

7



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**APUNTES DEL TEMA "HIDRATOS DE METANO",
TEMA PROPUESTO PARA LA ASIGNATURA
GEOLOGÍA DEL PETRÓLEO,
DE LA CARRERA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO
DE INGENIERA GEÓLOGA**

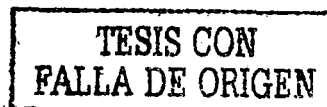
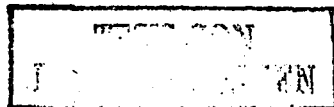
P R E S E N T A

MARÍA EUGENIA BALTAZAR MONTES

DIRECTOR DE TESIS: ING. JAVIER ARELLANO GIL



Ciudad Universitaria, noviembre de 2002.





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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-422

SRITA. MARIA EUGENIA BALTAZAR MONTES
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:

APUNTES DEL TEMA "HIDRATOS DE METANO", TEMA PROPUESTO PARA LA ASIGNATURA GEOLOGIA DEL PETROLEO, DE LA CARRERA DE INGENIERIA GEOLOGICA

	RESUMEN
I	INTRODUCCION
II	CARACTERISTICAS GENERALES
III	ORIGEN
IV	TIPOS DE DEPOSITOS
V	IMPACTO AMBIENTAL
VI	IMPORTANCIA ECONOMICA
VII	CONCLUSIONES
	BIBLIOGRAFIA

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 HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, D. F., a 10 de abril de 2002
EL DIRECTOR


ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*RLLR*gtg

ll

A mis padres,
mis hermanos y mi hermana.
Gracias por todo su apoyo y amor.

A Betito,
mi hijo, mi gran tesoro,
que con la imaginación
de sus tres abuelos
construye cotidianamente
un mundo en donde coexisten
los dinosaurios y los extraterrestres.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

A la Facultad de Ingeniería.

A todos mis maestros que compartieron generosamente sus conocimientos y contribuyeron a mi formación profesional.

A mis amigas y amigos por los grandes momentos que compartimos.

Al Ing. Javier Arellano Gil, mi director de tesis, por todo su apoyo, tiempo y dedicación.

A los ingenieros Héctor Luis Macías González, Jorge Nieto Obregón, Alberto Arias Paz y Martín Carlos Vidal García, por la revisión del presente trabajo.

ÍNDICE

	pág.
RESUMEN	
I. INTRODUCCIÓN.....	1
I.1. Objetivo.....	2
I.2. Meta.....	3
I.3. Importancia.....	3
I.4. Reseña histórica.....	4
II. CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	6
II.1. Composición química.....	8
II.2. Propiedades y características químicas.....	11
II.2.1. Estructuras de los hidratos de metano.....	13
II.3. Propiedades y características físicas.....	18
III. ORIGEN.....	21
III.1. Teorías sobre el origen de los hidrocarburos.....	21
III.2. La materia orgánica.....	23
III.3. El ciclo del carbono.....	31
III.4. Generación de hidrocarburos.....	33
III.5. Tipos de hidrocarburos.....	41
III.6. Gas natural.....	47
III.7. Generación de hidratos de metano.....	51
IV. TIPOS DE DEPÓSITOS.....	57
IV.1. Localización.....	57
IV.2. Secuencias almacenadoras.....	62

IV.3. Trampas.....	67
IV.4. Respuesta sísmica.....	71
IV.5. Sitios reportados.....	79
V. IMPACTO AMBIENTAL.....	93
V.1. Contaminación.....	96
V.2. Problemas de estabilidad.....	100
V.3. Ventajas y desventajas.....	103
V.4. Problemas para su explotación.....	104
VI. IMPORTANCIA ECONÓMICA.....	107
VI.1. Valor Económico.....	107
VI.2. Reservas.....	109
VI.3. Potencial como combustible.....	114
VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	118
BIBLIOGRAFÍA.....	120
APÉNDICE I: Glosario.....	124
APÉNDICE II: Programa actual y Propuesta de temario de la asignatura Geología del Petróleo.....	133

RESUMEN

El presente trabajo sobre los hidratos de metano corresponde a un tema que se propone incorporar a los temarios de las asignaturas Geología del Petróleo y Geología de Explotación, de las carreras de Ingeniero Geólogo e Ingeniero Petrolero respectivamente, que se imparten en la Facultad de Ingeniería de la UNAM a través de la División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra.

Los subtemas que se tratan fueron analizados y sintetizados de diferentes libros y publicaciones, así como páginas electrónicas. Las fuentes bibliográficas permitieron conjuntar en un sólo trabajo la información para facilitar la labor de consulta de los interesados.

En este trabajo se describen las propiedades físicas y químicas de los hidratos de metano, su origen, su transformación y generación en sus diferentes condiciones de depósito, la importancia de los hidratos de metano como recurso potencial energético para el futuro. También se estudia cómo afectaría la explotación de hidratos de metano en el medio ambiente.

Los hidratos de metano son acumulaciones naturales de agua (H_2O) y gas metano (CH_4) que forman sustancias sólidas cristalinas. Se encuentran principalmente en los poros de los sedimentos arenosos bajo condiciones de presión y temperatura característicos en las regiones polares (Permafrost), en el borde de plataforma y en el talud continental; en estas condiciones el agua y el gas metano reaccionan formando sólidos que cementan los granos de los sedimentos en estos ambientes.

Los hidratos de metano se forman generalmente por la descomposición bacteriana de materia orgánica de los sedimentos marinos (en este caso su origen es biogénico), o bien por procesos de transformación térmica de hidrocarburos en profundidad (origen termogénico). La mayoría de los hidratos de gas natural se forman del metano biogénico; los hidratos de metano se encuentran principalmente asociados a zonas donde ocurrió gran actividad microbiana en sedimentos de grano fino, ricos en materia orgánica. Este tipo de hidrato se concentra donde hay una acumulación rápida del detritus y también donde hay una acumulación rápida de sedimentos (que protege al detritus contra la oxidación).

El hidrato de metano es un compuesto que requiere de condiciones muy específicas para formarse y ser estable, cambiando esas condiciones se disocia rápidamente (agua y gas metano). Un metro cúbico de hidrato de metano contiene aproximadamente 164 metros cúbicos de gas metano con tan solo 0.84 metros cúbicos de agua. Una área importante de investigación del hidrato es la determinación de estas condiciones, para que pueda entenderse la presencia y abundancia de los hidratos en diferentes sitios.

En muchas áreas, la existencia de hidratos de metano natural es inferida solamente por evidencias indirectas obtenidas a través de los estudios geofísicos o el análisis geoquímico de muestras de sedimento. Hay, sin embargo, un número creciente de sitios donde la información está siendo reunida detalladamente y existe la certeza de su acumulación. Cada uno de estos sitios, con sus propias y únicas escenas geológicas, está aportando conocimientos y datos que fortalecen las teorías iniciales de formación del hidrato.

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

Uno de los riesgos implícitos que se tendría al explotar esta fuente de energía es el posible agravamiento del efecto invernadero, ya que el metano es 10 veces más potente que el dióxido de carbono. Si el metano llega intacto a la atmósfera provoca un efecto invernadero, el recalentamiento global aumentaría la presión del océano desestabilizando el metano del fondo marino y liberándolo hacia la atmósfera e intensificando así el efecto invernadero.

Se encuentran bajo consideración tres métodos principales para extraer el metano de los hidratos: la despresurización, la inyección térmica y la inyección de inhibidores. En la despresurización, la presión del hidrato de gas disminuye lo suficiente para provocar la disociación.

En la Zona Económica Exclusiva de México se tienen sitios de interés por evaluar tanto en la parte norte del Golfo de México (frente al Estado de Tamaulipas), como en el Océano Pacífico (frente a los estados de Oaxaca, Guerrero y Chiapas) y en el Golfo de California.

Los hidratos de gas constituyen una fuente energética alternativa de gran proyección mundial; los cálculos varían ampliamente, pero muchos expertos están de acuerdo en que los hidratos de metano existentes prácticamente duplican las reservas convencionales actualmente conocidas de los recursos energéticos fósiles. La energía almacenada en los hidratos de metano podría potencialmente alimentar a nuestro planeta en el futuro, aunque los problemas asociados a su explotación apenas se están comprendiendo. Los adelantos sobre el conocimiento general de los hidratos de gas natural son cada día más amplios.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Los requerimientos de cada vez mayores cantidades de hidrocarburos en las diferentes actividades del ser humano, ante el todavía reducido desarrollo comercial de fuentes alternas de energía; ha llevado a los países productores de petróleo a la búsqueda de nuevas alternativas para incrementar sus reservas, esto implica la búsqueda de fuentes alternas de energía a futuro. La respuesta podría estar en una sustancia natural congelada que se localiza debajo del piso oceánico, llamado hidrato de metano.

Los hidratos de metano o hielos de metano son acumulaciones naturales formadas por moléculas de gas metano (CH_4); son resultado de agentes térmicos o de la descomposición microbiana de la materia orgánica de los sedimentos marinos. El gas es atrapado dentro de pequeñas celdas de agua congelada (H_2O), que formando cristales, se encuentran en forma de hidratos de gas bajo la capa de suelo congelada de las regiones polares y en sedimentos marinos de los márgenes continentales en todo el mundo. Bajo ciertas condiciones fisicoquímicas el agua y el gas metano reaccionan y se convierten al estado sólido, en forma de hielo, cementando los granos de sedimento presentes en estos ambientes. El gas se almacena en una molécula de agua conocida como *clatrato*; los hidratos de metano adoptan formas geométricas que corresponden con moléculas de H_2O que atrapan en su interior moléculas de CH_4 .

Lo interesante de este arreglo, es que un metro cúbico de hidratos de gas (metano principalmente) equivale a 164 metros cúbicos de gas al expandirse, es decir, es gas que está comprimido. Esta es la razón por la que la existencia de estas reservas de gas han despertado el entusiasmo de los científicos e industriales que, sin embargo, no ignoran lo compleja que sería su explotación.

A pesar de que es una gran promesa energética, surgen grandes dudas acerca de cómo lograr la extracción de gas con rendimiento económico, sin que la energía que contienen cause problemas, ya que las condiciones en las que permanece estable en el fondo del mar son muy particulares: presión relativamente elevada (por lo menos 500 metros debajo de la superficie) y temperaturas bajas (cercanas al congelamiento).

Los hidratos de metano constituyen la mayor reserva de metano que existe en el planeta (más del doble de las reservas de carbón y de todos los otros combustibles fósiles sumados), sólo que, actualmente, su explotación es extraordinariamente complicada y no se ha diseñado todavía un método suficientemente eficaz para obtener de ellos la energía deseada; sin embargo, no es sorprendente que los gobiernos y las industrias de petróleo y gas natural se hayan interesado en investigar esta nueva fuente de energía alternativa. Los países que desean gastar menos en combustible importado han comenzado a buscar soluciones frente a las dificultades técnicas y financieras.

México hace frente al reto de incrementar las reservas de hidrocarburos a través de las actividades de exploración y explotación. El descubrimiento y desarrollo de nuevos yacimientos, con la aplicación de tecnologías modernas permite aumentar la recuperación de hidrocarburos y a explotar más eficientemente los ya descubiertos. No obstante, debe tomarse en cuenta que los descubrimientos de nuevos yacimientos de hidrocarburos tienden a ser menos frecuentes, debido a las grandes profundidades de tirante de agua, a los altos costos de exploración y a que los yacimientos más fáciles de encontrar ya fueron descubiertos.

La necesidad de incorporar nuevas reservas de crudo y gas obligan a continuar explorando, no sólo las partes terrestre y marina somera, sino también explorar y explotar yacimientos en aguas profundas dentro y fuera de las zonas exclusivas de cada país. En este sentido el Golfo de México cuenta con muchas probabilidades de éxito. Es importante hacer notar que en el futuro próximo la industria petrolera entrará en una etapa difícil, por lo que es necesario estar preparado para asumir tales retos. La localización y extracción de hidrocarburos necesitará nuevas tecnologías, además de buscar paralelamente fuentes alternas de energía, las cuales, al igual que los combustibles fósiles, deberán ajustarse a las restricciones para la protección ambiental.

En México se tienen sitios de interés por evaluar la exploración de aceite y gas. Con referencia a los hidratos de metano se tienen buenas posibilidades tanto en la parte norte del Golfo de México (frente al Estado de Tamaulipas), como en el Océano Pacífico (frente a los estados de Oaxaca, Guerrero y Chiapas).

I.1. OBJETIVOS

- El objetivo principal es conocer el origen, características e importancia de los hidratos de metano como una fuente importante de energía en el futuro de México.

Los objetivos específicos son:

- Incorporar el tema hidratos de metano como un tema de las asignaturas Geología del Petróleo y Geología de Explotación de las carreras de Ingeniero Geólogo e Ingeniero Petrolero respectivamente.
- Que los alumnos de ingeniería en Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería, cuenten con información actualizada en español que sea de fácil consulta sobre el tema de hidratos de metano.
- Describir las propiedades físicas y químicas de los hidratos de metano.
- Conocer el origen de los hidratos de metano y su localización.
- Conocer la transformación y generación de hidratos de metano en sus diferentes condiciones de depósito.

- Describir la importancia de los hidratos de metano como un recurso potencial energético para el futuro.
- Estudiar cómo afectaría la explotación de hidratos de metano el medio ambiente.

I.2. METAS

Las metas de este estudio son primordialmente las siguientes:

- Explicar las ventajas y desventajas de utilizar los hidratos de metano como combustible.
- Contar con mapas de localización de hidratos de metano.
- Contar con diagramas de fases de la zona de estabilidad de los hidratos.
- Contar con esquemas sobre los diferentes tipos de depósitos de los hidratos de metano (trampas).
- Tener textos y figuras sobre hidratos de metano que sirvan como referencia en el proceso de aprendizaje de los alumnos de ingeniería geológica e ingeniería petrolera.

I.3. IMPORTANCIA

Ha sido en los últimos años cuando los gases hidratados son considerados como una de las fuentes más importantes de recursos energéticos mundiales, muy por encima de la reservas convencionales conocidas actualmente de crudo y gas natural. Las reservas que se estiman de Carbono asociado a los hidratos son de 10^4 gigatoneladas, lo que representa el doble de Carbono que hay en todos los combustibles fósiles conocidos.

El estudio de los hidratos de metano es muy importante por las siguientes razones:

- Los hidratos de gas tienen un alto potencial como fuente de energía para el futuro, ya que contiene un volumen grande de metano, que es un hidrocarburo con un alto poder calorífico.
- La explotación de los hidratos de metano puede afectar la estabilidad de los sedimentos donde se encuentran. Las áreas con hidratos tenderían a ser menos estables que otras áreas del fondo marino. Consecuentemente, es importante evaluar su presencia antes de la construcción de estructuras submarinas relacionadas con su exploración.
- La falta de estabilidad puede influir en la presencia de derrumbes submarinos a gran escala. Tales derrumbes de sedimentos pueden liberar grandes cantidades de metano a la atmósfera, que podría afectar el clima global.
- La investigación debe no solo ayudar a resolver estos problemas sino además sugerir los caminos por medio de los cuales los hidratos puedan ser utilizados en forma rentable para aumentar los volúmenes de gas de las reservas y reducir los costos.

I.4. RESEÑA HISTÓRICA

La siguiente reseña y perspectiva histórica fueron tomadas de: Carroll J. J. "An Introduction to Gas Hydrates"; Ortega-Osorio A., 2001; Ballowh S. *et al.* "Methane Hydrate".

Los hidratos de metano fueron descubiertos de forma experimental en 1811 por Sir Humphrey Davy y Michael Faraday, mientras trabajaban con mezclas de cloro y agua. Faraday y Davy notaron la formación de un sólido parecido al hielo el cual se formaba arriba del punto de congelación del agua. Los hidratos seguían siendo una gran curiosidad a lo largo del siglo XIX cuando varios investigadores estaban principalmente interesados en: (1) qué componentes forman los hidratos y (2) a qué condiciones de presión y temperatura existían. Mucho de este trabajo de investigación fue dirigido en Francia por Villard, De Forcrand, y colaboradores quienes descubrieron muchos componentes que formaban hidratos. Fue en los años treinta del siglo pasado cuando Hammerschmidt comprendió que la congelación en las tuberías de alta presión era debida a la formación de hidratos.

A mediados del siglo XX la industria de gas natural en América del Norte enfocó su atención en estudiar las condiciones de formación de los hidratos, mucho de este trabajo se dirigió en la Universidad de Michigan bajo la dirección de Katz. En Europa, Von Stackelberg examinaba a los hidratos desde un punto de vista más teórico; a finales de 1940 y principios de 1950, estudió la estructura de los hidratos usando la difracción de la radiografía. En 1959, Van der Waals y Platteeuw, fueron los primeros en publicar un modelo termodinámico riguroso para calcular las condiciones a las que se forman los hidratos, éste modelo es la base para modelos más modernos (y más exactos).

Fue hasta 1964 cuando en una perforación en el norte de Siberia, se obtuvo gas natural en estado congelado, lo que demostró que este tipo de manifestación era un fenómeno posible en la naturaleza. Posteriormente en la década de los setentas del siglo pasado, científicos participantes en expediciones de perforación en aguas profundas, descubrieron que los hidratos no solo se forman naturalmente en las regiones continentales polares, sino también en los sedimentos de las aguas profundas en los límites continentales exteriores. En la actualidad la investigación marina ha permitido demostrar la formación de cúmulos de hidratos en los fondos marinos bajo condiciones naturales.

Perspectiva histórica:

1810 Humphrey Davy y Michael Faraday descubren el hidrato de metano.

1888 Villard, encontró experimentalmente hidratos de CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , y N_2O .

1930 Hammerschmidt, determina que los hidratos están bloqueando la línea de gas e investiga los gases del inhibidor.

1940 Los soviéticos suponen la existencia natural de los hidratos de metano en los climas fríos del norte.

1946 El Buró Americano de Minas publicó el primer estudio definitivo de hidratos.

1952 La estructura Molecular de hidrato es determinada (*clatratus*).

1960 Los soviéticos reconocen el hidrato de metano como una posible fuente de energía, descubren y producen en volúmenes pequeños el primer depósito mayor de hidratos en el permafrost siberiano.

1970 Se taladra un reflector sísmico que simula el fondo y se encuentra asociado con la base de estabilidad de los hidratos.

1981 Se recupera una muestra intacta de hidrato perforada desde una embarcación en Guatemala.

1990 Se realiza la caracterización inicial y cuantificación de hidrato de metano en depósitos en agua profunda.

2000 Empiezan los esfuerzos por cuantificar la situación y abundancia de los hidratos. Comienzan los esfuerzos de aprovechar el gran potencia de los hidratos como combustible.

En el Apéndice I: Glosario, se definen y describen los principales conceptos que se utilizan en este trabajo.

En el Apéndice II se encuentran el programa actual y la propuesta de temario de la asignatura Geología del Petróleo.

CAPÍTULO II. CARACTERÍSTICAS GENERALES

Las primeras muestras de hidratos de metano obtenidas a bordo de buques oceanográficos mostraron un aspecto exterior semejante a un fragmento de hielo de color blanquecino; dichos fragmentos en condiciones atmosféricas se derriten con rapidez, debido al cambio de presión y temperatura, transformándose en agua y gas metano. Los trozos de hielo recogidos de los fondos marinos tienen la particularidad de inflamarse cuando se les acerca una llama, de ahí el sobrenombre de *hielo que arde*. Muchos de los gases conocidos tienen la capacidad para formar hidratos (bióxido de carbono, anhídrido sulfúrico y algunos hidrocarburos de bajo número de carbono), pero es el hidrato del gas metano el que aparece abundantemente en los fondos marinos.

El hidrato de metano formado naturalmente es la forma más común de la única clase de compuestos químicos conocido como *clatrates*, una clase única de sustancia química en que las moléculas de un material (en este caso agua), forma una celosía sólida que adjunta las moléculas clasificadas apropiadamente según el tamaño de otro material (en este caso, metano). El hidrato de metano es un hidrato de gas donde el gas es el metano (CH_4 , el componente primario de gas natural). El hidrato de metano de los fondos oceánicos se refiere a hidratos del metano formados naturalmente y no como resultado de alguna actividad humana.

La rara asociación de dos moléculas en una sustancia sólida, ha intrigado a científicos desde hace casi dos siglos, desde la primera fabricación de hidrato del cloro. Sin embargo, el asunto parecía ser completamente académico hasta que el hidrato sólido fue encontrado tapando las líneas de transmisión de gas natural en los años treinta del siglo pasado. En la década de los sesentas del siglo pasado los científicos descubrieron que el hidrato podría también formarse en medio ambientes naturales. Encontraron los primeros depósitos naturales en la región de Siberia y en América del Norte, donde la sustancia era conocida como gas de pantano.

En la década de los setentas del siglo pasado los geofísicos George Bryan y John Ewing, del Observatorio Lamont-Doherty de la Universidad de Columbia (Estados Unidos), encontraron que los hidratos de metano también se ocultaba debajo de la flora marina. La inquietud provino de los estudios sismológicos del Arrecife Negro, una formación de 100 kilómetros de largo frente a la costa este norteamericana, en Carolina del Norte. Los sismólogos pudieron distinguir lo que yace debajo de la flora marina, gracias a la respuesta sónica. A 600 metros debajo de la flora marina, Bryan y Ewing observaron en una sección sísmica una inusual refracción, similar al contorno de un arrecife. Eran los depósitos de la probable energía del futuro.

La mayoría de la información que se conoce sobre las propiedades físicas y químicas de los hidratos del metano; ha sido conocida a partir de observaciones de laboratorio, donde se utiliza una máquina para crear las condiciones apropiadas de presión y la temperatura para la formación del hidrato. Puede estudiarse también en situ, utilizando los datos en donde se han realizado considerables progresos definiendo las condiciones en que se forman los hidratos, las estructuras que toma, y las propiedades que exhibe. Estos datos están verificándose en el campo enviando cada vez más submarinos y sondas al mar profundo, taladrando la base del piso oceánico. Los programas de sensores remotos revelan cómo existen los hidratos y cómo actúan recíprocamente con el ambiente natural. En plataformas marinas, se realizan los estudios geológicos necesarios para conocer las características de los depósitos de carbono en forma de hidratos de gas.

El hidrato de gas se encuentra en forma abundante en los sedimentos suboceánicos en las regiones polares (agua poco profunda) y en los sedimentos del talud continental (agua profunda), donde existen condiciones adecuadas de presión y temperatura para hacerlo estable. Los hidratos sólo son estables en un rango específico de temperaturas, cercanas a los 0 °C. Por lo tanto, los hidratos se pueden encontrar en zonas de bajas temperaturas como el permafrost de Siberia y Alaska o depósitos oceánicos profundos, como el Blake Plateau, en la costa este de Estados Unidos. Los hidratos de metano se encuentran en los espacios del poro de sedimentos, y puede formar cementos, nodos o capas (figura 2.1).

Actualmente, grupos de científicos en EE.UU., Canadá, Noruega, Gran Bretaña y Japón están investigando sobre los hidratos de gas y el papel que éstos juegan en el clima global y el futuro de los combustibles.



a) Vetillas de hidrato de gas (blanco) en sedimento de un núcleo.¹ b) Nódulo de hidrato de gas.²

Figura 2.1

² "A Meeting Place for the Methane Hydrates Community", [En línea]. Disponible: <http://www.hydrate.org/about/geology.cfm>, 20/01/02.

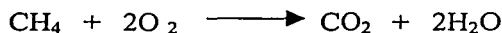
¹ U. S. Geological Survey. "Gas Hydrates a Possible Future Energy Resource?", 10/06/98, [En línea]. Disponible: <http://walrus.wr.usgs.gov/resour-ces/hydrate.html>, 17/01/02.

II.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA

Los hidratos de metano son acumulaciones naturales de agua (H₂O) y gas metano (CH₄) que forman sustancias sólidas cristalinas, estables a temperaturas cercanas a los 0 °C. Al combinarse el agua y el metano se generan microcristales, similares en apariencia al hielo, cada uno de ellos constituidos por moléculas de gas metano rodeadas por una malla de moléculas de agua llamada *clatratos*, los cuales son componentes formados por moléculas con una estructura hueca y moléculas más pequeñas incluidas en la cavidad.

El conocimiento concreto del metano se debe a Vota que en 1778 y a Henry en 1805, enseñaron a diferenciarlo de otros gases combustibles. El metano que se desprende del cieno de los pantanos y charcos, procedente de la putrefacción de sustancias orgánicas, especialmente celulosa, por la acción de microorganismos, va también acompañado de gas carbónico y de nitrógeno y, a veces, de hidrógeno sulfurado.

El metano se forma en el laboratorio por síntesis directa del hidrógeno y el carbono a temperaturas altas: $C + 2H_2 \longrightarrow CH_4$, entre los 1100 °C y 2100 °C a presiones por encima de las 200 atm, el metano es el único hidrocarburo saturado que se forma. El metano es el principal constituyente del gas natural. El metano es un gas incoloro, inodoro, no es venenoso, se descompone por el calor en carbono e hidrógeno. El metano arde en el aire o en oxígeno con una llama generalmente luminosa. Al mezclarlo con oxígeno o con aire forma una mezcla muy explosiva, que al reaccionar forman bióxido de carbono y agua.



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, siendo su fórmula H₂O.

El agua es la única sustancia que existe a temperaturas ordinarias en los tres estados de la materia: sólido, líquido y gas (tabla 2.1).

SÓLIDO	LÍQUIDO	GAS
Polos Glaciares Hielo en las superficies de agua en invierno Nieve Granizo Escarcha	Lluvia Rocío Lagos Ríos Mares Aguas subterráneas Océanos	Niebla Nubes

Tabla 2.1. Los tres estados de la materia del agua.

El agua es un líquido inodoro e insípido. Tiene un cierto color azul cuando se concentra en grandes masas. 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, cristaliza en el sistema hexagonal, llamándose nieve o hielo según se presente de forma esponjosa o compacta, se expande al congelarse, 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, no solo en organismos vivos, sino también 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, 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.

La atracción entre las moléculas de agua tiene la fuerza suficiente para producir un agrupamiento de moléculas. 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 *punto de hidrógeno*. Estos enlaces son los que dan lugar al aumento de volumen del agua sólida y a las estructuras hexagonales de que se habló anteriormente.

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 Cl₂, Br₂, CHCl₃, H₂S 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 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.

En la tabla 2.2 se muestra la composición de los hidratos de gas constituyentes del gas natural. Los valores de X representan el contenido de agua obtenido por los diferentes investigadores que han publicado sobre el tema.

Investigador	Metano $\text{CH}_4 \cdot \text{XH}_2\text{O}$	Etano $\text{C}_2\text{H}_6 \cdot \text{XH}_2\text{O}$	Propano $\text{C}_3\text{H}_8 \cdot \text{XH}_2\text{O}$	Bióxido de carbono $\text{CO}_2 \cdot \text{XH}_2\text{O}$
De Forcrand	6	7		6
Villard				6
Hammerschmidt	6	6	7	
Roberts, Brownscombe, y Howe	7	7		
Miller y Strong			6	
Deaton and Frost	7	8	18	7

Tabla 2.2. Composición de los hidratos.³

Las principales características químicas del Carbono, Hidrógeno y Oxígeno, elementos que forman a los hidratos de metano se mencionan a continuación (tabla 2.3):

CARBONO "C"	HIDRÓGENO "H"	OXÍGENO "O"
•Sólido	•Gas	•Gas
•Grupo IV en la Tabla Periódica de los elementos	•Grupo I en la Tabla Periódica de los elementos	•Grupo VI A en la Tabla Periódica de los elementos
•Numero atómico: 6	•Numero atómico: 1	•Numero atómico: 8
•Tetravalente (4 valencias)	•Valencia: 1	•Valencia: -2
•Masa atómica: 12.0115	•Masa atómica: 1.00797	•Masa atómica: 15.9994
•Peso atómico: 12.011	•Peso atómico: 1.0078	•Peso atómico: 16
•Porcentaje del "C" en los hidrocarburos: 82-87 %	•Porcentaje del "H" en los hidrocarburos: 13-18 %	•Porcentaje del "O" en los hidrocarburos: < 2 %

Tabla 2.3. Características de Hidrógeno, Carbono y Oxígeno.

³ American Gas Association, 1966. *Gas Engineers Handbook*, Capítulo 8, Gas Hydrates and Dehydration by Hammerschmidt, E. G., Knapp K. R. y Perkins C. L. pp 4/72-4/76. 1ª ed, 2ª reimpresión. The Industrial press. New York, N.Y.

II.2. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Los hidratos de gas son compuestos cristalinos que pertenecen a un grupo de sólidos llamados *clatratos*. Son formados de las mezclas de agua y los gases de baja masa molecular a presiones altas y a temperaturas bajas. Por el hidrógeno afianzando, las moléculas de agua forman un marco que contiene cavidades relativamente grandes que pueden ser ocupados por ciertas moléculas de gas que consiguen enlazar a la estructura por las fuerzas de Van der Waals (figura 2.2 y 2.3). Los hidratos formados de gases incluye alcanos ligeros (metano a isobutano), bióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, nitrógeno y oxígeno.

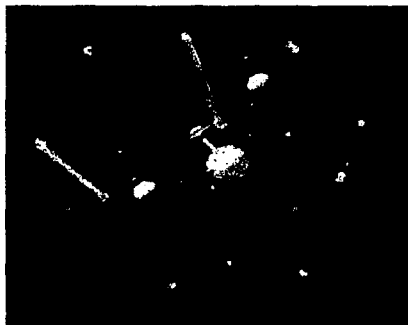


Figura 2.2. Estructura del hidrato de metano mostrando en el centro dentro de un enjaulado de hielo.⁴

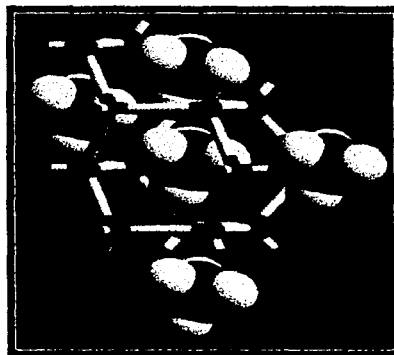


Figura 2.3. Imagen de la estructura el metano molecular de hidrato de metano.⁵

La estructura de estos hidratos consiste en jaulas congeladas que pueden absorber pequeñas moléculas de gas como metano, dióxido de carbono y sulfato de hidrógeno. 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.

La transición de la fase química ocurre cuando el agua a la presión atmosférica se enfría a una temperatura de 0 °C (32 °F). En ese punto, la energía en el sistema es lo suficientemente pequeña para permitir que los átomos de hidrógeno y oxígeno se enlacen juntos. El agua líquida se reestructura en un sólido rígido, llamado hielo. Sin embargo, resulta que en la naturaleza este proceso no siempre esta bien definido.

⁴ U. S. Geological Survey. "Gas Hydrate: What is it?", 01/03/99, [En línea]. Disponible: <http://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/hydrates/what.html>, 17/01/02.

⁵ U.S. Department of Energy. "Chemistry of Natural Methane Hydrate", 23/10/01, [en línea]. Disponible: http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about_hydrates/chemistry.htm, 17/01/02.

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, a menos que alguna molécula externa de tamaño apropiado entre en la estructura y soporte la cavidad. En la naturaleza, la molécula externa más abundante es el metano (CH_4). El resultado es un compuesto sólido que normalmente se llama *hidrato 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, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, 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 $\text{XCH}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, -con X tan grande como ocho, pero normalmente menor- e incluso esto es incorrecto, ya que otros gases invitados también 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 (Figura 2.4). 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 tienen moléculas invitadas que son gases a temperatura y presión estándar. El más común es 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 celosías 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.

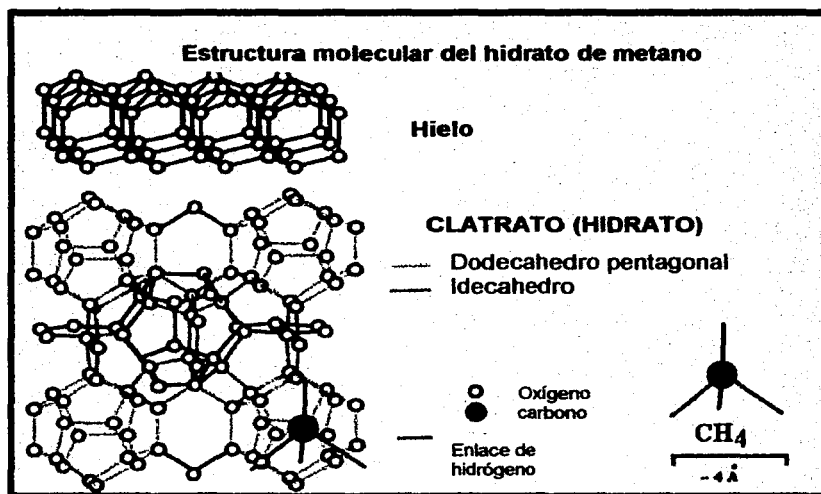


Figura 2.4. La estructura cristalina de hielo (agua congelada) puede cambiar significativamente con la presencia de impurezas, por ejemplo el metano. Si las impurezas o las moléculas del invitado son del tamaño apropiado, se forma un clatrato con estructura de enrejado alrededor de ellos sosteniéndolos a través de las fuerzas de Van der Waals (Sloan, 1990).⁶

II.2.a. ESTRUCTURAS DE LOS HIDRATOS DE METANO

Las propiedades físicas y estructurales de los hidratos son descritas en la literatura por Sloan, 1990. Las estructuras de hidratos clatrulinos son diferente de cualquiera de las formas conocidas de hielo, aunque son también sólidos que consisten principalmente de moléculas de agua.

Existen tres estructuras cristalinas de hidratos: I, II y H; cada una con diferente número de moléculas de agua y de gas, dependiendo de la composición de la fase y de las propiedades del sistema. La proporción de moléculas de agua es llamada número de hidratos. La suma de gas contenido en el hidrato es llamada grado de relleno. Las estructuras I y II consisten de dos tipos de cavidades y la estructura H consiste de tres tipos de cavidades.

Las estructuras I y II. Corresponden con dos tipos de estructuras primarias de los hidratos que son conocidas por existir en la naturaleza, denominándolas simplemente como estructura I y II. Estas estructuras representan arreglos distintos de moléculas de agua que producen formas ligeramente diferentes, tamaños y variedad de cavidades. La forma de la

⁶ U. S. Geological Survey. "Where are Natural Methane Hydrates Found?", [En línea]. Disponible: <http://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/hydrates/where.html>, 17/01/02.

la estructura depende de varios aspectos del gas invitado disponible, si este gas es metano se forman estructuras como las que se muestran en la figura 2.5.

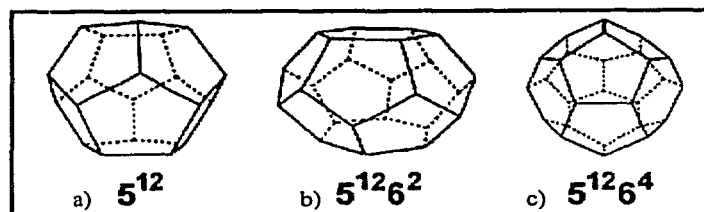


Figura 2.5. Los tres tipos de cavidades presentes en la estructura I y II de los hidratos de metano.⁷
 a) Estructura formada por 12 pentágonos; b) Estructura formada por 12 pentágonos y 2 hexágonos;
 c) Estructura formada por 12 pentágonos y 4 hexágonos.

Una unidad célula de los hidratos de estructura I, consiste de 46 moléculas de agua que rodean 2 cavidades pequeñas y 6 cavidades medianas. La unidad célula de la estructura II de hidrato consisten de 136 moléculas de agua que crean 16 cavidades pequeñas y 8 cavidades grandes. Ambas estructuras I y II pueden ser estabilizadas llenando 70 por ciento de las cavidades por un solo gas invitado, éstos son conocidos como hidratos simples (Tabla 2.3).

	I	I	II	II	H	H	H
TAMAÑO DE CAVIDAD	PEQUEÑO	MEDIO	PEQUEÑO	LARGO	PEQUEÑO	PEQUEÑO	ENORME
FORMA DE CAVIDAD	CUBICA	CUBICA	CUBICA	CUBICA	HEXAGONAL	HEXAGONAL	HEXAGONAL
DESCRIPCIÓN DE CAVIDAD	5 ¹²	5 ¹² 6 ²	5 ¹²	5 ¹² 6 ⁴	5 ¹²	4 ³ 5 ⁶ 6 ³	5 ¹² 6 ⁸
NUMERO/UNIDAD DE CELULA	2	6	16	8	3	12	1
RADIO PROMEDIO (Å)	3.91	4.33	3.902	4.683	3.91	4.06	5.71
REL. TAMAÑO DE CH ₄	88.6%	75.7%	88.9%	67.5%	88.6%		
NÚMERO DE COORDINACIÓN	20	24	20	28	20	20	36

Tabla 2.3. Características de las cavidades de los hidratos.⁸

⁷ U.S. Department of Energy, "Chemistry of Natural Methane Hydrate", 23/10/01, [en línea]. Disponible: http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about_hydrates/chemistry.htm, 17/01/02.

⁸ *Ibidem*.

Estructura H. Recientemente Ripmeester y otros (1987), descubrieron una tercera estructura del hidrato (la estructura H); para que se forme requiere la cooperación de dos gases invitados (uno grande y uno pequeño) para ser estable. Una célula de la unidad de este nuevo hidrato doble, consiste en 34 moléculas de agua que producen 3 cavidades pequeñas, 12 cavidades ligeramente más largas y 1 cavidad relativamente grande. Es esta, la cavidad grande, la que permite que se forme la estructura H, la cual permite incorporar moléculas invitadas más grandes (como el butano y los hidrocarburos más pesados); las cavidades más pequeñas son ocupadas por los gases con menor diámetro molecular. La estructura H de los hidratos es rara, pero se conoce en el Golfo de México, dónde se tienen gases más pesados que el metano (Figura 2.6).

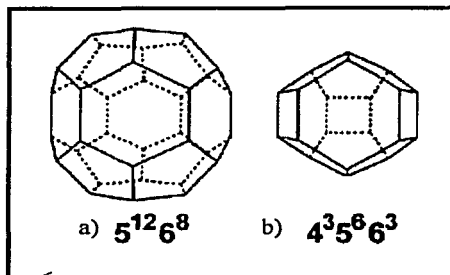


Figura 2.6. Los tipos de cavidades de la estructura H.⁹

- a) Estructura formada por 12 pentágonos y 8 hexágonos;
 b) Estructura formada por 3 cuadrados, 6 pentágonos y 3 hexágonos.

La estructura del hidrato comprime las moléculas del metano en un arreglo muy denso y compacto. Cuando se disocia el hidrato de metano por encontrarse a temperatura y presión de superficie (presión y temperatura atmosférica), un ft^3 de hidrato de metano sólido con 100 por ciento de ocupación por metano, soltará 164 ft^3 de metano (sin embargo, ocupa rangos típicamente de 70 a 90 por ciento). Esto da una energía extraordinaria al hidrato de metano, de $184,000 \text{ btu/ft}^3$. Esta familia de valores está entre los valores de gas de metano ($1,150 \text{ btu/ft}^3$) y gas natural licuado (GNL: $430,000 \text{ btu/ft}^3$). Recordemos que un BTU (unidad térmica inglesa) es la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de una libra de agua en un grado Fahrenheit (generalmente de $60 \text{ }^\circ\text{F}$ a $61 \text{ }^\circ\text{F}$).

El metano y etano forman hidratos con estructura I, son cristales cúbicos centrados, consistiendo de dos tipos de cavidades: dodecaedro pentagonal (cavidad pequeña) y tetracaidecaedro (cavidad grande). El propano es un ejemplo de un gas que forma la estructura II de los hidratos. La estructura II es una estructura particular de los hidratos, consiste de 136 moléculas de agua que incluyen 16 dodecaedros pentagonales y 8 cavidades hexacaidecaedrales. La estructura H está compuesta básicamente de una jaula $5^{12}6^8$ así como una jaula $4^35^66^3$. La jaula $4^35^66^3$ contiene tres caras rectangulares bastante estiradas, seis caras pentagonales y tres caras hexagonales. La $5^{12}6^8$ jaula contiene 12 caras

⁹ U.S. Department of Energy, "Chemistry of Natural Methane Hydrate", 23/10/01, [en línea]. Disponible: http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about_hydrates/chemistry.htm, 17/01/02

pentagonales y 8 caras hexagonales. Los hidratos de estructura H son hidratos dobles; moléculas pequeñas huésped, tal como el xenón, metano o sulfuro de hidrógeno, ocupan las dos jaulas pequeñas, mientras que una molécula más grande ocupa la jaula grande de la estructura (figura 2.7).


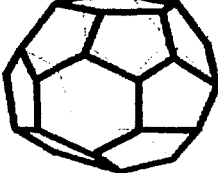
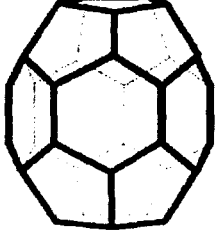
<p>Estructura I</p> <ul style="list-style-type: none"> • Normalmente el gas atrapado está formado por las moléculas más pequeñas como metano, etano y bióxido de carbono. • Contiene 46 moléculas de agua por 8 moléculas de gas. • Consiste de 8 dodecaedros pentagonal que realizan el enjaulado. 	
<p>Estructura II</p> <ul style="list-style-type: none"> • Normalmente el gas atrapado está formado por moléculas más grandes tal como el propano y el isobutano. • Contiene 136 moléculas de agua por 24 moléculas de gas. • Consiste de 24 hexacaidecaedros que realizan el enjaulado. 	
<p>Estructura H</p> <ul style="list-style-type: none"> • Normalmente el gas atrapado está formado por moléculas grandes tal como el methylcyclohexano, pero sólo en presencia de una molécula más pequeña. • Contiene 34 moléculas de agua por 6 moléculas de gas. • Consiste de 6 dodecaedros e icosaedros irregulares (a enderezar) que realizan el enjaulado. • La molécula grande ocupa la jaula grande y la molécula pequeña ocupa la jaula más pequeña. 	

Figura 2.7. Tipos de estructuras de los hidratos.¹⁰

Las cavidades en la celda unidad son características muy importantes que determinan las propiedades termodinámicas y cinéticas de los hidratos de gas (figuras 2.8, 2.9, 2.10 y 2.11).

