO₂ y del CH₄. Mientras que el contenido de CO₂ en la atmósfera depende fundamentalmente de los procesos oceánicos, las fuentes de CH₄ son terrestres: zonas húmedas, depósitos de hidrocarburos, incluidos los hidratos de gas, colonias de termitas, etc. En particular, el aumento repentino de la cantidad de CH₄ atmosférico después del final de las épocas glaciales podría haberse debido a una liberación de gas en depósitos gigantescos de hidrato de gas encerrados en las barreras

continentales polares por espesos mantos de hielo (V. M. Kotlyakov, 1994; en Baltazar Montes, 2002).

El calentamiento de grandes masas de agua por causas naturales podría haber llevado al deshielo de los hidratos de gas atrapados en el subsuelo. Como consecuencia, y medido en tiempo geológico, en el pasado pudieron haberse producido liberaciones masivas de gas a la atmósfera que habrían contribuido al calentamiento global del planeta. Del mismo modo, la liberación de metano, o de hidratos de gas, por usos energéticos, podría incrementar el efecto invernadero.

Como gas invernadero, el metano contenido en el aire es 10 veces más efectivo que el bióxido de carbono para absorber la energía calorífica solar, causando el calentamiento climático. Tomando en cuenta que el metano contenido en los fondos oceánicos en forma de hidratos es aproximadamente 3,000 veces el contenido en la atmósfera, la capacidad de los hidratos submarinos como potencial agente provocador del *efecto invernadero* es enorme. Un gran deslizamiento submarino puede provocar la salida de cerca de 5 gigatonnes de metano desde los fondos submarinos hasta la atmósfera, según estimaciones realizadas en el deslizamiento de Storegga, en Noruega. Una decena de estos deslizamientos submarinos en varias zonas del planeta, pueden provocar el mismo efecto o aun mayor que el provocado por la emisión de CO₂ durante todo el siglo XX (Baltazar Montes, 2002).

Considerando lo anterior expuesto, existe una relación cíclica entre los hidratos de metano y el calentamiento global de la tierra, es decir, el calentamiento global de la Tierra ocasionaría una fuerte liberación de gas metano producto de la disociación de los hidratos por el aumento de la temperatura y a su vez la liberación de grandes cantidades de gas invernadero a la atmósfera provocaría serios cambios climáticos a nivel global.

V.3.2. DESESTABILIZACIÓN DE TALUDES.

La disociación de los hidratos marinos se lleva a cabo a partir de muchos fenómenos naturales continuos, incluso por la deposición del sedimento, la erosión, subsidencia y levantamiento del suelo oceánico, ciclos globales de temperaturas y cambios en el nivel del mar que continuamente varían la temperatura y los perfiles de presión en los sedimentos poco profundos del fondo del mar. Estos procesos que operan a escala global continuamente impactan la estabilidad de hidrato de metano natural lo que origina la descarga de metano libre hacia la atmósfera.

La disociación de los hidratos puede causar inestabilidad en los sedimentos del fondo del mar depositados sobre las pendientes de los taludes continentales. La base de la zona hidratos de gas puede representar una discontinuidad en la solidez de la columna de sedimentos (Collet, T.S. et al., 2000). La presencia de hidratos puede inhibir 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 acontecen cuando los hidratos se disocian, puede encontrarse fuera de las márgenes del Océano Atlántico de los Estados Unidos de Norteamérica. Allí, la pendiente del fondo del mar es de aproximadamente 5° y como tal, parece ser estable. Sin embargo, se han observado muchas marcas ocasionadas por deslizamientos de bloques submarinos. La profundidad de las marcas es de aproximadamente el límite somero de la zona de estabilidad de los hidratos. Los BSR son más débiles en las áreas que han experimentado deslizamientos de tierra, indicando quizás que los hidratos no están presentes actualmente y que pueden haber escapado (Collet, T.S., et al., 2000). Los científicos creen que si disminuye la presión en los hidratos, como sucedería con una regresión del mar durante un periodo glacial, entonces los hidratos podrían disociarse en la profundidad y podrían ocasionar que los sedimentos saturados de gas se deslicen (Figura 5.3).

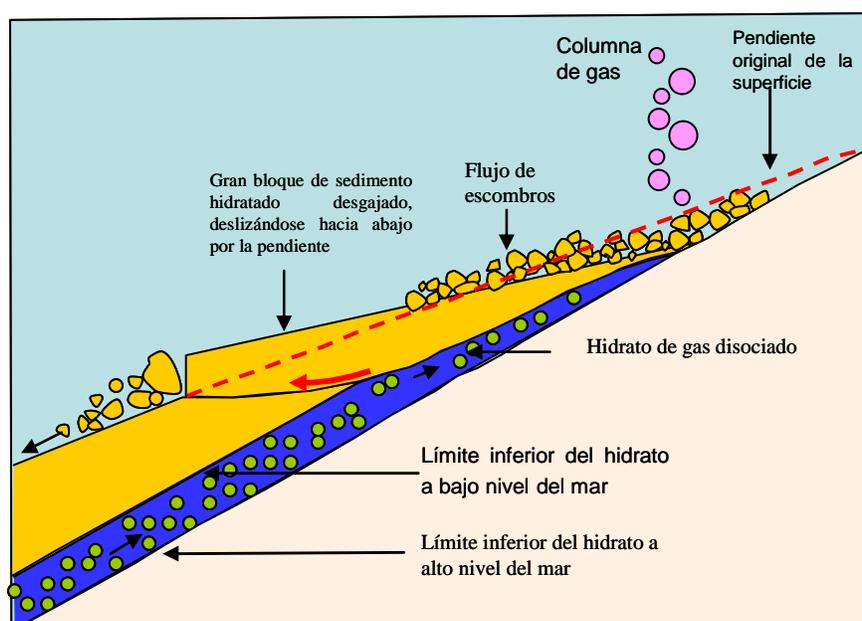


Figura 5.3. Desestabilización del talud continental producto de la disociación de los hidratos de gas marinos (Modificada de Collett, T.S., et al., 2000).

Tales zonas han sido detectadas cerca de la costa de Carolina del Sur, EE.UU. En una sección sísmica de una región donde sucedió un enorme deslizamiento de tierra submarino de 66 km ancho; se observa una formación masiva de hidratos en ambos lados del deslizamiento de tierra, sin embargo no se observan hidratos directamente debajo del deslizamiento (Collett T.S., et al., 2000) 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 maneras de detectar las áreas del fondo del mar propensas a la inestabilidad, a fin de evitar la colocación de estructuras en suelo inestable (Collett T.S., et al., 2000).

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- Los hidratos de gas son compuestos químicos sólidos cristalinos que ocurren de manera natural o que se pueden crear en el laboratorio, cuya apariencia asemejan al hielo seco; tienen una estructura clatrática o de jaula, cuya molécula está formada por agua en forma de hielo y una molécula huésped de gas, generalmente metano.
- Los hidratos de metano son una fuente potencial de energía futura, pues corresponden a la mayor reserva de gas natural no convencional que muy seguramente reemplazará a los hidrocarburos convencionales cuando los yacimientos de este combustible fósil se agoten o declinen fuertemente.
- Los hidratos de metano pueden contener hasta 10 trillones de toneladas de carbono, que representan más del doble del contenido, en los yacimientos de carbón, petróleo y las reservas de gas convencionales del mundo.
- El factor de expansión al liberarse el metano de la fase sólida a la gaseosa, hace que se deba considerar un factor de volumen de 164 de metano contra 0.8 de agua, es decir que de 1 m³ de hidrato de metano se obtienen 164 m³ de gas metano que se encontraba comprimido, y 0.8 m³ de agua.
- El origen del gas metano en los hidratos está relacionado con un origen biogénico y un origen termogénico, producido durante la diagénesis o catagénesis de la materia orgánica.
- Los gases de hidrocarburos biogénicos (principalmente metano) son producidos como una consecuencia directa de la actividad bacteriana y son usualmente generados a pocos metros debajo del fondo oceánico; relativamente formados in situ o con migración lateral.
- Los gases de hidrocarburos formados por procesos termogénicos usualmente ocurren a profundidades del piso oceánico mayores a los 1,000 m ([Floodgate y Judd, 1992](#); [en Booth, J.S, et al, 1996](#)). Estos gases se producen bajo condiciones de altas temperaturas (etapa de catagénesis y metagenésis) y grandes presiones; algunos autores mencionan en promedio 2,000 m de profundidad en cuencas sedimentarias donde la temperatura excede los 100° C ([Desa E, 2000](#)); un origen termogénico marca una migración ascendente del gas.
- Los estudios sobre hidratos han documentado únicamente dos ambientes donde se encuentran en grandes cantidades, estos son: 1) Bajo la capa de suelo congelada permanente ("permafrost"), en el Ártico, bajo condiciones de presión a profundidades de algunos cientos de metros y de temperaturas relativamente bajas. 2) En sedimentos marinos de los márgenes continentales bajo condiciones de mayor presión (profundidades de 1-4 km) y mayor temperatura. Los hidratos de gas marinos están relacionados en algunos casos con las zonas de subducción y en otros a los prismas acrecionales de los márgenes continentales. Las condiciones tectónicas que a lo largo de la historia geológica ha sido un