La posición de la molécula de metano dentro de la jaula del clatrato ha sido el motivo de varias investigaciones. Las moléculas de metano dentro de las jaulas tienen desplazamientos termales muy bajos, lo cual sustenta la idea de que las moléculas están centradas dentro de la estructura. También ha sido determinada que la orientación potencial del metano dentro de las tres jaulas de las estructuras son muy bajas, de modo que existe una pequeña limitación en la habilidad del metano para girar. La libre rotación del metano y un potencial regular de orientación, parecen contradecir la influencia estimada de las fuertes moléculas de agua polares que crea la jaula alrededor del metano. Podría suponerse que los efectos polares de las moléculas de agua que se coordinan con el metano lo

¹⁰ Ballough S. *et al.* "Methane Hydrate", Group Omaryaghi [En línea]. Disponible: <http://www-personal.umich.edu/~lkomjath/#econ>, 08/04/02.

atraparían en la trampa específica. Sin embargo, las estructuras de las jaulas son orientadas de modo que los dipolos del agua suprimen uno a otro exterior, removiendo su efecto en la orientación de metano. Toda la evidencia que ha sido acumulada, sugiere hasta ahora que la molécula tetraédrica del metano es perfectamente centrada dentro de la jaula de hielo y que es capaz de girar libremente.

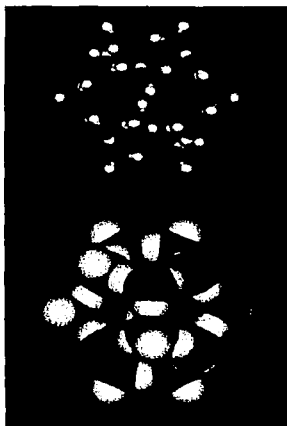


Figura 2.8. Cavity 1 en estructura I hidratos clatratos: dodecaedro pentagonal (12 lados).¹¹

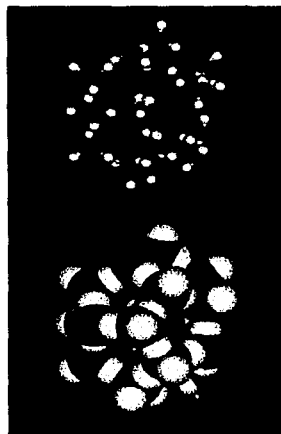


Figura 2.9. Cavity 2 en estructura I hidratos clatratos: tetracaidecahedron (14 lados).¹²

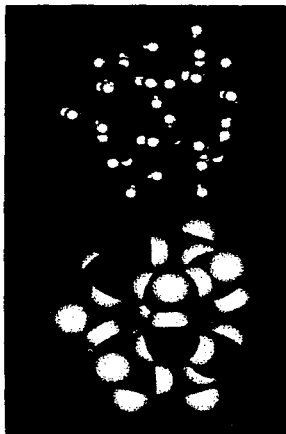


Figura 2.10 Cavity 1 en estructura II hidratos clatratos: dodecaedro pentagonal (12 lados)¹³

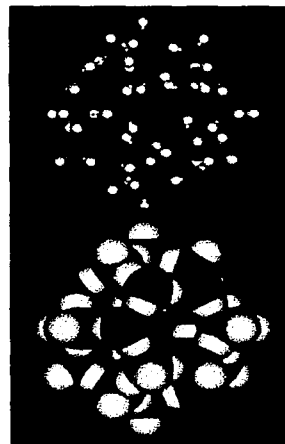


Figura 2.11 Cavity 2 en estructura II hidratos clatratos: hexacaidecahedron (16 lados)¹⁴

¹¹ "Molecular Simulation of Gas Hydrates", [En línea]. Disponible: <http://troutgroup.mit.edu/claathrate/methane/potential.html>, 26/03/02

¹² Ibidem.

¹³ Ibid.

¹⁴ Ibid.

II.3 PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

La determinación de las propiedades físicas de los hidratos de gas está basada en estudios de muestras recuperadas de perforaciones en mar profundo, de hidratos obtenidos en el laboratorio, de datos grabados por herramientas de registros eléctricos, de secciones sísmicas y de estudios magnéticos. Aunque los hidratos de gas han sido observados directamente en núcleos de pozos y en afloramientos sobre el piso marino, muchos de nuestros conocimientos acerca de la cantidad y distribución de datos están basados en evidencias indirectas: los parámetros físicos y acústicos detectados con instrumentos de registros y estudios geofísicos permiten establecer las mediciones de las propiedades de los hidratos, lo que permite a los científicos e investigadores entender mejor los datos y predecir condiciones de presencia de hidrato con mayor precisión. Finalmente, esta información puede ser el camino hacia avances tecnológicos que llevarán a la producción segura y eficaz de metano obtenido de los hidratos de gas.

La velocidad del sonido en el hidrato es muy alta, por consiguiente la velocidad del sonido en la capa de la superficie de sedimentos con hidratos consolidados también es alta. No se conocen bien las características acústicas específicas de los sedimentos de hidratos consolidados por lo que se requieren estudios extensos. Tal información tiene implicaciones importantes en el uso de dispositivos del personal para la defensa, exploración sísmica e investigación.

Los hidratos de metano tienen la propiedad de ser buenos refractores y reflectores de las ondas sísmicas; por el momento su explotación es muy difícil ya que al disminuir la presión, las moléculas cambian de la fase sólida a la fase gaseosa, liberando el metano a una presión elevada.

En cuanto a su coloración, los hidratos pueden presentar diferentes colores debido a impurezas; los hidratos encontrados en el Golfo de México son de color amarillo, naranja y verdosos; los de las Bahamas son de color azul. Estos colores son debido a la presencia de bacterias, minerales y otros gases que también son incorporados a los hidratos.

En la tabla 2.5, se muestran las propiedades físicas del hielo y los hidratos de metano (tomado de U.S. Department of Energy, "*Physical Properties of Gas Hydrates*"; datos modificados del trabajo que realizó Davidson en 1983).

PROPIEDAD	HIELO	HIDRATO DE METANO
Constante dieléctrica a 273 °K	94	~58
NMR estructura rígida del segundo momento de los protones del agua (G2)	32	33 ± 2
Tiempo de la molécula de agua a la reorientación a 273 °K (μseg)	21	~10
Tiempo de difusión del salto de las molécula de agua a 273 °K (μseg)	2.7	>200
Modulo de Young isotérmico a 268 °K (109 Pa)	9.5	~8.4
Rapidez longitudinal del sonido a 273 °K		
Velocidad del sonido (km/seg)	3.8	3.3
Tiempo de transito (μseg/pie)	8.0	92
Relación de velocidad Vp/Vs a 272 °K	1.88	1.95
Relación de Poisson	0.33	~0.33
Módulo Volumétrico (272 °K)	8.8	5.6
Módulo de Cizallamiento (272 °K)	3.9	2.4
Densidad volumétrica (gr/cm ³)	0.916	0.912
Compresibilidad volumétrica adiabática a 273 °k 10-11Pa	12	~14
Conductividad termal a 263 °K (W/m-K)	2.23	0.49 ± 0.02
~ Símbolo = significa igual o aproximadamente.		

Tabla 2.5. Propiedades físicas del hielo y de los hidratos de metano.¹⁵

En la Tabla 2.6 se muestran los valores publicados en U.S. Department of Energy, "Physical Properties of Gas Hydrates" (modificados de Anderson en 1992), en relación a las principales propiedades acústicas en hidratos puros, sedimentos saturados de agua, sedimentos de hidratos de gas, y sedimentos de gas a presión.

PARAMETRO	AGUA-SATURADA	HIDRATOS-PRESION	HIDRATOS PUROS	GAS-PRESION
Onda compresional Vp (km/seg)	1.6-2.5	2.05-4.5	3.25-3.6	0.16-1.45
tiempo de transito (μseg/pie)	190-122	149-68	94-85	1910-210
Onda transversal Vs (km/seg)	0.38-0.39	0.14-1.56	1.65	—
tiempo de transito (μseg/pie)	800-780	2180-195	185	—
Densidad (gr/cm ³)	1.26-2.42	1.26-2.42	—	—

Tabla 2.6. Propiedades acústicas de los hidratos de metano.¹⁶

¹⁵ U.S. Department of Energy, "Physical Properties of Gas Hydrates", 10/23/01, [en línea]. Disponible: http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about_hydrates/physical-properties.htm, 17/01/02.

¹⁶ Ibidem

En la Tabla 2.7 se muestran los valores en relación a las principales propiedades físicas obtenidas de los registros geofísicos de pozos.

PROPIEDAD	HIDATOS DE METANO	AGUA-SATURADA (PROMEDIO)
Velocidad Acústica		
-Vp (km/seg)	3.6	1.5-2.0
- tiempo de transito (μ seg/pie)	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

Tabla 2.7. Propiedades físicas obtenidas de registros geofísicos de pozos.¹⁷

¹⁷ U.S. Department of Energy, "Physical Properties of Gas Hydrates", 10/23/01, [en línea]. Disponible: http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about_hydrates/physical-properties.htm, 17/01/02.

CAPÍTULO III. ORIGEN

La producción, acumulación y preservación de materia orgánica no degradada, son requisitos indispensables para la existencia de las rocas generadoras de petróleo y gas. El concepto *material orgánico*, se refiere solamente al material compuesto de moléculas orgánicas en forma monomérica o polimérica que son derivadas directa o indirectamente de la parte blanda de organismos; las partes esqueléticas minerales, tales como conchas, huesos y dientes, no se incluyen. Primeramente, la materia orgánica es sintetizada por medio de organismos vivientes, posteriormente, se deposita y preserva en sedimentos de grano fino. Dependiendo de eventos geológicos posteriores, parte de la materia orgánica sedimentada se puede transformar en compuestos del tipo del petróleo y gas.

III.1. TEORÍAS SOBRE EL ORIGEN DE LOS HIDROCARBUROS

Las distintas teorías sustentadas para determinar el origen del petróleo, datan de 1886. En la últimas cuatro décadas, el avance sobre la génesis de los hidrocarburos, por medio de la información química, geológica y bacteriológica, ha permitido cancelar muchas teorías (inorgánicas) y acabar con los misterios de dicho origen.

Las teorías que han tratado de explicar este problema se han dividido, de acuerdo a los materiales y procesos involucrados en dos grandes grupos:

- Teorías inorgánicas o minerales.
- Teorías orgánicas.

Las teorías inorgánicas fueron esencialmente las hipótesis de fines de siglo XVIII y durante el siglo XIX, elaboradas principalmente por químicos. Postulan que el petróleo y gas asociado se forman mediante procesos inorgánicos reproducibles en el laboratorio; éstas teorías si explican en la mayoría de los casos como se pueden formar los hidrocarburos, pero no explican como se formaría el petróleo de los yacimientos que se encuentran dentro de la corteza terrestre. Cuando las técnicas del análisis geológico y geoquímico se perfeccionaron y se contó con información suficiente al respecto, se empezó a dar importancia a la teoría de formación orgánica, la cual si explica satisfactoriamente como se forma el aceite y gas de los yacimientos.

La teoría orgánica considera que organismos de vida marina y continental fueron sepultados en un medio ambiente anaeróbico y por cambios en la temperatura y presión (50 a 200 °C y 300 a 1500 bars), estos organismos que contienen carbono e hidrógeno, fueron convertidos en hidrocarburos en un lapso relativamente grande.

La teoría orgánica está basada en dos principios fundamentales: la producción de hidrocarburos a partir de organismos vivos y la acción del calor sobre la materia orgánica formada biogénicamente. En las últimas décadas, el conocimiento geoquímico y la evidencia geológica en los estudios sedimentarios y petroleros han demostrado fehacientemente que la mayor parte del petróleo se originó de materia orgánica sepultada en una cuenca sedimentaria. El factor fundamental para aceptar las teorías orgánicas, es que a partir de estudios realizados en el laboratorio de rocas petrolíferas colectadas en campos productores, se encontraron ciertas propiedades ópticas únicas de las sustancias orgánicas. Estos resultados constatan el origen orgánico del petróleo. Las evidencias son las siguientes:

- El contenido de materia orgánica que tienen los sedimentos recientes.
- En los restos orgánicos predominan el hidrógeno y carbono, que son los componentes de los hidrocarburos.
- La presencia de nitrógeno y de porfirina en el pigmento del petróleo. El nitrógeno es un componente esencial en los aminoácidos y estos componen las proteínas, relacionándose las porfirinas con la clorofila.
- La actividad óptica que presenta el petróleo es una propiedad típica de las sustancias orgánicas.
- La presencia de fósiles geoquímicos. Estas son moléculas orgánicas sintetizadas, incorporadas en los hidrocarburos.
- En forma experimental se pueden generar hidrocarburos a partir de materia orgánica mediante rompimiento termal.
- En las cuencas sedimentarias se tienen la mayoría de los yacimientos petroleros.

Las primeras aportaciones que indican que los hidrocarburos tienen origen orgánico son las siguientes:

- B. Haquet Nuremberg en 1790: fue el primero en sugerir el origen orgánico del petróleo. El argumentó que el aceite de Galicia provenía de moluscos.
- Waksman en 1933: identifica a la lignina en el petróleo, la que es característica de plantas terrestres; señala que los complejos húmicos y la lignina contienen estructuras heterocíclicas en anillos, similares a las de algunos aceites.

- Skinner en 1952: concluyó que el vanadio en las porfirinas es de origen bioquímico, ya que fue encontrado en las holoturias (equinodermos), y señaló que la presencia de porfirinas en algunos aceites (componentes ópticamente activos), es una evidencia del origen orgánico del petróleo. Se puede decir que la fuente del petróleo son animales y plantas.
- Davis y Squires en 1953: encontraron que las bacterias metabolizan pequeñas cantidades de hidrocarburos no volátiles que incorporan a su estructura celular.
- Craig en 1953: descubre que el agua dulce y las plantas terrestres contienen menos C^{13} y más C^{12} que las plantas marinas, por lo tanto, la mayoría de hidrocarburos líquidos son derivados de materia orgánica marina. El material orgánico terrestre contribuye en menor proporción a la formación del aceite y más a la formación de gas.
- Francis en 1954: encuentra que el carbón mineral contiene productos sólidos y líquidos relacionados a los materiales encontrados en los petróleos pesados.

III.2. LA MATERIA ORGÁNICA

De la materia orgánica sintetizada solo una pequeña parte se preserva e introduce en los sedimentos, convirtiéndolos en combustibles fósiles: petróleo, gas natural, carbón, arenas y lutitas bituminosas. La síntesis clorofiliana permite a los vegetales fabricar los constituyentes de sus células. Para ello emplea el agua y el gas carbónico del aire si se trata de vegetales terrestres, o el disuelto en el agua cuando son organismos marinos. La glucosa es el más simple de los productos así formados y a partir de este primer compuesto se sintetizan el almidón, la celulosa y todos los otros constituyentes de la célula, siempre y cuando, las sales minerales indispensables estén presentes.

La materia orgánica está compuesta principalmente por carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O) y nitrógeno (N). Muchos de los compuestos orgánicos que se dan naturalmente son similares a los hidrocarburos no saturados, mientras que el petróleo consiste principalmente de hidrocarburos saturados. La composición de los organismos comprende principalmente: carbohidratos, proteínas, lípidos y ligninas (tabla 3.1), sus características principales se describen a continuación.

	C	H	S	N	O
Carbohidratos	44	6			50
Lignina	63	5	0.1	0.3	31.6
Proteínas	53	7	1	17	22
Lípidos	76	12			12
Petróleo	85	13	1	0.5	0.5

Nota: Composición elemental (por ciento en peso).

Tabla 3.1. Composición de los organismos y composición del petróleo.

- **Carbohidratos:** En la naturaleza los carbohidratos actúan como almacén; es el material que capta la energía del sol y permite que la utilicen los seres vivos. Los azúcares son el producto inmediato de la fotosíntesis; con la energía solar, y a partir de CO_2 y H_2O se sintetiza la glucosa como primer producto, almidones y celulosas posteriormente. Los carbohidratos están esencialmente compuestos de C, H y O, los cuales, en las unidades llamadas monosacáridos simples, se encuentran en tal proporción, que por cada átomo de carbono existe una cantidad de H y de O equivalente a una molécula de agua, como si la fórmula fuera $\text{C}_n(\text{H}_2\text{O})$. Esta fue la suposición de la cual se partió para denominar a estos compuestos como *Hidratos de Carbono*; se pensaba que cada átomo de carbono estaba combinado con una molécula de agua.

Estudios subsecuentes, realizados desde el siglo XIX, permitieron observar que ésta no era la situación, pero el nombre persistió, y aún se les llama *Hidratos de Carbono* o *Carbohidratos*. Desde el punto de vista de su estructura, los carbohidratos pueden considerarse como formados por unidades simples o cadenas de átomos de carbono relativamente pequeñas, en su mayor parte de 3 a 6 ó 7 átomos. A éstas se encuentran unidos dos tipos de grupos funcionales, grupo $-\text{OH}$, y grupos $=\text{O}$. Este último aparece en sus dos variedades: el grupo *aldehídico*, cuando se encuentra en el carbono de un extremo de la cadena básica del compuesto, o el grupo *cetónico*, o ceto, cuando el oxígeno se une a un carbono intermedio de la cadena. A partir de las moléculas de tres átomos de carbono, la situación es tal que sólo existe un grupo aldehídico o cetónico por molécula en uno de los átomos de carbono; cada uno de los restantes está unido a un grupo alcohólico.

Además de su papel como los principales componentes de la dieta y del metabolismo general, los carbohidratos desempeñan papeles relevantes desde otros puntos de vista, intervienen en la composición de algunos tejidos, desempeñando entonces un papel estructural; también son componentes de los llamados mucopolisacáridos, sustancias que tienen un papel de gran importancia como revestimiento de las mucosas, o las superficies articulares, que se debe principalmente de las propiedades lubricantes de estas sustancias; participan en funciones de reconocimiento celular de gran especificidad, al determinar, por ejemplo, los grupos sanguíneos. Sus productos de descomposición son humus y ácidos húmicos. Su fórmula general es $\text{C}(\text{H}_2\text{O})_n$ con $n > 4$.

• **Proteínas:** son moléculas muy complejas, en cuya composición elemental se encuentran siempre presentes carbono, hidrógeno, oxígeno, y nitrógeno. La mayoría de ellas también incluye en su composición al azufre y en algunas se observa además la presencia de fósforo, hierro, zinc, molibdeno u otros elementos. Desde el punto de vista estructural, los elementos químicos que constituyen a las proteínas se encuentran distribuidos en bloques o unidades estructurales que se llaman *aminoácidos*, que unidos entre sí integran una estructura *polimérica*; las proteínas son fundamentalmente polímeros de aminoácidos.

Hay dos tipos principales de proteínas: las simples, que están constituidas únicamente por aminoácidos, y las proteínas conjugadas, que son las que tienen en su composición otras moléculas diferentes además de los aminoácidos. En este último tipo, la parte de su molécula no constituida por aminoácidos se llama *grupo prostético* y puede consistir en ácidos nucleicos.

Las proteínas varían en su tamaño y complejidad; hay algunas muy grandes y complejas, por ejemplo el sistema enzimático que participa en la conversión del ácido pirúvico en acetil-Coenzima A, tiene un peso molecular de 10 millones e incluye varios grupos prostéticos distintos; la insulina, por otra parte está formada por sólo 51 aminoácidos y su peso molecular es de 5,800. Existen polímeros de aminoácidos con pesos moleculares menores que el de la insulina, tales como algunas hormonas, antibióticos, etc; sin embargo, por convención sólo se consideran como proteínas aquellos polímeros de aminoácidos con pesos moleculares semejantes o mayores al peso molecular de la insulina.

Los aminoácidos que constituyen a las proteínas, son sustancias que tienen como característica general el hecho de poseer un *carboxilo* libre y un *grupo amino*, situado en el carbón alfa con respecto al carboxilo. Los aminoácidos difieren entre sí únicamente por las características del resto de su molécula o cadena lateral (R), de manera que su fórmula general es:

$$\begin{array}{c} \text{R} - \text{CH} - \text{COOH} \\ | \\ \text{NH}_2 \end{array}$$

Las propiedades de cada aminoácido libre dependen tanto de sus grupos carboxilo como de su grupo amino alfa, y de su cadena lateral (R). La polimerización de los aminoácidos para formar las proteínas se lleva a cabo por la reacción del grupo carboxilo alfa de un aminoácido, con el grupo amino alfa de otro. Se convierten en compuestos hidrosolubles por descomposición.

• **Lípidos:** Reciben el nombre de lípidos aquéllas sustancias de origen biológico, solubles en los llamados solventes orgánicos, como el etanol, el éter, el cloroformo, el benceno, la acetona, etc. Dado que la definición de estos elementos tienen como base común la solubilidad en una serie de sustancias, se incluyen en el grupo de los lípidos algunos

compuestos de naturaleza química diversa. El factor común estructural de este grupo de moléculas es la presencia de cadenas relativamente largas de átomos de carbono con una composición en la que predominan el C y el H. Esta característica determina que las moléculas sean en mayor o menor grado apolares, o anfifílicas y posean por ello las propiedades de solubilidad que las caracterizan.

Tal vez la función más importante de los lípidos se relaciona con el hecho de que un buen número de ellos son moléculas anfifílicas que en presencia de agua se asocian formando bicapas. Estas constituyen la base sobre la cual se organiza la complicada estructura de las membranas celulares. Otros tipos representan reservas energéticas de gran capacidad, en parte porque la grasa se puede almacenar en cantidades enormes, y en parte porque su valor calórico es muy alto (9 calorías por gramo). En los organismos superiores, las grasas que se acumulan en algunos sitios, bajo la piel principalmente, sirven como aislantes contra los traumatismos y cambios de temperatura. Por otra parte, es conveniente recordar que algunas hormonas y vitaminas pertenecen al grupo de los lípidos. Los ácidos grasos que tienen más de seis carbonos en su molécula, son prácticamente insolubles en agua, la razón de este comportamiento, es que a medida que aumenta la longitud de la cadena, también aumenta la porción apolar de la molécula y permanece constante el carboxilo, que es la porción polar. Por ello, según disminuye la solubilidad en agua, aumenta la solubilidad en los solventes orgánicos.

Además de la solubilidad, los ácidos grasos tienen otras propiedades, como el punto de fusión, que aumenta de acuerdo con el largo de la cadena. La presencia de dobles ligaduras en la cadena tiene efectos notables sobre las propiedades de los ácidos grasos; para citar sólo un caso, al ácido esteárico, saturado, de 18 átomos de carbono, es un sólido a la temperatura ambiente, el ácido oleico, con el mismo número de carbonos, pero con una doble ligadura, es un líquido en las mismas condiciones. Así como la clase de ácidos grasos modifica las propiedades de los lípidos en cuya composición participan, las estructuras formadas por lípidos dependen también, en cuanto a sus propiedades, del tipo de ácidos grasos que en ellas se encuentran.

- **Ligninas:** sustancias que se encuentran solamente en plantas vasculares terrestres y no en organismos marinos; es una sustancia que impregna las células, fibras y vasos de la madera, haciéndolos impermeables e inextensibles; es el precursor de los carbonos húmicos.

Efectuar una separación entre los términos *orgánico* e *inorgánico* no es fácil, así vemos por ejemplo, que las conchas de los animales, están constituidas por carbonatos, producto considerado como *inorgánico* desde el punto de vista petrolero, pero aparte presentan el cuerpo o masa (parte blanda) propiamente dicha, constituida básicamente por productos *orgánicos*. En nuestro caso, al referirnos a la *materia orgánica*, aplicaremos el término a moléculas o partículas *orgánicas* derivadas directa o indirectamente, de la parte *blanda* de

los animales o vegetales es decir, se excluyen hueso, conchas y dientes (concepto aplicado por Tissot, 1982).

Los primeros pasos para el estudio del contenido de materia orgánica en las rocas, son las referentes a:

- La aparición de los primeros seres en la Tierra.
- El fenómeno de la fotosíntesis y su relación con el aumento progresivo del oxígeno atmosférico.

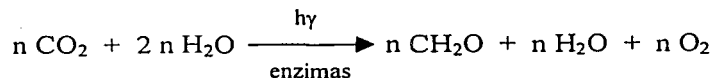
En función de los eventos geológicos que sucedan, parte de la materia orgánica sedimentaria puede ser transformada en compuestos de petróleo; por eso es importante tomar en cuenta que durante la historia de la Tierra, las condiciones de síntesis, depósito y preservación de la materia orgánica cambiaron considerablemente. Desde el Precámbrico (más de 570 millones de años) y hasta el Devónico (367 millones de años), la producción primaria de materia orgánica se realizó a partir del fitoplancton. A partir del Devónico, se dio un gran incremento en la producción primaria de materia orgánica debido a la contribución de plantas superiores terrestres.

La fotosíntesis (base para la producción de materia orgánica) surge en el Precámbrico: 3500-2800 millones de años. Se estableció la pirámide alimenticia y la evolución de formas superiores de vida. Ocurrió enriquecimiento de oxígeno en la atmósfera, por lo que la producción de materia orgánica se incrementó.

Los organismos autótrofos primitivos, tales como las algas verdiazules y bacterias fotosintéticas fueron los primeros responsables de la producción de materia orgánica en la Tierra. Un requisito básico para la fotosíntesis es la clorofila, pigmento verde que absorbe la luz solar.

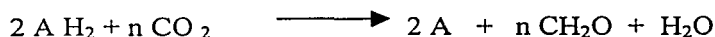
En el mar, el fitoplancton es el productor primario y fundamental de materia orgánica. La presencia de la luz (necesaria para la fotosíntesis) y la abundancia de sales minerales controlan su productividad: El fitoplancton comprende básicamente dos grupos de algas: las diatomeas y los dinoflagelados; además de los cocolitofóridos que forman el nivel trófico primario. El zooplancton, las bacterias y toda la fauna marina se alimentan de ellos para constituir así una cadena alimenticia compleja. Sin embargo, desde el punto de vista cualitativo, las producciones de materia orgánica marina son, en orden de importancia, las del fitoplancton, las del zooplancton y las de las bacterias.

El proceso de la fotosíntesis requiere además de la energía de la luz, y del dióxido de carbono, de un sustrato oxidable (agua). De la fotosíntesis resulta la formación de oxígeno molecular, el que se obtiene de esta agua mediante la eliminación de electrones y de protones. La reacción global de la fotosíntesis en estos organismos fotoautótrofos, se puede escribir de la siguiente manera:



donde CH_2O es la fórmula empírica de los carbohidratos sintetizados como resultado de la actividad fotosintética.

Otras bacterias son capaces de utilizar la luz solar para sintetizar compuestos orgánicos pero sin liberar oxígeno. Estas bacterias fotosintéticas se conocen como quimioautótrofas, ya que requieren de un sustrato adicional para la fotosíntesis, el cual utilizan en lugar del agua para obtener los equivalentes reductores de las reacciones generadas por la luz. El proceso global en estas bacterias se puede escribir de la siguiente manera:



donde $A \text{ H}_2$ representa un sustrato oxidable. Las bacterias quimioautótrofas se pueden dividir en tres grupos principales. Las bacterias verdes sulfurosas, las Cloráceas (por ejemplo, *Chlorobium thiosulfatophilum*) son anaerobias estrictas que oxidan el sulfuro de hidrógeno a azufre durante la fotosíntesis. Las bacterias púrpura sulfurosas, las Tiorrodáceas (por ejemplo, *Chromatium vinosum*), son capaces de oxidar algunos compuestos de azufre y ciertos compuestos orgánicos. Las bacterias púrpura no sulfurosas, las Atiorrodáceas (por ejemplo *Rhodospirillum rubrum*) son heterótrofas y utilizan sobre todo compuestos orgánicos (en particular sustancias intermedias del ácido tricarbóxico) provenientes tanto de la fotosíntesis como de la respiración aerobia en la oscuridad. El requerimiento de un sustrato distinto del agua como el principal donador de electrones durante la fotosíntesis, permite distinguir con claridad el proceso fotosintético de las bacterias quimioautótrofas de la fotosíntesis de las plantas. En la fotosíntesis de las bacterias, la molécula de sustrato que se añade (por ejemplo el H_2S) se oxida en lugar del agua, la cual es el sustrato del que se deriva indirectamente el oxígeno en todas las plantas, las algas y las cianobacterias.

En todos los organismos fotosintéticos se ha encontrado que el proceso de fotosíntesis global consiste de los siguientes sucesos básicos:

- **Absorción de luz.** La luz es absorbida por las moléculas de pigmento asociadas con proteínas complejas que están embebidas en membranas lipoproteicas especializadas.

La energía luminosa es transferida a un centro de reacción que contiene un tipo de molécula de clorofila -a en un medio especial.

- **Separación de cargas.** La absorción de un quantum de luz por el centro de reacción de la molécula de clorofila da como resultado la excitación y la pérdida de un electrón a una molécula aceptora adyacente, iniciándose así la separación de cargas. La separación de cargas es el primer cambio químico en la compleja secuencia de reacciones de la fotosíntesis.
- **Transporte de electrones.** La pérdida de un electrón desde el centro de reacción del pigmento provoca la formación de un oxidante fuerte. Este promueve la donación de un electrón del substrato oxidable, por ejemplo, del agua para remplazarlo. El electrón que se deriva de la clorofila es quitado del sitio de origen por una serie de acarreadores de electrones arreglados en forma vectorial y la separación de cargas se establece a lo largo de toda la membrana. Esto facilita la formación de ATP mediante una ATPasa unida a la membrana.
- **Almacenamiento de energía.** La energía química que se obtiene de la luz solar por medio de la secuencia de sucesos, como se mencionó en los párrafos anteriores, se estabiliza y consolida en la síntesis de compuestos orgánicos del dióxido de carbono.

Aparición de la vida primitiva:

- Para la existencia de la vida se necesita agua y ésta aparece abundantemente hace 4,000 Millones de años (M.a.).
- Se considera que la edad de la Tierra es de 4,500 M.a. En un principio, estaba formada por un 90% de hierro.
- La primera forma de vida aparece aparentemente en Sudáfrica, encontrándose en rocas con edades entre 3,100 a 3,300 M.a. Son organismos heterotróficos (bacterias y algas estructuralmente similares a las algas azul verdes, modernas).
- Los primeros organismos reciben el nombre de procariotes, aparecen hace aproximadamente 3,100 M.a. Se caracterizan por tener el material genético disperso en la célula, son asexuales y unicelulares.
- Como un producto de la evolución, los organismos fotosintéticos autótrofos superan a los organismos heterótrofos, originándose la fotosíntesis como un fenómeno mundial, produciéndose por efecto de esta evolución la aparición de formas superiores de vida.

La fotosíntesis es importante debido a que es la reacción a partir de la cual se ha generado la materia orgánica necesaria para poder pensar en los grandes volúmenes de petróleo, gas, carbón e hidratos de metano, formados a través de la historia de la tierra.

Los sedimentos del mar están poblados de bacterias y hongos hasta las profundidades abisales. La mayoría de los organismos están adheridos a las partículas del sedimento, lo cual dificulta la determinación de la cantidad y tipo de bacterias; desempeñan un papel muy importante, tanto como en el agua, por participar en la remineralización de los compuestos orgánicos e igualmente en la nutrición de la fauna del fondo marino.

La vida submarina en zonas de emisión de metano se consideraba en las últimas décadas como inexistente, debido a las condiciones químicas ambientales. Sin embargo, recientemente, exploraciones científicas con submarinos autónomos que alcanzan profundidades de más de 1000 metros, han observado la presencia a grandes profundidades de numerosos organismos como mejillones, estrellas de mar, gusanos tubícolas alargados y el descubrimiento del denominado *gusano de hielo*. Estos organismos viven en este medio hostil gracias a su simbiosis con bacterias *quimiosintéticas*.

Las bacterias *quimiosintéticas*, son grupos de bacterias que se adaptan a vivir en medios ricos en metano y en otros componentes químicos, adoptando la *quimiosimbiosis*, esto es, la transformación energética a través de sulfuros o carbono del metano como principal fuente de derivación de energía y nutrición. Estas bacterias, que son los productores primarios de la cadena alimenticia, son los encargados de *manufacturar* químicamente el alimento, viviendo en gran cantidad en el interior de los mejillones y gusanos tubícolas, que a su vez sirven de comida a cangrejos, estrellas de mar, etc. Esta simbiosis permite el crecimiento de grandes colonias denominadas *quimiosintéticas*, quienes viven en condiciones químicas extremas, a grandes profundidades, alta presión, baja temperatura y con muy baja luminosidad. Las emisiones de gas metano y ácido sulfhídrico, al contrario de perjudicarlas, son el sustento alimenticio de estas grandes colonias de vida submarina.

En el Golfo de México, se han encontrado grandes colonias de mejillones por debajo de los 500 metros de profundidad, con un tamaño mucho mayor que los que se encuentran en zonas costeras; forman especies de mejilloneras redondeadas alrededor de puntos de escape de gases, cerca de salmueras sobresaturadas en gas metano. Asimismo, uno de los organismos denominado *gusano de hielo* se ha descubierto recientemente, es similar a una pulga de agua y vive en simbiosis con bacterias *quimiosintéticas*.

En la Antártida, la existencia de vida en los grandes lagos descubiertos por debajo de los casquetes polares, como el Lago Vostok, puede estar favorecida por la presencia de gases hidratados y por el desarrollo de organismos *quimiosintéticos* en condiciones extremas de baja temperatura y falta de luminosidad.

La oxidación del metano que asciende a la superficie, es otro de los procesos que facilita las condiciones de vida en zonas profundas, provocando la formación de carbonato, sulfuros y sulfatos sobre el piso del mar, creando costras duras sobre el fondo blando. Estas costras son aprovechadas como *fondeaderos*, por los organismos *quimiosintéticos*, que a su vez

pueden crecer verticalmente formando colonias arrecifales tanto en aguas someras como profundas. En Porcupine, al sur de Irlanda, se han identificado una serie de arrecifes que viven en profundidades entre 750 y 1000 metros, asociados a emisiones de gas metano a través de fisuras en el talud continental. El estudio de los arrecifes de colonias quimiosintéticas relacionados con emisiones de gas y disociación de hidratos metano, son uno de los grandes retos en la exploración submarina para esta década, no solo por la posibilidad de la existencia de nuevos recursos biológicos, sino que también son claros indicios de existencia de grandes volúmenes de metano en el subsuelo marino.

Desde el punto de vista biológico y del medio ambiente, el descubrimiento de vida en condiciones químicas extremas por la presencia de grandes cantidades de gas ha cambiado la idea de que las zonas con emisiones submarinas de hidrocarburos son zonas abióticas *desérticas* sin presencia alguna de fauna marina.

III.3. EL CICLO DEL CARBONO

El hallazgo de aproximadamente 10,000 gigatoneladas de carbono fijadas en forma de hidratos de gas en el subsuelo de los taludes oceánicos, ha llevado a la necesidad de reevaluar el volumen global de carbono en el planeta y sus ciclos naturales. Asimismo, podría contribuir a explicar los grandes procesos de cambio climático acaecidos en eras geológicas pasadas. Por otra parte, su explotación como fuente energética podría contribuir al efecto invernadero y al cambio climático de origen antropogénico.

Para poder determinar con exactitud la masa total de carbono orgánico necesario para efectuar el fenómeno de la fotosíntesis durante la historia del planeta, es indispensable considerar el carbono total que se depositó en los sedimentos y en las aguas oceánicas y lacustres (menor proporción). En el año de 1970, Welte (Alemania), hace el cálculo de la cantidad total de carbono orgánico y de grafito acumulado en el Planeta, el cual según Welte, equivale a 6.4×10^{15} toneladas (Tissot, 1982).

Dentro de los ciclos del carbono tenemos uno primario y otro secundario (figura 3.1).

- En el ciclo primario, se presenta una masa circulante de aproximadamente 3.0×10^{12} toneladas de carbono. Este ciclo es el de gran circulación, la vida media del mismo va desde días hasta decenas de años e involucra a todos los organismos.
- En el ciclo secundario tenemos el gran volumen de carbono constituido por 6.4×10^{15} toneladas de carbono y con vida media de millones de años, representado por la materia

orgánica fija en las rocas, en los sedimentos, en los fósiles, así como en el carbón y kerógeno. Este ciclo es de circulación lenta.

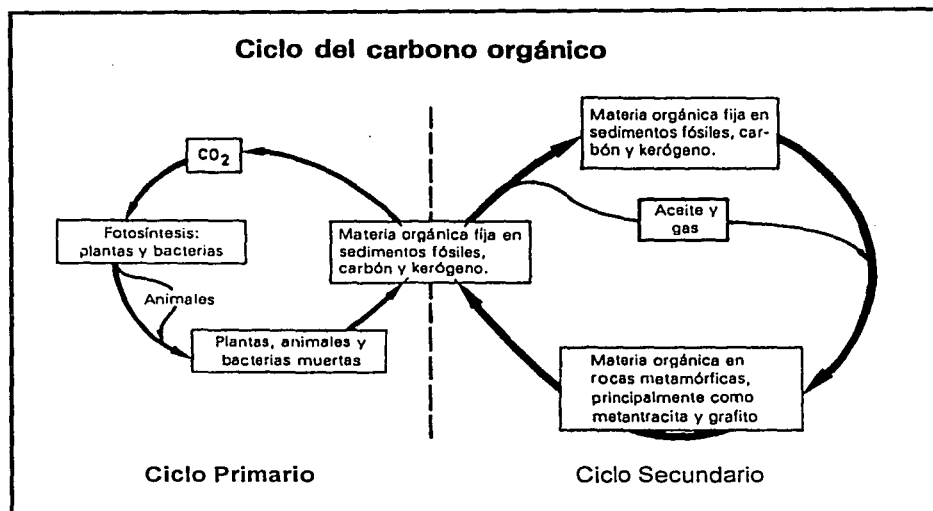


Figura 3.1. Los dos principales ciclos del carbono en la Tierra. El carbono se recircula principalmente en el ciclo 1.¹⁸

Los dos ciclos están interconectados por una pequeña fuga de aproximadamente, 0.01% a 0.1% del total del carbono orgánico, lo cual representa la oxidación de la materia orgánica sedimentaria a CO_2 . Una vez que la materia orgánica se incorpora a un sedimento, su destino a largo plazo queda gobernado, principalmente, por hechos tectónicos. Es decir, fases de subsidencia y de aumento de sepultamiento, o fases de levantamiento y erosión, determinan que el contenido orgánico de un sedimento se preserve y transforme en petróleo o que sea erosionado y oxide.

Se ha visto que la mayor parte del carbono se encuentra en las rocas sedimentarias de la corteza terrestre. Este carbono se puede presentar en dos formas diferentes, de un 18 a 20% se encuentra en forma reducida en compuestos *orgánico*, y del 80 a 82% en forma oxidada (como carbonatos, formando parte de las conchas y esqueletos de los organismos).

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

¹⁸ Tissot B. T., Welte D. H., 1982. El petróleo su formación y localización, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, 2ª ed. México, p. 27.

III.4. GENERACIÓN DE HIDROCARBUROS

Los hidrocarburos se originan de una pequeña fracción de la materia orgánica depositada en cuencas sedimentarias. La mayor parte de ésta proviene de los restos de plantas y animales que vivieron en el mar y el resto procede de la materia orgánica terrestre transportada a la cuenca por corrientes fluviales y por el viento, principalmente. El producto intermedio que da origen a los hidrocarburos –a partir de las rocas que contienen materia orgánica- recibe el nombre de kerógeno. Los hidrocarburos se forman en rocas arcillosas que contienen entre 1% y 3% de materia orgánica; a estas rocas se les conoce como roca madre o roca generadora. Para que los hidrocarburos que se generen se puedan explotar, deben migrar a rocas porosas y permeables (rocas almacén) y quedar atrapados por algún mecanismo que impida que la migración los lleve hasta la superficie (trampas petroleras).

La roca generadora debe ser enterrada a una profundidad suficiente para que la materia orgánica contenida pueda madurar hasta convertirse en petróleo. Para ello es necesario que la roca se encuentre dentro de una cuenca sedimentaria que sufra procesos de subsidencia (hundimiento por su propio peso) y enterramiento con un aporte suficiente de sedimentos. Dentro de la roca generadora, no toda la materia orgánica se transforma en petróleo, se estima que el 70% permanece como residuo orgánico insoluble, por lo que el rendimiento promedio de las rocas generadoras es de aproximadamente 30% y se estima que sólo el 1% del petróleo generado es capaz de migrar hacia la roca almacén y acumularse en ella, mientras que el 99% no llega a migrar o se pierde debido a que no existe un sello que impida que el crudo o el gas escape de la roca almacén. Por otro lado, se tiene el problema de la cantidad de petróleo recuperable con rendimiento económico, que en general es menor del 60%.

Los hidrocarburos de los yacimientos son compuestos orgánicos formados principalmente por carbono e hidrógeno. Los hidrocarburos líquidos son en la actualidad la principal fuente de hidrocarburos, de ellos se obtienen la gasolina y un sin número de compuestos (materia prima para la industria del país). Sin el petróleo el desarrollo de México y de todos los países no sería posible. Los hidrocarburos en la naturaleza aparecen en tres formas principales:

- Como gas natural
- Como petróleo crudo, líquido
- Como arenas asfálticas (tar sands) y lutitas bituminosas (oil shales).

Los hidrocarburos que constituyen los yacimientos provienen básicamente de dos caminos diferentes: 1) Entre el 10 y 15% son hidrocarburos formados directamente por los organismos, preservados y que sólo sufren pequeños cambios químicos, 2) Entre el 85 y

90% de los hidrocarburos que constituyen el petróleo se forma a través de una serie de procesos químicos y bacterianos a los que es sometida la materia orgánica original, es decir, estos hidrocarburos se forman a partir de un proceso de transformación, donde la temperatura y la profundidad son los principales factores que influyen para la generación de los mismos.

Tanto el petróleo y el gas, así como el carbón, son el producto de la transformación de la materia orgánica, la cual por efecto de la temperatura y de la profundidad, se transforma en petróleo, gas o carbón. Dependiendo del tipo de materia orgánica, tendremos el producto oleoso o carbonoso; así cuando se trata de material vegetal superior, el producto final es el carbón y el gas; cuando la materia orgánica procede de restos de microorganismos marinos ricos en lípidos y proteínas, el resultado será la producción de petróleo.

En una cuenca de sedimentación el depósito de nuevas capas es en general continua, durante millones de años. Los sedimentos depositados con anterioridad son sepultados bajo cientos o miles de metros de depósitos posteriores, y así se ocasiona un aumento considerable de la temperatura. Este incremento o gradiente geotérmico varía de 1.5 a 8 °C/100m; en un gran número de cuencas sedimentarias, un gradiente de 3 °C/100m representa un valor medio aceptable.

El factor más importante en el origen del petróleo es la historia térmica de las rocas generadoras. Durante la diagénesis, la mezcla compleja de componentes hidrocarburos produce toda una serie de reacciones de baja temperatura que a su vez provocan la formación de más hidrocarburos y de otros materiales debido a las pérdidas de oxígeno, nitrógeno y azufre.