factor importante en la ocurrencia de hidratos de gas y que en el pasado han existido bajo condiciones semejantes a las presentes y que solo varían en su distribución global debido al movimiento de las placas tectónicas en el planeta. También se encuentran hidratos en cantidades importantes en el talud continental de las márgenes continentales pasivas, como ocurre en el Golfo de México.

- La sísmica de reflexión empleada en la exploración marina ha permitido definir la posible localización de hidratos de gas en las capas de sedimentos marinos debajo del piso oceánico.
- La principal identificación de los hidratos de metano se hace a partir de reflectores sísmicos, que en sedimentos cementados por los hidratos, representan un depósito con muy alta velocidad de propagación (aproximadamente 3,3 km/seg, alrededor del doble de la del agua salada). Debajo de las zonas con hidratos las velocidades son menores debido a que los sedimentos infrayacentes contienen en sus poros sólo agua (con velocidad de alrededor de 1,5 km/seg) o les infrayace una capa de gas libre atrapado; el hidrato funciona como un excelente sello dada su baja permeabilidad. El contraste de velocidad creado entre ambas zonas produce una reflexión muy fuerte cuya traza es paralela a la del fondo marino, por lo que fue denominada “Reflexión simulada del fondo” o en inglés “*Bottom Simulating Reflection*” o *BSR*.
- Los análisis geoquímicos que identifican zonas de agua más dulce de la esperada en los poros (disminución de la cantidad de iones de cloruro, permiten interpretar la presencia de hidratos. Si la salinidad original del agua del poro es conocida, la cantidad de disolución de cloruro puede ser directamente traducida en la cantidad de hidrato de gas que existió en la muestra.
- Se especula que el promedio de metano secuestrado en los hidratos de metano es enorme, en un rango de 3114 a 7634000 trillones de m³ (Kvenvolden, 1993 en Collett, 2001). Estimaciones mundiales del promedio de gas natural en los depósitos de hidratos es de 14 trillones a 34, 000 trillones de m³ para áreas del permafrost y de 3100 trillones a 7, 600, 000 trillones de m³ en los sedimentos oceánicos de aguas profundas (Modificada de Kvenvolden, 1993; en Collett, 2001).
- Las pruebas de producción en el ártico pueden también servir como un primer y relativo indicador de bajo costo, como una enseñanza de cómo la más grande fuente potencial de gas natural puede ser producida de los hidratos marinos (Working Document of the NPC Global Oil & Gas Study, 2007).
- La arquitectura de los depósitos marinos puede diferir de los depósitos del Ártico, no obstante elementos de la tecnología de producción del Ártico, posiblemente pueden ser transferibles a escenarios marinos (Working Document of the NPC Global Oil & Gas Study, 2007).

- Estudios regionales hechos en aguas profundas de México en su zona económica exclusiva, han permitido identificar un área potencial de 19,000 km², en donde hay buenas posibilidades de contener depósitos de Hidratos de metano (HMN), ya que en aguas profundas se han recuperado núcleos, cuyos análisis de laboratorio mostraron hasta 99% de impregnación de metano; otros estudios en el Océano Pacífico han detectado y documentado emanaciones constantes (chimeneas) de metano provenientes del lecho marino.
- Dentro de la zona económica exclusiva de México (ZEE), los sitios documentados con potencial de contener hidratos son: Leg 66- Sitios 490, 491 y 492 del Deep Sea Drilling Program en la Trinchera Mesoamericana, además frente las costas de Puerto Vallarta (Bartolome; 2002). en toda la zona de trinchera del Pacífico, en el Golfo de California, y en el Golfo de México enfrente de la Plataforma de Campeche y la lengua de Veracruz (R/V SONNE 174 en 2003 y METEOR EXPEDITION 67 Leg M67-2 en 2006)
- Es importante implementar un programa nacional de estudio, exploración y explotación futura de los Hidratos de Metano en nuestro país, apoyándose en los conocimientos, en la experiencia y los avances de los países o empresas que encabezan las investigaciones sobre el tema.
- La preparación de especialistas mexicanos en la exploración y explotación de esta fuente de energía es un factor trascendental en el desarrollo económico y energético futuro de México, por tanto, el incentivo prometedor de independencia energética cuando los yacimientos de hidrocarburos convencionales se agoten, está de por medio.
- Para nuestro país siempre ha sido una limitante el nivel tecnológico con que se cuenta para la eficaz exploración de hidrocarburos en aguas profundas; la dependencia de tecnología hacia empresas transnacionales, considero, lejos de ser la solución es la imposibilidad de crecimiento nacional y profesional de México. La implementación de nuevas políticas económicas es necesaria, donde se invierta en investigación, en la creación de nuestra propia tecnología y la preparación de nuevos profesionales comprometidos con el país.

BIBLIOGRAFÍA.

Baltazar- Montes, E., 2002. *Apuntes del tema “hidratos de metano”, tema propuesto para la asignatura geología del petróleo, de la carrera de ingeniería geológica*. Tesis profesional. UNAM F.I.

Bartolomé De laPeña, R. 2002. *Evolución tectónica del margen continental oeste de México: fosa Mesoamericana y Golfo de California*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Tesis doctoral. pág. 301

Bohrmann, G., Schenck, S., 2004. *Gas hydrate im Geosystem*. Cruise report SO 174, RV Sonne, Otega II: Lotus Omega Mumm. Balboa-Corpus Christi-Miami 1 Oct. – 12 Nov., Balboa (Panamá)-Corpus Christi (USA) 1 – 24 Oct., Corpus Christi (USA)-Miami (USA) 25 Oct. – 12 Nov., 2003. IFM-GEOMAR Leibniz-Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel, Leibniz Institute of Marine Sciences at Kiel University. GEOMAR REPORT ISSN 0936-5788.

Booth, J. S., Rowe , M. R., Fischer, K. M. 1996. *Offshore Gas Hydrate Sample Database with an Overview and Preliminary Analysis*. USGS Woods Hole Science Center Coastal and Marine Geology Program. Open-File Report 96-272.

Boswell, R. y Collett, T. 2006. *The Gas Hydrates Resource Pyramid*. Fire in the ice, Fall 06. NETL. pag. 5-7.

Boswell, R., Hutchinson, D y Pulak, R. 2005. *Changing Perspectives On The Resource Potential Of Methane Hydrates*. Fire in the ice, verano 05. NETL. pag. 1-5

Boyer, Ch., Kischnick, J., Lewis, R.E. 2006. *Producción de gas desde su origen*. Oilfield review. pág. 36-49

Burger J., Gupta D., Jacobs P., y Shillinglaw J. 2006. *Overview on hydrate coring, handling and analysis topical report – final*. DE-FC26-02NT41327.

Canet, C., Prol-Ledesma R. M., Escobar-Briones E., Mortera-Gutiérrez C., Lozano-Santa Cruz R., Linares C., Cienfuegos E., Morales-Puente P. 2006. *Mineralogical and geochemical characterization of hydrocarbon seep sediments from the Gulf of Mexico*. Marine and Petroleum Geology 23 (2006) 605–619. www.elsevier.com/locate/marpetgeo

Collett, T. S., Lewis, R., Uchida, T. 2000. *El Creciente Interés en los Hidratos de Gas*. Schlumberger Oilfield Review, otoño 2000, pág 47-61.