La **diagénesis** es el proceso de alteración biológica, física y química de los fragmentos orgánicos debido al incremento de la presión y la temperatura. Uno de los principales agentes de la transformación durante la diagénesis temprana es la actividad microbiana. Los microorganismos aeróbicos que viven en la capa superior de los sedimentos consumen el oxígeno libre. Los anaeróbicos reducen los sulfatos para obtener el oxígeno requerido. La energía se suministra a través de la descomposición de la materia orgánica, la cual, durante el proceso, se convierte en dióxido de carbono, amoníaco y agua. Normalmente, la conversión se efectúa completamente en las arenas y parcialmente en los lodos. Algunos sólidos como el carbonato de calcio organodetrital y el óxido de silicio se disuelven, alcanzan una saturación y vuelven a precipitarse junto a los minerales autogénicos, como sulfuros de hierro, cobre, zinc, siderita, etcétera.

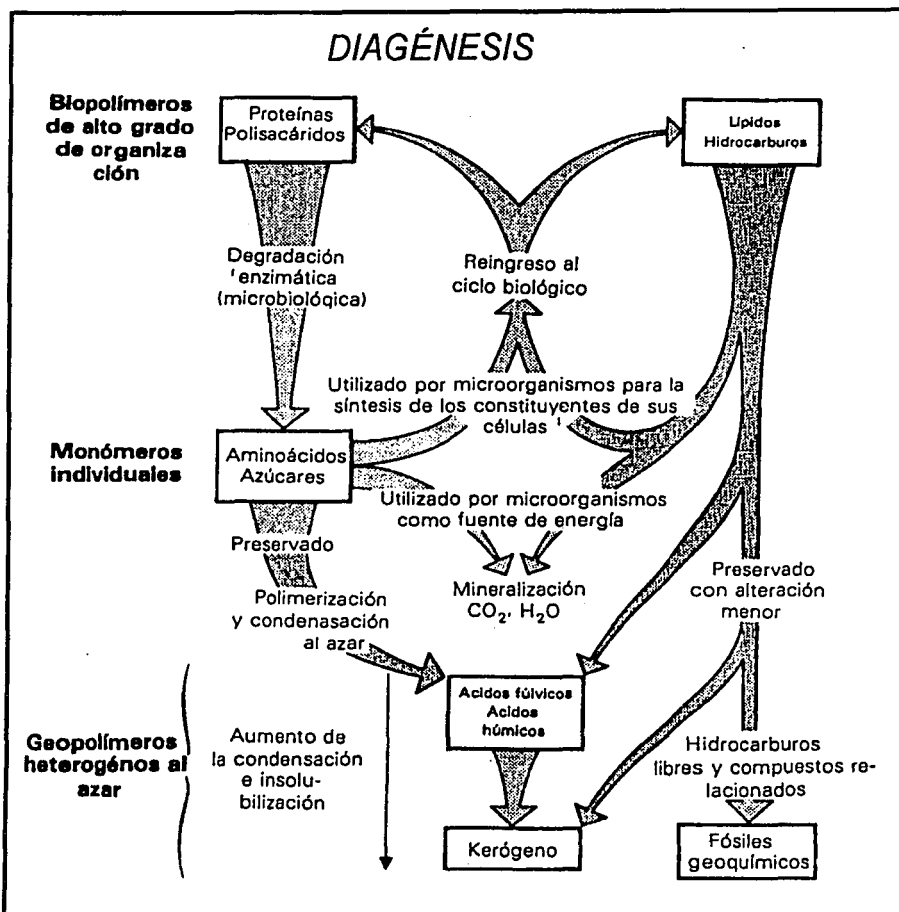
Dentro del sedimento, el material orgánico tiende al equilibrio. Los polímeros o *biopolímeros* biogénicos previos (compuestos orgánicos constituyentes de los seres vivos, tales como carbohidratos, proteínas, entre otros.), son sometidos a un ataque básicamente microbiano, que se realiza a poca profundidad (con presiones litostáticas menores a 300

bares) y bajas temperaturas (generalmente menos de 50 °C) durante la sedimentación y diagénesis primaria; éste ataque trae como consecuencias la degradación de los biopolímeros (ácidos grasos, aminoácidos, etc.); estos bionómeros al ser sometidos a procesos de condensación y polimerización, se convierten en una serie de compuestos estructurados que reciben el nombre de *geopolímeros*, entre los cuales se encuentran los materiales de tipo húmico (ácidos húmicos y flúvicos principalmente), los cuales han sido considerados como los precursores del *kerógeno*. Cuando el depósito de la materia orgánica derivada de las plantas es masivo, comparado con la distribución mineral, se forma la *turba* y luego los *carbones cafés* (lignito y carbón sub-bituminoso).

El principal hidrocarburo generado durante esta etapa, es el metano, asimismo, se producen también una serie de compuestos como el CO₂, H₂O y NH₃ principalmente, y algunos compuestos heteroatómicos. El metano generado durante esta etapa, recibe el nombre de biogénico o biológico, aunque también es llamado gas seco y es básicamente producido por el proceso de descomposición de la materia orgánica. En esta etapa se presenta generalmente la consolidación del sedimento, de tal manera que la materia orgánica se transforma en kerógeno y los sedimentos se litifican y forman las rocas sedimentarias.

El final de la diagénesis de la materia orgánica sedimentaria se sitúa en la forma más conveniente al nivel en que los ácidos húmicos extraíbles han disminuido hasta una cantidad menor, y en donde la mayor parte de los grupos carboxilo han sido eliminados (figura 3.2).

El *kerógeno* es la fracción de la materia orgánica en las rocas sedimentarias que es insoluble en ácidos, bases y en solventes orgánicos, ya que está compuesto básicamente de grasas y ceras; el betumen es la parte soluble, ya que proviene de los demás compuestos orgánicos. El kerógeno está formado por macromoléculas de núcleos cíclicos condensados y encadenados por enlaces heteroatómicos o cadenas alifáticas, por lo que es resistente a la descomposición. Produce hidrocarburos cuando se somete a un proceso de diagénesis.



TEMIS CON
 FALTA DE ORIGEN

Figura 3.2. Destino del material orgánico durante la sedimentación y diagénesis, dando como resultado dos fracciones orgánicas principales, kerógeno y fósiles geoquímicos.¹⁹

El kerógeno se compone de fragmentos orgánicos diseminados que pueden agruparse en unidades llamadas macerales; éstos tienen las siguientes características:

- Vitrinita: principal tipo en muchos kerógenos y principal componente del carbón. Aparece en casi cualquier medio deposicional.
- Exinita: derivado de algas, esporas, polen y ceras. No es muy común, indica un medio lacustre o marino somero.

¹⁹ Tissot B. T., Welte D. H., 1982. El petróleo su formación y localización, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, 2ª ed. México.

- Inertita: proviene de varias fuentes de materia orgánica que han sido muy oxidadas durante la deposición.
- Amorfinita: incluye a todos los componentes amorfos. Son los componentes más interesantes en la formación del petróleo, debido a que están más comprimidos y maduran a menores temperaturas

La clasificación de los kerógenos puede realizarse basándose en diferentes tipos de estudios como son los palinológicos, petrográficos así como los geoquímicos. Los términos para clasificar los carbones (sapro pélico y húmico), pueden ser empleados también en los kerógenos. El término *sapro pélico* se refiere al producto obtenido de la descomposición y la polimerización de la materia algácea y herbácea principalmente, depositada en condiciones acuáticas con bajo contenido de oxígeno atmosférico. Por su parte la palabra húmico se aplicará al producto obtenido de la descomposición de plantas terrestres superiores, depositadas en medios terrígenos con abundante oxígeno atmosférico. Los kerógenos sapropélicos producen aceite mediante calor, mientras que los húmicos producen principalmente gas.

El análisis de la materia orgánica (kerógeno) sirve para determinar la calidad y el tipo de la misma, en función de establecer las relaciones atómicas H/C y O/C. En función de estas relaciones se obtienen los siguientes cuatro tipos de productos:

- **Kerógeno tipo I:** kerógeno que tiene una alta relación atómica H/C inicial (cerca de 1.5 o más), con una baja relación O/C inicial (generalmente menor de 0.1); se compone de gran cantidad de material lípido, particularmente cadenas alifáticas; el contenido de los núcleos poliaromáticos y enlaces heteroatómicos es bajo comparado con otros tipos de materia orgánica. Cuando se somete en laboratorio a pirólisis (550-600 °C) produce un alto rendimiento de compuestos volátiles y/o extraíbles, comparado con cualquier otro tipo de kerógeno (hasta 80% en peso para las muestras inmaduras de poca profundidad), y de manera similar, un más alto rendimiento de aceite. Es poco común con respecto a los otros tipos y probablemente es derivado de productos algaceos y de una biomasa de lípidos retransformados y otros lípidos microbiales. Son muestras de medios marinos con excelente calidad de materia orgánica y gran potencial generador de hidrocarburos líquidos. Se trata de un kerógeno difícil de encontrar.

- **Kerógeno tipo II:** se encuentra relacionado con los sedimentos marinos en donde se deposita la materia orgánica autóctona, derivada de una mezcla de fitoplancton, zooplancton y microorganismos (bacterias), en un medio ambiente reductor. Presenta menor rendimiento en la pirólisis que el de tipo I, aunque es más frecuente en muchas rocas generadoras de petróleo y lutitas aceitíferas; presenta relaciones H/C relativamente altas y O/C bajas. Los núcleos poliaromáticos y los grupos heteroatómicos (cetona y carboxílico), son más importantes en comparación con el tipo I, pero menos que en el tipo III. En la catagénesis este tipo de kerógeno produce aceite y gas; el azufre se encuentra presente en

cantidades notables. Correspondiente a medios iguales que los anteriores, pero con una menor calidad de materia orgánica o bien representativa de una mezcla de material continental, marino y lacustre; el potencial generador es inferior al de las muestras de kerógeno tipo I, a este tipo de kerógeno corresponde la generación de la mayor parte de los aceites producidos que se encuentran en los yacimientos de hidrocarburos (los principales organismos productores son el Fitoplancton, el Zooplancton y Microorganismos). El kerógeno tipo II es el que generalmente produce aceite y gas al mismo tiempo.

- **Kerógeno tipo III:** se refiere al kerógeno con relación H/C inicial relativamente baja (normalmente menos de 1.0) y una relación atómica O/C inicial alta (0.2 o 0.3), está compuesto por una proporción importante de núcleos poliaromáticos y grupos heteroatómicos (cetona y ácido carboxílico), además por algunas cadenas largas que se han originado en las ceras de plantas superiores, por lo que es rico en vitrinita. Este tipo es menos favorable para la generación de hidrocarburos líquidos que los otros dos, aunque puede proporcionar rocas generadoras de gas convenientes cuando está sepultado a profundidad suficiente; es menos productivo durante la pirólisis y no incluye ninguna lutita aceitífera. Son característicos de material de tipo eminentemente continental, o bien marinos o lacustres, pero sometidos a una fuerte oxidación. Este material es un pobre generador de hidrocarburos líquidos, produciendo generalmente carbón o gas.

- **Kerógeno tipo IV:** Se refiere a la materia orgánica rica en inertinita, por lo que no produce aceite o gas. Este tipo de kerógeno no es importante en la generación de hidrocarburos.

Los procesos por los cuales la materia orgánica es alterada debido al efecto del aumento en la temperatura se llama *Catagénesis*, una vez que se tienen los sedimento consolidados, se entierran profundamente (profundidades mayores a 2,000 m), debido al depósito de nuevos sedimentos. Esto, junto con los movimientos tectónicos, representa un aumento considerable en la temperatura y en la presión.

Las temperaturas en el subsuelo se incrementan de 2 a 5 °C por cada 100 metros de profundidad. Un aumento lineal en la temperatura causa un incremento lineal logarítmico en la razón de reacción para la mayoría de las reacciones involucradas en la formación del petróleo (PEMEX, 2000). La catagénesis está definida dentro del rango de 50 a 225 °C, y la presión geostática debida a la sobrecarga puede ser de 300 a 1000 ó 1500 bars (PEMEX, 2000). Tal aumento coloca nuevamente al sistema fuera de equilibrio, y da como resultado nuevos cambios (figura 3.3).

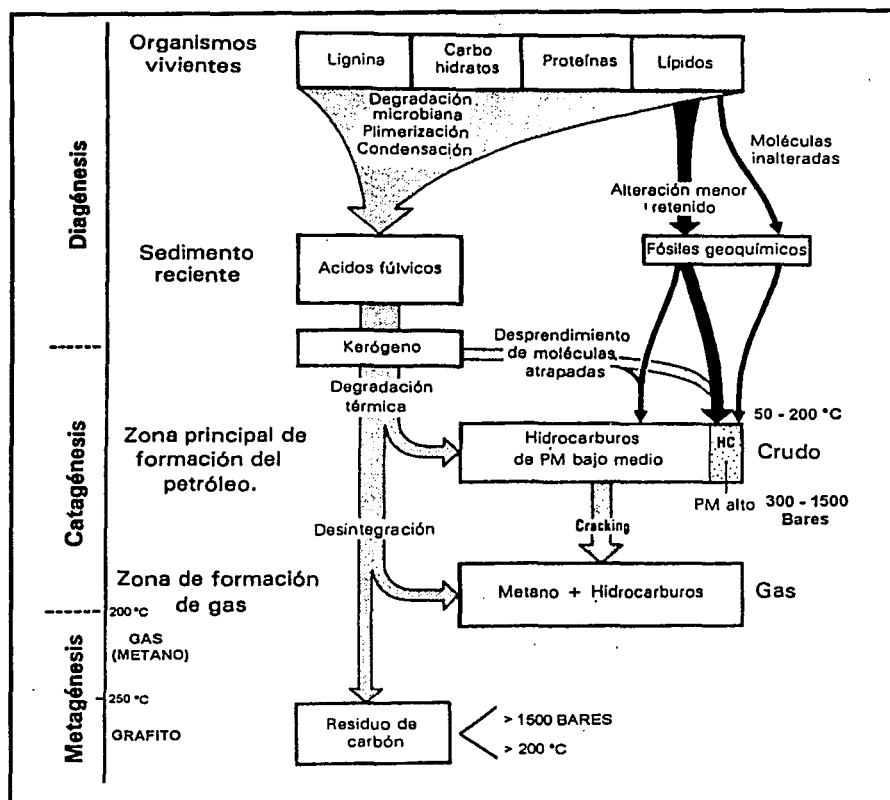


Figura 3.3. Fuente de hidrocarburos en situaciones geológicas, con respecto a la evolución de la materia orgánica (diagénesis, catagénesis y metagénesis). Los fósiles geoquímicos representan una primera fuente de hidrocarburos en el subsuelo (flechas negras sólidas). La degradación del kerógeno representa una segunda fuente de hidrocarburos (flechas grises punteadas).²⁰

La materia orgánica experimenta cambios mayores a través de evolución progresiva, el kerógeno produce inicialmente petróleo líquido; luego, en una etapa subsecuente, se obtiene el *gas húmedo* y condensado; tanto el aceite líquido como el condensado van acompañados de una cantidad considerable de *metano*, posteriormente los depósitos orgánicos masivos se modifican como diversas clases de carbón y producen también hidrocarburos. Se produce gas y aceite en los siguientes intervalos:

Gas: de ± 50 a $\pm 225\text{ }^{\circ}\text{C}$
 Aceite: de ± 60 a $\pm 175\text{ }^{\circ}\text{C}$

²⁰ Tissot B. T., Welte D. H., 1982. El petróleo su formación y localización. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, 2ª ed. México.

Conforme la temperatura continúa aumentando, se rompen más enlaces, por ejemplo, los enlaces de éster y algunos carbono-carbono. Las moléculas de hidrocarburos, particularmente las cadenas asfálticas, se producen a partir del kerógeno y de los compuestos de nitrógeno (N), azufre (S), oxígeno (O) previamente generados. Algunos de los hidrocarburos liberados son moléculas biogénicas C_{15} C_{30} comparables con los fósiles geoquímicos que fueron anteriormente entrampados en la matriz del kerógeno. La mayor parte de los nuevos hidrocarburos producidos durante la zona principal de la generación de aceite tienen peso molecular de intermedio a bajo. No disponen de una estructura característica o distribución específica, contrariamente a los fósiles geoquímicos que progresivamente se diluyen por estos nuevos hidrocarburos.

Esta es la etapa más importante en la formación de aceites, aunque la generación de aceite líquido va acompañada de la formación de una significativa cantidad de gas. A medida que la temperatura y el sepultamiento continúan aumentando, la ruptura de los enlaces carbono-carbono se presenta con más frecuencia y altera tanto a los hidrocarburos ya formados de la roca generadora como al kerógeno remanente. Los hidrocarburos ligeros se generan a través de esta desintegración, mientras que en los hidrocarburos de la roca generadora y el petróleo su proporción aumenta rápidamente.

Debido a la cinética de la formación y a la estructura del kerógeno, el metano se convierte velozmente en el compuesto liberado predominante. La transformación global que se presenta durante la catagénesis es equivalente al proceso de desproporción. Por otra parte, se generan hidrocarburos de contenido de hidrógeno creciente con una relación atómica Hidrógeno/Carbono promedio de 1.5 a 2.0 en el crudo, y 4.0 en el metano puro. Por otra parte, el kerógeno residual llega a ser agotado en hidrógeno con una relación atómica hidrógeno/carbón de aproximadamente 0.5 al final de la etapa de catagénesis.

El final de la catagénesis se alcanza en el intervalo en donde se completa la desaparición de las cadenas asfálticas de carbono en el kerógeno, y en donde se inicia el desarrollo de un ordenamiento de sus unidades básicas.

La tercera etapa dentro del proceso, corresponde a la **metagénesis**, es la última etapa dentro de la transformación de la materia orgánica, consideranda importante para la generación de gas. En esta etapa los minerales experimentan una transformación bajo condiciones de temperatura muy alta (entre 200 y 250 °C). Los minerales arcillosos pierden su intercapa de agua y alcanzan un alto grado de cristalinidad; los óxidos de hierro contienen agua estructural (Goethita) y cambian a óxidos sin agua (Hematita); también ocurre una severa disolución por presión y recristalización, además de la formación de cuarcita e, inclusive, la desaparición de la estructura original de la roca.

Las rocas ricas en materia orgánica sufren bajo estas condiciones de temperatura la *metagénesis* de la materia orgánica. En este estado, los constituyentes orgánicos están

compuestos solamente de metano y carbón residual, y entonces algunos cristales ordenan su desarrollo. El carbono se transforma en antracita. La producción, acumulación y preservación de materia orgánica no degradada es un prerequisite para la existencia de rocas generadoras de petróleo.

Una vez que el material más débil se elimina, se presenta a través de la catagénesis con un alto grado de ordenamiento, una reorganización estructural en el kerógeno. Sin embargo, en esta etapa (metagénesis) no se generan cantidades significativas de hidrocarburos a partir del kerógeno, excepto una pequeña cantidad de metano. Las cantidades grandes de metano se pueden obtener como resultado de la desintegración de los hidrocarburos de la roca generadora y del petróleo líquido acumulado en los yacimientos.

La estabilidad del metano, aún a temperaturas superiores (hasta cerca de 550 °C), es tal que las profundidades de perforación actuales y próximas no alcanzarán las zonas en las que el metano pueda ser destruido a causa de la temperatura. No obstante, el metano se puede destruir debido a la presencia de azufre que puede presentarse originalmente como azufre libre debido a que la materia orgánica puede reaccionar con los sulfatos a temperaturas altas para producir azufre libre. A su vez, el azufre puede reaccionar con el metano para formar sulfuro de hidrógeno (H_2S). El sulfuro de hidrógeno es particularmente abundante cuando la propia materia orgánica es rica en azufre, como sucede con las secuencias de carbonatos y carbonato evaporita. En tales condiciones geológicas, la generación de H_2S parece verse favorecida a gran profundidad (típicamente 3,000 a 4,000 m) y generalmente, en el mismo intervalo de temperatura que el metano.

La matagénesis está considerada también como el inicio del metamorfismo. Finalmente, cuando el sepultamiento es mayor a los 10 km, inicia el proceso de metamorfismo, tenemos como resultado la transformación del carbón en meta-antracita y del kerógeno residual en grafito. En estas condiciones, es imposible considerar la producción aún mínima de hidrocarburos gaseosos (figura 3.3).

III.5. TIPOS DE HIDROCARBUROS

En términos generales, los hidrocarburos están constituidos por dos elementos mayores, el carbono y el hidrógeno, y en cantidades menores azufre, nitrógeno, oxígeno y algunos metales en proporciones muy bajas (vanadio, níquel, cromo y cobre principalmente). Analizando la composición por fracciones químicas del petróleo, vemos que está constituido por tres grandes grupos de compuestos: hidrocarburos saturados, hidrocarburos aromáticos y productos pesados.

Si los átomos de carbono se unen en una cadena lineal hablamos de compuestos alifáticos (del vocablo griego que significa *grasa*). Si se unen en anillos, se denominan compuestos cíclicos. A los compuestos alifáticos o hidrocarburos en cadena abierta lineal los podemos clasificar de acuerdo con el tipo de enlace que une a los carbonos (figura 3.4). De tal manera que llamamos:

- alcanos: a los compuestos cuyos carbonos se unen con un enlace sencillo
- alquenos: a los compuestos que tienen los carbonos unidos con ligadura doble
- alquinos: a aquellos compuestos que poseen carbonos con ligadura triple.

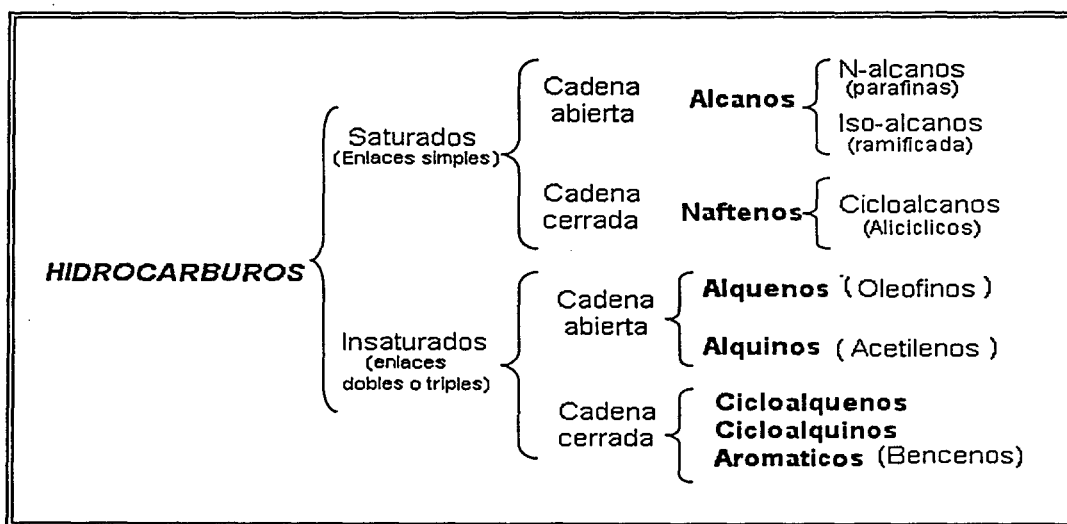


Figura 3.4. Clasificación de los hidrocarburos, por el tipo de enlace y de cadena.

-Alcanos: son compuestos formados por cadenas de átomos de carbono unidos entre sí por con un enlace simple. Estos compuestos son el conjunto más sencillo de los hidrocarburos. Empezando con el metano, cada miembro sucesivo de la serie de los alcanos está formado por la adición de un grupo metileno (-CH₂-). Una serie como ésta, en donde cada miembro subsiguiente está formado por la adición del mismo grupo, se conoce como *serie homóloga*. La de los alcanos puede ser representada por la fórmula general C_nH_{2n+2} en la que n es el número de carbonos y 2n+2, el número de átomos de hidrógeno del compuesto. El nombre de los alcanos -y también de los demás hidrocarburos- se forma con dos partes: de un prefijo (latino o griego) que indica el número de átomos de carbono (para los compuestos que le siguen al butano); y de la terminación *ano*.

El enlace sencillo es la forma más simple de unión que puede tener lugar entre dos átomos monovalentes. El enlace está formado por la unión de dos electrones, uno de cada átomo; por ejemplo el metano CH_4 , el etano C_2H_6 y el pentano C_5H_{12} tienen enlaces sencillos y se pueden expresar de la siguiente forma (figura 3.5):

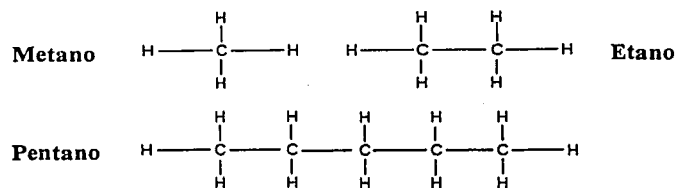


Figura 3.5. Fórmulas estructurales desarrolladas del metano, etano y pentano.

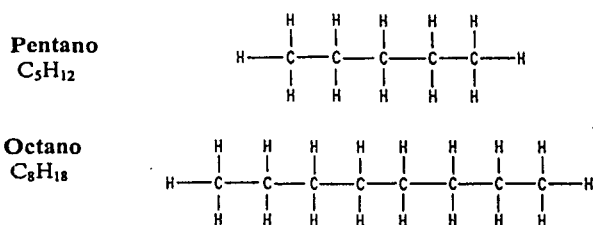
Las fórmulas arriba expresadas (figura 3.6) de la serie de los alcanos se conocen como *fórmulas estructurales desarrolladas* y muestran claramente cómo los átomos están unidos entre sí. Para ahorrar espacio y tiempo al escribir fórmulas estructurales, los químicos orgánicos a menudo usan *fórmulas estructurales condensadas*. Las fórmulas estructurales condensadas correspondientes a las fórmulas estructurales desarrolladas que se dan en la figura 3.5 son: CH_4 (metano), C_2H_6 (etano) y C_5H_{12} (pentano).

Los primeros cuatro compuestos de la serie de los alcanos son el metano, el etano, el propano y el butano. Como cada uno de los cuatro electrones de valencia del carbono están unidos a otros cuatro átomos en las moléculas de los alcanos, se ha llegado en ellos a la máxima capacidad de enlace del átomo de carbono. Por esta razón, los alcanos también se conocen como hidrocarburos saturados. El hecho de que la capacidad de enlace del carbono está saturada en las moléculas del alcano, explica su relativa inactividad química. Esa relativa inactividad es la que ha dado origen al antiguo nombre para esa familia de hidrocarburos -las parafinas- de los vocablos latinos que significan *poca afinidad*.

A partir de los compuestos con cuatro átomos de carbono los nombres de los hidrocarburos de cadena lineal se llaman normales, y al escribir su nombre se les antepone la letra *n*, presentándose para estos compuestos el fenómeno de la isomería de cadena, como se observa en los siguientes ejemplos:

n-alcanos (parafinas, cadena abierta).

Ejemplos:

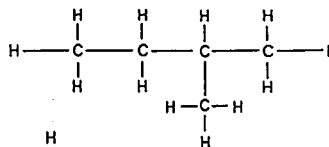


A los compuestos que tienen la misma fórmula condensada, pero diferente fórmula desarrollada se les llama isómeros. Los isómeros, por tener diferente estructura, tienen también distintas propiedades físicas y químicas.

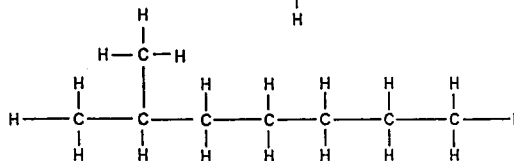
Iso-alcanos (Cadena abierta ramificada)

Ejemplos:

Isopentano:
 C_5H_{12}



Isooctano
 C_8H_{18}

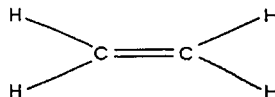


Al ir aumentando la cadena de carbonos en los hidrocarburos, aumenta su densidad y sus propiedades físico-químicas también van cambiando. Los primeros cuatro hidrocarburos son gases, del quinto al decimoséptimo son líquidos; los demás son sólidos y se conocen como parafinas.

Serie de los Alcanos:			
Metano	CH_4	Pentano	C_5H_{12}
Etano	C_2H_6	Hexano	C_6H_{14}
Propano	C_3H_8	Heptano	C_7H_{16}
Butano	C_4H_{10}	Octano	C_8H_{18}
Fase gaseosa: de CH_4 a C_4H_{10}			
Fase líquida: de C_5H_{12} a $C_{17}H_{36}$			
Fase sólida: $> C_{17}H_{36}$			

Tabla 3.2. Serie de los alcanos C_nH_{2n+2}

El enlace doble y triple resulta cuando dos núcleos atómicos comparten electrones. Para conservar la tetravalencia del carbono, es necesario suponer algunas veces que un átomo de carbono puede unirse con otro por medio de su valencia. Así, el etileno C_2H_4 puede expresarse como:

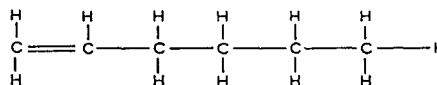


Los hidrocarburos unidos por dos o más ligaduras se llaman hidrocarburos no saturados. Además las cadenas de hidrocarburos no sólo son lineales, sino pueden también adoptar formas arborescentes (ramificadas) o estructuras cerradas o cíclicas.

-Los **alquenos** u olefinas son hidrocarburos cuyos átomos de carbono se unen por medio de dos valencias (doble ligadura). Los alquenos responden a la fórmula C_nH_{2n} en donde n es el número de átomos de carbono y $2n$ los de hidrógeno. El nombre de estos compuestos se construye siguiendo el mismo patrón que los alcanos, pero su terminación es *eno*, para indicar la doble ligadura. Los alquenos son cadenas abiertas insaturadas relativamente inestables, por lo tanto poco usuales en aceites crudos. Tienen enlaces dobles y simples.

Ejemplos:

n - exeno.
 C_6H_{12}



-Los **alquinos** (acetilenos) son compuestos no saturados con enlaces triples y simples que unen un carbono con otro. La fórmula molecular general de los alquinos es C_nH_{2n-2} . El nombre de estos compuestos se construye siguiendo el mismo patrón que los alcanos y alquenos, pero su terminación es *ino*, para indicar la triple ligadura.

Ejemplo:

Etino

(Acetileno)
 C_2H_2



Hidrocarburos ramificados y cíclicos: Las cadenas de hidrocarburos no son sólo lineales, sino pueden también adoptar formas arborescentes (ramificadas) o estructuras cerradas o cíclicas.

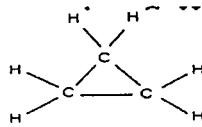
Los alquenos y los alquinos también pueden formar compuestos con estructuras ramificadas. Los alquenos y los alquinos, además de los isómeros que pueden formar debido a sus ramificaciones, forman más isómeros dependiendo de la posición en la que se encuentra el doble o el triple enlace.

Los hidrocarburos cíclicos se unen conformado anillos o ciclos y no en forma lineal. Los hidrocarburos cíclicos que presentan sus carbonos unidos por valencias simples se llaman cicloalcanos y utilizan la terminación *ano*. Los hidrocarburos cíclicos que presentan sus carbonos unidos por ligaduras dobles se llaman cicloalquenos y utilizan la terminación *dieno*

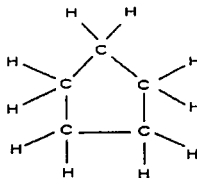
Naftenos: Son hidrocarburos saturados, de enlace simple. Tienen estructura de cadena cerrada, cíclica o de anillo. Su fórmula:

Ejemplos:

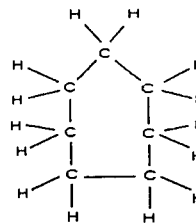
Ciclopropano
 C_3H_6



Ciclopentano
 C_5H_{10}



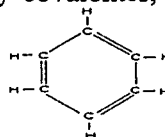
Cicloheptano
 C_7H_{14}



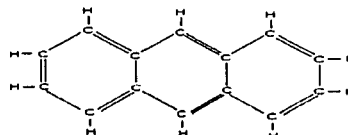
Los hidrocarburos **aromáticos** son hidrocarburos cíclicos cuyos átomos de carbono quedan unidos alternadamente por dobles ligaduras. Su nombre proviene de aroma, debido al olor agradable de algunos de estos compuestos. El benceno, de fórmula C_6H_6 es el más importante de los aromáticos. Aromáticos (Insaturados - cadena cerrada). Son compuestos no saturados donde alternan enlaces simples y covalentes, en una cadena cerrada de seis carbonos, formando anillos llamados *bencei*

Ejemplos:

Benceno C_6H_6

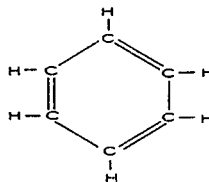


Trimetilnaftaleno $C_{14}H_{10}$



TEMIS CON
FALLA DE ORIGEN

El químico alemán Kekulé (1829-1886) descubrió la estructura del benceno en un sueño. Los químicos de la época no podían explicar cómo estaba estructurado el benceno, un hidrocarburo de 6 carbonos y 6 hidrógenos y de gran estabilidad. Kekulé se imaginó, cuando dormitaba en un camión, que los átomos de carbono ejecutaban una danza. La cabeza de una cadena de átomos mordía a su propia cola y formaba un anillo circular. A partir de éste sueño propuso la siguiente fórmula estructural para el benceno:



Hasta antes del sueño de Kekulé los hidrocarburos se representaban sólo mediante cadenas lineales de átomos de carbono. Ahora pueden representarse de manera más consistente y apegada a la estructura real de los compuestos, mediante fórmulas estructurales circulares.

III.6. GAS NATURAL

El gas natural es una mezcla compuesta por las fracciones más ligeras de la serie parafínica; el gas natural es la porción de hidrocarburos que existe en los yacimientos cuya fase es gaseosa o que se encuentra como solución en el aceite, permaneciendo como gas a condiciones atmosféricas del nivel del mar. De la misma manera que el aceite crudo, el gas también puede incluir impurezas tales como ácido sulfúrico, nitrógeno, dióxido de carbono, entre otros. Cuando las impurezas alcanzan valores por encima de cierta norma, este gas es tratado a fin de eliminar estas concentraciones de impurezas. Cuando esto sucede, el gas es denominado gas natural amargo. Por el contrario, cuando la cantidad de impurezas no impide su uso como combustible no corrosivo, este gas es denominado gas natural dulce.

Asimismo, los líquidos del gas natural, son porciones líquidas del gas que se recupera en los separadores, en las instalaciones de campo o en plantas de procesamiento de gas y puede incluir cantidades pequeñas de impurezas. Por ejemplo, los condensados son líquidos del gas constituidos principalmente por pentanos y componentes de hidrocarburos más pesados.

El gas natural se encuentra en tres tipos de yacimientos:

- Yacimientos de gas individualizado
- Yacimientos asociados a los de aceite, en las zonas altas de los mismos (casquete), o en disolución en la fase líquida.
- Yacimientos de hidratos de metano.

Los yacimientos de gas natural están compuestos fundamentalmente por metano, que llega a constituir hasta el 100% de los mismos (gas seco). Además, puede incluir otros hidrocarburos gaseosos, como etano, propano, butano, en proporción decreciente con el número de Carbonos. Otros constituyentes, minoritarios pero frecuentes, son: bióxido de carbono (CO_2), ácido sulfúrico (H_2S), nitrógeno (N_2), helio (He) y argón (Ar) (tabla 3.3).

- El gas seco es aquel gas natural que consiste casi exclusivamente de metano.
- Gas húmedo es el gas natural compuesto por fracciones ligeras y pesadas asociadas.

	Gas "húmedo"	Gas "seco"
metano	84.6	96.00
etano	6.4	2.00
propano	5.3	0.60
iso-butano	1.2	0.18
n-butano	1.4	0.12
iso-pentano	0.4	0.14
n-pentano	0.2	0.06
hexano	0.4	0.10
heptanos	0.1	0.80

Nota: porcentajes por volumen

Tabla 3.3. Hidrocarburos gaseosos típicos ("húmedos" y "secos") de los yacimientos promedio.²¹

El poder calorífico del gas natural constituye la base de su interés económico; el cual es variable según la composición específica del gas. El valor medio es de 38 a 40 megajulio/Kg, ó 9,500-10,000 Cal/gr. La densidad del gas natural varía de 0.55 a más de 1, respecto a la densidad del aire.

Los hidrocarburos gaseosos que se presentan en condiciones ambientales son: metano (CH_4), etano (C_2H_6), propano (C_3H_8) y butano (C_4H_{10}), otros hidrocarburos que se pueden encontrar en estado de vapor debido a mayor temperatura son el pentano (C_5H_{12}) y el hexano (C_6H_{14}). El metano es el hidrocarburo más abundante como gas natural y su origen puede ser de las siguientes fuentes:

- De los procesos que dan origen al petróleo (metano termogénico).
- De la putrefacción de la materia orgánica (metano biogénico).
- De las emanaciones volcánicas.
- De los compuestos de carbono, hidrógeno y agua que se encuentran en estado cristalino en los sedimentos, bajo determinadas condiciones de temperatura y presión (hidratos de metano).

Los principales gases asociados al gas natural aparte de los hidrocarburos gaseosos, son los siguientes:

-Bióxido de carbono (CO_2). Se origina principalmente por la oxidación de los compuestos orgánicos a causa del oxígeno existente en la atmósfera y en el agua, este gas es abundante en las emanaciones volcánicas. Su presencia en el gas natural es desfavorable, ya que disminuye el valor calorífico y aumenta la temperatura de combustión.

²¹ Tirtsoo E. N., 1979. Natural Gas. Third Edition, Gulf Publishing Company.

-Ácido sulfhídrico (H₂S). Es un gas incoloro, de olor fétido característico, y muy tóxico; químicamente presenta una fuerte acción corrosiva sobre los metales. Su presencia en el gas natural es originada por: a) emanaciones volcánicas, b) putrefacción de la materia orgánica, c) reducción de los sulfatos en ambiente anaeróbico y por acción de bacterias (éstas actúan sobre los sulfatos disueltos en el agua liberando el azufre, el cual se combina con el hidrógeno formando el ácido sulfhídrico). Cuando el ácido sulfhídrico es abundante en el gas natural, éste se denomina gas amargo. Las condiciones que favorecen la abundancia de ácido sulfhídrico en el gas natural, es cuando se tienen domos salinos, cuando la roca almacén son carbonatos y cuando en la secuencia sedimentaria hay rocas evaporíticas.

-Nitrógeno (N). El nitrógeno se deriva principalmente de la atmósfera, de la que constituye un promedio del 78% (del aire), en el gas natural se encuentra en pequeñas cantidades, pero al igual que el bióxido de carbono, su presencia disminuye el valor calorífico e incrementa la temperatura de combustión.

-Helio (He). El helio es un gas inerte que se encuentra en el gas natural en muy pequeñas cantidades. Su origen es posiblemente, debido a la desintegración de minerales radioactivos.

A continuación se muestra la composición promedio de algunos gases comerciales obtenidos de varios yacimientos del mundo (tabla 3.4).

	Mar del norte (Banco Leman)	Países Bajos (Groningen)	Brunei	Libia	Argelia	Nigeria (Ughelli)
Metano	94.8	81.7	88.0	71.4	86.5	88.1
Etano	3.0	2.7	5.1	16.0	9.4	6.3
Propano	0.6	0.4	4.8	7.9	2.6	2.1
Butano	0.2	0.1	1.8	3.4	1.1	0.3
Pentano	0.2	1.1	0.2	1.3	0.1	1.1
Nitrógeno	1.2	14.0	0.1	-	0.3	-
Dióxido de carbono	-	-	-	-	-	2.1

Nota: porcentajes por volumen.

Tabla 3.4. Composición de algunos gases naturales comerciales.²²

Los hidrocarburos licuados y gaseosos están constituidos casi exclusivamente por Carbono e Hidrógeno, mezclados en proporciones diversas entre sí, con cantidades menores de otros compuestos químicos, su composición elemental promedio se muestra en la Tabla (3.5).

²² Tiratsoo E. N., 1979. Natural Gas. Third Edition, Gulf Publishing Company.

ELEMENTO	RANGO (%)	TIPICO (%)
Carbono	85-95	85
Hidrógeno	5-15	13
Azufre	< 5	1.3
Oxígeno	< 2	0.5
Nitrógeno	< 0.9	0.2
Metales	< 0.1	

Tabla 3.5. Composición básica de los hidrocarburos gaseosos.

Las propiedades y características físicas de los hidrocarburos gaseosos son muchas, sin embargo, las principales se indican en la tabla 3.6.

Hidrocarburo	Fórmula	Peso específico (Aire = 1)	Punto de ebullición a la presión atmosférica (°C)	Presión de vapor a 37.8°C(100°F) Kg/cm ² absoluta	Potencia calorífica superior, Kcal /m ³ a 15.6 °C (60 °F)	Condiciones críticas	
						Temperatura (°C)	Presión absoluta Kg/cm ²
Metano	CH ₄	0.554	-103.9	-	9007	-82	47.3
Etileno	C ₂ H ₄	0.968	-89.0	-	14356	10	52.6
Etano	C ₂ H ₆	1.038	-47.7	-	15762	32	49.8
Propileno	C ₃ H ₆	1.453	-42.1	15.96	21093	91	46.9
Propano	C ₃ H ₈	1.522	-4.5	13.28	22428	97	43.4
1, 3-Butadieno	C ₄ H ₆	1.867	-161.4	4.15	26415	163	44.1
1-Butileno	C ₄ H ₈	1.937	-6.3	4.36	27448	147	41.3
Iso-butileno	C ₄ H ₈	1.937	-6.9	4.43	27278	145	40.8
Iso-butano	C ₄ H ₁₀	2.006	-11.7	5.13	29014	134	37.3
N-butano	C ₄ H ₁₀	2.006	-0.5	3.65	29076	152	38.7

Tabla 3.6. Principales características de los hidrocarburos gaseosos.²³

Los hidrocarburos de la tabla anterior, corresponden con gases a la temperatura y presión atmosférica normal. Se pueden subdividir en parafinas y olefinas; los gases parafínicos son sustancias saturadas que predominan en la composición del gas natural, mientras que los olefínicos son compuestos insaturados que forman la mayoría de los productos de las unidades de cracking.

²³ Instituto de Petróleo, Londres, 1963. *Moderna tecnología del Petróleo*. Versión española por Mora Cartaya y García Patrón. Ed. Reverté.

III.7. GENERACIÓN DE HIDRATOS DE METANO

El metano se puede formar por diferentes causas y procesos, una vez generado y bajo ciertas condiciones de presión y temperatura se puede mezclar con agua y formar hidratos de metano. Como consecuencia, los hielos de metano se forman mediante dos procesos:

- Biogénico
- Termogénico

Los gases se forman generalmente por la descomposición bacteriana de materia orgánica de los sedimentos marinos (en este caso su origen es biogénico), o bien por descomposición térmica de hidrocarburos en profundidad (origen termogénico). En condiciones de temperatura y presión adecuadas, el agua que inunda los poros de los sedimentos se solidifica y atrapa literalmente al metano, generando un compuesto altamente concentrado. Un metro cúbico de hidrato de metano contiene aproximadamente 164 metros cúbicos de gas metano con tan solo 0.84 metros cúbicos de agua.