Collett, T.S. 2001. *Natural-Gas hydrates: Resource of the twenty-first century?* In M.W. Downey, J.C. Threet, and W.A. Morgan, eds, *Petroleum provinces of the twenty-first century*, AAPG Memoir 74, p 85-108.

Collett, T. S. 2004. *Geologic Controls on the Energy Resource Potential of Gas Hydrates*. First Forum on Natural Gas Hydrates in Mexico,

Cooper A, Hart P, Pecher I. 1998. *Cruise Report for a Seismic Investigation of Gas Hydrates in the Mississippi Canyon Region, Northern Gulf of Mexico* -- Cruise M1-98-GM. Department of the Interior. Geological Survey. Open-File Report 98-506
<http://geopubs.wr.usgs.gov/open-file/of02-368/>.

Cooper A, Twichell D, Hart P. 1999. *A seismic-reflection investigation of gas hydrates and sea-floor features of the upper continental slope of the Garden Banks and Green Canyon regions, northern Gulf of Mexico*: Report for cruise G1-99-GM (99002). U. S. Geological Survey. <http://geopubs.wr.usgs.gov/open-file/of02-368/>.

Cooper A.K., Hart P.E. 2003. *High-resolution seismic-reflection investigation of the northern Gulf of Mexico gas-hydrate-stability zone*. Marine and Petroleum Geology 19 (2003) 1275–1293. Elsevier. www.elsevier.com/locate/marpetgeo

Corona-Esquivel, R., Tritla, J., Benavides-Muñoz E., Piedad-Sánchez, N., Ferrusquia – Villafranca, I. 2006. *Geología, estructura y composición de los principales yacimientos de carbón mineral en México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana , Volumen conmemorativo del centenario, tomo LVIII, no. 1, pág. 141- 160.

Desa, E. 2000. *Submarine Methane hydrates-potencial fuel resource of the 21st century*. Gas Hydrates Research Group National Institute of Oceanography Goa, India. Workshop on Mineral Resources of the International Seabed Area. Kingston, Jamaica Chapter 14, 26-30 June 2000.p 517 -571

Federal Methane Hydrate Advisory Comitee. 2007. *An Assessment of Methane Hydrate Research Program and An Assessment of the 5-Year Research Plan of the Departmen of Energy*. Report to Congress

Fisher, C., Roberts, H., Cordes, E., Bernard, B., 2007. *Cold seeps and associated communities of the Gulf of Mexico*. Oceanography 20 (4): 118-129.
http://www.tos.org/oceanography/issues/issue_archive/issue_pdfs/20_4/20.4_fisher_et_al.pdf

Foley, J.E., Bums, D.R. 1992. *The Sensitivity of Seismic Responses to Gas Hydrates*. DOE/MC/28079-92/C0029.

Hutchinson, D., Hart, Pat., Myung Lee., Dugan, B. *Seismic Evidence for Subsurface Gas Hydrate in the Northern Gulf of Mexico*. Chevron-Texaco WesternGeco.
http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/publications/Hydrates/conference_pdfs/JIP_USGS_GeoEvidence.pdf

Hyndman, R.D y Dallimore, S.R. 2001 *Natural Gas Hydrate Studies in Canada*. Geological Survey of Canada.

Jain A.K., 2008. *Challenging Task of Gas Hydrate Exploration: Indian Scenario*. Oil and Natural Gas Corporation Ltd. India., en Hidratos de Metano: La fuente de gas natural mas importante del futuro. Memorias técnicas. Ppt

Klauda, J. B., Sandler, S.I., 2003. *Predictions of gas hydrate phase equilibria and amounts in natural sediment porous media*. Marine and Petroleum Geology 20 (2003) 459–470. www.elsevier.com/locate/marpetgeo

Kvenvolden K. 1993. *Gas Hydrates-Geological Perspective and Global Change*, Reviews of Geophysics 31, número 2, p. 173-187.