El metano biogénico es el derivado común de la ingestión bacteriana de materia orgánica como se describe en la ecuación siguiente:



Como el metano se puede producir en los ambientes subsuperficiales poco profundos a través de la alteración biológica de materia orgánica (con la proporción original de carbono: nitrógeno: fósforo de 106:16:1). La ecuación resume fases sucesivas de oxidación por oxígeno y reducción por nitratos, sulfatos, y carbonatos (Sloan, 1990).

El mismo proceso que produce el metano en los pantanos, basureros, las plantaciones de arroz, y los tractos digestivos de mamíferos ocurre continuamente dentro de los sedimentos enterrados en los ambientes geológicos alrededor del globo. Los procesos biogénicos son capaces de producir inmensas cantidades de metano, se considera que son la fuente primaria del metano atrapada en las capas del hidrato dentro de los sedimentos del piso oceánico poco profundos.

Los hidratos de gas son formados por bacterias anaeróbicas que viven de la materia orgánica que se encuentra en los sedimentos bajo el piso oceánico. Durante el proceso de digestión, producen principalmente metano conjuntamente con pequeñas cantidades de bióxido de carbono, ácido sulfúrico, propano, y etano. Los gases producidos se disuelven en el agua entre los sedimentos del océano.

Los hidratos también se forman cuando las discontinuidades de las rocas permiten que el gas natural (u otros gases) emigre de gran profundidad dentro de la corteza de la Tierra a la superficie del fondo del mar en los lugares con los niveles apropiados de presión y de temperatura. Los hidratos formados termogéicamente tienden a contener además del metano, muchos gases mezclados dentro, junto con los minerales y otros compuestos. Estos procesos pueden ocasionar la formación de hidratos en una capa fría que actúa de tal forma que previene que el gas escape hacia la atmósfera.

El metano termogénico se produce por la acción combinada de calor, presión y tiempo en el material orgánico enterrado. En el pasado geológico, las condiciones se han repetido periódicamente en que las inmensas cantidades de materia orgánica eran conservadas dentro del sedimento de mares poco profundos. Con el tiempo y con el sepultamiento profundo, estos estratos ricos en materia orgánica, literalmente se cocinan a presión y temperatura elevadas, dando como resultado la producción de grandes cantidades de aceite y de gas natural. Junto con el aceite, el gas (principalmente el metano, pero también el etano, propano y otras moléculas más grandes) emigra despacio hacia la parte superior debido a su baja densidad. Si cantidades suficientes alcanzan la zona de estabilidad del hidrato, el gas se combinará con el agua de la formación local, para formar el hidrato.

La mayoría de los hidratos de gas naturales, se forman del metano biogénico, excretado por las bacterias que comen la materia orgánica que se ha lavado en (o se ha muerto adentro) el océano. Cuando las bacterias digieren los residuos de plantas y animales del sedimento marino, liberan moléculas de metano (CH_4) y sometido a la enorme presión y a las bajas temperaturas del agua estas moléculas acaban aprisionadas por cristales de agua, formando los hidratos, éstos al combinarse con limo o arcilla del fondo del océano forman concentraciones de gas entre densas camas de barro. Los hidratos de metano se encuentran principalmente asociados a zonas donde ocurrió gran actividad microbiana en sedimentos de grano fino, ricos en materia orgánica. Este tipo de hidrato se concentra donde hay una acumulación rápida del detritus y también donde hay una acumulación rápida de sedimentos (que protege al detritus contra la oxidación). Los hidratos producidos por el proceso orgánico son generalmente muy puros; tienden a contener solamente agua y metano.

El hidrato de metano es un compuesto que requiere de condiciones muy específicas para formarse y ser estable. Quitándolo de esas condiciones, se disocia rápidamente (agua y gas de metano). Una área importante de investigación del hidrato, es la descripción precisa de estas condiciones para que puedan entenderse con precisión la presencia y abundancia de los hidratos en diferentes situaciones. Nuestro entendimiento actual de los hidrato del metano natural indica que las condiciones fundamentales en la formación del hidrato y su estabilidad son:

- Suministro adecuado de agua y metano.

- Temperaturas y presiones convenientes.
- Condiciones geoquímicas.
- Tipos del sedimento y texturas.

Bajo condiciones adecuadas de presión y temperatura, los hidratos formarán acumulaciones importantes sólo cuando se tiene agua y metano suficiente, tal que un porcentaje mínimo necesario (alrededor de 70% o más) de las cavidades estructurales dentro de la celosía del hidrato esté lleno. La presencia de agua generalmente no es problema; sin embargo, el suministro de metano (incluso los volúmenes y proporciones de producción del metano y migración) es más irregular.

Con cantidades adecuadas de agua y metano, se necesitará en general, una combinación de temperatura baja y presión alta para que se forme el hidrato de metano. La figura 3.6 muestra la combinación de temperaturas y presiones (límite de la fase) que marca la transición de un sistema en el que coexisten el gas metano libre y el hidrato de metano sólido. Cuando las condiciones se mueven a la izquierda del límite de la fase, ocurrirá la formación de hidratos. Moviéndolas a la derecha del límite se produce la disociación (fusión) de la estructura del hidrato en agua libre y metano. Por esta razón en la superficie de la Tierra a 1 atm de presión y 20 °C, el hielo de H₂O se funde y pasa a la fase líquida, y el gas escapa, al pasar a la fase gaseosa; puede entonces arder, de ahí el nombre de "hielo que arde".

Además de la temperatura y presión, la composición del agua y el gas es extremadamente importante para poner a punto las condiciones de estabilidad de los hidratos de gas en distintos escenarios. La mayoría de los datos colectados experimentalmente han sido para los sistemas de agua dulce o agua de mar. Sin embargo, los ambientes subsuperficiales naturales pueden exhibir variaciones significantes en la química de agua de formación, y estas variaciones cambiarán los límites de la fase presión/temperatura (la salinidad más alta restringe la formación de hidrato causando que el límite de la fase cambie a la izquierda). Similarmente, la presencia de cantidades pequeñas de otros gases naturales, como el bióxido del carbono (CO₂), ácido sulfhídrico (H₂S) e hidrocarburos más grandes como el etano (C₂H₆), aumentará la estabilidad del hidrato, cambiando la curva hacia el lado derecho.

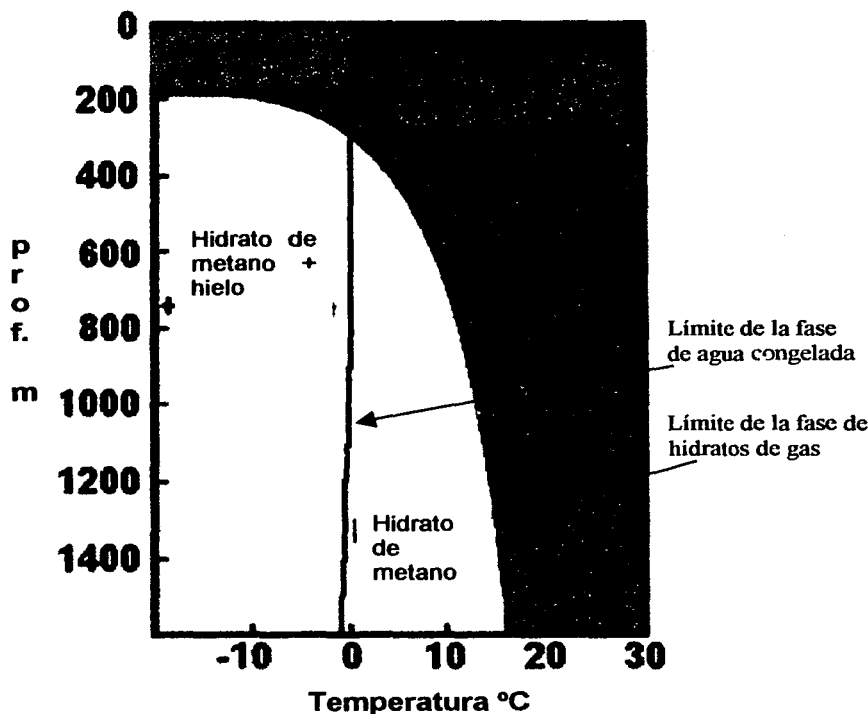


Figura 3.6. Diagrama de fases mostrando los límites de estabilidad del hidrato de metano.²⁴

Normalmente, se presentan los hidratos de metano en diagramas de fase con la presión convertida en profundidad para poner el diagrama en una perspectiva geológica. Además, la pendiente geotérmica natural se muestra para indicar el rango de temperaturas que se supone existe con el incremento de la profundidad (es decir la presión). El rango de profundidades en que la curva de pendiente de temperatura es a la izquierda del límite de la fase indica la Zona de Estabilidad de los Hidratos de Gas (Gas Hydrate Stability Zone, GHSZ por sus siglas en inglés). Esta zona sólo delimita donde serán estables los hidratos si se formaran. Las condiciones locales, en particular la disponibilidad y proporción de metano, determinarán donde los hidratos realmente ocurrirán dentro de la GHSZ.

El diagrama de fase en la figura 3.7A ilustra las condiciones típicas en una región de permafrost ártico (se asumió una profundidad de permafrost de 600 metros). La intersección del límite de la fase y el gradiente de temperatura indica que el GHSZ debería extenderse de una profundidad de aproximadamente 200 metros a más de 1,000 metros. El espesor del permafrost y la pendiente de las curvas de presión/temperatura en la figura son

²⁴ U.S. Department of Energy, "Necessary Conditions for Methane Hydrate Formation", 29/10/01, [En línea]. Disponible: http://www.netl.doe.gov/scmg/hydrate/about_hydrates/conditions.htm, 17/01/02.

ejemplos y pueden variar con la localidad, para que los diagramas sean especialmente exactos, antes debe intentarse hacer las predicciones específicas de estabilidad del hidrato para el sitio estudiado.

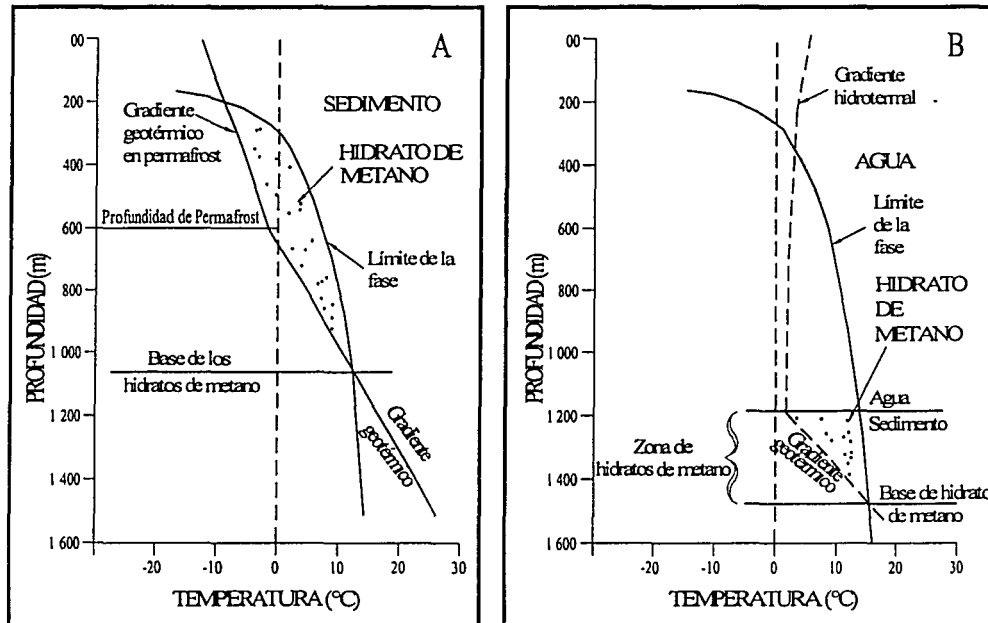


Figura 3.7. Diagramas de estabilidad de los hidratos de metano. A en Permafrost Ártico y B en sedimentos de borde de plataforma y talud continental.²⁵

El diagrama de fase de la figura 3.7B muestra una situación típica en las plataformas continentales profundas; se asume una profundidad del piso oceánico de 1,200 metros. La temperatura disminuye gradualmente con la profundidad, alcanzando un valor mínimo cerca del 0 °C en la base del océano; bajo el piso oceánico, la temperatura se incrementa gradualmente. En estas condiciones, la cima de la GHSZ se encuentra aproximadamente a 300 m (la base de la GHSZ está a 1,500 m). Sin embargo, los hidratos únicamente se acumularán en los sedimentos, lo cual les impide escapar (ya que son menos densos que el agua) salirse de la zona de estabilidad.

Del diagrama de fase de Figura 3.7B para condiciones oceánicas, parecería que los hidratos deberían acumularse en cualquier parte en los sedimentos del fondo oceánico donde la profundidad del agua excede 300 metros. Sin embargo, en sedimentos muy profundos (abisal) generalmente no se piensa que se alojen hidratos en cantidades grandes; la razón es la falta de metano. En las profundidades oceánicas, tanto la falta de productividad biológica

²⁵ Sloan E. Dendy, 1990. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. Ed. Marcell Dekker, Inc. New York and Basel.

alta (necesaria para producir la materia orgánica que es convertida en metano) como la falta de una tasa rápida de sedimentación (necesaria para enterrar la materia orgánica) que sostiene la formación de hidratos en la plataforma continental, no favorecen que se formen hidratos de metano. El diagrama de fase en la figura 3.8 ilustra por qué los hidratos no se encuentran en el interior de las cuencas de latitudes subpolares.

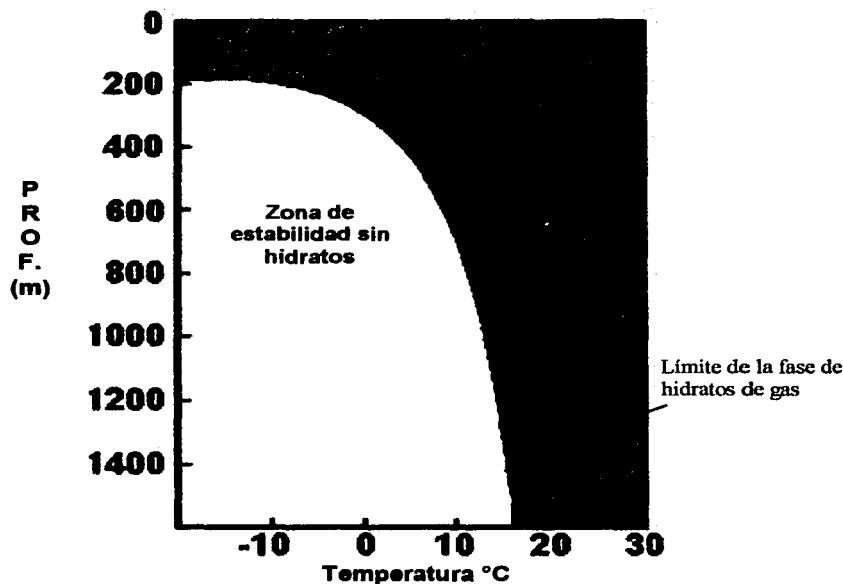


Figura 3.8. A profundidad (presión), la temperatura subterránea es también alta lo cual impide que los hidratos de metano puedan ser estables.²⁶

²⁶ U.S. Department of Energy, "Necessary Conditions for Methane Hydrate Formation", 29/10/01, [En línea]. Disponible: http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about_hydrates/conditions.htm, 17/01/02

CAPÍTULO IV. TIPOS DE DEPÓSITOS

Hasta los años sesenta del siglo pasado, el hidrato del metano fue considerado una sustancia rara y antinatural que sólo se presentaba en los laboratorios químicos y en las tuberías de gas natural. Nadie sospechó que pudiera existir en cantidades importantes en la naturaleza. Sin embargo, una serie de descubrimientos, primero en las regiones polares y después a lo largo de los taludes en aguas profundas de cada continente, ha revelado que el hidrato de metano natural se presenta verdaderamente en cantidades asombrosas.

En muchas áreas, la existencia de hidratos de metano natural es inferida solamente por evidencias indirectas obtenidas a través de los estudios geofísicos o el análisis geoquímico de muestras de sedimento. Hay sin embargo, un número creciente de sitios dónde la información está siendo reunida detalladamente y existe la certeza de su acumulación. Cada uno de estos sitios con sus propias y únicas escenas geológicas, está aportando conocimientos y datos que fortalecen las teorías iniciales de formación del hidrato. Los adelantos sobre el conocimiento general de los hidratos de gas natural son cada día más amplios.

IV.1. LOCALIZACIÓN

Los hidratos de metano se encuentran principalmente en los poros de los sedimentos arenosos bajo condiciones de presión y temperatura característicos de las regiones polares (Permafrost), del borde de plataforma y en el talud continental; en estas condiciones el agua y el gas metano reaccionan formando sólidos que cementan los granos de los sedimentos presentes en estos ambientes (figura 4.1).

En las regiones de permafrost estas formas cristalinas son estables a temperaturas de -12°C a $+14^{\circ}\text{C}$, que corresponden con profundidades que varían de -200 a -1050 m. En cambio en los sedimentos del borde de plataforma y en el talud continental las condiciones adecuadas para que se formen los hidratos de metano corresponden con temperaturas que están en el rango de 0°C a 16°C , que corresponden con profundidades de -1200 a -1400 m.

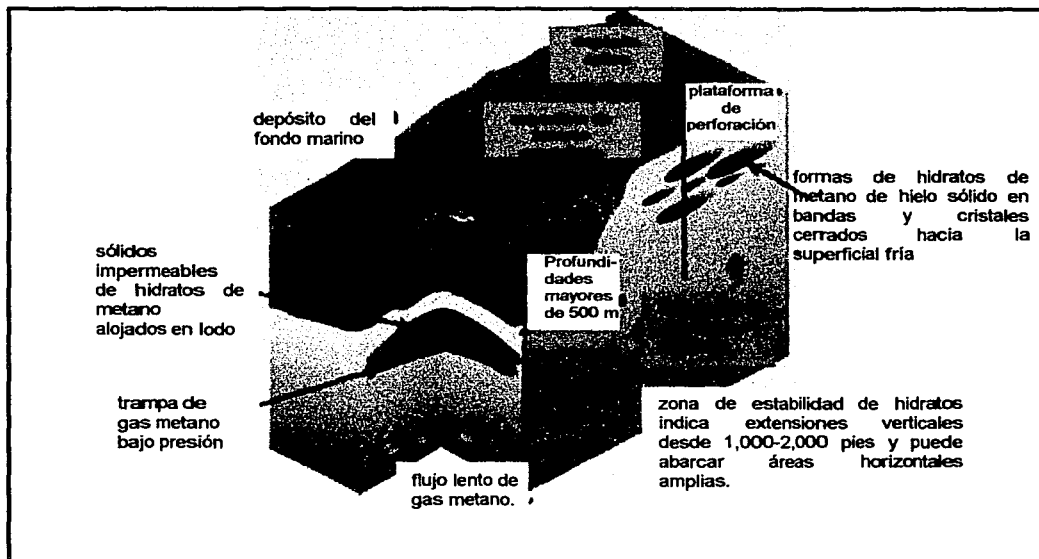


Figura 4.1. Presencia de hidratos de metano en ambientes Ártico y Marino.²⁷

En las regiones del Ártico, los hidratos de metano se presentan en asociación íntima con el permafrost. Las capas del permafrost se forman donde el agua subterránea en el espacio poroso de roca y sedimento está permanentemente congelada. El permafrost se desarrolla porque la temperatura media anual del aire es bastante baja, para mantener una temperatura constante de la superficie debajo de 0 °C, así la profundidad a la que el agua subterránea se convierte en hielo en invierno excede la profundidad del deshielo de verano. Aproximadamente veinte por ciento del área de la tierra en el Hemisferio Norte es de permafrost, con espesores variables de menos de uno a varios cientos de metros. Normalmente se pueden encontrar juntos permafrost y los hidratos de gas; sin embargo, no hay ningún eslabón causal directo entre ellos.

En las regiones polares frías, se presentan dos eventos paralelos:

- 1) Con un gradiente geotérmico normal, con temperaturas en la superficie alrededor de -12 °F, pueden persistir a las profundidades de 600 metros o más.
- 2) Cuando las temperaturas son muy bajas, combinadas con una creciente presión subterránea, el hidrato de metano es estable a profundidades que van de 300 metros a

²⁷ U.S. Department of Energy, "Geology of Methane Hydrates", 23/10/01, [En línea]. Disponible: http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about_hydrates/geology.htm, 17/01/02

1 kilómetro. Las condiciones que son favorable para la formación del permafrost también coinciden con las condiciones que son favorables para la formación de hidratos de gas.

Varias áreas en el Ártico (figura 4.2) muestran potencial para tener acumulaciones de hidrato de gas ya que pueden tener presión y condiciones de temperatura favorables; tres provincias se encuentran en América del Norte y cuatro están en Rusia, estas provincias son:

- 1) Noreste de Alaska.
- 2) Región del Delta del Mackenzie Beaufort.
- 3) Basamento de Sverdrup de Canadá.
- 4) Basamento de Siberia Occidental.
- 5) La provincia de Lena-Tunguska (basamento de Vilyuy).
- 6) Basamento de Timan-Pechora.
- 7) Varios basamentos sedimentarios en Siberia nororiental y el área de Kamchatka.

Adicionalmente se encuentran:

- 8) El archipiélago de Svalbard (Noruega).
- 9) Basamentos sedimentarios bajo el casquete de hielo de Groenlandia (Dinamarca).

Datos de más de 1000 pozos proporcionan una evidencia indirecta para la existencia de hidratos de gas árticos. La mayoría 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 de pozos, pruebas de perforación, de producción, estudios de fondo de pozos, datos cromatográficos de gas, y muestras de agua. Por ejemplo, los registros de pozos de fondo graban resistividades eléctricas altas y las velocidades acústicas rápidas en el área marina del Delta del Mackenzie-Beaufort que se cree es indicativo de presencia del hidrato.

Las tablas 4.1 y 4.2, tomadas de Sloan, 1990 (modificadas de Kvenvolden 1988a), muestran cuarenta sitios alrededor del mundo en los cuales existe alguna evidencia de hidratos in situ; en cada sitio se tiene el tipo de evidencia y la cita original de la ocurrencia del hidrato. Los números de la parte izquierda corresponden con las localidades mostradas en el mapa global de la figura 4.3 Aunque el número de la lista es pequeño, los datos considerados son una muestra de la presencia de los hidratos de gas, ya que una exploración detallada aun no se ha dado.

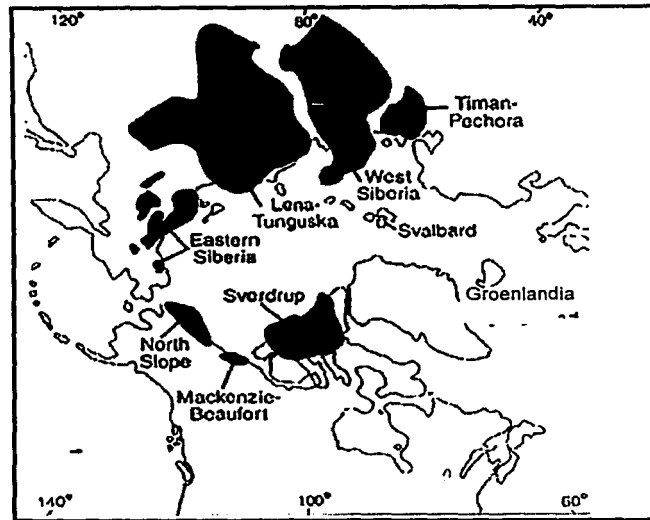


Figura 4.2. Cuencas sedimentarias en el Hemisferio Norte que pueden contener hidratos de gas.²⁸

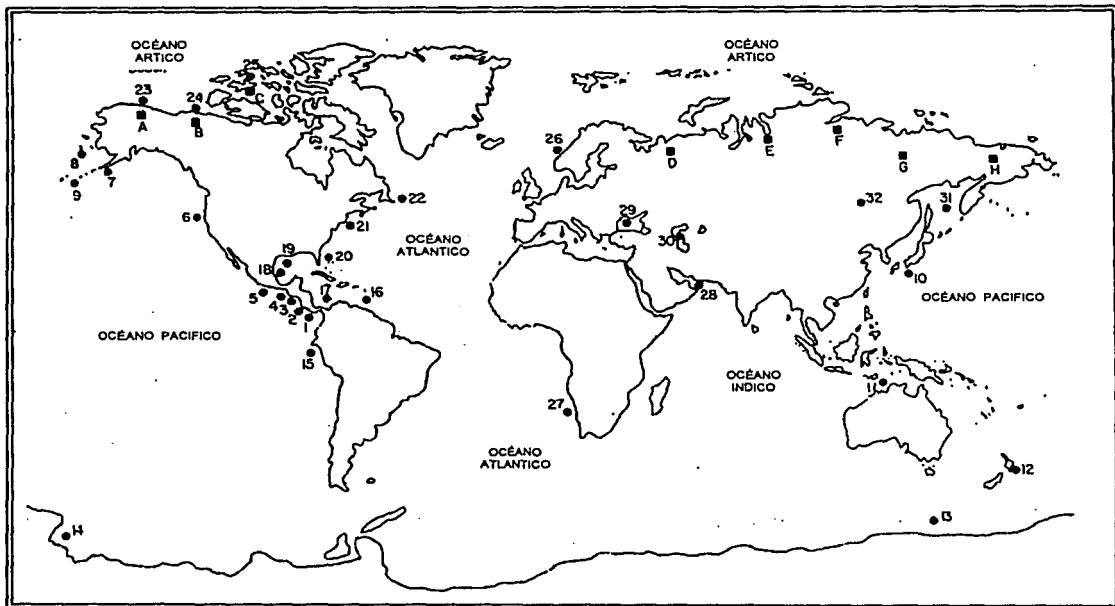


Figura 4.3. Presencias conocidas e inferidas de los hidratos de metano. Depósitos de hidratos en el Océano (●) y Permafrost (■). (Tomado de Kvenvolden 1988a, en Sloan 1990).²⁹

²⁸ U.S. Department of Energy, "Arctic Regions", 23/10/01, [En línea]. Disponible: http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about_hydrates/arctic-regions.htm, 14/02/02

²⁹ Sloan E. Dendy, 1990. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. Ed. Marcell Dekker, Inc. New York and Basel.

HIDRATOS EN LOS OCÉANOS

NÚMERO EN LA FIGURA	LOCALIZACIÓN	EVIDENCIA	REFERENCIA
1	Océano Pacífico de Panamá	BSR,	Shiple et al. (1979)
		Artículo	Krason & Ciesnik 1986a)
2	Trinchera de Costa Rica (Centroamérica)	BSR,	Shiple et al. (1979)
		Artículo	Finley & Krason (1986a)
3	Trinchera de Nicaragua (Centroamérica)	Muestras	Kvenvolden & McDonald (1985)
		Artículo	Finley & Krason (1986a)
4	Trinchera de Guatemala (Centroamérica)	BSR	Shiple et al. (1979)
		Muestras	Harrison & Curiale (1982)
		Muestras	Kvenvolden & McDonald (1985)
		Artículo	Finley & Krason (1986a)
5	Trinchera de México (Norteamérica)	BSR	Shiple et al. (1979)
		Artículo	Finley & Krason (1986a)
6	Cuenca Eel River de California	BSR	Field & Kvenvolden (1985)
		Artículo	Krason & Ciesnik 1986b)
		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)
		Artículo	Krason & Ciesnik 1987)
9	Trinchera de Alaska	BSR	McCarthy et al. (1984)
		Artículo	Krason & Ciesnik 1987)
10	Comedero Nankai en Japón	BSR	Aoki et al. (1983)
11	Comedero Timor en Australia	Gas	McKirby 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	Shiple et al (1979)
		Artículo	Finley & Krason (1986b)
18	Oeste del Golfo de México en México	BSR	Shiple et al (1979)
			Hedberg (1980)
		Artículo	Krason et al. (1985)
19	Golfo de México en USA	Muestras	Brooks et al. (1984)
		Artículo	Brooks & Bryant (1985)
20	Blake Outer Ridge , Sureste de USA	BSR	Markl et al. (1970),
			Shiple et al. (1979)
			Dillon et al. (1980)
		Muestras	Kvenvolden & Barnard (1983)
21	Rise Continental en Este de USA	Artículo	krason & Ridley (1985a)
		Artículo	krason & Ridley (1985b)
22	Shelf Labrador en Newfoundland	BSR	Tucholke et al. (1977)
		Artículo	Taylor et al. (1979)
23	Mar Beaufort en Alaska	Artículo	Krason & Rudloff (1985)
		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)
		Artículo	Ciesnik & Krason (1987)
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 4.1. Localización de hidratos de gas en los océanos (modificada de Kvenvolden, 1988a, en Sloan 1990).³⁰

HIDRATOS EN LOS CONTINENTES

NÚMERO EN LA FIGURA	LOCALIZACIÓN	EVIDENCIA	REFERENCIA
A	Pendiente Norte, Alaska	Registros	Collett (1983)
		Muestras	Collett & Kvenvolden (1987)
		Artículo	Collett et al. (1988)
B	Delta Mackenzie, Canadá	Registros	Bily & Dick (1974)
C	Arctic Isands, Canadá	Registros	Davidson et al. (1978)
			Judge (1982)
D	Provincia Timan-Pechora, ex-Unión Soviética	Gas	Cherskiy et al. (1985)
E	Campo Messokayha, ex-Unión Soviética	Muestras	Makogon et al. (1972)
F	Cratón Siberiano Este, ex-Unión Soviética	Gas	Cherskiy et al. (1985)
G	Noreste de Siberia, ex-Unión Soviética	Gas	Cherskiy et al. (1985)
H	Kamchatka, ex-Unión Soviética	Gas	Cherskiy et al. (1985)

Tabla 4.2. Localización de hidratos de gas en los continentes (modificada de Kvenvolden, 1988a).³¹

IV.2. SECUENCIAS ALMACENADORAS

Aunque el hidrato de metano natural normalmente ha sido observado como granos diseminados, existen otras formas conocidas; los hidratos también se presentan como cemento intergranular, nódulos, láminas, vetillas que llenan fracturas pequeñas, en capas delgadas a lo largo de láminas planas de cemento junto a los granos de sedimentos y capas masivas de hidratos puros de más de cuatro metros de espesor (figuras 4.4 y 4.5). Tanto en los depósitos de hielos de metano continentales como marinos, las secciones que los

³⁰ Sloan E. Dendy, 1990. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. Ed. Marcell Dekker, Inc. New York and Basel.

³¹ *Ibidem*

contienen normalmente varían en espesor, de unos cuantos centímetros a 30 m; el hidrato se encuentra con distribución uniforme, mostrando tendencias verticales claras, pero sutiles de aumentar o disminuir en abundancia. Sin embargo, también son comunes ejemplos con distribución heterogénea en zonas espaciadas o bien hidrato esparcido en zonas de concentración alta.

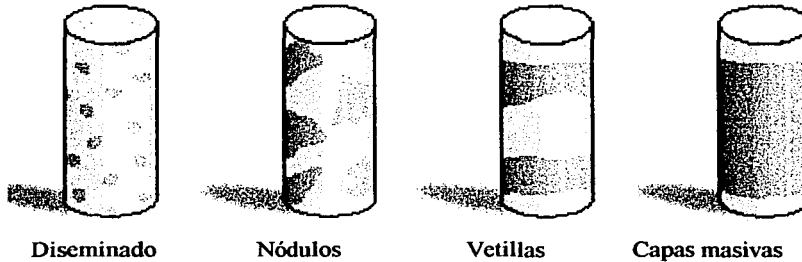


Figura 4.4. Distribución de los hidratos en los sedimentos. Una formación puede contener hidratos en la forma de cemento, diseminado, nódulos, vetas y capas masivas.³²

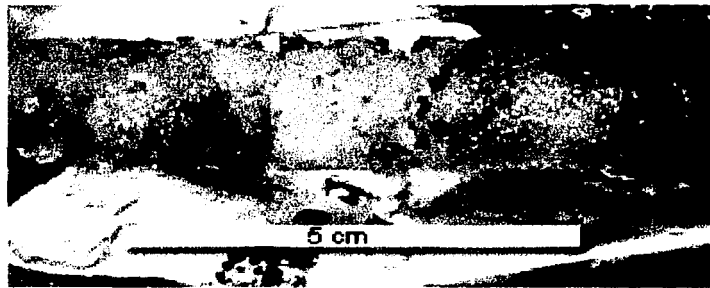


Figura 4.5. Fotografía de un núcleo de hidrato, tomada usando un microtaladro en Blake Ridge. El núcleo fue adquirido durante el buceo 2001 Johnson Sea-Link II. Hay alguna deterioración de color debido al ajuste de la imagen.³³

Aunque todavía se entienden pobremente los factores que controlan su distribución y cantidad, las características que dominan son:

- La porosidad y permeabilidad
- El grado de litificación del sedimento

³² Collett T. S., Lewis R., Uchida T., 2000. "El Creciente Interés en los Hidratos de Gas", Schlumberger Oilfield Review, otoño 2000, pág. 47-61.

³³ U.S. Department of Energy, en "Exploring for Methane Hydrate", 08/01/02, [En línea]. Disponible: http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about_hydrates/explore.htm, 17/01/02

La **porosidad** se define como la razón entre el espacio poroso y el volumen total de la roca, y por lo general se expresa como un porcentaje. Para obtener un porcentaje de porosidad de acuerdo con la siguiente ecuación se requieren dos medidas, el volumen de los poros y el volumen total. La razón entre el volumen total del espacio que ocupan los poros y el volumen total de la roca se denomina *porosidad absoluta* o *total*. Incluye a *todos* los intersticios o huecos, interconectados o no. Sin embargo, la medida de porosidad que se usa comúnmente en los estudios de yacimientos, es la razón entre los espacios que ocupan los poros interconectados y el volumen total de la roca, razón a la que se denomina **porosidad efectiva**.

$$\text{Porcentaje de porosidad efectiva} = \frac{\text{Volumen de poros interconectados}}{\text{Volumen total}} \times 100$$

La permeabilidad es la propiedad que permite el paso de un fluido a través de los poros interconectados de una roca —su porosidad efectiva— sin que se dañen ni se desplacen las partículas de la roca. En otras palabras, la permeabilidad es la medida de la conductividad de fluidos que tiene una roca, y es probablemente la propiedad aislada más importante de la roca del yacimiento. La permeabilidad, en geología del petróleo, no es absoluta sino relativa; se dice que una roca es permeable si una cantidad considerable de fluido la atraviesa en un lapso breve (por ejemplo, una hora); sin embargo, casi todas las rocas tienen alguna permeabilidad cuando se las considera en términos de períodos largos de tiempo geológico.

La unidad de medida de la permeabilidad de una roca en el sistema CGS se denomina *darcy* en honor a Henri Darcy (1856), quien llevó a cabo experimentos con circulación de líquidos a través de medios porosos. La Ley de Darcy se expresa en la siguiente ecuación:

$$q = \frac{kA}{m} \times \frac{dp}{dx}$$

donde q representa al volumen del flujo (volumen por unidad de tiempo) en centímetros por segundo para el flujo horizontal; k representa a la constante de permeabilidad en darcys; A el área de la sección en centímetros cuadrados; m es la viscosidad del fluido en centipoises y dp/dx es el gradiente hidráulico [(la diferencia de presión (p) en la dirección del flujo (x))], que se mide en atmósferas por centímetro. Esta ecuación define en forma completa el flujo viscoso o laminar de fluidos homogéneos a través de medios porosos de empaquetamiento uniforme y de sección transversal uniforme. Para un valor dado k el régimen de flujo a través de cualquier roca porosa es por lo tanto proporcional a la diferencia en presión a través de la roca y a la superficie de la roca e inversamente proporcional a la viscosidad del fluido y a la longitud de la muestra.

Si una roca o sedimento tiene buena porosidad y buena permeabilidad se considera como una roca con potencial almacenador de hidratos de metano.

En general existen dos ambientes primarios geológico/geográfico apropiados para la acumulación de hidratos:

- 1) Áreas con agua profunda en la proximidad de los bordes continentales.
- 2) Continentes en las regiones polares.

Las aguas profundas pueden ser clasificadas como:

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

Las márgenes pasivas estables se ubican a lo largo de los márgenes continentales donde el tectonismo activo está ausente, dando por resultado el ordenamiento eficaz de sedimento. Mientras se acumulan arenas en el lecho de los ríos y a lo largo de la orilla, 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 en el agua profunda 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 debido a la presencia de diapiros de sal. A lo largo de la margen pasiva de la Costa sur del Golfo de Louisiana y Texas, los sedimentos de la pendiente han sido perturbados por la formación de grandes diapiros de sal que provocaron fracturas y caminos que facilitan la migración ascendente de metano termogénico hacia la zona de estabilidad del hidrato (figura 4.6).

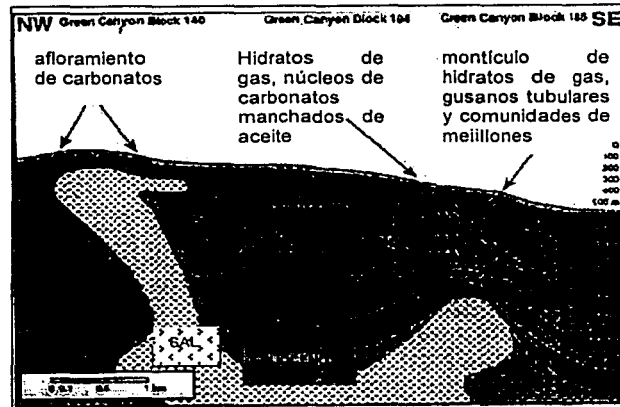


Figura 4.6. Estructuras de sal con fracturamiento en las capas superiores.³⁴

Las regiones tectónicamente activas pueden tener mejores perspectivas para la acumulación de hidratos de metano en ambientes marinos. Estas regiones ocurren a lo largo de los límites de las placas, donde una placa de corteza oceánica está siendo subducida bajo otra placa a lo largo de una trinchera oceánica profunda; cuando se forma un arco de islas. En cualquier caso, el resultado es una fuerte erosión de las áreas altas de la región montañosa en la proximidad a los ambientes de aguas profundas. Comparando con los sedimentos de márgenes pasivos, ésta proximidad produce un sedimento significativamente grueso con granulometría variable. Como resultado, los sedimentos de regiones tectónicamente activas contendrán numerosas zonas de alta porosidad junto con permeabilidad moderada. Además, el sedimento acumulado está siendo deformado. Esta deformación 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.

El ejemplo de una zona de subducción es Nankai, costa mar adentro de Japón, dónde una capa de 16 metros de espesor de porosidad elevada fue encontrada con 80% de saturación de hidrato. Otro ejemplo en una zona de subducción, es la Trinchera de Guatemala en Centroamérica, donde un núcleo de 1 metro de espesor de hidrato sólido fue recuperado. Un ejemplo en Norteamérica es Blake Ridge, mar adentro de Oregón. Las características de acumulación de hidratos que hace atractivas a las márgenes activas, están también presentes en el Ártico.

Aunque se describen a menudo a los recursos de hidratos de tales depósitos como insignificantes en relación a las presencias marinas, la proporción de recursos en éstos lugares pueden ser importantes para una producción económica mucho mayor. La presencia de fallas y sedimentos heterogéneos crean trampas y sellos que concentran el flujo de

³⁴ U.S. Department of Energy, "Geology of Methane Hydrates", 23/10/01, [En línea]. Disponible: http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about_hydrates/geology.htm, 17/01/02.

metano y agua. En las márgenes activas se pueden tener numerosas zonas aisladas con concentración alta de hidratos.

IV.3. TRAMPAS

El termino *trampa* fue introducido por primera vez por McCollough en 1934, se aplicó a receptáculos de características tan diversas como obturaciones de asfalto, capas lenticulares, variaciones locales en la porosidad, truncamientos y traslapes, sobre todo en áreas de inclinación homoclinal, así como pliegues y fallas. Puesto que se ha confirmado reiteradas veces el hecho de que la deformación estructural es sólo una de las múltiples formas en que puede formarse una trampa, y que un gran número de yacimientos se han acumulado en trampas formadas de otro modo, actualmente, es más frecuente el empleo del término "teoría de las trampas" y suele denominarse *trampa* a la configuración geométrica que contiene el petróleo, cualquiera que sea su forma o su causa. Su característica esencial es que tiene la posibilidad de acumular y retener en su interior al aceite y al gas.

Como trampa se entiende aquellas zonas de la corteza terrestre favorables para la acumulación de hidrocarburos. La existencia de una variedad de trampas es consecuencia de los numerosos factores geológicos y sus interacciones. Debido a lo anterior, 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.

La clasificación de trampas más utilizada en la industria petrolera es la siguiente:

Trampas Estructurales

- a) Pliegues anticlinales.
- b) Domos.
- c) Fallas normales.
- d) Fallas inversas.

Trampas por variación de permeabilidad

- a) Cambios de facies.
- b) Lentas de arenas.
- c) Arrecifes.
- d) Discordancias angulares.

- e) Discordancias basales (paleogeomórficas).
- f) Variación causada por aguas subterráneas.
- g) Variación causada por truncamiento y sello.

Trampas mixtas

- a) Combinación de elementos estructurales con variación de permeabilidad.
 - b) Hidrodinámicas.
- **Las Trampas Estructurales.** Son el resultado de deformación, la que causa las modificaciones en la forma de la roca almacén. Las trampas son resultado de plegamientos y fallamientos, son las más fácilmente identificables desde la superficie y las que pueden localizarse mejor en el subsuelo por los métodos geofísicos.
 - **Trampas por Variación de Permeabilidad.** Se reúnen bajo este título todas las trampas que permiten que los hidrocarburos se acumulen en el subsuelo sin deformación estructural. Son resultado de la presencia local de un cierto volumen de roca-almacén separada por formaciones impermeables tanto vertical como lateralmente; se deben a anomalías en la repartición de los sedimentos o a la naturaleza litológica de las formaciones.
 - **Trampas Estratigráficas.** Son todas aquellas que permiten al aceite y gas acumularse sin haber una deformación estructural, es decir, la tectónica no interviene. Estas trampas son originadas por fenómenos del tipo litológico, sedimentario y por discordancias.

Las trampas por variación de permeabilidad más comunes e importantes son las trampas estratigráficas, las cuales se dividen en:

- Trampas estratigráficas primarias.
- Trampas estratigráficas secundarias.

-Trampas Estratigráficas Primarias. Están condicionadas por la presencia de un cuerpo rocoso, poroso, permeable, de tamaño limitado. Existen debido al hecho de que un sedimento capaz de originar un almacén (buena porosidad y permeabilidad) se encuentra rodeado de rocas impermeables. A esta categoría pertenecen los cuerpos arenosos lenticulares y los arrecifes calcáreos. Son consecuencia del modo y medio de sedimentación, su tamaño, su aspecto, su disposición relativa y su posición en la cuenca, condicionan la naturaleza de la trampa. Las trampas estratigráficas primarias se subdividen en:

- Trampas de la serie detrítica.
- Trampas de la serie carbonatada.
- Trampas combinadas.

-Las trampas estratigráficas primarias en serie detrítica son resultado de la presencia de un cierto volumen de roca almacén con buena porosidad y permeabilidad, embalado en una formación impermeable, lo más frecuentemente arcillosa, que asegura su cierre.

Para que un cuerpo arenoso forme una trampa, se debe evaluar:

- El volumen (longitud, anchura, potencia) del sedimento.
- La morfología en planta y en corte del cuerpo arenoso.
- La composición litológica y caracteres petrográficos.
- La posición, repartición y orientación en la cuenca.
- La madurez textural y mineralógica del sedimento.
- Las relaciones con las rocas sello que lo cubren.

Lo anterior está condicionado por el medio de transporte, el ambiente sedimentario, la forma y tamaño de la cuenca.

-**Trampas Estratigráficas Secundarias.** Se crean por fenómenos posteriores a la sedimentación y a veces se forman durante la diagénesis, las que resultan de una discordancia angular o una discordancia basal. Las trampas estratigráficas secundarias son un tránsito a las trampas mixtas.

- **Trampas Combinadas o Mixtas.** Este tipo de trampas son una combinación de las deformaciones estructurales y de las variaciones estratigráficas o litológicas antes mencionadas.

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. Debido a que los yacimientos petroleros aparecen normalmente tectonizados en mayor o menor grado, las rocas sello, deben tener comportamiento plástico, de manera que respondan a los esfuerzos mecánicos deformándose en el campo dúctil, formando pliegues en lugar de fracturas en el campo frágil; si esto ocurre se abrirían las vías a la migración del petróleo.

El hidrato de metano puede actuar como cemento, lo que endurecerá 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 forman en los espacios intersticiales del sedimento consolidado, el hidrato sólido, en lugar del agua líquida, ocupa los espacios intersticiales y los procesos diagenéticos de consolidación y cementación mineral se inhiben en gran medida. Cualquier capa de hidrato puede atrapar el metano libre mientras la capa forma un sello a través del cual el gas no puede emigrar. 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 se ha derretido. En la figura 4.7 se muestra de manera esquemática como los hidratos atrapan al metano libre, es decir, pueden formar sellos de los yacimientos de gas y ese sello corresponde con importantes volúmenes de hidratos de metano.

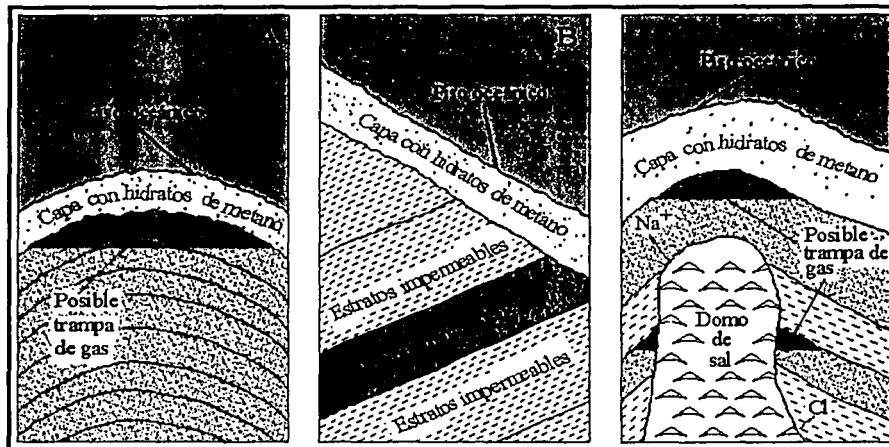


Figura 4.7. Diagrama de situaciones geológicas en donde los hielos de metano funcionan como sello formando trampas de metano. A en una secuencia plegada, B en una secuencia discordante y C en una secuencia deformada por una intrusión salina.³⁵

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 4.7). Se puede tener una secuencia plegada con una capa de hidratos de metano en los sedimentos superiores (figura 4.7A); otro arreglo puede corresponder con una secuencia inclinada de sedimentos estratificados que estén cubiertos discordantemente por una capa de hidratos de metano inclinados en otra dirección (figura 4.7B); otra posibilidad puede corresponder con una secuencia deformada por la acción de una intrusión salina, donde los sedimentos superiores estén cementados por los hielos de metano (figura 4.7C). En los tres casos existe la posibilidad de encontrar

³⁵ 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.

yacimientos de gas inmediatamente debajo de la capa con hidratos de metano, ya que estos al cementar a los sedimentos se convierten en excelentes sellos.

La estructura del hidrato es compacta, las moléculas de gas se condensan más densamente que en las trampas de gas convencionales. Los estratos de hidratos de gas consolidados también actúan como resurgideros para el gas libre entrampado. Estas trampas proporcionan los recursos potenciales, pero ellas también pueden representar riesgos al perforar, y por consiguiente deben estudiarse bien. 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.

IV.4. RESPUESTA SÍSMICA

El estudio de los hidratos de metano propone desafíos técnicos únicos. Los hidratos se presentan solamente en ambientes apartados y hostiles del Ártico y en las profundidades de los océanos, en sitios muy inestables. Son difíciles de sacar de su ambiente natural para ser estudiados más tarde en el laboratorio. Por consiguiente, los científicos emplean una amplia variedad de tecnologías y métodos para determinar su presencia y características.

Una tecnología normalmente usada en el estudio del piso marino profundo donde los hidratos ocurren, 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, cicatrices, diapiros de lodo, y los volcanes de lodo.

Los estudios de reflexión sísmica son la tecnología más prometedora para una interpretación rápida y exacta de grandes áreas de los océanos profundos. Los científicos utilizan las ondas sonoras para interpretar las estructuras y propiedades del interior de la Tierra (figura 4.8). Durante décadas, la industria ha utilizado los estudios sísmicos para identificar en el subsuelo estructuras geológicas prometedoras que puedan contener aceite y gas. Actualmente, algunos geofísicos están trabajando para obtener secciones sísmicas, proceso, y técnicas de interpretación para la investigación de hidratos de metano.

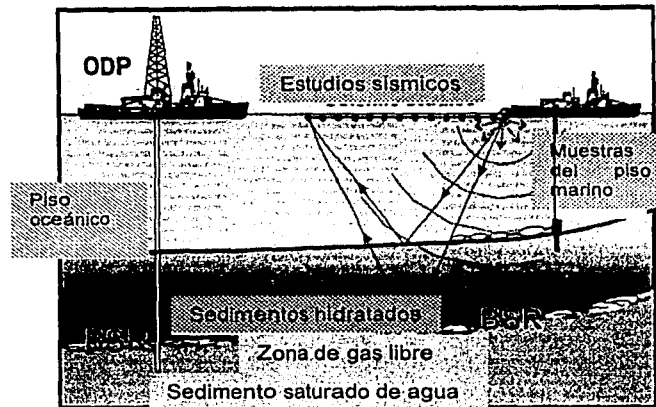


Figura 4.8. Recorrido de las ondas sísmicas.³⁶

Sólo una pequeña proporción de la evidencia de las acumulaciones de hidratos alrededor del mundo proviene de muestreo directo; la mayoría proviene de otras fuentes, tales como reflexiones sísmicas, registros geofísicos de pozos, análisis geoquímicos, información sobre perforación y mediciones de la salinidad del agua intersticial.

Las técnicas sísmicas de exploración detectan con frecuencia no los hidratos mismos, sino el fondo de los depósitos de hidratos y el principio de una zona de metano libre. Los datos sísmicos tridimensionales proporcionan la identificación preliminar de algunos depósitos de hidrato en y por debajo del piso marino. Otra manera de detectar los hidratos es por el muestreo de núcleos desde un barco, una barrena especial se baja al fondo del mar y una base de varias pulgadas de diámetro se perfora hacia fuera y se extrae.

En la superficie, donde los pozos están siendo perforados para investigar la presencia del hidrato o donde los pozos atraviesan las zonas de hidrato hacia objetivos más profundos, existe gran interés en evaluar el potencial de las zonas de hidratos como un recurso energético. Existe también preocupación acerca de los riesgos que implica el perforar zonas de hidratos de gas, y del impacto que los hidratos de gas puedan ocasionar en el cambio del clima global.

Para cuantificar el volumen probable de hidratos y su potencial como recurso, es importante entender tanto la distribución de hidratos en los sedimentos como las propiedades mecánicas de las formaciones que contienen hidratos. Cuando los hidratos de gas se forman en los espacios intersticiales del sedimento consolidado, el hidrato sólido, en lugar del agua líquida, ocupa los espacios intersticiales, y los procesos diagenéticos de consolidación y cementación mineral se inhiben en gran medida.

³⁶ U.S. Department of Energy, "Exploring for Methane Hydrate", 08/01/02, [En línea]. Disponible: http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about_hydrates/explore.htm, 17/01/02.

Aunque los hidratos de gas se han reconocido por la perforación de pozos, su presencia encima de áreas grandes pueden descubrirse más eficazmente por medio de los métodos acústicos usando los perfiles de reflexión sísmica. Los hidratos tienen un efecto muy fuerte en las reflexiones acústicas ya que tienen una velocidad acústica alta (aproximadamente 3.3 km/seg), dos veces más que los sedimentos del piso oceánico. Se cree que la velocidad de sonido en el hidrato puro es similar a la del hielo, pero el valor exacto no se ha determinado y probablemente depende de la química del hidrato. La velocidad acústica en una capa de hidrato cementado también es alta, más alta que en un sedimento lleno de líquido.

Como resultado, el contacto entre una capa rica en hidrato y una capa llena de gas puede actuar como un reflector sísmico prominente. Estos reflectores que ocurren en la base de la zona del hidrato se les conoce como reflectores simuladores de fondo (Bottom Simulating Reflector, BSR por sus siglas en inglés). Su forma rastrea la forma del fondo del mar, y la polaridad de su pulso sísmico se invierte. La profundidad del BSR por debajo del fondo del mar depende de las temperaturas y presiones requeridas para la estabilidad del hidrato. En zonas marinas se han cartografiado BSR que se encuentran a profundidades de entre 100 a 500 m por debajo del fondo del mar.

La ocurrencia de los BSR en los datos de reflexión sísmica es el indicador más importante de la existencia de hidratos en los sedimentos marinos. Sin embargo, los hidratos pueden existir sin crear un BSR si no existe una cantidad importante de gas libre o si el hidrato no endurece la matriz del sedimento apreciablemente. Investigadores en Canadá han informado el éxito en la identificación de zonas marinas de hidratos usando resonancia eléctrica remota en áreas donde no es visible ningún BSR. Se han observado reflectores simuladores de fondo en muchas partes del mundo. Una de las regiones mejor estudiadas es el Blake Ridge, costa afuera de Carolina del Norte, EUA. (figura 4.9) Aquí, los científicos del Servicio Geológico de los Estados Unidos de Norteamérica (USGS) han dirigido estudios sísmicos bidimensionales (2D) sobre la superficie marina y estudios sísmicos de pozo conjuntamente con perforaciones de investigación para conducir experimentos sobre las propiedades químicas e isotópicas de hidratos.

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

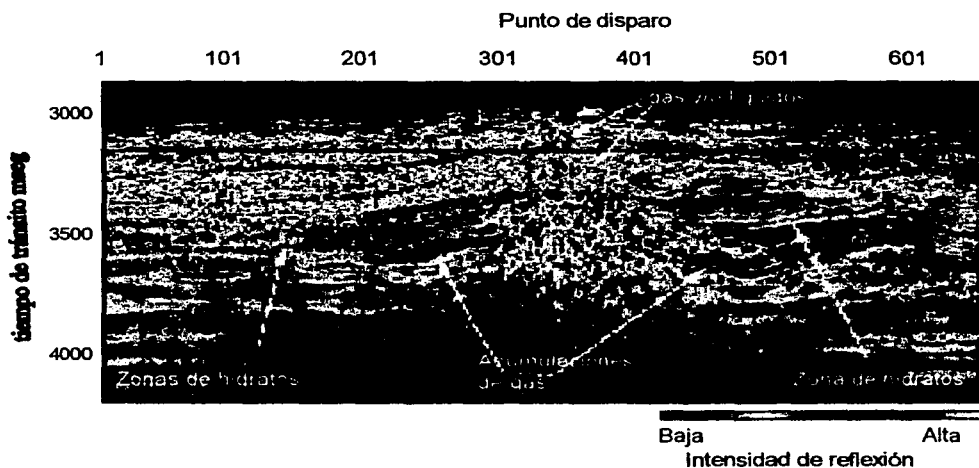


Figura 4.9. Sección sísmica que muestra la intensidad de la reflexión a lo largo de la Costa del Atlántico Blake Ridge, EUA. Se observa un reflector simulador de fondo (BSR) siguiendo la base de la capa de hidrato de gas. El BSR se eleva en el centro del perfil, donde se produjo un diapirismo de sal.³⁷

Además de los estudios sísmicos marinos que abarcan grandes áreas, las mediciones de la salinidad del agua intersticial puede detectar la existencia, o reciente presencia, de hidratos cerca del fondo del mar. Los hidratos contienen sólo agua pura y eliminan las sales y otros compuestos que pueden estar presentes en el agua del mar. Inmediatamente después de la cristalización de la molécula de hidrato, el agua marina circundante se enriquece con los componentes expulsados, tales como el cloruro. Las mediciones de la salinidad tomadas en este momento muestran altas concentraciones de cloruro. Posterior a la cristalización, la combinación provoca que la anomalía del cloruro desaparezca. En forma inversa, la disociación del hidrato purifica el agua reduciendo la salinidad del agua intersticial. La detección de agua pura durante la perforación puede iniciar la disociación de hidrato y, en consecuencia, su presencia reciente.

En 1970, fue cuando se detectaron hidratos de metano, por primera vez utilizando métodos geofísicos dentro de los sedimentos marinos del fondo del Blake Outer Ridge (EEUU). Este descubrimiento se presentó al observar sobre los perfiles sísmicos un “eco” doble, que era un calco de la forma del fondo marino, y que estaba asociado con la presencia de hidratos. A este eco se le conoce como Bottom Simulating Reflector (BSR) o “Eco que simula el fondo”, que se forma por reflexión cuando las ondas atraviesan la diferencia de densidad que existe entre el fondo marino “helado” y el que hay por debajo. El fondo marino “helado” con hidratos, a su vez, realiza las funciones de tapadera, impidiendo que los gases en estado libre lleguen a la superficie, a no ser que haya fisuras o fallas. Este “eco doble”

³⁷ Collett T. S., Lewis R., Uchida T., 2000. “El Creciente Interés en los Hidratos de Gas”, Schlumberger Oilfield Review, otoño 2000, pág 47-61.

permite conocer la profundidad y el espesor de los gases hidratados en el subsuelo marino, así como la presencia de gases en estado libre por debajo de ellos.

La velocidad acústica en una capa de hidrato cementado también es alta, más alta que en un sedimento lleno de líquido. Como resultado, el contacto entre una capa rica en hidrato y una capa llena de gas puede actuar como un prominente reflector sísmico. A estos reflectores que se presentan en la base de la zona de hidratos se les conoce como reflectores simuladores de fondo. Su forma sigue la forma del fondo del mar y la polaridad de su pulso sísmico se invierte. La profundidad de los reflectores simuladores de fondo por debajo del fondo del mar depende de las temperaturas y las presiones requeridas para la estabilidad del hidrato. En zonas marinas se han cartografiado reflectores simuladores de fondo que se encuentran a profundidades de entre 100 a 500 m por debajo del fondo del mar. La ocurrencia de los reflectores simuladores de fondo en los datos de reflexión sísmica, es el indicador más importante de la existencia de hidratos en los sedimentos marinos. No obstante los hidratos pueden existir sin la creación de los reflectores simuladores de fondo si no existe una cantidad importante de gas libre o si el hidrato no endurece considerablemente la matriz del sedimento.

El método de exploración principal dentro de la zona de estabilidad de hidrato es un reflector que simula el fondo (BSR); son reflectores fuertes resultado de contrastes de impedancia que se piensa que es causada por el gas libre atrapados debajo de los hidratos. Debido a que la formación de hidratos está en función de la presión, temperatura, agua y composición de gas, los BSR no siempre siguen perfectamente los contornos del suelo oceánico, pueden cortar por la litología. Sin embargo, como todos los indicadores del hidrocarburo directos, los BSR no son fiables. Se han recuperado los hidratos donde no hay ningún BSR, y existen BSR donde no hay ningún hidrato. El análisis de hidrato de gas muestra que la velocidad acústica es relativamente alta en los hidratos, y esto ayuda identificarlos.

Con relación a los registros geofísicos de pozos, se usan en la investigación de hidratos de gas, los registros de resistividad, velocidad acústica y de neutrón. Los hidratos de gas en el subsuelo muestran una resistividad eléctrica relativamente alta, una rápida velocidad acústica, porosidad de neutrón alta, y aparentemente una baja densidad. El registro eléctrico de resistividad proporciona información sobre la saturación de agua intersticial y salinidad. El agua salada tiene una baja resistividad. La velocidad acústica rápida 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, y una baja densidad significa una densidad más baja del hielo comparada con el agua.

Una nueva evaluación de las técnicas de registros de pozos, formulada por Tim Collett del Servicio Geológico en Denver, EUA, permite cálculos muy exactos de porosidad del sedimento y niveles de saturación de hidrato en el sedimento. Collett (1998) demostró que la cantidad de hidrato puede calcularse utilizando el registro eléctrico de resistividad y el

tiempo de tránsito acústico. Él usa dos formas únicas de la ecuación de Archie, la cual muestra las relaciones empíricas entre la textura de la roca o sedimento, porosidad, saturación de agua, y resistividad. En particular, la porosidad variable toma en cuenta las diferentes densidades de la matriz, hidrato, y agua. La ecuación de Archie modificada se usa para calcular las saturaciones de agua (S_w), con saturación de hidrato de gas igual a $(1 - S_w)$. La ecuación modificada usando los datos de las ondas compresionales acústicas han sido también usadas para calcular la saturación de hidratos de gas (tomado de Sloan 1990).

Collet en 1983 y Collet y Ehlig-Economides en 1983 (Tomado de Sloan, 1990) estudiaron los registros de 125 pozos en la región de la Bahía Prudhoe, determinando 102 presencias de hidratos en 32 pozos. El análisis de otros pozos en permafrost fueron basados en los registros de un pozo conocido con hidratos, Northwest Eileen 2 de ARCO y EXXON en la pendiente norte de Alaska, en el cual fueron recuperados núcleos con hidratos en 1972. En general, todos los estudios sobre los efectos de hidratos en registros de pozos indicaron la dificultad para distinguir a los hidratos basados en un sólo registro, particularmente en la región de permafrost. Para tener alguna confianza para determinar hidratos a través de los registros, es necesario considerar un juego de registros. La figura 4.10 muestra que las respuestas simultáneas de los registros corroboran la interpretación de hidratos.

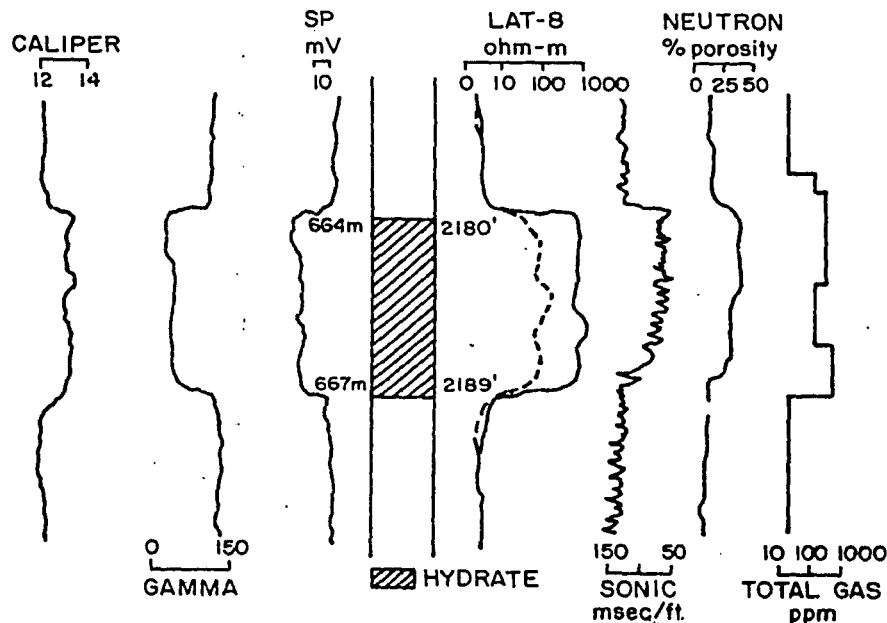


Figura 4.10. Respuestas típicas de registros de pozos en presencia de hidratos en el permafrost.³⁸

³⁸ Sloan E. Dendy, 1990. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. Ed. Marcell Dekker, Inc. New York and Basel.

Los principales registros geofísicos de pozos (sondeos geofísicos) que se pueden utilizar para detectar hidratos de metano son los siguientes:

-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. Los fluidos fríos o densos pueden ocultar la disociación resultando un gas más ligero.

-Registro de capacidad resistiva 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 e imita un yacimiento en relación al hielo.

-Registro de Potencial Espontáneo. Comparado con 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.

-Registro Calibrador. Un agujero de perforación agrandado puede formarse por la disociación de hidratos. Esto puede también ocurrir con hielos del permafrost.

-Registro de Tiempo de Tránsito Acústico. Dentro de un hidrato 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 un hidrato 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 un hidrato 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 un hidrato de gas dentro del permafrost portador de hielo, es decir, la densidad decrece aparentemente con hidratos y puede ser distinguido del agua pero no del hielo.

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.

En la detección de hidratos también se realizan estudios geoquímicos de las muestras obtenidas en aguas profundas, el muestreo de los sedimentos del mar es uno de los métodos principales usado en la búsqueda de hidratos de metano; los científicos 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. Para descubrir la presencia y cantidad de hidratos de metano, los científicos realizan una variedad de análisis geoquímicos en el agua. Las concentraciones características de elementos específicos, iones, e isótopos pueden revelar si el agua era recientemente parte de la celosía del hidrato sólido.

La salinidad (concentración de iones de sal disuelta) del agua del poro de las muestras es un primer indicador de la presencia de hidratos. 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, estos iones son excluidos de la celosía 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. Análisis geoquímicos que identifican zonas de agua más dulce de la esperada en los poros (disminución de la cantidad de iones de cloruro) hace pensar en la reciente presencia de hidratos. Si la salinidad original del agua del poro es conocida, la cantidad de dilución de cloruro puede ser directamente traducida en la cantidad de hidrato de gas que existió en la muestra.

Además de la medición de 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 científicos 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 científicos pueden estimar si el hidrato pudo haber estado presente, y en que concentración.

Los científicos también realizan análisis geoquímicos en el metano presente en las muestras a fin de determinar el origen del metano. La medición más común es la relación de los isótopos carbono-12/carbono-13. El metano de fuentes termogénicas tiene típicamente niveles más altos de carbono 13, mientras que el metano que se origina del decaimiento bacteriano de la materia orgánica se enriquece típicamente con carbono 12.

IV. 5. SITIOS REPORTADOS

El único ejemplo conocido de producción de gas atribuido a los hidratos se presentó en el campo Siberiano de gas Messoyakha (figura 4.11). El campo Messoyakha descubierto en 1968, fue el primer campo productor en la cuenca siberiana Oriental. Para mediados de la década de los ochentas del siglo pasado, más de 60 campos de gas se habían descubierto en la cuenca, conteniendo conjuntamente aproximadamente 22 trillones m^3 , o un tercio de las reservas de gas del 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 (figura 4.12).

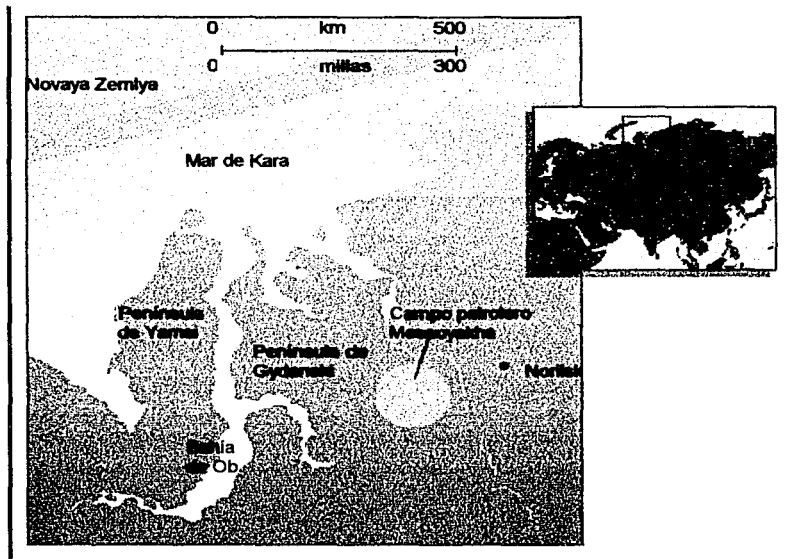


Figura 4.11. Campo petrolero Messoyakha en Rusia, descubierto en 1968. Mucha de la producción de gas se atribuye a la disociación de hidratos de metano.³⁹

La producción empezó en 1969 desde la zona de gas libre del yacimiento, por un par de años las presiones disminuyeron como se esperaba. Posteriormente, en 1971 se midieron presiones y obtuvieron producciones mayores a lo esperado; éstas se atribuyeron a la producción de gas originada en la capa de hidrato: conforme disminuyó la presión en la capa de gas libre, la capa de hidrato se despresurizó y liberó gas de los hidratos disociados. Aproximadamente 36%, o 5 mil millones m^3 , del gas producido de Messoyakha se ha atribuido a la disociación de hidratos de gas.

³⁹ Collett T. S., Lewis R., Uchida T., 2000. "El Creciente Interés en los Hidratos de Gas", Schlumberger Oilfield Review, otoño 2000, pág 47-61.

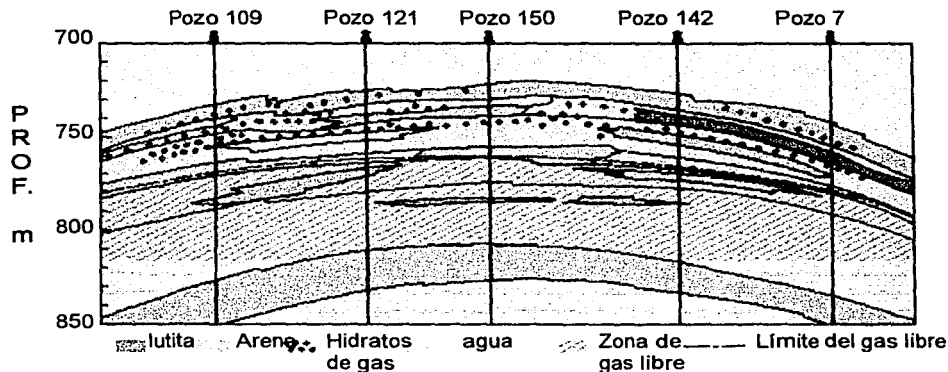


Figura 4.12. Sección de Messoyakha, campo de hidratos de gas. En el campo Messoyakha, los hidratos de gas se encuentran por encima del gas libre.⁴⁰

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

Después de los hidratos de gas del campo ruso Messoyakha, las acumulaciones de hidrato más estudiadas en el mundo son las encontradas en el área del Río Kuparuk-Bahía de Prudhoe en Alaska (figura 4.13). En 1972, se recuperaron hidratos de gas en barriles cilíndricos presurizados del pozo de exploración Northwest Eileen 2 (ARCO y Exxon), en la pendiente norte de Alaska.

El espesor de la zona de estabilidad del hidrato de gas para el área de la Bahía Prudhoe-Kuparuk puede calcularse a partir de los gradientes de temperatura y presión en la región. El análisis de los datos de registros de pozos de los 445 pozos en la pendiente norte, revelaron que 50 pozos contenían hidratos en seis capas de areniscas continuas en el extremo este de la unidad de producción del Río Kuparuk y en el extremo oeste de la unidad de producción de la Bahía de Prudhoe. El análisis relacionó los registros de estos pozos con los registros del pozo de exploración en el cual se había recuperado el núcleo de hidrato. 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 4.14).

⁴⁰ Ibidem

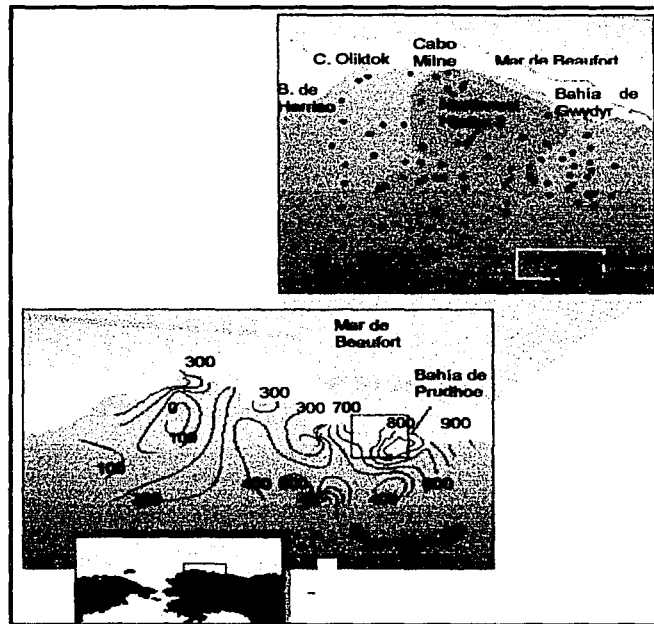


Figura 4.13. Hidratos en la región de Bahía de Prudhoe, pendiente norte de Alaska. Los intervalos de las curvas de contorno se presentan en metros.⁴¹

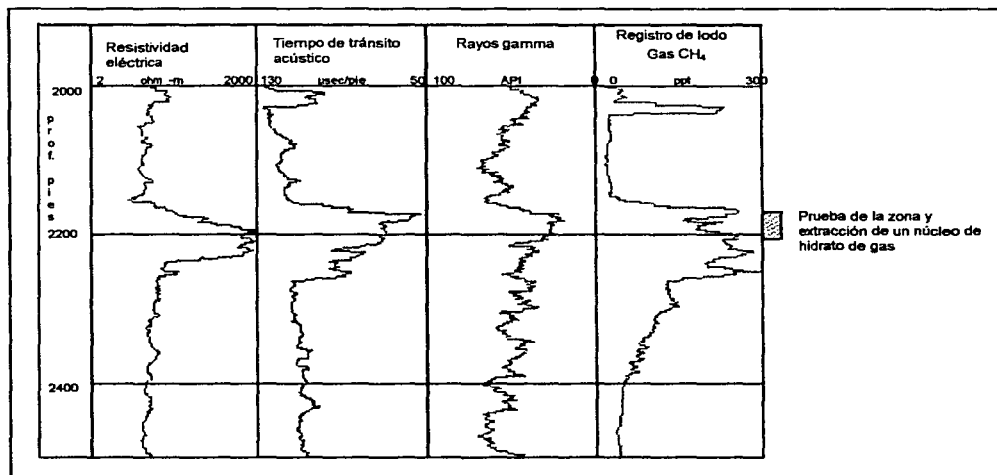


Figura 4.14. Registros obtenidos en el pozo Northwest Eileen 2 (ARCO y Exxon). La velocidad sónica (carril 2) aumenta a lo largo de la zona de hidrato, como lo haría en una capa de hielo. La resistividad (carril 1) aumenta debido al metano. El registro del lodo (carril 4) muestra un incremento en el gas de trasfondo, similar a la respuesta observada durante la perforación en una zona de gas libre.⁴²

⁴¹ *Ibid.*.

⁴² *Ibid.*

Estos primeros descubrimientos de hidratos, asociados con acumulaciones convencionales de hidrocarburos mostraron cómo las herramientas de adquisición de registros podían identificar las zonas de hidratos en ambientes árticos. La perforación para buscar los hidratos en el ambiente marino son costosos, sin embargo, hay otra herramienta disponible para tales efectos: las secciones sísmicas.

También se ha investigado un yacimiento de hidratos de gas en los territorios al noroeste del delta de Mackenzie, en Canadá, a través de un proyecto que involucra a los miembros de la Geological Survey of Canada (GSC), la Japan National Oil Corporation (JNOC), Japan Petroleum Exploration Company (JAPEX), la USGS, el Departamento de Energía de los Estados Unidos de Norteamérica y distintas compañías petroleras, incluyendo Schlumberger; perforaron en 1998 cerca de un pozo de la Imperial Oil Ltd. que había encontrado hidratos, el nuevo pozo de investigación (Mallik 2L-38) fue diseñado para evaluar las propiedades en-situ de los hidratos y valorar la capacidad de las herramientas de registros para caracterizarlos (figura 4.15).



Figura 4.15. Ubicación del pozo de investigación Mallik 2L-38, Delta de Mackenzie, Canadá, diseñado para evaluar las propiedades en el sitio y valorar la capacidad de las herramientas de registro para identificar los hidratos.⁴³

Como otros pozos en el Ártico, el Mallik 2L-38 se perforó y revistió a través del intervalo del permafrost, el cual alcanzó una profundidad de 640 m. Antes de fijar el ademe, se corrieron varios registros de Schlumberger a través de la zona de permafrost. Éstos registros incluyeron la herramienta de Imágenes de Inducción AIT, la herramienta de Imagen Sónica Dipolar de Cizallamiento DSI y la sonda Platform Express. El pozo fue perforado por debajo del intervalo de permafrost, hasta los 1150 m y se extrajo un núcleo.

⁴³ Fischer Perry A. "Gas hydrates research continues to increase", [En línea]. Disponible: <http://www.aist.go.jp/GSI/hydrate/hydrate.resources.html>, 17/01/02.

En esta sección del subpermafrost se corrieron las mismas herramientas de registros, así como también el Microbarredor de Formaciones de Cobertura Total MI (figura 4.16).

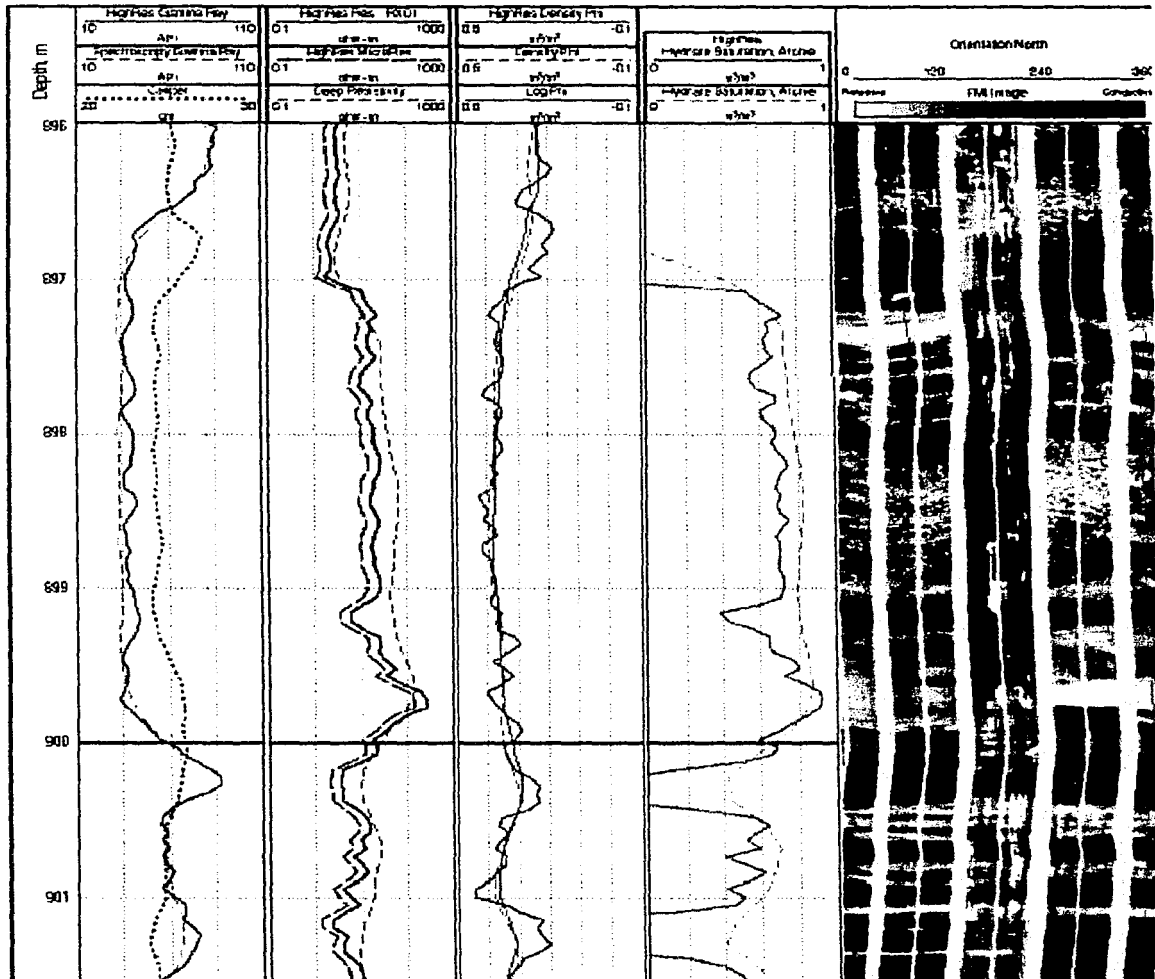


Figura 4.16. Registros e imágenes del pozo desde los primeros metros de la capa de hidrato en el pozo Mallik 2L-38. La resistividad en el Carril 2 muestra un incremento indicativo de la presencia de hidrocarburos. La saturación calculada de hidrato en el Carril 4 alcanza más del 80%.⁴⁴

⁴⁴ Collett T. S., Lewis R., Uchida T., 2000. "El Creciente Interés en los Hidratos de Gas", Schlumberger Oilfield Review, otoño 2000, pág 47-61.

El registro y la calidad del agujero eran excelentes en la sección con presencia de hidratos, la cual se extendió de 897.5 a 1109.5m. Se utilizó un enfriador de lodos que incrementó en gran medida la estabilidad del hidrato. La resistividad eléctrica de fondo de pozo y los registros de velocidad acústica confirmaron la presencia de hidrato de gas en un intervalo más de 200m de espesor. Los valores de resistividad eléctrica de lectura profunda variaron de 10 ohm-m a 100 ohm-m. Las velocidades de la onda acústica compresional (V_p) variaron de 2.5 a 3.6 km/seg, y las velocidades acústicas de cizallamiento (V_s) variaron de 1.1 a 2.0 km/seg. El bajo valor de la relación entre la velocidad acústica de cizallamiento, V_p/V_s , en la base de la zona de hidrato, indica una capa delgada de gas libre. A partir del pequeño cruce de las curvas del registro densidad-neutrón, se puede interpretar una pequeña cantidad de gas libre en otras partes del hueco, pero esto puede ser causado por los hidratos que se vieron afectados durante el proceso de perforación.

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

Las saturaciones de los hidratos de gas se calcularon con base en la ecuación *estándar de Archie*. Las saturaciones se calcularon también a partir de los datos del registro acústico, pero sus valores fueron menores a los obtenidos en las mediciones de los núcleos recuperados. Los cálculos basados en la resistividad indican la presencia de algunas zonas con saturaciones de hidrato que exceden el 90%. El volumen de hidratos inferidos a partir de los datos de registro y de los datos del núcleo es equivalente a valores de 3 a 4×10^9 m³ de gas en un área de 1 km² alrededor del pozo.

La experiencia obtenida en el pozo de investigación Mallik 2L-38 ayudó a aclarar las características de los hidratos de gas natural y motivó a JAPEX y a los grupos asociados a comprometerse en el siguiente proyecto de perforación de hidratos en el valle de **Nankai**, mar adentro de Japón (figura 4.21).

Japón es un país industrializado con un nivel alto de vida y muy pocas fuentes de energía. Se espera que la demanda de energía aumentará en el futuro, y un suministro seguro de metano obtenido de los hidratos sería un valioso recurso para la estabilidad económica de ese país. Así, los japoneses tienen gran interés en las acumulaciones de hidrato de gas en los sedimentos marinos costeros, como un nuevo recurso prometedor de gas natural.

Japón corresponde a un sistema de arco de islas volcánicas formado por la subducción de las placas del Pacífico y del Mar Filipino bajo la placa Eurasiática. En el norte de Japón el borde occidental converge con la placa del Pacífico y está siendo subducida debajo de Japón (placa Eurasiática) a lo largo de la Trinchera de Japón. En el sur de Japón, el borde

occidental de la placa más pequeña del Mar Filipino está en contacto con Japón a lo largo de la depresión de Nankai.

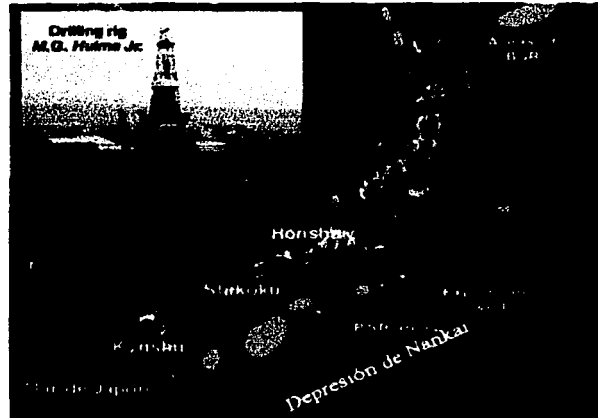


Figura 4.18. Regiones donde se han realizado estudios de reflexiones sísmicas simuladoras de fondo en la Depresión de Nankai, mar adentro de Japón.⁴⁵

La tasa de convergencia es aproximadamente 4 centímetros por año y los grandes terremotos en la zona de subducción se presentan aproximadamente cada 100 años. En el borde oriental de la placa del Mar Filipino, a lo largo de la trinchera de Izu-Bonin, es donde existe actualmente la subducción más activa. La subducción puede estar causando elevación tectónica de la parte norte de la depresión de Nankai y la placa del Mar Filipino.