Kvenvolden, K.A., 1995. *A review of geochemistry of methane in natural gas hydrate*. Organic Geochemistry 23 (11-12): 997-1008. http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V7P-3YCMCT-1&_user=945819&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&_view=c&_version=1&_urlVersion=0&_userid=945819&md5=b4390e34c4932ac89709a8514d89bbb1

Kvenvolden, K. A., Lorenson, T. D. 2000. *Poster Distribución de Hidratos de gas en el mundo*.

Lorenson, T. D., Dougherty, J. A. y Flocks, J. G., 2002. *Hydrocarbon gases from giant piston cores in the northern Gulf of Mexico: Results from the IMAGES VIII/PAGE 127 cruise of the RV Marion Dufresne*, chapter 9 in Winters, W.J., Lorenson, T.D., and Paull, C.K., eds., 2007, Initial report of the IMAGES VIII/PAGE 127 gas hydrate and paleoclimate cruise on the RV Marion Dufresne in the Gulf of Mexico. U.S. Geological Survey Open-File Report 2004–1358. <http://quashnet.er.usgs.gov/data/2002/02018/pubs/index.html>

Marshall, A.P. 2002. *Un potencial recurso de la Plataforma Continental Argentina Los hidratos de metano*. Petrotecnia, p 72-76

McGee, T y Macelloni, L. 2006. *Seismo-acoustic imagery of a carbonate/hydrate mound in the Gulf of Mexico*. Resources and Environmental Technology University of Mississippi. Presented to the American Geophysical Union Fall Meeting San Francisco, California <http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/publications/Hydrates/pdf/AGU.pdf>

Milkov, A.V., Sassen, R., 2000. *Thickness of the gas hydrate stability zone, Gulf of Mexico continental slope*. Global and Planetary Change 17: 981-991. http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V9Y-41V3503-1&_user=945819&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&_view=c&_acct=C000048981&_version=1&_urlVersion=0&_userid=945819&md5=6c7e717758a7051dd347412ade682fb6

Milkov A. V, Sassen R. 2001. *Estimation of gas hydrate resource, northwestern Gulf of Mexico continental slope*. Marine Geology 179 (2001) 71-83. Elsevier. www.elsevier.com/locate/marpetgeo

Milkov A.V., Sassen R. 2002. *Economic geology of offshore gas hydrate accumulations and provinces*. Marine and Petroleum Geology 19 (2002)1-11. Elsevier. www.elsevier.com/locate/marpetgeo.

Moore J. C., Watkins J. S. 1982. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*: Washington, D. C., U. S. Government. Printing Office. V. 66. p. 219-287. http://www.deepseadrilling.org/66/volume/dsdp66_07.pdf

Moore, G. F., Taira, A.2001. *Results of Ocean Dilling Program, Leg 190*. http://www-odp.tamu.edu/publications/prelim/190_prel/190back.html

Mitlunt, J. 1996. *Petroleum Geochemistry and Geology*. Segunda edición. Edit W.H Freeman and Company. New York. Cap 5-7.

Moridis, G. J., Collett, Timothy.S. 2003. *Strategies for gas production from hydrate accumulations under various geological and reservoir conditions*. proceedings, tough Symposium Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California. pág1-8.

Mazurenko L. L., Soloviev V. A. 2003. *Worldwide distribution of deep-water fluid venting and potential occurrences of gas hydrate accumulations*. Geo-Mar Lett (2003) 23: pág162–176. DOI 10.1007/s00367-003-0146-x.

National Petroleum Council., 2003. *Natural Gas Hydrates*. Balancing Natural Gas Policy, Vol. 4, Chap 5, § VII, Available at <http://www.npc.org/>

National Petroleum Council (NPC). 2007. *Hydrates*. Topic paper #24. Working Document of the NPC Global Oil & Gas Study.

Pimmel, A., Claypool, G., 2001. *Introduction to shipboard organic Geochemistry on the joides Resolution*. ODP Tech. Note, 30. <http://www-odp.tamu.edu/publications/tnotes/tn30/>

Pohlman John W. 2006. *Sediment Biogeochemistry Of Northern Cascadia Margin Shallow Gas Hydrate Systems*. Tesis doctoral. The Faculty of the School of Marine Science. The College of William and Mary. Virginia.