Los hidratos de gas en la plataforma y talud continental cerca de Japón, se identifican por la presencia de bien definidos Reflectores que Simulan el Fondo (BSR), que son registrados por los estudios sísmicos de reflexión de alta resolución. Los BSR registran la posición de la interface de hidrato/gas. Los reflectores más marcados ocurren en las regiones donde existe una suficiente porosidad del sedimento para que se formen los hidratos de gas y donde se entrapa el gas debajo del hidrato impermeable. El propio hidrato forma un sello que previene la migración extensa del gas. Los BSR son generalmente discontinuos lo cual puede reflejar variaciones de porosidad en los sedimentos. Los BSR muestran el área mínima de ocurrencia de hidratos de gas; se sabe que los hidratos ocurren detrás de los límites del BSR. Mediante los BSR se han identificado aproximadamente una docena de áreas con potenciales yacimientos de hidrato.

Como un primer paso, a fines de 1999 y principios del 2000 se perforó un pozo exploratorio en un área donde el lecho marino tiene 945 m de profundidad. Se taladraron

⁴⁵ Fischer Perry A. "Gas hydrates research continues to increase", [En línea]. Disponible: <http://www.aist.go.jp/GSJ/hydrate/hydrate.resources.html>, 17/01/02.

dos agujeros piloto y un agujero principal a 1600 m y 3300 m de profundidad respectivamente. Se obtuvieron núcleos y se registraron las anomalías de cloro; se tomaron los siguientes registros geofísicos durante la perforación: densidad (LWD), neutrón, inducción dual y de resistividad frente a la barrena; registros de velocidad acústica de compresión y de cizallamiento dipolar, registros de laterolog y de resonancia magnética nuclear (NMR). Se calculó una saturación de hidratos de gas máxima de aproximadamente 80%, en las areniscas del yacimiento.

A lo largo del margen suroeste de la depresión de Nankai, los hidratos de metano identificados por BSR, al parecer se tienen en concentraciones mayores que los identificados al noreste. Varios factores pueden ser los responsables: historia más larga de la migración y concentración del gas, una diferencia en tasa de elevación, o la falta de una historia relacionada al tectonismo en la compleja subducción. En las regiones del norte, los hidratos de gas no parecen estar concentradas cerca del margen de la cuña acrecionada como en el sur; en el norte los hidratos muestran una mayor distribución al azar sin relación directa de estructuras mayores.

Las estimaciones del volumen de los hidratos de gas naturales y el gas libre asociado debajo del hidrato en la región de la depresión de Nankai son variadas y han sido calculadas entre 16 a 27 billones de m³.

El futuro de la extracción de los hidratos de metano es prometedor. Sin embargo para producir metano de los hidratos del metano, se necesita desarrollar tecnología segura y confiable ya que la disociación del metano en aguas poco profundas puede producir presiones muy altas.

El Golfo de México. La zona norte del Golfo de México (figura 4.19) corresponde con una margen continental pasiva. Comparado a otras márgenes pasivas, existen dos rasgos del norte del Golfo que hacen importante esta área para la formación de hidratos: 1) la presencia del delta del Río Mississippi y 2) el tectonismo de sal.

La porción oriental del Golfo que incluye la plataforma de Florida y el talud, recibe sedimentos clásticos finos, y por consiguiente se caracteriza por tasas bajas de depositación de carbonatos. En contraste, la parte occidental del Golfo, se caracteriza por la deposición de siliciclásticos, principalmente del delta del Río Mississippi; contiene gruesas secuencias de rápida acumulación de areniscas, limos, y lutitas ricas en material orgánico. Además, debido a la acción de las olas bajas en el Golfo, la concentración de suministro del sedimento a un solo punto (delta del Río Mississippi), sobre la pendiente del piso oceánico ha aumentado el potencial de clásticos gruesos que llegan a los ambientes de aguas profundas lo que contrasta con otras márgenes pasivas.

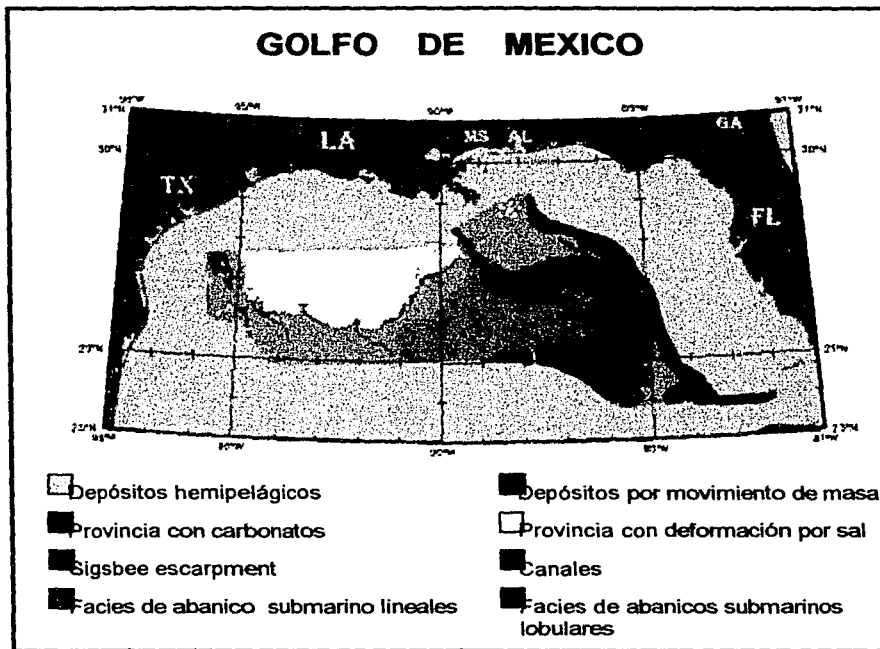


Figura 4.19. Imagen de radar de la interpretación geológica de los depósitos sedimentarios de la parte norte del Golfo de México. Cortesía de USGS, proyecto GLORIA.⁴⁶

Aunque el norte del Golfo de México representa una margen continental pasiva, el movimiento de sal ha producido una intensa deformación de las capas sedimentarias. Durante el Jurásico, el Golfo se abrió y una secuencia gruesa de sal (Louann Sal) se acumuló debido a la evaporación del agua en un clima cálido con poca profundidad. Cuando fueron depositados más sedimentos principalmente siliciclásticos en la cuenca, su peso ocasionó que la sal se movilizara. Actualmente, los diapiros de sal, almohadas y stocks, y fallas listricas son todos indicadores de movimiento debido a las tensiones de sobrecarga. Esta deformación proporciona numerosos caminos para la migración del metano termogénico en zonas poco profundas donde el hidrato es estable. El Acanilado de Sigsbee en la porción occidental del Golfo marca el límite sur del movimiento de sal dentro de la cuenca y el límite donde se pueden encontrar hidratos de metano.

Otra característica del Golfo de México, que indica el interés actual en los hidratos, es la presencia de una industria activa de exploración de petróleo y gas. Debido que la disociación de hidratos provoca la inestabilidad del piso marino, las compañías perforadoras de petróleo y gas en ambientes costeros están interesadas en la detección de

⁴⁶ U.S. Department of Energy, "Gulf of Mexico", 23/10/01, [en línea]. Disponible: http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about_hydrates/gulf-mexico.htm, 17/01/02

hidratos para que pueden tomar las precauciones necesarias para reducir los riesgos asociados al perforar a través de la capa inestable de hidratos.

En la mayoría de los sitios marinos donde se conoce la existencia de hidratos, un registro definido BSR (Fondo que Simula el Reflector) marca la base de HSZ (Zona de Estabilidad de Hidratos) en datos de reflexión sísmica. Sin embargo, en el Golfo de México, las imágenes de los registros de BSR son raras; la estratigrafía poco profunda es compleja y la estructura interfiere con la señal sísmica del BSR.

La acumulación de hidratos de gas en montículos sobre el piso oceánico es otra presencia distintiva en el Golfo de México (figura 4.20). Los datos sísmicos han mostrado planos con defectos de amplitud alta y áreas difusas sísmicamente de migración de gas bajo los montículos. Estos errores en los planos y las chimeneas de gas mantienen una canalización del gas termogénico de las formaciones más profundas que atraviesan el HSZ y forman los montículos de hidratos directamente sobre el piso marino. Muestras de hidratos con gas termogénico han sido recuperados del Campo Jolliet y Cañón Green en el Golfo de México.

Los reconocimientos en mar profundo con submarinos tripulados, ha llevado a investigadores a enfrentarse cara a cara con los hidratos sobre el piso oceánico. Se han encontrado montículos de hidratos en el Golfo de México con varios colores, predominando el anaranjado, blanco, amarillo, o rojo (figura 4.21). Aunque nadie sabe el origen de los colores, una hipótesis las explica por inclusiones de aceite, bacterias, y minerales.



Fig. 4.20. Montículos de hidratos sobre el suelo oceánico.⁴⁷

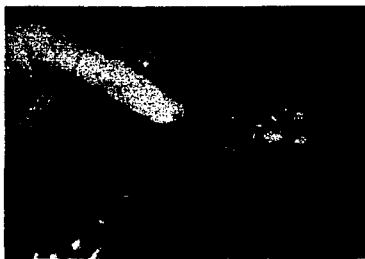


Fig. 4.21. Hidrato amarillo, los agujeros en este pedazo de hidrato de metano son las madrigueras del gusano de hielo.⁴⁸



Fig. 4.22. Gusano de hielo.⁴⁹

⁴⁹ Sassen R. "Gas hydrate gardens of the Gulf of México", Quarterdeck, Vol. 5, No.3, December 1997. 09/12/97, [En línea]. Disponible: <http://www-ocean.tamu.edu/Quarterdeck/QD5.3/sassen.html>, 17/01/02.

⁴⁷ MacDonald I, Joye S. "Lair of the Ice Worm", Quarterdeck, Volume 5, Number 3, december 1997, 09/12/97, [En línea]. Disponible: <http://www-ocean.tamu.edu/Quarterdeck/QD5.3/macdonald.html>, 17/01/02.

⁴⁸ Idídem

Uno de los descubrimientos más interesantes en la breve historia del estudio de los hidratos ocurrió el 12 de julio de 1997, cuando dos investigadores a bordo del sumergible Johnson SeaLink II descubrieron una nueva especie de gusano marino a 550 metros de profundidad en aguas del Golfo de México. El "*gusano de hielo*" fue descubierto viviendo sobre un montículo de hidrato cubriendo una manifestación de petróleo y gas (figura 4.22). Los gusanos de hielo se alimentan de hidrocarburos y perforan a los hidratos para resguardarse y alimentarse. Posteriormente, se han encontrado gran variedad de organismos cerca de zonas de manifestaciones de petróleo y gas. Algunos se alimenta directamente de hidrocarburos (gusano de hielo y bacterias) y son conocidos como organismos quimiosintéticos. Otros organismos, como los tubeworm y mejillones, forman relaciones simbióticas con las bacterias quimiosintéticas.

México tiene grandes áreas por explorar y explotar dentro de su Zona Económica Exclusiva; en aguas con diferente batimetría se han reconocido sitios con gran potencial de reservas minerales y petroleras. En el Golfo de México, se encuentran importantes volúmenes de sedimentos del Paleógeno y Neógeno que tienen potencial generador y almacenador de hidrocarburos por lo que se considera que existen volúmenes considerables (reservas posibles) de gas y/o aceite.

El Golfo de México Mexicano permanece prácticamente inexplorado para estos tipos de depósitos y el Instituto de Petróleo Mexicano (IMP), ha creado un programa de integración para el estudio de hidratos del metano el cual comenzó en octubre de 2000 (Ortega-Osorio 2001).

Adicionalmente se considera la existencia de gran cantidad de hidratos de metano, cuya explotación actual aún no es posible, pero con el desarrollo de nuevas tecnologías que permitieran su extracción y distribución se tendría cubierta a corto y a largo plazo la mayor parte de la demanda futura de combustible. En la Zona Exclusiva de México se tienen sitios de interés por evaluar tanto en la parte norte del Golfo de México (frente al Estado de Tamaulipas), como en el Océano Pacífico (frente a los estados de Oaxaca, Guerrero y Chiapas) y en el Golfo de California (Arellano Gil J., Nieto Obregón J., 2002) (figura 4.23).

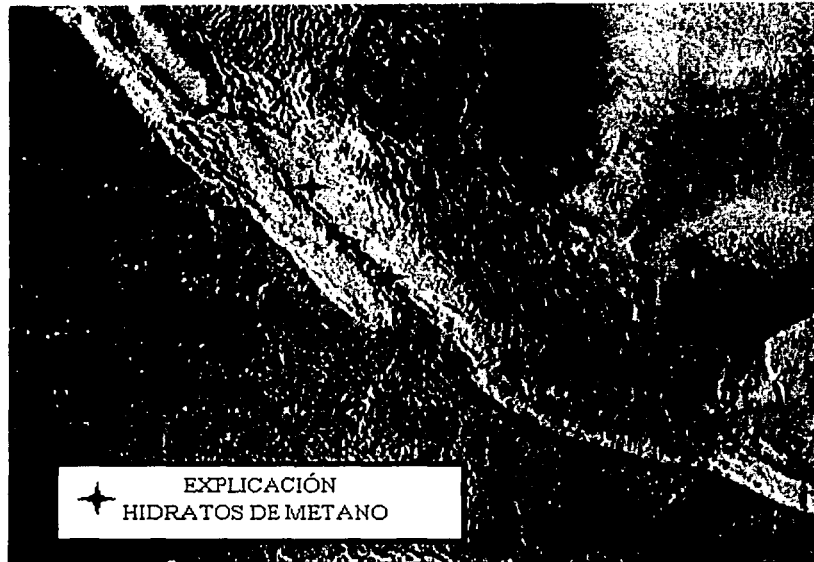


Figura 4.23. Ubicación en una imagen digital resaltada de sitios potenciales con hidratos de metano en las aproximaciones de la República Mexicana.⁵⁰

El **Blake Ridge** en Estados Unidos de Norteamérica es un alto batimétrico localizado en la elevación continental Atlántica aproximadamente a 400 km al Este de Charleston, Carolina del Sur (figura 4.24). El rasgo sedimentario se sitúa en las profundidades de agua entre 2,000 y 4,800 metros, tiene aproximadamente 500 km de longitud. Durante los últimos 30 años, el Blake Ridge ha sido quizás la presencia de hidrato de metano más estudiada.

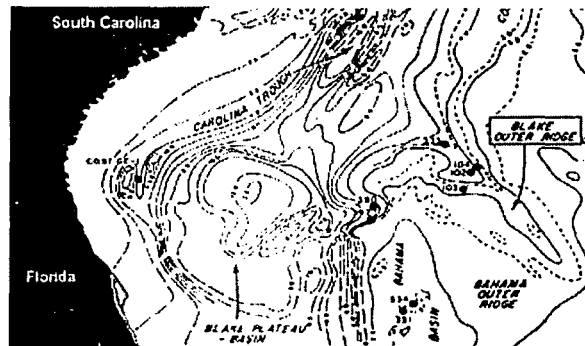


Figura 4.24. Localización de Blake Ridge, se toma como referencia a la línea de costa del Atlántico.⁵¹

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

⁵⁰ Arellano Gil J., Nieto Obregón J., 2002. "Los recursos minerales y petroleros del mar y su importancia", Consejo de Recursos Minerales, COREMI Boletín Técnico, año VIII, núm. 46, enero-febrero 2002, México.

⁵¹ U.S. Department of Energy, "Blake Ridge", 23/10/01, [En línea]. Disponible: http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about_hydrates/blake-ridge.htm, 17/01/02

En 1970, el Proyecto de Perforación en Mar Profundo (DSDP) empezó perforando en Blake Ridge como parte de su programa por entender la evolución de los océanos del mundo y los procesos oceánicos. Los núcleos de sedimento recuperados durante la perforación contenían altas concentraciones de metano. La relación entre la presencia de metano y la observación de velocidades sísmicas anómalas altas, llevaron a la hipótesis de la existencia de hidratos de metano en Blake Ridge. La confirmación de la presencia de hidratos fue en 1980 cuando una muestra del hidrato real fue recuperado debajo el piso oceánico.

Blake Ridge se formó por la depositación de sedimentos llevados paralelamente a la línea de costa por las corrientes de fondo oceánico. Durante el Paleoceno, se inició el flujo del Golfo trayendo aguas cálidas del noreste a lo largo de la costa Atlántica. La apertura del Mar de Groenlandia en el Oligoceno permitió enfriarla, aguas densas del Océano Ártico fluyeron al sur (Límite Occidental Actual) a lo largo del margen Atlántico occidental. Blake Ridge señala la ubicación donde estas dos corrientes mayores interactúan, perdiendo velocidad, y dejando una porción de su carga de sedimento.

La presencia de hidratos en Blake Ridge se relaciona a las altas tasas de sedimentación en el área. Las estimaciones del ritmo de sedimentación van de 160 a 350 metros por millón de años para el Mioceno a 40 metros por millón de años para el Pleistoceno. Las tasas altas de sedimentación permiten un sepultamiento rápido y profundo de la materia orgánica que es transportada al lugar. A profundidad, las bacterias convierten la materia orgánica en metano y lo sueltan en los sedimentos. Además, las lutitas más profundas en el mar y los carbonatos pueden proporcionar metano termogénico para la formación de hidratos. En Blake Ridge una gran cantidad de metano es atrapada dentro de la capa de hidrato y debajo del hidrato como gas libre. Los episodios repetidos de entierro profundo de hidrato, la disociación del hidrato, la liberación del metano y recaptura se reconoce como un método para explicar la relativa concentración de gas libre y de hidratos en Blake Ridge.

Científicos del USGS han cartografiado la distribución y espesor de los depósitos de hidrato de metano en Blake Ridge usando líneas sísmicas y sonar (figura 4.25). Los mapas de profundidad en el BSR (Reflector que Simula el Fondo) muestran como la capa del hidrato se desliza. Debido a que los hidratos son sensibles a los cambios en la temperatura y presión, fuerzas externas que afectan estos parámetros, como cambios en el nivel del mar o un movimiento de masa de sedimento, pueden comenzar la disociación del hidrato.

Los deslizamientos Cape Fear y Guardia de Capotillo son dos rasgos de movimiento de masas cerca de Blake Ridge. Las líneas sísmicas muestran BSR más débiles y poco profundos debajo de los deslizamientos comparadas con áreas adyacentes no perturbadas. Es probable que al disminuir la presión producida por la carga de los sedimentos, causada por los deslizamientos ocasionará la disociación de hidratos. Aunque la disociación de hidratos puede no haber activado los deslizamientos, la disociación pudo haber involucrado más sedimento en el movimiento de masas.

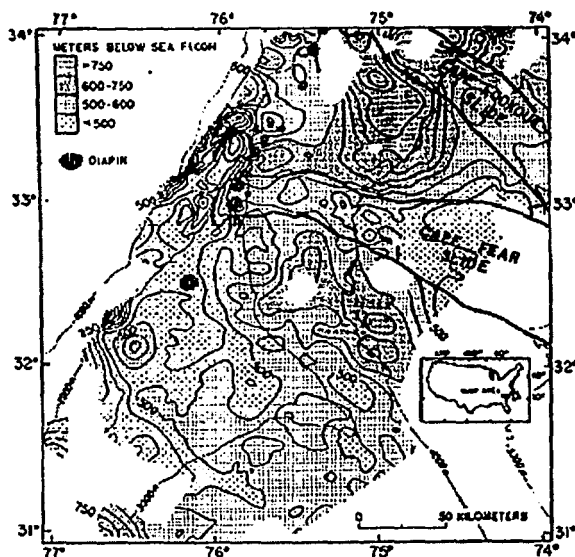


Figura 4.24. Mapa topográfico mostrando los sitios de derrumbamientos y diapiros encima del BSR en el área Blake Ridge.⁵²

Uno de los aspectos más interesantes de Blake Ridge, es la presencia de una gran depresión en la cresta que puede ser relacionada con la disociación y liberación de metano. Aunque su historia de desarrollo no se entiende totalmente, existen dos teorías para explicar la estructura. Una enfatiza la expulsión catastrófica de gas y sedimento; durante un episodio glacial no especificado, el descenso del nivel del mar produjo un descenso de presión y la disociación del hidrato consecuente. Sin embargo, el gas era incapaz de disiparse eficazmente debido a la baja permeabilidad de los sedimentos de Blake Riddge. Una segunda teoría sugiere que el rasgo está compuesto de paquetes de sedimento rápidamente depositadas que permitieron la expulsión del metano de forma gradual a través de rutas de alta permeabilidad que se vinculan a la zona de disociación del hidrato en el fondo oceánico.

⁵² Ibidem

CAPÍTULO V. IMPACTO AMBIENTAL

La humanidad comenzó a modificar la composición natural de la atmósfera, hace dos siglos, cuando a partir de la revolución industrial, comenzó a introducir a la atmósfera, productos derivados de la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural), a tasas cada vez mayores. Entre estos productos se mencionan principalmente el bióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (NO_2) y el ozono (O_3), los cuales tienen la propiedad de ser absorbentes de parte de la radiación emitida por la superficie terrestre.

Las concentraciones actuales de estos gases, indican que la cantidad de bióxido de carbono, ha aumentado en un 30% en relación a la época preindustrial (1750-1800); la cantidad de metano se ha incrementado en un 120% y el óxido nitroso en un 10% en el mismo período. A pesar de la escasa disponibilidad de datos precisos sobre el ozono troposférico (localizado bajo los 8 Km de altura), ha sido posible determinar que su abundancia actual es cerca de tres veces superior a la del período preindustrial.

En la década de los cuarentas del siglo pasado, comenzó la introducción en la atmósfera de los *clorofluorocarbonos (CFCs)*, gases inexistentes en la atmósfera hasta esa época y que también poseen un importante efecto absorbente de la radiación terrestre infrarroja, que originan el efecto invernadero y que a su vez destruyen el ozono estratosférico.

El aumento de estos gases produjo en la atmósfera inferior un aumento en su temperatura, como resultado del mantenimiento del balance energético entre el sistema Tierra-atmósfera y el espacio exterior, proceso del cual se comenzó a hablar hace ya más de medio siglo, conocido como *Calentamiento Global*, causado principalmente por el aumento de los gases de efecto invernadero.

Las predicciones del clima futuro originadas por el aumento en la concentración de gases de invernadero, se obtienen mediante los Modelos de la Circulación General de la Atmósfera, los cuales se basan en las leyes físicas de conservación que describen la redistribución de cantidad de movimiento, calor y vapor de agua que se producen a través de los movimientos atmosféricos. Estos procesos se formulan en las *ecuaciones generales* que describen el comportamiento de un fluido (aire o agua), sobre un cuerpo en rotación (la Tierra), bajo la influencia de una diferencia de calentamiento (contraste térmico entre el Ecuador y los Polos) ocasionada por una fuente térmica externa (el Sol). Estos modelos pueden representar por lo tanto, en forma bastante real, los principales procesos físicos que suceden en el sistema Tierra-atmósfera-oceano; entre algunos elementos del sistema climático, como las nubes, la vegetación, el agua, hielo y nieve, etc. se originan otra serie

de procesos de menor escala como consecuencia del aumento de temperatura y de anhídrido carbónico que se realimentan por sí mismos y que pueden intensificar o aminorar los cambios previstos por el efecto invernadero según los modelos.

Estos procesos de cambio constituyen actualmente una de las principales incógnitas y más difíciles problemas relacionados con la teoría del calentamiento del planeta. En la mayoría de ellos se ha podido determinar cualitativamente su efecto o contribución al calentamiento global y los principales procesos han podido ser incorporados en los modelos climáticos, pero aún subsiste una gran incertidumbre acerca de la influencia total que tendrían estos procesos en el cambio climático una vez se alcance un nuevo equilibrio energético entre los componentes del sistema climático.

Existe casi una veintena de procesos de cambio potencialmente identificados, de los cuales, los principales se enuncian a continuación:

- **Descomposición de la materia orgánica vegetal.** Una cantidad mayor de CO₂ en la atmósfera acelerará la descomposición de la vegetación muerta mediante microorganismos, liberándose CO₂ a la atmósfera a un ritmo más intenso, lo que también acelerará el crecimiento de las plantas, lo que a su vez eliminará el anhídrido carbónico atmosférico también a un ritmo más intenso. Es posible también que ciertas especies vegetales no puedan adaptarse a un clima distinto y mueran, aumentando la masa de materia orgánica en descomposición, lo que aumentará la liberación de CO₂. Estos procesos de origen vegetal, en cierta medida se anularán entre sí.
- **Cambio en el albedo.** En aquellas áreas donde el calentamiento atmosférico derretirá el hielo y la nieve, dejará al descubierto suelo, vegetación o masas de agua, habrá una mayor absorción de radiación por la superficie, radiación que era inicialmente reflejada por el hielo y la nieve, produciéndose así un aumento en la temperatura que contribuirá a un mayor derretimiento del hielo.
- **Liberación de calor.** El derretimiento de los glaciares del polo norte, que ejercen un efecto aislante al retener el calor en el interior del océano glacial ártico, hará que parte de ese calor se libere a la atmósfera, disminuyendo la temperatura superficial.
- **Absorción y reflexión de calor por las nubes.** Una mayor temperatura global, aumentará la capacidad atmosférica de contener humedad absoluta, con lo que aumentará la nubosidad total. Las nubes, por estar compuestas de vapor de agua, tienen alta capacidad de absorber radiación, amplificando así la tendencia al calentamiento, en especial aquellas formadas en niveles más altos. Pero en las capas atmosféricas cercanas al suelo, las nubes actúan como reflectoras desviando la radiación emergente desde la superficie de la Tierra y

produciendo así un descenso de la temperatura. Un estudio realizado mediante mediciones satelitales, indica que en condiciones actuales, el efecto de enfriamiento producido por las nubes domina por margen considerable al efecto de calentamiento, aunque no podría concluirse que las nubes neutralizarán el efecto invernadero.

- **Hidratos de metano.** En los sedimentos del borde de plataformas continentales submarinas, en los taludes continentales y bajo la tundra ártica, se encuentran enormes cantidades de moléculas de metano formando una estructura sólida, bajo ciertas condiciones de presión y temperatura. El calentamiento global aumentará la evaporación del agua de los océanos y disminuirá la presión del océano desestabilizando el metano del fondo marino y liberándolo hacia la atmósfera e intensificando así el efecto invernadero.
- **Reflectividad de los bosques.** El calentamiento global producirá un avance de los bosques hacia los polos, estimado en unos 100 kilómetros cada 1 °C de aumento, lo que producirá un cambio en la reflectividad y absorptividad de la superficie terrestre. El resultado neto de este cambio dependerá del tipo de bosque que avanzará y de la superficie que será desplazada.
- **Arrozales y pantanos.** Aquí el proceso de descomposición se realiza bajo el agua, o sea sin oxígeno, por lo tanto el desprendimiento de metano será mayor que el de CO₂. Como el CH₄ tiene un efecto de invernadero mayor que el CO₂, el resultado será un incremento en la temperatura.
- **Circulación oceánica.** Los océanos absorben la mitad del CO₂ producido por los seres humanos y contienen una proporción mayor que la atmósfera. A medida que los océanos se calienten, disminuirá su capacidad química para retener el CO₂ lo que favorecerá el calentamiento. Además las corrientes verticales de agua se harán más estables, disminuyéndose la mezcla de agua superficial con aguas profundas, retardándose así la transferencia de bióxido de carbono hacia las profundidades. El resultado neto de este proceso está aún indeterminado.
- **Fitoplancton.** También absorbe el CO₂ atmosférico, pero al aumentar la temperatura del aire, la circulación y la química oceánicas sufrirán cambios que podrían reducir la masa total de fitoplancton, disminuyendo la absorción de CO₂, lo que incrementará el calentamiento.
- **Química atmosférica.** El calentamiento acelerará los procesos químicos atmosféricos en las capas inferiores. Por ejemplo, el CH₄ se oxidará más rápido transformándose en CO₂, el que no contribuye tanto al efecto invernadero como el CH₄, lo que reducirá la tendencia al calentamiento. Pero por otra parte, los compuestos químicos orgánicos volátiles,

generados por la evaporación de la gasolina, solventes, etc., se convierten en ozono que absorbe el calor y por lo tanto amplificaría el calentamiento.

- **Radiación UV.** Una reducción del ozono estratosférico, aumentará la intensidad de la radiación UV-B que alcanza la superficie de la Tierra. Esto repercutirá negativamente sobre la mayor parte de la biota marina y terrestre, a través de una disminución de la productividad, afectando así la intensidad con que ésta absorbe el CO₂ atmosférico. Actualmente ha cobrado urgencia el esfuerzo por identificar y comprender en mejor forma cada uno de estos cambios y el conocimiento básicamente cualitativo sobre ellos que se posee hasta ahora, sólo permite estimar que como resultado neto, sus efectos podrían aumentar el calentamiento global en otros 3 °C adicionales a lo que predicen los modelos computacionales hacia finales del presente siglo.

V.1. CONTAMINACIÓN

El metano es un constituyente natural de la atmósfera de la Tierra, su concentración se ha incrementado en los últimos años por la contaminación ambiental. Se produce continuamente a través del decaimiento de 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 produce descarga de metano en la atmósfera (figura 5.1). Sin embargo, no se cree que estas fuentes produzcan el metano en la cantidad 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.

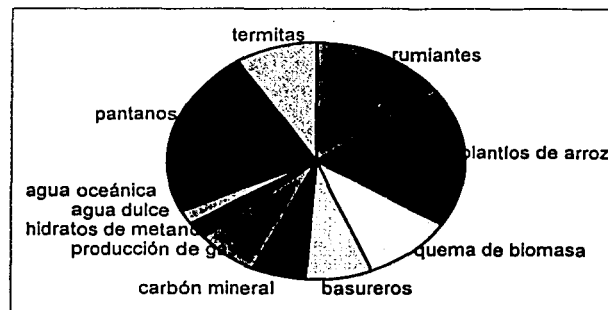


Figura 5.1. Metano en la Atmósfera.⁵³

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

⁵³ U.S. Department of Energy, "Hydrate and Global Climate", 23/10/01, [En línea]. Disponible: http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about_hydrates/global-climate.htm, 17/01/02.

El bióxido de carbono (CO_2) es el principal responsable del calentamiento global, aunque en realidad es el ser humano, por quemar tanto combustible fósil y arrasar con los bosques. El segundo gas invernadero que le sigue es el metano (CH_4), por ahora poco nombrado. Sin embargo, sus escenarios de emisiones, difíciles de mitigar, harán que este otro compuesto de carbono preocupe más. El nivel de metano en la atmósfera es muchísimo menor en comparación al CO_2 (1.72 partes por millón contra 354ppm); sin embargo, su concentración actual está aumentando al doble de la velocidad que el CO_2 .

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. Pese a que la descomposición del metano produce CO_2 , el saldo a favor es positivo: por 20 moléculas de metano que se descomponen se libera sólo una molécula de CO_2 , además el metano dura menos que el CO_2 en la tropósfera (12 años contra 100 años). Por lo mismo, se estima que el metano es una fuente energética ecológica, al menos mucho más que el petróleo o el carbón, los cuales son los más grandes contaminantes.

En la medida que las fuentes antropogénicas de metano sigan creciendo, sus contrapartes no lograrán compensar su crecimiento; por esta razón sube la concentración de este gas en la tropósfera. 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 CO_2 . Como el CH_4 tiene un efecto de invernadero mayor que el CO_2 , el resultado será un incremento en la temperatura.

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 (gases que entranpan la radiación solar y por consiguiente, en las cantidades suficientes, tienen el potencial para contribuir al cambio del clima global); el gas metano tiene 10 veces más capacidad de almacenar calor que el bióxido del carbono (CO_2), es el gas invernadero más conocido.

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 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.

Por otro lado, el metano liberado desde las capas de permafrost en el Artico durante un periodo de calentamiento global podría calentar aún más la atmósfera, exacerbando el calentamiento climático, y en consecuencia desestabilizar el clima. Los científicos están investigando cuál de los procesos geológicos podría afectar en mayor proporción la estabilidad de los hidratos en los sedimentos y así controlar la posible liberación de metano a la atmósfera.

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.

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 3,490m sobre el nivel medio del mar. El espesor del hielo se acerca a los 3,700m, de manera que toda la masa está constituida por hielo depositado durante varios cientos de miles de años. El pozo tiene una profundidad de 3000m 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 podemos 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.

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).

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. El poder calórico estimado para los hidratos de gas es 73 veces superior al del gas metano, aunque es entre 6 y 11 veces inferior al del gas natural licuado y al del petróleo, respectivamente.

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.

Uno de los retos científicos actuales es conocer si realmente la emisión de gas a la atmósfera por fusión de los hidratos submarinos, puede ser una de las causas mayores del calentamiento global de la Tierra. Y si por el contrario, los hidratos submarinos son una víctima del aumento progresivo de temperatura de los océanos como consecuencia de la emisión de CO₂ hacia la atmósfera.

V.2. PROBLEMAS DE ESTABILIDAD

Aunque la actividad humana en aguas profundas tiene el potencial para comenzar la disociación del hidrato en escala pequeña y local, estos impactos son completamente despreciables en un contexto del clima global. Sin embargo, hay muchos fenómenos naturales continuos, incluso 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 alteran la temperatura y 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 del metano natural, resultando en ocasiones la descarga de metano libre en 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. 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. 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 5.2).

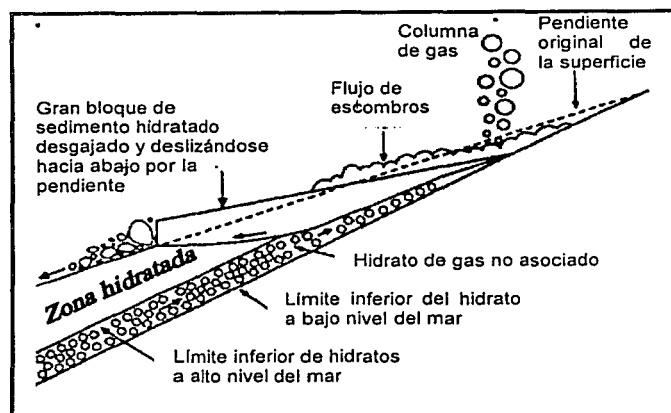


Figura 5.2. Disociación de hidratos responsable de un deslizamiento de un bloque submarino. Una disminución de la presión en la zona de hidratos les permitiría disociarse en la profundidad y ocasionar que los sedimentos no consolidados se deslizaran encima de ellos.⁵⁴

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.

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.

A escala geológica, los científicos tratan de establecer la relación entre las grandes regresiones del mar como consecuencia del aumento de las superficies heladas del planeta por enfriamiento global (glaciaciones) y las emisiones de gas hidratados hacia la atmósfera. Estas regresiones del mar, estimadas en 100 a 130 metros por debajo del nivel actual, provocan un descenso de la presión hidrostática sobre los hidratos submarinos, y esto a su vez la desestabilización, fusión y emisión de grandes cantidades de metano a la atmósfera. El *efecto invernadero* provocado por la fusión de gases hidratados, pudo "parar" el enfriamiento global en las glaciaciones y actuar como un "rebote" hacia periodos más cálidos. En este sentido, los gases hidratados son un nexo de unión entre los procesos climáticos globales y la actividad tectónica en la historia geológica de la Tierra. Cuanto mayor actividad tectónica se tiene (por ejemplo terremotos, aperturas oceánicas, etc.) la

⁵⁴ Collett T. S., Lewis R., Uchida T., 2000. "El Creciente Interés en los Hidratos de Gas", Schlumberger Oilfield Review, otoño 2000, pág 47-61.

emisión de gas libre procedente de hidratos es mayor, causada por la desestabilización de los fondos submarinos, y produciendo un calentamiento global de la Tierra. Esta relación, puede permitir a los científicos, conectar etapas geológicas muy activas en el funcionamiento de las placas geológicas con fases de climas cálidos o cambios climáticos abruptos y anormales.

La relación causa-efecto entre los grandes deslizamientos submarinos a nivel mundial y los gases hidratados, es otro de los retos científicos encontrados con el descubrimiento de los gases hidratados. Se ha comprobado que las zonas de inicio de la mayoría de los grandes deslizamientos submarinos coinciden donde la zona de estabilidad de los hidratos (ZEH) intersecciona el fondo marino. Esto provoca deslizamientos de dimensiones mayores que los generados en tierra, como ejemplo el deslizamiento de Cabo Fear con un escarpe de 50 km de anchura; el deslizamiento de Storegga, en el Atlántico Norte, con un escarpe de 250 Km, que recorre 800 Km afectando un espesor de 450 m. En el Golfo de Cádiz, se han descrito deslizamientos de 200 a 300 Km que afectan un área de 50x103 kilómetros.

La desestabilización de los fondos marinos causados por la fusión de los gases hidratados pueden ser también responsable de los grandes *Tsunamis*, que se generan en los océanos y que llegan a tener efectos devastadoras en las costas, como el que sucedió en el Golfo de Cádiz en 1755 y que arrasó ciudades como Lisboa y Cádiz. Un terremoto de fuerte magnitud (7 en escala Richter), puede ser el desencadenante de que grandes movimientos de masa se desplacen hacia zonas profundas. Hay que tomar en cuenta que las pendientes de la mayoría de los taludes submarinos por debajo de 5 °C son estables en condiciones normales. Sin embargo la presencia de gases hidratados pueden provocar un alteración en dichas condiciones geotécnicas. La zona de estabilidad de hidratos (ZEH) puede actuar como zona de *patinaje* entre los sedimentos superiores *helados* y los inferiores con sedimentos blandos y con gas en estado libre. Esto es como si nos encontráramos una placa de hielo inestable sobre una rampa de barro. Si agitamos o calentamos un poco la barra de hielo, esta se deslizará inmediatamente. Este mecanismo provoca que grandes masas de sedimento se desplacen bruscamente hacia el fondo oceánico como el que sucedió en La Palma (figura 5.3) generando importantes ondas (*Tsunamis*), que se relacionan a su vez con sacudidas sísmicas. Se cree que un escape masivo de este gas, aconteció de forma natural hace 7,000 años, fue el origen de un tsunami, una ola gigantesca que barrió las islas escocesas Shetland.

Los depósitos de hidratos de gas podrían ayudar indirectamente a localizar grandes depósitos de aceite y gas que se supone se encuentran en los taludes oceánicos. Los investigadores sostienen que para que se dé esta relación deben cumplirse al menos dos condiciones. Por una parte, debe existir un paquete sedimentario de dimensiones considerables. Por otra, esta secuencia debe haberse depositado encima de la capa de hielo que atrapa a los hidratos. En esas condiciones, se da un cambio de propiedades mecánicas, de modo que los hidratos actúan como un plano de deslizamiento.

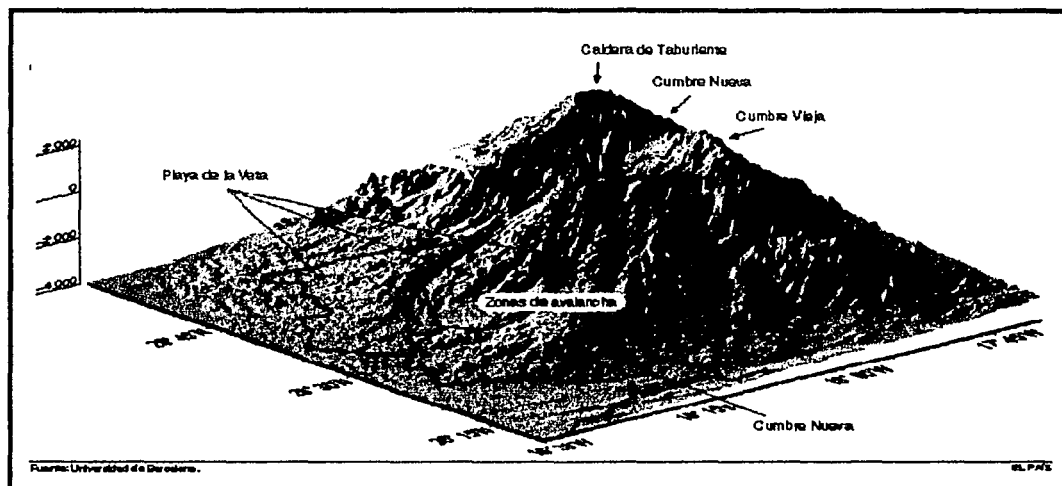


Figura 5.3. Sedimentos desprendidos en La Palma, las flechas indican las zonas de avalancha tras un corrimiento de tierras debido a la fuga de hidratos de gas.⁵⁵

Exista o no una relación de causa y efecto, lo cierto, es que se han localizado hidrocarburos bajo algunos de los grandes desprendimientos en los mares de Noruega, Brasil, Angola y en el Mar Caspio. Lo que sí está claro, es que los desprendimientos son un magnífico indicador de riesgos. En los fondos oceánicos se tienen gran cantidad de estructuras de comunicaciones, gaseoductos o bases de exploración que pueden verse alteradas por un desprendimiento.

V.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

TEJIS CON
FALLA DE ORIGEN

Aunque los hidratos de gas potencialmente podrían corresponder con grandes fuentes de metano, (una unidad de hidrato a la presión de una atmósfera produce 160 unidades de gas), debido a que las mallas almacenan hasta seis veces más gas que un sistema poroso similar. En la evaluación se debe tener en cuenta lo inhóspito del medio marino y la difícil accesibilidad de estas profundidades, 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.

Se liberarían cantidades considerables de metano durante la disociación del hidrato, que posiblemente, después de un cierto tiempo terminaría en la atmósfera. Como un gas del

⁵⁵ Somosa L. "El gas Helado Inflamable: el futuro de la investigación de los fondos marinos para la próxima década", proyecto TASYO. [En línea]. Disponible: <http://www.tierra.rediris.es/TASYO/1999margeol.html>, 20/01/02.

invernáculo fuerte, el metano puede contribuir grandemente a recalentamiento global. Además de los posibles efectos globales de disociación del hidrato, la estabilidad de depósitos pequeños, localmente restringidos es también de interés inmediato. Posiblemente al perforar los hidratos inestables durante la exploración de hidrocarburos, se puede poner en riesgo al personal y al equipo, es decir, si la descarga de gas que proviene de los sedimentos es bastante grande, las cantidades de gas viajarán directamente del piso oceánico a la plataforma de exploración.