Riedel, M., Collett, T.S., Malone, M.J., et al. 2006. *Expedition 311 summary*. Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program, Volume 311. doi:10.2204/iodp.proc.311.101.2006. <http://publications.iodp.org/proceedings/311/101/101.htm>

Riedel M., Willoughby E.C., Chen, M.A., He T., Novosel I, Schwalenberg K., Hyndman R.D., Spence G.D., Chapman N.R, y . Edwards R.N. 2006. *Gas hydrate on the northern Cascadia margin: regional geophysics and structural framework*. Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program, Volumen 311.

Riedel M., Hyndman R.D., Spence G D., Chapman R., Novosel I. *Marine Gas Hydrates off Canada's West Coast*. Geological Survey of Canada, Pacific Geoscience Centre, Sidney, BC

Sassen, R., Joye S., Sweet, S.T., DeFreitas, D.A., Milkov, A.V., MacDonald, I.R., 1999. *Thermogenic gas hydrates and hydrocarbon gases in complex chemosynthetic communities, Gulf of Mexico continental slope*. *Organic Geochemistry* 30 (7): 485- 497.
http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V7P-3WXP299-2&_user=945819&_coverDate=07%2F31%2F1999&_alid=766575041&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_cdi=5848&_sort=d&_docanchor=&view=c&_ct=1&_acct=C000048981&_version=1&_urlVersion=0&_userid=945819&_md5=ac554c70c24105b73d118975a39f1ef3

Sassen, R. 2004. *Economic Geology of Massive Gas Hydrate Deposits and Active Gas Venting in the Gulf of Mexico Slope*. First Forum on Natural Gas Hydrates in Mexico, June 28-30, , Mexico City, Mexico.

Sloan E. Dendy, 1990. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. Ed. Marcell Dekker, Inc. New York y Basel.

Spence G.D, Minshull T.A, and Fink C. 1995. *Seismic studies of methane gas hydrate, offshore Vancouver Island*. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol 146 (Pt1)*.

Sumito Morita, Yasuyuki Nakamura, Shin ichi Kuramoto, Nathan Bangs and Asahiko Taira. *Gas Hydrate BSR and Possible Fluid Migration in the Nankai Accretionary Prism off Muroto*.
<http://earth.kumst.kyoto-u.ac.jp/prismfluid/proc/no01162114.pdf>

Taira A., Hill L, Firth, J., et al., 1991. *Geological Background and Objectives*. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports, Vol. 131. p. 5-14*.
http://www-odp.tamu.edu/publications/131_IR/VOLUME/CHAPTERS/ir131_01.pdf

Tamaki, K., Pisciotto, K., Allan, J., et al., 1990. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports, Vol. 127*

Thomas C.P. 2001. *Methane Hydrates: Major energy source for the future or wishful thinking?* Idaho National Engineering and environmental laboratory.

Tréhu, A. M., Ruppel, C., Holland, M., Dickens, G. R., Torres M. E., Collett, T.S., Goldberg, D., Riedel, Michael y Schultheiss, P. 2006. *Gas Hydrates in marine sediments*. *Oceanography* Vol. 19, No. 4

U. S. Geological Survey. "Gas Hydrate: What is it?" <http://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/hydrates/what.html>.

U.S. Department of Energy. 1987. Gas Hydrates. Unconventional gas and oil recovery projects branch, pág. 25

U.S. Department of Energy, “Chemistry of Natural Methane Hydrate”
http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about_hydrates/chemistry.htm.

U.S. Department of Energy, “Arctic Regions”.
http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about_hydrates/arctic-regions.htm

Vera, E. E. *Hidratos de Gas Submarinos en el Margen Chileno*, Depto. Geofísica U. de Chile. ppt

Yuan, J., Edward, R.N. *Towed seafloor electromagnetics and assessment of gas hydrate deposits*. Department of Physics, University of Toronto, Toronto, ON, M5S 1A7, Canada.