Timothy Collett (2000), del Servicio Geológico estadounidense en Denver, propuso llegar a la costa con tubos y licuar el gas desde barcos con plataformas acondicionadas específicamente. Según Collett (2000), el metano sería en parte quemado para obtener hidrógeno y monóxido de carbono. Una catálisis posterior convertiría la mezcla en hidrocarburo líquido, que sería rápidamente transportado por barco. En el trayecto se perdería un 35 por ciento de la energía, pero la rentabilidad aun haría posible la operación. Para Roger Sassen (1997), de la Universidad de Texas, es factible la producción de metano a partir de la flora oceánica misma, donde el metano emergente podría ser combinado con agua para formar hidratos no contaminados por los sedimentos. Posteriormente, los submarinos remolcarían el hidrato en tanques depósitos para lugares cercanos donde los ingenieros podrían, con mayor seguridad, descomponerlo en agua y combustible. Sassen (1997) asegura que en el transcurso del siglo XXI se debería tener al gas hidrato convertido en un recurso limpio para el medio ambiente. A medida que las reservas de petróleo disminuyen en todo el mundo, empresas y gobiernos se verán obligados a invertir en tecnologías para la explotación de la última gran reserva del mundo.

V.4. PROBLEMAS PARA SU EXPLOTACIÓN

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. Por ejemplo los especialistas discrepan en la cantidad de hidratos presentes en las porciones accesibles del subsuelo.

El inconveniente que en este momento existe para explotarlos, es que no hay tecnología adecuada para extraerlos con rendimiento económico y se desconoce el impacto ambiental que tendría la liberación de este gas invernadero a la atmósfera; se considera también que se modificarían las condiciones de estabilidad del talud y borde de plataforma, por lo que los fondos marinos también tendrían cambios.

Uno de los problemas a solucionar, es que los depósitos se encuentran a aproximadamente un kilómetro debajo de la flora marina. Por arriba, el hidrato se descompone rápidamente si

es removido de las altas presiones y bajas temperaturas de las profundidades oceánicas. Incluso si los ingenieros construyeran un sistema para traer hidrato a la superficie antes de que se evaporara, sacar el metano de la matriz de arena, limo, arcilla o de la roca seguiría siendo un problema.

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

El quitar un taponamiento de hidrato pueden ser peligroso. Un taponamiento de hidratos despresurizado puede viajar a velocidades balísticas, lesionando a trabajadores y causando daño a las tuberías hasta romperlas. Una manera de evitar que se destruya la tubería es calentándola, pero la extracción del agua antes de comprimir los hidrocarburos puede ser un tratamiento más rentable. Para evitar los efectos negativos de la formación de hidratos en los ductos de gas, se puede utilizar una combinación de técnicas que puede resultar efectiva, esto es: eliminar el agua por debajo del punto de rocío, mantener la temperatura por encima del punto de formación de hidratos, y utilizar inhibidores para prevenir que la mezcla solidifique.

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 reducir 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.

En las operaciones que se llevan a cabo en aguas profundas, la formación de hidratos sólidos en el pozo que resulta de la combinación de líquidos, presenta un problema importante de control del pozo. Si el gas entra en el fondo del pozo, la alta presión hidrostática y la baja temperatura del piso marino pueden ocasionar la formación de hidratos en los fluidos a base de agua, así como también en la salmuera de lodos a base de aceite y de lodos sintéticos. Las repercusiones de la formación de hidratos son los taponamientos de las líneas de descarga, líneas de estrangulación y de control del pozo, de los preventores de reventón (BOP), las dificultades en el monitoreo de la presión del pozo, las restricción del movimiento de la sarta de perforación y el deterioro en las propiedades del lodo debido a la deshidratación. Las líneas de estrangulación y de control de pozos y los conjuntos de BOPs son particularmente los susceptibles de dañarse, ya que se encuentran

ubicados en lugares donde la temperatura es más baja, y ésta baja rápidamente cuando se detiene la circulación.

Ciertas áreas de operación de aceite y gas están expuestas a problemas causados por hidratos formados naturalmente. El Mar Caspio se ha caracterizado como una cuenca particularmente peligrosa, con una enorme cantidad de sedimento y una alta tasa de sedimentación. Grandes sobrepresiones conducen al diapirismo de lodo y a la formación de volcanes de lodo.

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

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

Distintas organizaciones han desarrollado programas de computadora para predecir la formación de hidratos para algunas composiciones químicas de lodo idealizadas; también para determinar los niveles y tipos apropiados de aditivos inhibidores. Para utilizar estos programas, el usuario fija las condiciones ambientales; no obstante, la diversidad de la composición real de los lodos de perforación limita la aplicabilidad de estos programas.

CAPÍTULO VI. IMPORTANCIA ECONÓMICA

En los últimos treinta años, la participación de los hidrocarburos líquidos dentro del consumo mundial de energía primaria ha disminuido diez puntos porcentuales y se espera que continúe decreciendo en las próximas décadas, como resultado de la continua implantación de tecnologías para uso eficiente de energía y, principalmente por su sustitución por gas natural. Este último ha venido ganando participación en el mercado, toda vez que pasó del 17.5% del total mundial de energéticos primarios en 1970, a 23.5% en 1996 y se espera que para el año 2015 alcance 26%.

De acuerdo con las proyecciones de la Agencia Internacional de Energía, se estima que durante los próximos diez años el uso de gas natural presente la tasa de crecimiento más alta entre los combustibles fósiles, alcanzando 2.9% anual; en tanto que el consumo de hidrocarburos líquidos y de carbón se estima crecerán en 2.1 y 1.9% anual, respectivamente. Para el año 2010, el consumo de gas natural representará cerca de dos terceras partes del consumo de hidrocarburos.

En los últimos quince años, las reservas probadas de petróleo crudo a nivel mundial se han incrementado 46%, en tanto que las de gas natural han crecido 38%. Sin embargo, la relación reservas/producción para el petróleo crudo asciende actualmente a 42 años, en tanto que para el gas natural dicha relación resulta de 62 años. De esta manera, la disponibilidad de reservas, una mayor eficiencia y la combustión limpia del gas natural respecto a los combustibles alternativos, son elementos que favorecen su mayor utilización en la industria y en la generación de electricidad, además del desplazamiento de otros energéticos en los sectores residencial, comercial y en el transporte vehicular, entre otros.

VI.1. VALOR ECONÓMICO

Dos factores hacen a los hidratos de gas atractivos como recurso de energía potencial:

- 1) Las enormes cantidades mundiales de metano que aparentemente existen en los sedimentos profundos.
- 2) La gran energía almacenada del hidrato de metano.

La importancia que tienen los hidratos de metano para los países pobres en hidrocarburos es muy grande, es el recurso de gas natural que debido a su gran potencial puede contribuir a los suministros de energía futuros; los hidratos de metano a condiciones ambientales se

funden y liberan gas seco (metano). Cuando el hidrato de metano se funde, libera agua líquida y gas metano. Cada metro cúbico de hidrato contiene aproximadamente 160 metros cúbicos de metano. Teóricamente, un centímetro cúbico de hidrato puro de metano debe rendir cerca de 164 centímetros cúbicos de metano y 8 centímetros cúbico de agua. En la naturaleza, sin embargo, otras moléculas se mezclan con frecuencia adentro con el metano. Es más típico conseguir 158 centímetros cúbicos de metano de un centímetro cúbico del hidrato. En las muestras de hidratos de gas que se han encontrado y analizado, se ha observado que los vapores de gas que escapan de éstas muestras, a la presión ambiental liberan gas que puede entrar en combustión, por eso se les conoce como los hielos que arden.

La distribución mundial de los yacimientos de hidrocarburos, ha obligado a muchas naciones que carecen de ellos a buscar maneras de disminuir sus importaciones de hidrocarburos. Japón, India y Corea del Sur, así como muchos otros países con pocos recursos de energía, pagan un precio muy alto por el aceite y gas natural líquido importado (LNG). Los altos costos de los recursos de hidrocarburo importados son la razón por la cual en los últimos años las agencias de gobierno en Japón, India, y Corea del Sur han comenzado a desarrollar programas de investigación de los hidratos para explotar gas de hidratos oceánicos. Dado que hay muchos países que no tienen fuentes de energía (petróleo, etc.) pero sí costas marítimas, la explotación de este recurso a partir de mediados del presente siglo podría provocar un vuelco en la estructura económica mundial.

Dada la gran cantidad de depósitos de hidratos de metano en todo el mundo (más del doble de las reservas de carbón y todos los otros combustibles fósiles sumados), los gobiernos y la industria de petróleo y gas natural se han interesado en investigar esta nueva energía alternativa. Los países que desean gastar menos en combustible importado han comenzado a buscar soluciones frente a las dificultades técnicas. Además, ya existen programas de investigación y desarrollo en países importadores de crudo.

Sin embargo, antes de que los hidratos de gas puedan tenerse como una opción viable para provisiones futuras de gas natural, se necesitarán resolver los problemas técnicos significativos. En la mayor parte de los casos, la viabilidad de un recurso de energía es basada casi solamente en la economía. Sin embargo, es importante notar que en algunos casos la viabilidad de un recurso de hidrocarburo particular puede ser controlado por factores económicos locales únicos y no técnicos. Por ejemplo, los países con producción pequeña de gas natural pagan considerablemente más por sus necesidades de energía debido a que dependen de los hidrocarburos importados, que vienen a menudo con tarifas adicionales y gastos de transportación. La seguridad de energía es a menudo un asunto de los países pobres del recurso, que en comparación con los países ricos quienes hacen una inversión a menudo de mayor capital en recursos de energía. En algunos casos la unicidad de una ubicación particular, tal como la distancia a un recurso de energía convencional, puede llevar al desarrollo del recurso de otra manera poco convencional no económica.

Tanto la India como Japón, han iniciado un programa nacional muy ambiciosos de investigación de los hidratos de gas. En marzo de 1997, el gobierno de India anunciaba una nueva exploración en su mar patrimonial en aguas profundas (>400m) a lo largo de la costa Este de la India, entre Madras y Calcuta. Recientemente los datos sísmicos han revelado posibles presencias de hidratos de gas en las áreas que se extienden a lo largo de la costa. También anunciaba grandes perspectivas de hidratos de gas en el mar de Andaman, entre India y Myanmar, que se estima podría contener aproximadamente seis billones de metros cúbicos de gas. El gobierno de la India indica que esos hidratos de gas son de *extrema importancia para satisfacer sus necesidades de energía, las cuales van en crecimiento.*

Es una realidad que el mundo consumirá volúmenes cada vez mayores de gas natural en el presente siglo, por lo que se buscan opciones confiables y económicamente rentables. El gobierno regulador y la política de tributación puede dictar también la viabilidad de exploración y explotación de los hidratos de gas. En el pasado reciente, los subsidios de gobierno para explorar y explotar recursos de gas poco convencional tal como el metano de lechos de carbón se empezaron a realizar para determinar su viabilidad técnica y económica. Formas similares de apoyo de gobierno pueden tener un impacto significativo en la viabilidad de recurso de hidratos de gas. Otro factor no económico que puede afectar el recurso potencial de los hidratos de gas en un país particular son los intereses que tratan sobre las seguridad y dependencia nacionales en recursos de energía extranjeros. Los gobiernos de muchos países, incluyendo los EE.UU., expresan a menudo intereses sobre la confianza en los recursos de energía importados. Con toda seguridad los programas internacionales de investigación en hidratos de gas de Japón, India, y Corea del Sur se han establecido en parte para dirigir sus intereses sobre recursos de energía extranjeros.

El interés en los hidratos de gas continúa creciendo en muchos gobiernos -EE.UU., Japón, Corea, Canadá, Noruega e India- consolidando activamente los programas de investigación, sin embargo, Japón ha sido el más activo intentando desarrollar tecnología para que dentro de una década se puedan extraer hidratos como un recurso energético; también planean su producción comercial. Por otra parte, Noruega ha estado estudiando la viabilidad de explotar y transportar el gas de los hidratos. Los resultados de esta investigación indican que ese transporte de gas puede lograrse económicamente, sobre todo cuando son empleadas las *estructuras H* de los hidratos.

VI.2 RESERVAS

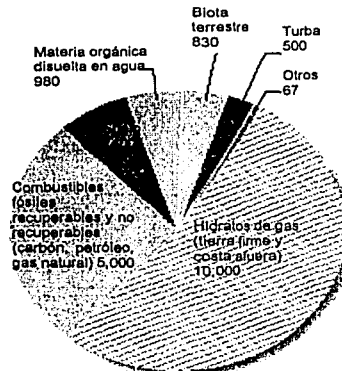
Todas las estimaciones actuales de hidratos de metano están basadas principalmente en datos que indican la localización y espesor del potencial de la Zona de Estabilidad de los Hidratos de Gas (GHSZ). Cuando más sitios se estudian en detalle, los nuevos datos pueden llevar a una mayor precisión de calidad y cantidad de gas. Por ejemplo, los recientes datos de mar adentro de Nankai, Japón indican concentraciones más grande de las

esperadas; recíprocamente, los datos del Blake Ridge en el Atlántico Norte, indican concentraciones más bajas de las esperadas.

Es difícil poner a los hidratos en una perspectiva económica cuando no existe ninguna predicción verdaderamente exacta. No solamente carecemos de estimaciones precisas de las reservas de hidratos de metano, sino que tampoco tenemos ninguna idea de cómo éste recurso sea recuperable a los costos que sean competitivos en el mediano y largo plazo. Algunos científicos estiman que la cantidad de metano almacenado en los hidratos está entre 100,000 y 270,000,000 billones de pies cúbicos.

Sin embargo, otras estimaciones mundiales de la cantidad de gas natural en los depósitos de hidratos de gas están entre los 14 a 34,000 billones de metros cúbicos para las áreas de permafrost y de 3,100 a 7,600,000 billones de metros cúbicos para sedimentos oceánicos (Kvenvolden, 1993); los sedimentos oceánicos parecen ser un recurso mucho más grande de gas natural que los sedimentos continentales. Las estimaciones de la cantidad de metano almacenado en el mundo entero en los hidratos de gas son de alrededor de 20,000 billones de metros cúbicos (Kvenvolden, 1993). Si estas estimaciones son válidas, la cantidad de metano en los hidratos de gas es de casi el doble de la magnitud de los recursos de metano convencionales estimados recuperables (tomado de Collett T. S. "Natural Gas Hydrates: Resource of the 21st Century?").

La cantidad absoluta de los hidratos de gas es obviamente desconocida; se cree que se han encontrado cantidades suficientes de hidratos como para permitir efectuar estimaciones sobre su volumen total. Existe un arduo consenso, que calcula que aproximadamente 20,000 billones de metros cúbicos de metano se encuentran atrapados en los hidratos. Aproximadamente el 99% de éstos se encuentran en sedimentos marinos costa afuera. El total es de aproximadamente dos órdenes de magnitud mayores a la cantidad de metano convencional recuperable, el cual se estima es de aproximadamente 250 billones de m³. Es decir, los hidratos pueden contener 10 billones de toneladas de carbono, más del doble de todo el carbón, petróleo y las reservas de gas convencionales del mundo combinados (figura 6.1). Estas inmensas estimaciones de este recurso de hidrocarburos potenciales están llevando a varios países a iniciar programas de investigación y exploración para entender el comportamiento de los hidratos, identificar las acumulaciones y desarrollar métodos de extracción. Japón, India, EE.UU., Canadá, Noruega y Rusia son algunos de los países que actualmente están desarrollando investigaciones sobre los hidratos de gas.



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 6.1. Contenido de carbono de los recursos de hidrocarburos calculados para el planeta. Los hidratos de gas contabilizan más de la mitad de los recursos de hidrocarburos. (Esta cifra excluye el carbono orgánico disperso como kerógeno y el asfalto).⁵⁶

Varios autores han intentado estimar la cantidad de hidrato de gas y gas libre disponible en Blake Ridge. Teniendo presente que los métodos de estimación de la magnitud del área y concentración del hidrato varían grandemente, la tabla 6.1 muestra estimaciones del volumen de metano de Blake Ridge.

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

Total de gas estimado (billones m ³)	Área (km ²)	Volumen/Unidad Área (millón m ³ /km ²)	Referencia
18	3,000	6	
80*	100,000	0.8	Holbrook et al. 1996
70*	26,000	2.7	Dickens et al. 1997
37.7	26,000	1.5	Collett y Ladd 2000
57*	26,000	2.2	Collett y Ladd 2000

* Incluye el gas debajo de los sellos de hidratos de gas.

Tabla 6.1. Volumen estimado de gas en el área Blake Ridge.⁵⁷

⁵⁶ Collett T. S., Lewis R., Uchida T., 2000. "El Creciente Interés en los Hidratos de Gas", Schlumberger Oilfield Review, otoño de 2000, pág 47-61.

⁵⁷ U.S. Department of Energy, "Blake Ridge", 23/10/01, [En línea]. Disponible: http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about_hydrates/blake-ridge.htm, 17/01/02

La tabla 6.2 muestra las estimaciones de las reservas de hidratos (tomada de Desa Erhlich, 2000, modificada de Stephen Prensly, 1995).

Gas metano m ³ x10 ¹⁵	Gas metano en billones de pies cúbicos x10 ⁵	Metano carbón kg x 10 ³	Referencias
Oceánico			
3.1	1.1	1.7	Mclver (1981)
5-25	1.8-8.8	2.7-13.7	Trofimuk et al. (1977)
7600	2700	4100	Dobrynin et al. (1981)
17.6	6.2	11	Kvenvolden (1988)
19.5	6.9	11	MacDonald (1990)
26.4-139.1	9.3-49.1	----	Gornitz and Fung (1994)
Continental			
0.014	0.005	7.5	Meyer (1981)
0.031	0.011	17	Mclver (1981)
0.057	0.02	31	Trofimuk et al. (1977)
34	12	1800	Dobrynin et al. (1981)
----	----	400	MacDonald (1990)

Tabla 6.2. Estimaciones de las reservas de gas metano y metano carbón contenido en acumulaciones de hidratos de gas continentales y marinos.⁵⁸

Se ha sugerido que el volumen de gas que puede estar contenido en una acumulación de hidrato de gas depende principalmente de cinco parámetros (modificado de Collett, 1993):

1. La extensión del área de presencia de hidrato de gas.
2. El espesor del "depósito".
3. La porosidad del sedimento.
4. El grado de saturación de hidrato de gas.
5. El hidrato de gas produce un parámetro volumétrico que define cuánto gas libre está guardado dentro de un hidrato de gas (también conocido con el nombre del número de hidrato).

Los hidratos de gas se encuentran asociados con otros recursos de hidrocarburos no convencionales, tales como capas carboníferas con metano, arenas compactas y lutitas negras. Con excepción de los hidratos, en la actualidad se está produciendo gas comercialmente en una pequeña porción del volumen total de fuentes no convencionales. En la mayoría de los casos, la evolución de un recurso de gas no convencional y no

⁵⁸ 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.

redituable a uno redituable ha sido una consecuencia directa de una importante inversión de capital y del desarrollo de la tecnología.

La industria del gas ha trabajado lentamente en el desarrollo de metodologías para extraer el metano de los hidratos. Se encuentran bajo consideración tres métodos principales: la despresurización, la inyección térmica y la inyección de inhibidores (figura 6.2). En la despresurización, la presión del hidrato de gas se disminuye lo suficiente para provocar la disociación. Este método es viable únicamente cuando puede producirse el gas libre asociado para disminuir la presión del depósito de hidrato, como se ha reportado en el campo Messoyakha.

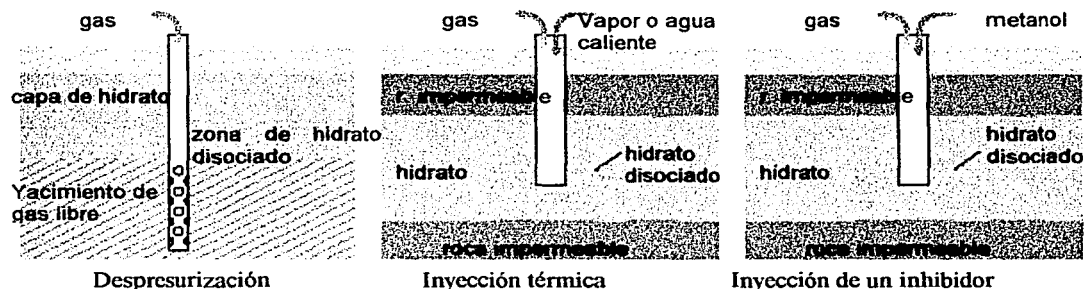


Figura 6.2. Los tres métodos principales considerados para la explotación del hidrato: despresurización, inyección térmica e inyección de un inhibidor.⁵⁹

En caso de ausencia de una zona de gas libre por debajo de los hidratos, la inyección térmica o la estimulación, puede ser una solución viable. Se les agrega calor a los estratos que contienen hidratos de gas a fin de aumentar la temperatura lo suficiente para provocar que el hidrato se disocie. Un ejemplo de esto es la inyección de agua de mar relativamente caliente a una capa de hidratos de gas que yace en una zona marina. La producción vía la despresurización de una formación productora de hidratos ocurrió en 1972 en el Noreste de Eileen State en el campo 2 de la Bahía de Prudhoe.

El campo de gas de Messoyakha ubicado en la parte norte del basamento siberiano occidental, es un ejemplo de la producción de gas que se ha extraído de hidratos de gas natural en su lugar de origen. Datos de producción y otra información geológica pertinente han documentado la presencia de hidratos de gas dentro de la parte superior del campo de Messoyakha (Makogon, 1981). También se ha sugerido que la historia de producción del campo de Messoyakha demuestra que los hidratos de gas son una fuente producible inmediata de gas natural, y esa producción pudo empezar y mantenerse por métodos

⁵⁹ Collett T. S., Lewis R., Uchida T., 2000. "El Creciente Interés en los Hidratos de Gas", Schlumberger Oilfield Review, otoño de 2000, pág 47-61.

TESIS C.T.R.
FALLA AL CRECIMIENTO

convencionales. La producción a largo plazo de la parte de hidrato de gas del campo de Messoyakha es estimada por haberse logrado por la despresurización simple. Como la producción empezó de la porción de gas libre inferior del campo de Messoyakha en 1969, las presiones de depósito medidas seguían las relaciones de declive predecidas; sin embargo, en 1971, las presiones de depósito comienzan desviarse de los valores estimados. Esta desviación se ha atribuido a la liberación del gas libre debido a la disociación de los hidratos de gas. A lo largo de la historia de producción del campo de Messoyakha, se ha estimado que alrededor del 36% (5 mil millones metros cúbicos), del gas aislado del campo se ha producido de los hidratos de gas. Sin embargo, varios estudios recientes sugieren que los hidratos de gas no pueden estar significativamente contribuyendo a la producción de gas en el campo de Messoyakha.

La inyección de inhibidores, tales como el metanol, modifica el equilibrio de presión-temperatura de modo que los hidratos ya no sean estables en sus condiciones normales y el metano sea liberado. En la industria de gas natural, el metanol es normalmente el método utilizado para inhibir la formación de hidratos en las tuberías, se utilizan las bombas de presión alta para inyectar el metanol en las líneas del proceso y equipo.

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

Sin embargo, existen ciertos factores negativos contra los hidratos de gas como un recurso de energía futuro; éstos desfavorecen el potencial de los hidratos de gas como un recurso de energía significativo. Algunos factores a considerar son:

- Limitación actual en la infraestructura de la industria de gas respecto a la localización de hidrato de gas.
- No existe un buen ejemplo de una producción exitosa de metano a partir de los hidratos de gas
- La baja permeabilidad en los sedimentos (materiales que limitan el fluido de metano, tal como arcilla).
- Disminución del factor de enriquecimiento con la profundidad.
- Falta de interés mantenido por las industrias de gas.

VI.3. POTENCIAL COMO COMBUSTIBLE

La tendencia hacia el uso de energéticos cuya combustión genere menos contaminación ha incrementado la importancia del gas natural, en relación al combustóleo, diesel y gas LP, ya que el gas natural no produce óxidos de azufre y reduce sensiblemente las partículas suspendidas, contribuyendo así a la prevención del medio ambiente (tabla 6.3).

Principales características	Unidad de medida	Gas natural	Combustóleo		Diesel	Gas LP
			3% S ¹	1% S ¹	0.5% S ¹	
Poder calorífico ²	kJ/m ³	35,420	42,523,747	42,275,469	38,358,760	27,680,935
	kJ/kg	43,675	43,392	43,138	44,812	51,261
Emisiones contaminantes SO _x	Kg/GJ	0	1,8815	0.4732	0.2231	0.0055

¹ Contenido de azufre

² Para el gas natural se tomó como base un poder calorífico de 8,460 kilocaloría/m³, el cual es la referencia promedio que utiliza PEMEX para efectos de facturación de gas seco. Para el combustóleo, el diesel y el gas LP se tomaron los poderes caloríficos superiores.

kJ/m³: Kilojoule por metro cúbico; kJ/kg: kilojoule por kilogramo; kg/GJ: Kilogramo por gigajoule.

Tabla 6.3. Ventajas competitivas del gas natural seco con respecto a otros combustibles.⁶⁰

La Secretaría de Energía, dentro de la Perspectiva del Mercado de Gas Natural 1997-2006, prevé que, entre 1997 y 2006, el consumo total nacional de gas natural seco pasará de 73.5 millones de metros cúbicos diarios (MMm³d) a 191.0 millones de metros cúbicos diarios (MMm³d) de acuerdo con el escenario base y a 168.9 (MMm³d) en el escenario alternativo, que contempla condiciones menos expansivas en el mercado internacional y nacional. En el escenario base, el sector consumidor más dinámico será el eléctrico, toda vez que con la reconversión y construcción de algunas de sus plantas a ciclo combinado, sus requerimientos de gas natural se incrementarán a un ritmo de 20.6% anual, absorbiendo el 40.4% del total; por su parte, el sector industrial consumirá el 36.9%; en tanto que PEMEX, excluyendo los autoconsumos de PEMEX Exploración y Producción (PEP), absorberá el 14.4 % del total, y el resto estará distribuido entre los sectores residencial y comercial, y el transporte vehicular. El escenario base de extracción y procesamiento prevé una producción neta, sin autoconsumos de PEP, de 135.6 (MMm³d) en el 2006.

Las principales industrias que utilizan el gas natural seco como combustible son: siderurgia, química, minería, vidrio, celulosa, papel, cemento, fertilizantes, las de cerveza, malta, aluminio, hule, automotriz, aguas envasadas y tabaco. Se utilizan en motores turbinas, quemadores para calentamiento directo, hornos y calderas o como combustible doméstico.

⁶⁰ Secretaría de Energía. Prospectiva del Mercado de Gas Natural 1997-2006. México.

Adicionalmente, resalta el uso del gas natural seco en la generación de energía eléctrica, sobre todo en áreas consideradas como zonas críticas por la normatividad ambiental.

El gas natural es materia prima fundamental en la industria petroquímica y como combustible en la propia industria petrolera. Una parte se destina para el bombeo neumático en pozos petroleros que ya no tienen presión para fluir por sí mismos, incrementando de esta forma el factor de recuperación de aceite en estos yacimientos. En este caso y en la mayor parte de los campos, el gas utilizado no se consume, sino únicamente circula de las compresoras a los pozos y viceversa, con pérdidas mínimas.

Como materia prima, los usos más importantes del gas natural en la industria petroquímica se encuentran en la producción de amoníaco, para la obtención de fertilizantes, y en las cadenas del etano-etileno y del metano-metanol; metanol, cloruros de metilo y metileno, amoníaco y acetileno.

La mayor parte del gas natural se emplea en procesos de calefacción industrial y doméstica. Su facilidad de control, uniformidad en la composición, ausencia de substancias indeseables y elevada potencia calorífica, que promedia las 10,000 kcal/m³, hacen que sea este gas el combustible ideal en una serie ilimitada de aplicaciones. El gas natural, aunque no se utiliza tan extensamente como combustible de motores de explosión, ofrece una fuente inmediata de energía para centrales energéticas situadas cerca de los centros de producción. En muchos países que son deficitarios en otras clases de combustibles se emplea también metano o gas natural para motores de automóviles.

Ya sea que los hidratos formados naturalmente se conviertan o no en la próxima fuente de combustible del mundo, pueden encontrarse otros usos para el conocimiento adquirido acerca de la formación de hidratos. Los investigadores de la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología (NTNU) en Trondheim están investigando la posibilidad de almacenar y transportar gas natural en su estado de hidrato a presión atmosférica. Experimentos realizados en la NTNU demostraron que una vez formado el hidrato de gas a presión atmosférica, no se disociará si se mantiene en o por debajo de los -15°C. Las aplicaciones potenciales de esta tecnología abundan. Entre ellas, se pueden mencionar:

- El gas producido en los campos petroleros podría convertirse en hidrato de gas sólido y transportarse en tanques de transporte o mezclarse con petróleo crudo refrigerado y transportarse como pasta aguada en tanques de transporte o a través de tuberías.
- El hidrato congelado, así como el gas natural líquido (GNL), puede transportarse a través de grandes distancias cuando no se dispone de ductos.
- Cuando sea necesario el almacenamiento de gas, el gas natural puede convertirse en hidratos y almacenarse refrigerado a la presión atmosférica.

- El Nitrógeno, el bióxido de carbono, y el sulfuro de hidrógeno pueden separarse del metano a través de la formación de hidratos.
- Las sales y los materiales biológicos pueden separarse del agua mediante el proceso de formación de hidratos.
- El bióxido de Carbono puede eliminarse de la atmósfera y puede guardarse en forma de hidrato sólido para ser transportado y eliminado en aguas profundas.

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

Hay todavía sin embargo, preocupaciones serias sobre la transformación útil de estos depósitos. Varios investigadores de la industria petrolera consideran que ni la infraestructura ni la tecnología está lista para la producción de metano a partir de los hidratos. Cualquier explotación del hidrato sería antieconómico en los precios actuales de gas natural. Además, sin pago económico inmediato, el sector privado no está persiguiendo vigorosamente la investigación que podía hacer a los hidratos de metano técnica y económicamente viable.

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

Los hidratos de gas naturales pueden ofrecer un recurso de energía muy importante para el desarrollo humano futuro. Es necesaria aún una mayor investigación para determinar la factibilidad geológica y económica de extraer los hidratos de gas y considerar ampliamente las implicaciones ambientales de su explotación.

CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Los hidratos de metano constituyen una fuente energética alternativa de gran proyección mundial, con reservas estimadas que prácticamente duplican las reservas convencionales actualmente reconocidas para los recursos energéticos fósiles. Existe un amplio consenso que calcula que aproximadamente los hidratos pueden contener 10 billones de toneladas de carbono, más del doble de todo el carbón, petróleo y las reservas de gas convencionales del mundo combinados.
- En general existen dos ambientes primarios geológico/geográfico apropiados para la acumulación de hidratos: Áreas con agua profunda en la proximidad de los bordes continentales y Continentes en las regiones polares.
- La mayoría de los hidratos de gas natural se forman del metano biogénico, excretado por las bacterias que comen la materia orgánica que se ha lavado en (o se ha muerto adentro) el océano. Cuando las bacterias digieren los residuos de plantas y animales del sedimento marino liberan moléculas de metano (CH_4) y sometidas a la enorme presión y a las bajas temperaturas del agua estas moléculas acaban aprisionadas por cristales de agua, formando los hidratos, Los hidratos producidos por el proceso orgánico son generalmente muy puros y tienden a contener solamente agua y metano.
- Sólo una pequeña proporción de la evidencia de las acumulaciones de hidratos alrededor del mundo proviene de muestreo directo; la mayoría proviene de otras fuentes, tales como reflexiones sísmicas, registros geofísicos de pozos, análisis geoquímicos, información sobre perforación y mediciones de la salinidad del agua intersticial.
- El estudio de las propiedades físicas del sedimento puede tener un gran valor en el estudio de recursos energéticos como los hidratos de gas. En los últimos años se han descubierto grandes volúmenes de hidratos de gas almacenados en sedimentos marinos, despertando un gran interés en toda la comunidad científica dedicada al estudio de hidrocarburos y fuentes alternas de energía.
- Los hidratos de metano tienen algunos problemas medioambientales debido a que si el metano llega intacto a la atmósfera este gas provoca un efecto invernadero diez veces superior al del dióxido de carbono y es susceptible de contribuir al recalentamiento del clima terrestre, por ello se deberá plantear un mecanismo de control tanto para su exploración como para su explotación.
- Es difícil poner a los hidratos en una perspectiva económica cuando no existe ninguna predicción verdaderamente exacta. No solamente carecemos de estimaciones precisas de las reservas de hidratos de metano, sino que tampoco se tiene ninguna idea de cómo éste recurso sea recuperable a los costos que sean competitivos en el mediano y largo plazo.

- Los métodos propuestos para la recuperación de gas de los hidratos estudian cómo disociar hidratos de gas en su lugar de origen calentándolos y/o despresurizándolos. Entre las técnicas para la producción del gas natural de hidratos de gas en el lugar de origen el más prometedor es el de despresurización.
- A pesar de que se conoce relativamente poco sobre el potencial como recurso de los hidratos de metano, es cierto que los hidratos de gas son un almacén vasto de gas natural y los programas de investigación nacional de los hidratos de gas en Japón, India, y los EEUU, contribuyen significativamente a la comprensión de los desafíos técnicos necesarios para volver este enorme recurso en una reserva económicamente rentable.
- Se debe efectuar un estudio del marco regulatorio y una evaluación de las tecnologías necesarias para la futura explotación comercial de los hidratos de metano. Este conocimiento permitirá un desarrollo futuro de gran potencial para la exploración de recursos y el establecimiento de líneas de base para la regulación y protección del medio ambiente marino.
- En el mar patrimonial mexicano se tienen las condiciones genéticas adecuadas para que se formen acumulaciones de hidratos de metano tanto en la parte norte del Golfo de México (frente a los Estados de Tamaulipas y Veracruz), como en el Océano Pacífico (frente a los Estados de Oaxaca, Guerrero y Chiapas) y en el Golfo de California.
- México necesita implantar un programa específico sobre hidratos de gas, un programa integral que sea desarrollado según las capacidades del país, por lo que se requiere de la acción inmediata de organismos nacionales de gobierno y empresas privadas que se avoquen a la exploración y evaluación de estos recursos.
- Dada la importancia de los hidratos de metano como una posible futura fuente energética, las universidades deberán de preparar a los profesionales que se encargarán de afrontar este reto.

BIBLIOGRAFÍA

- American Gas Association, 1966. *Gas Engineers Handbook*, Capítulo 8, Gas Hydrates and Dehydration by Hammerschmidt, E. G., Knapp K. R. y Perkins C. L. pp 4/72-4/76. 1ª ed, 2ª reimpression. The Industrial press. New York, N.Y.
- Arellano Gil J., Nieto Obregón J., 2002. "Los recursos minerales y petroleros del mar y su importancia", Consejo de Recursos Minerales, COREMI Boletín Técnico, año VIII, núm. 46, enero-febrero 2002, México.
- Berger B. D., Anderson K. E., 1980. *Gas Handling and Field Processing*, Vol. 3. Penn Well Books.
- Chambers, 1979. *Diccionario Científico y Tecnológico*. Ed. Omega, S. A., Barcelona.
- Collett, T. S., 1993. "Natural gas hydrates of the Prudhoe Bay and Kuparuk River area, North Slope, Alaska", AAPG Bulletin 793.
- Collett T. S., Lewis R., Uchida T., 2000. "El Creciente Interés en los Hydratos de Gas", Schlumberger Oilfield Review, otoño 2000, pág 47-61. También disponible en página web: http://www.slb.com/Hub/Docs/connect/reference/oilfield_review/ors00/sum00/pdf/p42_57.pdf, 20/01/02.
- 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.
- Foyer H. Christine, 1987. *Fotosíntesis*, traducido por Dra. Fuentes Pardo B. de la 1ª edición en inglés 1994, Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V., p. 15-20.
- Guillemot J., 1971. *Geología del Petróleo*. Ed. Paraninfo. Madrid.
- Hunt John M., 1996. *Petroleum Geochemistry and Geology*, second edition, W. H. Freeman and Company, New York.
- Instituto de Petróleo, Londres, 1963. *Moderna tecnología del Petróleo*. Versión española por Mora Cartaya y García Patrón. Ed. Reverté.
- Katz and Lee, 1990. *Natural gas engineering, production and storage*. Chemical engineering series. Mc Graw_hill publishing company, pp 197-230.
- Kvenvolden K. 1993. "Gas Hydrates-Geological Perspective and Global Change", Reviews of Geophysics 31, número 2, p. 173-187.
- Kotlyakov V. M., 1994. *Mir Snega i L'da (World of Snow and Ice)*. Moscú: Nauka. *Late Quaternary Environments of the Soviet Union* 1984. Univ. of Minnesota Press: Minneapolis.
- Landes K.K., 1972. *Geología del Petróleo*. Ed. Omega, Barcelona.
- Levorsen A. I., 1973. *Geología del petróleo*. Editorial Universitaria de Buenos Aires, traducido de la segunda edición de 1967, por R. Rogelio Figueira.

- Majorowicz J. A., Osadetz K. G., 2001. "Gas hydrate distribution and volume in Canada", AAPG Bulletin -V. 85, No. 7, p.1211-1230.
- Makogon Y.F., 1981. *Hydrates of Natural Gas*. Penn Well Publishing Company. Tulsa, Oklahoma.
- MC Cain, William D., 1990. *The properties of petroleum fluids*; second edition, PennWell Publishing Company.
- Ortega-Osorio A., 2001. "Los Hidratos del metano: Nueva Iniciativas en el IMP 4^{ta}" Conferencia Internacional Conjunta AMGP/AAPG, Exploración y Desarrollo de Plays Gasíferos, noviembre 4-7 del 2001, Veracruz, México.
- Oxford-Complutense, 1998. *Diccionario de Física*, 1^a edición española, Editorial Complutense, España.
- PEMEX, 2000. *Un siglo de la perforación en México*, Unidad de Perforación y Mantenimiento de Pozos (UPMP).
- Peña Díaz A. *et al.*, 1979. *Bioquímica*, Editorial Limusa, México.
- Rheinheimer Gerhard, 1987. *Microbiología de las aguas*. 4^a ed., Ed. Acribia, S.A. (España).
- Rodríguez Santana E., 1986. *Apuntes de Geología del Petróleo*. 2^a edición. Facultad de Ingeniería, Div. de Ingeniería en Ciencias de la Tierra. UNAM.
- Selley Richard C., 1998. *Elements of Petroleum Geology*, second edition. Ed. Academic Press.
- Sloan E. Dendy, 1990. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. Ed. Marcell Dekker, Inc. New York and Basel.
- Tiratsoo E. N., 1979. *Natural Gas*. Third Edition, Gulf Publishing Company.
- Tissot B. T., Welte D. H., 1982. *El petróleo su formación y localización*, 2^a ed. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México.
- Secretaría de Energía. *Prospectiva del Mercado de Gas Natural* 1997-2006. México.
- Welte D. H., 1972. *Petroleum exploration and organic geochemistry*. J Geochem-Explor. 1, pp 117-136.

PÁGINAS DE INTERNET

- "A Meeting Place for the Methane Hydrates Community", [En línea]. Disponible: <http://www.hydrate.org/about/geology.cfm>, 20/01/02.
- Ballough S. *et al.* "Methane Hydrate", Group Omaryaghi [En línea]. Disponible: <http://www-personal.umich.edu/~lkomjath/#econ>, 08/04/02.

- Carroll J. J. "*An Introduction to Gas Hydrates*", AQUALibrium. [En línea]. Disponible: <http://www.telusplanet.net/public/jcarroll/HYDR.HTM>, 17/01/02.
- Collett T. S. "*Natural Gas Hydrates: Resource of the 21st Century?*", U.S. Geological Survey. [En línea]. Disponible: [http://www.emdaapg.org/Gas Hydrates/ENERGY RESOURCES POTENTIAL.htm](http://www.emdaapg.org/Gas%20Hydrates/ENERGY%20RESOURCES%20POTENTIAL.htm), 23/06/02.
- Dillon W. "*Gas (Methane) Hydrates A New Frontier*", U. S. Geological Survey, 09/92 [En línea]. Disponible: <http://marine.usgs.gov/fact-sheets/gas-hydrates/title.html>), 17/01/02.
- Fischer Perry A. "*Gas hydrates research continues to increase*", [En línea]. Disponible: <http://www.aist.go.jp/GSJ/hydrate/hydrate.resources.html>, 17/01/02.
- Kvenvolden K. A., Lorenson T. D. "*A Global Inventory of Natural Gas Hydrate Occurrence*", U. S. G. S., 03/08/01, [En línea]. Disponible: <http://walrus.wr.usgs.gov/globalhydrate/index.html>, 17/01/02.
- Lorenson T.D., kvenvolden K.A., "*Methane in Coastal Sea Water, Sea Ice, and Bottom Sediments, Beaufort Sea, Alaska*". U. S. Geological Survey Open File report 95-70, 27/02/01, [En línea]. Disponible: <http://pubs.usgs.gov/openfile/of95-70/Core/meta/report.html>, 17/01/02.
- MacDonald I., Joye S. "*Lair of the Ice Worm*", Quarterdeck, Volume 5, Number 3, december 1997, 09/12/97, [En línea]. Disponible: <http://www-ocean.tamu.edu/Quarterdeck/QD5.3/macdonald.html>, 17/01/02.
- "*Molecular Simulation of Gas Hydrates*", [En línea]. Disponible: <http://troutgroup.mit.edu/claathrate/methane/potential.html>, 26/03/02.
- Pujol Gebellí, X. "*Hidratos de gas, el oro negro del siglo XXI*", El País, p. 33, 05/04/00. [En línea]. Disponible: http://www.geocities.com/geo_info/geo/hidrgas/hidrgas.htm, 06/05/02.
- Sassen R. "*Gas hydrate gardens of the Gulf of México*", Quarterdeck, Vol. 5, No.3, December 1997. 09/12/97, [En línea]. Disponible: <http://www-ocean.tamu.edu/Quarterdeck/QD5.3/sassen.html>, 17/01/02.
- Somosa L. "*El gas "Helado Inflamable": el futuro de la investigación de los fondos marinos para la próxima década*", proyecto TASYO. [En línea]. Disponible: <http://www.tierra.rediris.es/TASYO/1999margeol.html>, 20/01/02.
- Takle Eugene S. "*Ciclo del Carbono, metano*", [En línea]. Disponible: http://www.meteor.aistate.edu/gccourse/chem/carbon/carbon_lecture.html, 22/02/02.
- "*Tras el rastro del petróleo y el estudio del ciclo del carbono*", 18/07/00, [En línea]. Disponible: <http://www.aldeaeducativa.com/aldea/>, 22/02/02.
- U.S. Department of Energy. "*Arctic Regions*", 23/10/01, [En línea]. Disponible: <http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about-hydrates/arctic-regions.htm>, 14/02/02.
- U.S. Department of Energy. "*Blake Ridge*", 23/10/01, [En línea]. Disponible: <http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about-hydrates/blake-ridge.htm>, 17/01/02.

- U.S. Department of Energy. "*Cascadia Margin*", 23/10/01, [En línea]. Disponible: <http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about-hydrates/cascadia-margin.htm>, 17/01/02.
- U.S. Department of Energy. "*Chemistry of Natural Methane Hydrate*", 23/10/01, [en línea]. Disponible: <http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about-hydrates/chemistry.htm>, 17/01/02.
- U.S. Department of Energy. "*Estimates of the Methane Resource in Hydrates*", 23/10/01, [En línea]. Disponible: <http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about-hydrates/estimates.htm>, 17/01/02.
- U.S. Department of Energy. "*Exploring for Methane Hydrate*", 08/01/02, [En línea]. Disponible: <http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about-hydrates/explore.htm>, 17/01/02.
- U.S. Department of Energy. "*Geology of Methane Hydrates*", 23/10/01, [En línea]. Disponible: <http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about-hydrates/geo-logy.htm>, 17/01/02.
- U.S. Department of Energy. "*Gulf of México*", 23/10/01, [en línea]. Disponible: http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about_hydrates/gulf-mexico.htm, 17/01/02.
- U.S. Department of Energy. "*Hydrate and Global Climate*", 23/10/01, [En línea]. Disponible: http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about_hydrates/global-climate.htm, 17/01/02.
- U.S. Department of Energy. "*Nankai Trough, Offshore Japan*", 23/10/01, [En línea]. Disponible: http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about_hydrates/nankai-trough.htm, 17/01/02.
- U.S. Department of Energy. "*Necessary Conditions for Methane Hydrate Formation*", 29/10/01, [En línea]. Disponible: http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about_hydrates/conditions.htm, 17/01/02.
- U.S. Department of Energy. "*Physical Properties of Gas Hydrates*", 10/23/01, [en línea]. Disponible: http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/about_hydrates/physical-properties.htm, 17/01/02.
- U. S. Geological Survey. "*Gas Hydrates a Possible Future Energy Resource?*", 10/06/98, [En línea]. Disponible: <http://walrus.wr.usgs.gov/resources/hydrate.html>, 17/01/02.
- U. S. Geological Survey. "*Gas Hydrate: What is it?*", 01/03/99, [En línea]. Disponible: <http://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/hydrates/what.html>, 17/01/02.
- U. S. Geological Survey. "*Where are Natural Methane Hydrates Found?*", [En línea]. Disponible: <http://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/hydrates/where.html>, 17/01/02.

APÉNDICE I: GLOSARIO

Agua: sustancia formada por la combinación de una molécula de oxígeno y dos de hidrógeno (H_2O), líquido inodoro e insípido, incoloro, disolvente, refractor de la luz; posee su densidad máxima de 1 gramo por cm^3 a la temperatura de 4 °C. A la presión de una atmósfera hierve a 100 °C y solidifica a 0 °C.

Aceite crudo: está constituido por hidrocarburos líquidos a las condiciones de presión y temperatura del yacimiento y libre de gas, con una viscosidad menor o igual a 10,000 centipoises.

Alcanos: Los alcanos están formados por cadenas de átomos de carbono unidos entre sí por valencias simples. Estos compuestos son el conjunto más sencillo de los hidrocarburos. Los primeros cuatro compuestos de la serie de los alcanos son gaseosos. (metano, etano, propano y butano). Para su nombre se cuentan los carbonos y a la palabra griega que representa dicho número se le agrega la terminación *ano*.

Alquenos: son los hidrocarburos no saturados de doble ligadura. El primer término de la serie tiene dos carbonos, el segundo tiene tres y así sucesivamente; en estos se cambia la terminación *ano* del alcano por la terminación *eno*. En compuestos con cuatro carbonos o más, se debe indicar el número del carbono en que va apoyada la doble ligadura. Los carbonos se enumeran comenzando por el extremo más cercano al doble enlace.

Alquinos: son los hidrocarburos no saturados de triple ligadura. El primer término consta de dos carbonos, el segundo de tres y así sucesivamente. Se nombran cambiando la terminación *ano* del alcano por la terminación *ino*. Desde el compuesto de cuatro carbonos se indica el número del carbono en que va apoyada la triple ligadura. Si en el esqueleto hay dos o más dobles ligaduras o dos o más triples ligaduras, entonces la terminación es *dieno*, *trieno*, etc.

Bacterias: organismos unicelulares o filamentosos, microscópicos, que carecen de clorofila y con un núcleo bien definido; se multiplican rápidamente por simple escisión. Algunas especies permanecen en la fase de esporas; otras son móviles. Se encuentran en el aire, agua y estiércol, corrompiendo los materiales orgánicos, animales y plantas. Las formas saprofitas son más numerosas que las parásitas las cuales incluyen a los agentes patógenos de las plantas y los animales.

Basamento: es considerado como el conjunto de rocas metamórficas o ígneas, debajo de las cuales no aparece ninguna otra secuencia de rocas. Cuando predominan las rocas ígneas plutónicas se denomina *Basamento ígneo*, cuando la secuencia basal está formada por diferentes rocas metamórficas incluyendo material ígneo intrusivo se llama *Complejo Metamórfico*. La secuencia de basamento son las rocas debajo de las formaciones sedimentarias, cinturones plegados y rocas volcánicas jóvenes. Idealmente, las rocas del basamento son metamórficas y plutónicas que contrastan fuertemente con su cobertura.

BTU: (British Thermal Unit) unidad térmica inglesa. La cantidad de calor que se requiere para elevar la temperatura de una libra de agua en un grado Fahrenheit (generalmente de 60°F a 61 °F).

Caloría: una caloría es la cantidad de calor que se necesita para que $1cm^3$ de agua, aumente un grado centígrado de temperatura, a la presión constante de una atmósfera estándar; la

caloría, una unidad cuantitativa de calor en el sistema cgs, ha sido reemplazada por el Joule, una unidad del SI: 1caloría=4.1868 Joules.

Campo petrolero: área donde existen varios pozos petroleros productores y un grupo de yacimientos de hidrocarburos con características litológicas, estratigráficas, estructurales y de aceite similares. Comprende dos o más yacimientos de hidrocarburos relacionados a una determinada condición geológica (cuenca sedimentaria, estructura, formación).

Catagénesis: es la etapa en la que la degradación térmica del *kerógeno* es responsable de la generación de la mayor parte de los hidrocarburos (petróleo y gas); es el resultado del aumento de la temperatura y presión por el sepultamiento en las cuencas sedimentarias.

Catalización: modificación de las velocidades (aceleración o frenado) de las reacciones químicas, producidas por ciertas sustancias que permanece sin alteración al final del proceso.

Clatrato: llamados también, compuestos de inclusión, los cuales no están unidos por los enlaces normales entre compuestos -covalentes o metálicos o enlaces débiles como los de Van der Waals- sino que mas bien parte de ellos resulta enclaustrada por el resto de la estructura geométrica de las moléculas que lo conforman. La hidroquinona era uno de los ejemplos clásicos de clatratos; esto es, hasta la aparición de los fulléridos. A estos últimos, al contener Carbono, se les conoce también con el nombre de *carcerandos* (*carcerands*), una subclase de clatratos.

Conductividad Térmica: flujo de calor a través de una superficie, por unidad de tiempo, dividido por la negativa de la velocidad de cambio de temperatura con la distancia en una dirección perpendicular a la superficie. Propiedad que tienen los hidrocarburos de transmitir calor, con la facultad de una rápida propagación cuando se encienden.

Connigración: son todos los desplazamientos de hidrocarburos que conducen más o menos rápida y directamente a la formación de un yacimiento por acumulación y segregación en una trampa.

Constante dieléctrica (permitividad símbolo ϵ): cociente entre el desplazamiento eléctrico en un medio y la intensidad del campo eléctrico que lo produce. Es importante en el estudio de los aislantes eléctricos usados como dieléctricos. Si dos cargas Q_1 y Q_2 están separadas por una distancia r en el vacío, la fuerza F entre las cargas está dada por: $F=Q_1Q_2/r^24\pi\epsilon_0$. En esta formulación de la ley de Coulomb usando unidades del SI, ϵ_0 es la permitividad absoluta del espacio libre, que ahora se conoce como la constante eléctrica; tiene el valor de $8.854 \times 10^{-2} \text{Fm}^{-1}$. Si el medio entre las cargas es distinto que el vacío, la ecuación se convierte en: $F=Q_1Q_2/r^24\pi\epsilon$ y la fuerza entre las cargas se reduce; ϵ es la permitividad absoluta del nuevo medio. La permitividad relativa (ϵ_r) de un medio, antes llamada la constante dieléctrica, se define por $\epsilon_r=\epsilon/\epsilon_0$.

Diagénesis: se inicia en los sedimentos recientemente depositados, donde la actividad microbiana es uno de los principales agentes de transformación; se originan rearrreglos químicos a poca profundidad (la policondensación y la insolubilización). Al final de la diagénesis, la materia orgánica se transforma principalmente de *kerógeno* y el sedimento en roca.

Dismigración: son los desplazamientos de hidrocarburos a la superficie terrestre. Conducentes a la formación de manifestaciones superficiales.

Enlace: fuerza atractiva que existe entre distintos átomos, suficientemente intensa para permitir que el agregado funcione como una unidad. Todos los enlaces se originan por las cargas electrostáticas de los electrones y los núcleos atómicos.

Estereoquímica: la estereoquímica tiene que ver con la relación espacial de los átomos y grupos atómicos dentro de una molécula y el efecto que estas relaciones tienen sobre las propiedades físicas y químicas de la molécula.

Estructura cristalina: la posición relativa de sus átomos, la cual muestra una ordenación definida en cada tipo de cristal.

Factores de conversión:

1m ³ = 6.2898 barriles
1m ³ = 35.31467 pies cúbicos
1millón de m ³ = 6,289.8 miles de barriles
1millón de pies cúbicos = 178.107 miles de barriles
1pie cúbico = 0.0283168 m ³
1BTU = 1055.056 Joule
1BTU = 0.252 kilocalorías
1caloría = 4.1868 Joule
1kilocaloría = 3.968 BTU
1Gigajoule = 239,000 kilocalorías
0°C = 273.15°K = 32°F
100°C = 373.15°K = 212°F

Fuerza de Van der Waals: 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.

Gas asociado: gas natural que se encuentra en contacto y/o disuelto en el aceite crudo del yacimiento. Este puede ser clasificado como gas de casquete (libre) o gas en solución (disuelto).

Gas asociado libre: también conocido como gas de casquete, es el gas natural que sobreyace y está en contacto con el aceite crudo en el yacimiento.

Gas asociado en solución: gas natural disuelto en el aceite crudo del yacimiento bajo las condiciones de presión y temperatura que prevalecen en el.

Gas natural: es la porción de petróleo que existe en los yacimientos en fase gaseosa o en solución en el aceite y que a condiciones atmosféricas permanece en fase gaseosa, puede incluir algunas impurezas o sustancias que no son hidrocarburos (ácido sulfhídrico, nitrógeno o dióxido de carbono).

Gas natural amargo: es cuando las impurezas alcanzan valores por arriba de cierta norma (2%) y por tanto este gas debe ser tratado a fin de eliminar estas impurezas razón por lo que se endulza.

Gas natural dulce: es cuando las impurezas que contiene, no impiden su uso como combustible; son gases no corrosivos.

Gas no asociado: es gas natural que se encuentra en yacimientos que no contienen aceite crudo.

Gas seco: es aquel que contiene cantidades insignificantes de hidrocarburos más pesados que el metano, se puede obtener también de las plantas de proceso.

Gas seco equivalente a líquido: volumen de aceite crudo que por su poder calorífico equivale al volumen del gas seco.

Gelisol: (del lat. gelu, hielo, y solum, suelo) suelo sometido al hielo. En él se distingue una parte profunda constantemente helada, llamada pergelisol (o *permafrost* o *permagel*), y una parte superficial que deshiela durante un período del año (mollisuelo).

Gradiente geotérmico: el aumento de temperatura que se observa según se desciende a niveles más profundos de la corteza terrestre. El gradiente medio es de 1°C por cada 30-35 m de profundidad, pero en áreas volcánicas llega a ser hasta de 1°C cada 10 m.

Grados API: en el área petrolera se ha adoptado de manera arbitraria la unidad de densidad en grados API, establecida por el (American Petroleum Institute), con la cual se manejan los diferentes tipos de petróleo y su escala es también arbitraria y es de acuerdo a la siguiente relación:

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141.5}{\text{PeA} = a \text{ } 60^{\circ}\text{F } 1\text{atm}} - 131.5$$

Su relación con la densidad a 15° C, es la siguiente:

$$\text{Densidad a } 15^{\circ}\text{C} = 141.5 / (131.5 + ^{\circ}\text{API})$$

Así, cuando decrece la densidad del hidrocarburo, aumenta el equivalente en grados A.P.I. Este parámetro es un criterio muy representativo de la calidad económica del crudo, y se utiliza para fijar su precio. Los términos comerciales que se utilizan son: crudos ligeros (>31.1°API); medios (22.3-31.1°API); pesados (10-22.3°API) y extrapésados (<10°API).

Los valores altos en °API, corresponden a pesos específicos bajos y viceversa:

Peso específico	°API
0.7	70
0.8	45
0.9	25.7

Nota: en México, el petróleo Olmeca tiene 39 °API, el Istmo tiene 32 °API y el Maya 22 °API.

Hidrocarburo: es cualquiera de los compuestos que se forman por hidrógeno y carbono, como los que forman la nafta, la parafina, el metano, el benceno y otros productos del petróleo.

Hidrocarburos aromáticos: son un tipo especial de compuestos saturados en donde se alternan enlaces simples y dobles en una cadena cerrada de seis carbonos, formando un anillo denominado benceno; el nombre de aromático proviene del olor agradable de gran parte de dichos compuestos.

Hidrocarburos saturados: son aquellos en donde cada uno de los átomos de carbono, tiene un enlace cubierto por un átomo de hidrógeno (enlace sencillo).

Hidrocarburos no saturados (insaturados): son aquellos en donde los átomos de carbono muestran enlaces dobles o triples.

Hielo: el hielo se forma cuando el agua se enfría por debajo de su punto de congelación. Es un sólido transparente de peso específico 0.916 gr/cm³.

Isótopos: son elementos que tienen igual número atómico, pero distinta masa atómica.

Kerógeno: es la fracción de la materia orgánica dispersa en las rocas sedimentarias, insoluble en ácidos, bases y solventes orgánicos, produce hidrocarburos cuando se somete a un proceso de catagénesis. Los kerógenos sapropélicos producen aceite mediante calor,

mientras que los húmicos producen principalmente gas. El kerógeno se origina como un paso intermedio de la degradación de la materia orgánica, en medio anaerobio, y en un rango concreto de presiones y temperaturas.

Metagénesis: se alcanza solamente a gran profundidad (entre 8 y 12 km). Sin embargo, esta última etapa de evolución de la materia orgánica se inicia antes (reflectancia vitrinita cercana a 2.0%) que el metamorfismo de la fase mineral (reflectancia vitrinita cerca de 4.0%, correspondiente al principio de las facies de esquistos verdes). Durante la metagénesis se forman rocas metasedimentarias.

Metano: (CH_4) es el hidrocarburo de arreglo molecular más sencillo y más abundante. Es el principal constituyente del gas natural. Se considera que tiene una molécula tetragonal en la que todos los átomos de hidrógeno están situados a igual distancia del átomo de carbono y equidistantes entre sí. Gas con punto de fusión -186°C y punto ebullición -164°C , se encuentra en estado natural en los pozos de petróleo y en el gas de los pantanos.

Migración: es el movimiento de aceite y/o gas en los poros y/o discontinuidades de las rocas (porosidad primaria y secundaria) en el interior de la corteza terrestre.

Migración primaria: designa los movimientos de los fluidos de la roca madre hacia la roca almacén. Comprende el movimiento de los hidrocarburos a partir de su desprendimiento del kerógeno, así como su transporte dentro y a través de los capilares y poros estrechos de las rocas de grano fino.

Migración Secundaria: es el desplazamiento de los hidrocarburos, en el interior de los horizontes permeables de una serie estratigráfica, hacia las trampas donde se produce la acumulación. Es el movimiento de los hidrocarburos después de su expulsión de la roca generadora a través de poros más amplios de las rocas portadoras y almacenadoras, más permeables y porosas. La diferencia entre la migración primaria y secundaria no se fundamenta en distintos procesos de migración sino solamente en su localización en poros de diferentes tamaños y litología y posiblemente en un diferente estado de distribución. La pérdida de los hidrocarburos de una trampa frecuentemente se denomina dismigración.

Permafrost: zonas en regiones árticas y subárticas, donde gran parte o la totalidad del suelo permanece helado (ver Gelisol).

Permeabilidad: la permeabilidad es la propiedad que permite el paso de un fluido a través de los poros interconectados de una roca —su porosidad efectiva— sin que se dañen ni se desplacen las partículas de la roca. En otras palabras, la permeabilidad es la medida de la conductividad de fluidos que tiene una roca, es un factor importante que clasifica si un yacimiento tiene o no buenas características productoras. La permeabilidad, en geología del petróleo, no es absoluta sino relativa; se dice que una roca es permeable si una cantidad considerable de fluido la atraviesa en un lapso breve de tiempo. La unidad de medida de la permeabilidad de una roca en el sistema CGS se denomina *darcy* en honor a Henri Darcy, que llevó a cabo experimentos con circulación de líquidos a través de medios porosos en 1856.

Petróleo: (Crudo ó Petróleo líquido) está constituido por hidrocarburos líquidos fundamentalmente, y puede tener en solución hidrocarburos gaseosos (los denominados crudos ligeros), o sólidos (crudos pesados). Sus características físicas y económicas están muy relacionadas con la composición. La principal característica económica de los petróleos es su poder calorífico, que hace que sean utilizables como fuentes de energía. Este

parámetro varía en función de la densidad, y, por tanto, de la composición química concreta: así, el poder calorífico es mayor para los crudos ligeros que para los pesados.

Petróleo crudo equivalente (pce): es la suma del aceite crudo, condensados, líquidos de planta y gas seco equivalente a líquido.

Petróleo in situ (recurso): es la cantidad total de petróleo que se estima existe originalmente en los yacimientos.

Pirolisis: descomposición química obtenida por calentamiento, sin catalizador.

Poise: es la unidad de viscosidad de una sustancia contenida en un recipiente con sección de 1 cm^2 , que sometida a la fuerza de una Dina, se mueve con una velocidad de 1 cm/s . Un poise es igual a 10^{-1} Nsm^{-2} .

Polimerización: al modificar las condiciones físico-químicas de los aceites, las moléculas pequeñas pueden reaccionar entre sí y formar grandes moléculas complejas, llamadas polímeros. En la petroquímica esta propiedad se utiliza para la producción de plásticos, aditivos y lubricantes.

Porosidad: El cociente de dividir el volumen de poros existentes en una roca con respecto al volumen total de la misma y por lo general se expresa como un porcentaje.

Porosidad efectiva: medida de porosidad que se usa comúnmente en los estudios de yacimientos; es la razón entre los espacios que ocupan los poros interconectados y el volumen total de la roca.

Presión original: presión que prevalece en un yacimiento que no ha sido explotado y se le denomina original del yacimiento; es la que se mide en el pozo descubridor de una estructura productora, se mide en Kg/cm^2 .

Presión de rocío: presión a la cual se forma la primera gota de líquido, al pasar de la región de vapor a la región de dos fases.

Presión de saturación: presión a la cual se forma la primera burbuja de gas, al pasar de la fase líquida a la región de dos fases.

Presión de Vapor: es el esfuerzo que ejercen los hidrocarburos en fase gaseosa o de vapor sobre las paredes de los poros de las rocas o sobre un recipiente donde se encuentran confinados al incrementar su temperatura; por ejemplo, un hidrocarburo líquido puede entrar en fase de vapor y comportarse como un gas.

Procesos Bioquímicos: por la acción de bacterias y la acción del oxígeno, los hidrocarburos se degradan, originando hidrocarburos pesados.

Provincia (Cuenca Petrolera): comprende varios campos localizados en una región geológico-petrolera, en la cual los yacimientos se formaron en condiciones geológicas similares, por lo que presentan características generales parecidas.

Punto de Ebullición: es el paso de un hidrocarburo líquido al estado gaseoso, producto del incremento de temperatura, manteniéndose el equilibrio de las dos fases.

Punto de Fusión y de Transición: corresponde al cambio de estado de la materia debido a la variación de temperatura; de sólido a líquido, de líquido a gas y viceversa.

Punto de Inflamación y de Combustión (Punto Flash): es la temperatura en la cual se encienden los vapores del petróleo al entrar en contacto con el medio ambiente.

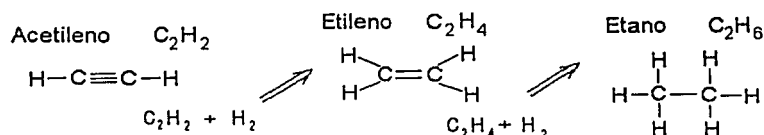
Quimiosíntesis (chemosynthesis): formación de materia orgánica por la acción de algunas bacterias mediante energía derivada de cambios químicos.

Quimioautotrofia: la utilización por parte de un organismo de la energía derivada de la oxidación de compuestos inorgánicos, para la asimilación de materiales simples, p.e. bióxido de carbono y amoníaco.

Recurso descubierto: volumen de hidrocarburos de los cuales se tiene evidencia a través de los pozos perforados.

Recurso no descubierto: volumen de hidrocarburos con incertidumbre, pero cuya existencia se infiere en cuencas geológicas a través de factores favorables, resultantes de la interpretación geológica, geofísica y geoquímica y se subdivide en recursos posibles y potenciales.

Reducción (hidrogenación): es la acción mediante la cual se adiciona hidrógeno a la molécula y se elimina oxígeno. Los hidrocarburos no saturados (con enlaces dobles o triples), se saturan y dan moléculas de enlaces sencillos, ejemplo:



Relación gas-aceite: relación de la producción de gas del yacimiento a la producción de aceite, medidos a la presión atmosférica.

Relación gas disuelto-aceite: relación del volumen de gas que está disuelto en el aceite comparado con el volumen de aceite que lo contiene, esta puede ser original (Rsi) o instantánea (Rs).

Reserva: son acumulaciones de hidrocarburos conocidas, de las que se tiene evidencia física, mediante pruebas de producción; es la parte que se espera recuperar con rendimiento económico con los métodos y los sistemas de explotación adecuados, evaluada a cierta fecha, a condiciones atmosféricas y bajo las normas gubernamentales. El riesgo económico generado por la incertidumbre en la información e interpretación de datos geológicos, geofísicos, petrofísicos y la aplicación de prácticas de ingeniería permiten clasificar a las reservas como probadas y no probadas. Las primeras incluyen las desarrolladas, y las segundas las probables y posibles.

Reservas especulativas: son las cantidades de aceite y gas estimadas en una fecha específica y que todavía no han sido descubiertas, pero que los criterios generales geológicos y de ingeniería permiten suponer que podrían ser descubiertas en el futuro y recuperables en forma económica mediante pozos e instalaciones hechas para el efecto.

Reserva original: volumen de hidrocarburos a condiciones atmosféricas, que se espera recuperar económicamente con los métodos y sistemas de explotación aplicables a una fecha específica, además se puede decir que es la fracción del recurso que podrá obtenerse al final de la explotación del yacimiento.

Reserva posible: volúmenes de hidrocarburos en donde el análisis de datos geológicos y de ingeniería, sugieren que son menos probables de ser comercialmente recuperables que las

reservas probables. El término posible implica que se tiene una probabilidad de extraer al menos 10% de las cantidades actualmente recuperadas.

Reserva probable: reserva no probada cuyo análisis de datos geológicos e ingenieriles, sugiere que son más tendientes a ser que a no ser comercialmente recuperables. Para los métodos probabilísticos, implica que se tendrá una probabilidad de 50% de que las cantidades recuperadas sean iguales o mayores que la suma de las reservas estimadas probadas más las probables.

Reserva probada: volumen de hidrocarburos o sustancias asociadas evaluadas a condiciones atmosféricas, las cuales por análisis de datos geológicos y de ingeniería se estima con razonable certidumbre que serán comercialmente recuperables a partir de una fecha dada; provienen de yacimientos conocidos bajo condiciones actuales económicas, métodos operacionales y regulaciones gubernamentales. Dicho volumen está constituido por la reserva probada desarrollada y la reserva probada no desarrollada; cuando se utilizan métodos probabilísticos, el término probado implica que se tiene una probabilidad de al menos 90% de que las cantidades actualmente recuperadas sean mayores o iguales a las reservas estimadas.

Reserva remanente: volumen de hidrocarburos medido a condiciones atmosféricas, que queda por producirse económicamente de un yacimiento a determinada fecha; es la diferencia entre la reserva original y la producción acumulada de hidrocarburos en una fecha específica.

Resistividad (símbolo ρ): es la medida de la capacidad de un material para oponerse al fluido de una corriente eléctrica. La resistividad de un material está dada por RA/l , donde R es la resistencia de una muestra uniforme del material, con una longitud l y una sección transversal A. Está usualmente dada a 0°C o a 20°C y es medida en ohm metro. Fue antes conocida como resistencia específica.

Rocas almacenadoras: son aquellas rocas que contienen poros o espacios para almacenar el petróleo y estos poros deben estar interconectados para que la roca sea permeable y permita el movimiento del agua, aceite o gas. Los dos elementos esenciales de una roca almacenadora o de yacimiento son la porosidad y la permeabilidad. La porosidad de las rocas de yacimiento o almacenadoras, normalmente queda dentro del intervalo de 5 a 30%; la porosidad de la roca carbonatada frecuentemente es algo menor que en las areniscas pero la permeabilidad de los carbonatos puede ser superior. La mayor parte de las acumulaciones de petróleo en el mundo se encuentran en rocas almacenadoras clásticas o detríticas, incluyendo las areniscas, pero en México la mayor producción de aceite es en rocas carbonatadas.

Rocas generadoras: son aquellas que son, pueden volverse, o han sido capaces de generar petróleo. Para reconocer una roca generadora es necesario determinar el contenido de materia orgánica insoluble (kerógeno), soluble (betumen), el grado de madurez, tipo y calidad de la materia orgánica.

Rocas sello: son aquellas que por su escasa permeabilidad impiden el paso del petróleo, sirviendo como cierre a su migración o desplazamiento; las mejores rocas sello son las rocas evaporíticas, pero las más abundantes son las lutitas.

Rompimiento Termal o Cracking: por la acción de alta temperatura, los compuestos más pesados y complejos, dan origen a moléculas más pequeñas por la ruptura de enlaces; obteniéndose compuestos con menor número de carbonos por lo tanto más ligeros.

Sapropélico: dicese de los organismos acuáticos que viven en la materia orgánica en putrefacción, de lugares cenagosos.

Segregación gravitatoria: mecanismo de empuje en el cual parte del gas liberado del aceite, forma o contribuye al agrandamiento de un casquete de gas en la parte culminante de la estructura y aumenta la eficiencia total de desplazamiento.

Sistema petrolero: es el conjunto de aquellos elementos y procesos geológicos esenciales para que un depósito de gas o aceite exista en la naturaleza, estos elementos básicos incluyen una roca generadora, un camino de migración, una roca almacenadora, una roca sello y una trampa, así como los procesos geológicos que crean cada uno de estos elementos básicos. **Trampa:** término empleado en geología para definir un receptáculo natural cerrado en la corteza terrestre, con una geometría que permite que los hidrocarburos se acumulen y conserve de manera natural durante un cierto periodo de tiempo, lo mantiene en condiciones hidrodinámicas propicias e impide que estos escapen; cuentan con rocas almacenadoras y rocas sello en posición tal que permiten se acumulen los hidrocarburos.

Trasgresión: avance del mar sobre el continente, la línea de costa retrocede y los sedimentos acumulados en la cuenca marina sobre la plataforma continental, van teniendo progresivamente mayor extensión; en las transgresiones el continente pierde terreno.

Valencia: número entero que representa o denota el poder de combinación de un elemento con otro.

Viscosidad: Medida de la resistencia a fluir que ofrece un fluido cuando está sometido a un esfuerzo de cizalla. Para un fluido newtoniano, la fuerza F , necesaria para mantener un gradiente de velocidad dv/dx entre planos adyacentes de un fluido de área A está dada por: $F=hA(dv/dx)$, donde h es una constante, llamada el coeficiente de viscosidad. En unidades SI tiene unidades de pascal por segundo; en el sistema cgs es medida en poises.

Yacimiento: es una concentración de hidrocarburos en el subsuelo en capas de roca permeable, caracterizado por un sistema natural de presión de tal manera que la producción de petróleo en una parte de él, afecta la presión del receptáculo en toda su extensión. Es la acumulación natural en la corteza terrestre de gas y/o aceite de la misma composición, comprendida en los mismos límites y sometida a un mismo sistema de presión en una trampa petrolera.

APÉNDICE II: PROGRAMA ACTUAL Y PROPUESTA DE TEMARIO DE LA ASIGNATURA GEOLOGÍA DEL PETRÓLEO.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Programa de Asignatura

INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA
Cerritos

GEOLOGÍA DEL PETRÓLEO Y GEOHIDROLOGÍA
Departamento

Fecha de aprobación del Consejo Técnico de la Facultad: 27 de mayo de 1995
Consejo Académico del Área de las Ciencias Físico Matemáticas y de las Ingenierías: 6 de diciembre de 1995

Programa de la Asignatura: GEOLOGÍA DEL PETRÓLEO
Clave: 9254 Núm. de créditos: 6 Carrera: INGENIERO GEOLÓGICO
Duración del curso: Semanas: 18
Horas: 48 Semestre: V
Teoría: 3 Obligatoria: X
Prácticas: Optativa:

OBJETIVO DEL CURSO

El alumno explicará la ocurrencia, propiedades y fenómenos que propician la acumulación del petróleo y gas. Conocerá los métodos de investigación geológica para la exploración petrolera.

TEMAS

Núm.	Nombre:	Horas
I	INTRODUCCION	3.0
II	PETROLEO Y GAS	9.0
III	ORIGEN DEL PETROLEO Y GAS	2.0
IV	LA ROCA GENERADORA	8.0
V	MIGRACION	6.0
VI	LA ROCA ALMACENADORA	8.0
VII	LA EXPLORACION PETROLERA	8.0
VIII	IMPACTO AMBIENTAL POR EXPLORACION PETROLERA	4.0
		48

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Asignatura: GEOLOGÍA DEL PETRÓLEO

Página 2

ANTECEDENTES, OBJETIVOS Y CONTENIDOS DE LOS TEMAS

I. INTRODUCCION

OBJETIVO:

El alumno conocerá el desarrollo histórico del uso del petróleo y su perspectiva; la evolución de la exploración petrolera y su estado actual.

CONTENIDO:

- I.2. Definición y alcance de la geología del petróleo
- I.2. Evolución histórica de la disciplina
- I.3. El papel del geólogo petrolero
- I.4. El estado actual del petróleo, políticas nacionales e internacionales
- I.5. Distribución geográfica de las provincias petroleras

II. PETROLEO Y GAS

ANTECEDENTES:

Geoquímica

OBJETIVO:

Que el alumno describa las propiedades físicas y químicas del petróleo y gas en función de su estructura molecular.

CONTENIDO:

- II.1. Manifestaciones de hidrocarburos en la naturaleza
- II.2. Composición del petróleo
- II.3. Propiedades físicas y químicas del petróleo
- II.4. Clasificación de los crueros
- II.5. El gas natural

III. ORIGEN DEL PETROLEO Y GAS

ANTECEDENTES:

Geología Histórica
Geoquímica
Petrología Sedimentaria

OBJETIVO:

Que el alumno, mediante técnicas grupales, discuta la formulación de las teorías tradicionales sobre el origen del petróleo y formule sus propias hipótesis.

CONTENIDO:

- III.1. Teorías Inorgánicas
- III.2. Teorías Orgánicas

ANTECEDENTES, OBJETIVOS Y CONTENIDOS DE LOS TEMAS

IV. LA ROCA GENERADORA

ANTECEDENTES:

Estratigrafía
Geoquímica
Petrología Sedimentaria

OBJETIVO:

Que el alumno, dentro del marco conceptual desarrollado, analice las informaciones parciales y aplique metodologías para evaluar el potencial generador de las rocas.

CONTENIDO:

- IV.1. Características físicas y biológicas
- IV.2. La materia orgánica: su origen, acumulación y preservación
- IV.3. La materia orgánica en las rocas
- IV.4. Evolución de la materia orgánica y generación del petróleo y gas.
- IV.5. Factores geológicos que influyen en la generación

V. MIGRACION

ANTECEDENTES:

Geohidrología

OBJETIVO:

El alumno analizará los factores que propician el movimiento del petróleo y gas dentro de la corteza terrestre.

CONTENIDO:

- V.1. Existencia y tipos de migración
- V.2. Factores físicos y geológicos asociados con la migración
- V.3. Migración primaria
- V.4. Migración secundaria

VI. LAS ROCAS ALMACENADORAS Y SELLO

ANTECEDENTES:

Estratigrafía
Petrología Sedimentaria
Geohidrología
Geología Estructural

OBJETIVO:

Que el alumno aplique sus conocimientos de geología estructural y petrología sedimentaria para definir las características físicas y estructurales favorables para la acumulación de petróleo y gas.

ANTECEDENTES, OBJETIVOS Y CONTENIDOS DE LOS TEMAS

CONTENIDO:

- VI.1. Características físicas de las rocas
- VI.2. Fluidos en las rocas
- VI.3. Trampas: clasificación
- VI.4. Trampas estructurales
- VI.5. Trampas estratigráficas
- VI.6. Trampas mixtas

VII. LA EXPLORACION PETROLERA

ANTECEDENTES:

Estratigrafía
Petrología Sedimentaria

OBJETIVO:

Que el alumno conozca las premisas fundamentales y su jerarquía en la sedimentarias.

CONTENIDO:

- VII.1. Sistema petrolífero
- VII.2. Métodos de exploración directa
- VII.3. Métodos de exploración indirecta
- VII.4. Concepto de "Play"

VIII. IMPACTO AMBIENTAL POR LA EXPLORACION PETROLERA

ANTECEDENTES:

Estratigrafía
Geohidrología
Geología Estructural

OBJETIVO:

Que el alumno comprenda los riesgos y consecuencias al medio ambiente

CONTENIDO:

- VIII.1. Desastres petroleros
- VIII.2. Contaminación por petróleo y gas
- VIII.3. Estudios de impacto ambiental
- VIII.5. Contaminación durante la explotación

TECNICAS DE ENSEÑANZA:	ELEMENTOS DE EVALUACION:
Exposición oral _____ (X)	Exámenes parciales _____ (X)
Exposición audiovisual _____ (X)	Exámenes finales _____ (X)
Ejercicios dentro de clase _____ ()	Trabajos y tareas fuera del aula _____ (X)
Ejercicios fuera del aula _____ ()	Participación en clase _____ (X)
Seminarios _____ ()	Asistencia a prácticas _____ (X)
Lecturas obligatorias _____ (X)	Otros: _____
Trabajo de investigación _____ (X)	_____
Prácticas de taller o laboratorio _____ ()	_____
Prácticas de campo _____ ()	_____
Otras: _____	_____

ANTECEDENTES	
Asignatura	Clave
GEOLOGIA HISTORICA	0251
GEOQUIMICA	0411
ESTRATIGRAFIA	0189
PETROLOGIA SEDIMENTARIA	0624
GEOHIDROLOGIA	0255
GEOLOGIA ESTRUCTURAL	0252

CONSECUENTES	
Asignatura	Clave
GEOLOGIA DE MEXICO	0319
GEOLOGIA DEL SUBSUELO	0410

Temas de la n

BIBLIOGRAFIA

TEXTO:

TESTOS BASICOS

LANDES, K.K.
"Geología del Petróleo".
Omega, Barcelona, 1988.

TISSOT, P.B. y WELTE, D.H.
"El petróleo su formación y localización".
CONACYT, México, 1978.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BERTRAND, C.C.
"Apuntes de Geoquímica Orgánica Aplicada a la Prospección Petrolera".
DEPFI, UNAM., México, 1987.

HUNT, M.J.
"Petroleum Geochemistry and Geology".
Freeman and Co. San Francisco, 1979.

FIGUEROLA, C.J.
"Tratado de Geofísica Aplicada".
LITROPRINT, Madrid, 1974.

VISHER, G.
"Exploration Stratigraphy".
Visher, Glenss, Pennwell, Oklahoma, 1990.

REVISTAS

AMERICAN ASSOCIATION OF
PETROLEUM GEOLOGISTS.
"Continuing Education Course".
Mole Series, Tulsa, Oklahoma, E.E.U.U.

Propuesta de Temario de Geología del Petróleo**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO****Facultad de Ingeniería**

División de Ingeniería de Ciencias de la Tierra
 Departamento de Geología del Petróleo y Geohidrología
 Geología del Petróleo

**Objetivo General Del Curso**

El alumno conocerá, analizará y explicará las características geológicas por las cuales se originan, migran y acumulan los hidrocarburos, comprendiendo entre ellos al gas, al aceite y a los hidratos de metano. Como parte fundamental se estudiarán los yacimientos de hidrocarburos de México.

Temas

	Tema	horas
I.	INTRODUCCIÓN	3
II.	LA ROCA GENERADORA	6
III.	MIGRACIÓN	6
IV.	LAS ROCAS ALMACENADORAS Y SELLO	9
V.	EVALUACIÓN PETROLERA DE CUENCAS SEDIMENTARIAS	9
VI.	YACIMIENTOS PETROLEROS DE MÉXICO	9
VI.	IMPACTO AMBIENTAL	6
Total		48

Objetivos y contenidos de los temas**I. INTRODUCCIÓN**

Objetivo: El alumno conocerá y analizará los conceptos fundamentales de la Geología del Petróleo, sus relaciones en el contexto social y económico, y su importancia en el país.

- I.1. Definición y alcance de Geología del Petróleo y Geología de Explotación.
- I.2. Evolución histórica de la disciplina
- I.3. El estado actual del petróleo, políticas nacionales e internacionales
- I.4. Distribución geográfica de las provincias petroleras

II. ROCAS GENERADORAS

Objetivo: El alumno conocerá y comprenderá las características de las principales secuencias sedimentarias que tienen potencial generador de hidrocarburos. Explicará los procesos de transformación que experimenta la materia orgánica desde su acumulación hasta su transformación en aceite gas.

- II.1. Teorías sobre el origen del petróleo
- II.2. El ciclo del Carbono
- II.3. Origen, acumulación y preservación de la materia orgánica
- II.4. Características físicas, químicas y biológicas de las rocas generadoras.
- II.5. El kerógeno
- II.6. Generación de hidrocarburos líquidos y gaseosos.
- II.7. Factores geológicos que influyen en la generación

II.8. Los aceites crudos, el gas natural y los hidratos de metano

III. MIGRACIÓN

Objetivo: El alumno conocerá bajo que condiciones, parámetros y en que tipo de rocas se da la movilidad de fluidos dentro de la corteza terrestre.

- III.1. Manifestaciones de hidrocarburos en la naturaleza
- III.2. Tipos de migración
- III.3. Fuerzas que causan la migración
- III.4. Factores que gobiernan la migración

IV. LAS ROCAS ALMACENADORAS Y SELLO

Objetivo: El alumno conocerá y describirá las principales propiedades, características y atributos de secuencias siliciclásticas y de carbonatos como potenciales rocas almacenadoras y sello.

- IV.1. Características petrofísicas
- IV.2. Principales tipos de rocas
- IV.3. Fluidos en las rocas
- IV.4. Definición y clasificación de trampas
 - IV.4.a. Trampas estratigráficas
 - IV.4.b. Trampas estructurales
 - IV.4.c. Trampas mixtas
 - IV.4.d. Trampas de los hidratos de metano

V. EVALUACIÓN PETROLERA DE CUENCAS SEDIMENTARIAS

Objetivo: El alumno analizará y explicará las principales características geológicas de las cuencas sedimentarias con potencial de generar y almacenar hidrocarburos.

- V.1. Sistemas de depósito y secuencias estratigráficas
- V.2. Sedimentación y tectónica de placas
- V.3. Métodos de mapeo de cuencas
- V.4. Sistema petrolero
- V.5. Concepto de Play

VI. YACIMIENTOS PETROLEROS DE MÉXICO

Objetivo: El alumno conocerá y explicará las características geológicas de los yacimientos petroleros de México. Conocerá la metodología que se utiliza en la evaluación de áreas de interés petrolero.

- VI.1. Análisis paleogeográfico del Jurásico al Reciente de México
- VI.2. Cuencas sedimentarias Jurásicas, Cretácicas y Cenozoicas
- VI.3. Yacimientos petroleros del Jurásico
- VI.4. Yacimientos petroleros del Cretácico
- VI.5. Yacimientos petroleros del Cenozoico
- VI.6. Zonas potenciales futuras

VII. IMPACTO AMBIENTAL

Objetivo: El alumno comprenderá los riesgos y consecuencias al medio ambiente por la exploración y explotación de hidrocarburos.

- VII.1. Contaminación por hidrocarburos

- VII.2. Desastres petroleros
VII.3. Estudios de Impacto ambiental por aceite y gas
VII.4. Estudios de Impacto ambiental por hidratos de metano

Práctica

Se propone una práctica de campo obligatoria, dado que la asignatura es de aplicación en un área terminal.

Bibliografía

- Miall Andrew D. 1990. *Principles of Sedimentary Basin Analysis*. Springer, Second Edition, New York.
- Hunt, M. John. 1996. *Petroleum Geochemistry and Geology*. W. H. Freeman and Company, Second Edition, New York.
- Bjorlykke Knut. 1994. *Sedimentology and Petroleum Geology*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- Berkowitz Norbert. 1997. *Fossil Hydrocarbons. Chemistry and Technology*. Academic Press, United States of America.
- Henriet J.P., and Mienert J. 1998. *Gas Hydrates: Relevance to world margin stability and climatic change*. The Geological Society, Special publication No. 137, United States of America.
- Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, A. C. 2001. *Subsistemas Generadores de México*. Volumen XLIX, Nums. 1-2, enero-diciembre, México.
- Pemex, Exploración y Producción. *Las Reservas de hidrocarburos de México, Vol. I y Vol. II*. Pemex, México, D.F.
- Link K. Peter. 2001. *Basic Petroleum Geology*. Society of Petroleum Engineers, OGCI United States of America.
- Jahn, F., Cook Mark and Graham Mark. 1998. *Hydrocarbon Exploration and Production*. Elsevier, United States of America.
- Surdam C.R. 1997. *Seal, Traps, and the Petroleum System*. Memoir 67, American Association of Petroleum Geologists (AAPG).
- Schumacher Dietmar and Abrams A. Michael. 1996. *Hydrocarbon Migration and its Near-Surface Expression*. Memoir 67, American Association of Petroleum Geologists (AAPG).