



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN PETRÓLEO**

**TEMA:**

**“ESTUDIO DE MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN DE YACIMIENTOS  
DE HIDRATOS DE GAS COMO FUTURO USO DE RECURSO  
ENERGÉTICO”**

**PROYECTO PRÁCTICO DEL EXÁMEN COMPLEXIVO  
“TRABAJO DE INVESTIGACIÓN”**

**AUTOR:**

**OSORIO CHÁVEZ FABIÁN PATRICIO**

**TUTOR:**

**ING. ITURRALDE KURE SADI ARMANDO, Msc**

**LA LIBERTAD- ECUADOR**

**2020**

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA**  
**FACULTAD DE CIENCIA DE LA INGENIERÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN PETRÓLEO**

**TEMA:**

“ESTUDIO DE MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN DE YACIMIENTOS  
DE HIDRATOS DE GAS COMO FUTURO USO DE RECURSO  
ENERGÉTICO”

**PROYECTO PRÁCTICO DEL EXÁMEN COMPLEXIVO**

“TRABAJO DE INVESTIGACIÓN”

**Autor:**

OSORIO CHÁVEZ FABIÁN PATRICIO

**TUTOR:**

ING. ITURRALDE KURE SADI ARMANDO, Msc

**LA LIBERTAD - ECUADOR**

**2020**



Santa Elena, 28 de Septiembre del 2020

## CARTA DE ORIGINALIDAD

**Ing. Gutierrez Hinestroza Marllelis, PhD**  
**Directora de la Carrera de Petróleos**  
**Universidad Estatal Península de Santa Elena**

Cumpliendo con los requisitos exigidos, envío a Uds. La Tesina Titulada “**ESTUDIO DE MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN DE YACIMIENTOS DE HIDRATOS DE GAS COMO FUTURO USO DE RECURSO ENERGÉTICO**”, para que se considere la Sustentación, señalando lo siguiente:

1. La investigación es original.
2. No existen compromisos ni obligaciones financieras con organismos estatales ni privados que puedan afectar el contenido, resultados o conclusiones de la presente Investigación.
3. Constatamos que la persona designada como autor es el responsable de generar la versión final de la investigación.
4. El Tutor certifica la originalidad de la investigación y el desarrollo de la misma cumpliendo con los principios éticos.

**Autor:** Fabián Patricio Osorio Chávez

**Firma:** 

**N° de Cédula:** 2450351925

**Correo:** [fabianosorio8@hotmail.com/](mailto:fabianosorio8@hotmail.com)  
[fabian.osoriochavez@upse.edu.ec](mailto:fabian.osoriochavez@upse.edu.ec)

**Tutor:** Ing. Iturralde Kure Sadi Armando, Msc

**Firma:** 

**N° de Cédula:** 0904349453

**Correo:** [siturralde@upse.edu.ec](mailto:siturralde@upse.edu.ec)

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo práctico a Dios por brindarme su apoyo incondicional, a mi madre Elsy, mi padre Javier y a mis hermanos Javier y Nathaly Osorio Chávez que con sus oraciones, consejos y palabras demostraron su confianza en mí y lograron que no decline y concluya exitosamente mi carrera.

## **AGRADECIMIENTO**

Deseo expresar mi gratitud a Dios y a mi familia, por la fortaleza brindada durante todo este tiempo para lograr la meta anhelada, a mis catedráticos quienes con sus conocimientos y sentido de responsabilidad proporcionaron su colaboración, para la realización de este trabajo práctico. De manera muy especial a mi tutor Ing. Sadi Iturralde Kure, por su guía y orientación para el desarrollo de este trabajo.

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA EN PETRÓLEO

**“ESTUDIO DE MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN DE YACIMIENTOS DE  
HIDRATOS DE GAS COMO FUTURO USO DE RECURSO ENERGÉTICO”**

**Autor:** Fabián Osorio Chávez

**Tutor:** Ing. Sadi Iturralde Kure, Msc

**RESUMEN**

Los hidratos de gas son compuestos cristalinos en forma de jaula en que una considerable cantidad de metano es atrapado dentro de una estructura cristalina de agua, en los cuales se forman sólidos a bajas temperaturas y presiones altas. Estos hidratos de gas están distribuidos en las regiones de permafrost (*suelo congelado de las regiones muy frías*) y en regiones en alta mar. Está estimado que las cantidades mundiales de metano provenientes de los hidratos de gas serian el doble de la cantidad de hidrocarburos conocidos en la tierra.

Una comprensión adecuada de los métodos de explotación existentes es importante de ser estudiadas para sus futuras aplicaciones para la producción de gas natural. En el presente trabajo de investigación se revisaron los diferentes métodos de explotación de hidratos de gas. Uno de esos métodos estudiados fue el método de despresurización que consiste en la disminución de la presión por debajo de la presión de estabilidad del hidrato. Otra técnica fue la estimulación térmica en el que su principio básico es de aumentar la temperatura por encima de la temperatura de estabilidad del hidrato. También se está estudiando la técnica de inyección de inhibidores, que en los casos prácticos ha servido de complemento para el método de despresurización.

**Palabras claves:** Hidratos de gas, Disociación, Permafrost, Recurso Energético

**ABSTRACT**

Gas hydrates are cage-shaped crystalline compounds in which a considerable amount of methane is trapped within a crystalline water structure, in which solids are formed at low temperatures and high pressures. These gas hydrates are distributed in permafrost regions (frozen soil of very cold regions) and in offshore regions. It is estimated that the global amounts of methane from gas hydrates would be double the amount of known hydrocarbons on earth.

A proper understanding of existing exploitation methods is important to be studied for future natural gas production applications. In this research paper, the different methods of gas hydrate exploitation will be reviewed. One such method studied is the depressurization method which consists of decreasing the pressure below the hydrate stability pressure. Another technique is thermal stimulation in which its basic principle is to increase the temperature above the hydrate stability temperature. The inhibitor injection technique is also being studied, which in the practical cases has served as a complement to the depressurization method.

**Keywords:** Gas hydrates, Dissociation, Permafrost, Energy Resource

## INDICE GENERAL

<b>CARTA DE ORIGINALIDAD .....</b>	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTO.....</b>	<b>v</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>vi</b>
<b>INDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>ix</b>
<b>INDICE DE TABLAS .....</b>	<b>x</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>

### CAPITULO I

<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>3</b>
1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	3
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3 OBJETIVOS.....	4
1.3.1 OBJETIVO GENERAL: .....	4
1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS: .....	4

### CAPITULO II

<b>2. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....</b>	<b>4</b>
2.1 HIDRATOS DE GAS.....	4
2.2 DISTRIBUCIÓN DE LOS HIDRATOS DE GAS .....	6
2.2.1 HIDRATOS PRESENTES EN ZONAS ÁRTICAS.....	6
2.3 FORMAS EN QUE SE ENCUENTRAN LOS HIDRATOS DE GAS .....	9
2.4 CONDICIONES DE ESTABILIDAD DE LOS HIDRATOS DE GAS.....	10
2.5 POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS HIDRATOS DE GAS .....	12
2.5.1 DISTRIBUCIÓN EN EL ÁMBITO MUNDIAL.....	12
2.5.2 IMPLICACIONES DEL DESARROLLO DE HIDRATOS DE GAS.....	13
2.5.2.1 IMPLICACIONES ECONÓMICAS .....	13
2.5.2.2 IMPLICACIONES DE SEGURIDAD ENERGÉTICA .....	14
2.5.2.3 IMPLICACIONES MEDIOAMBIENTALES.....	15
2.5.2.4 IMPLICACIONES SOCIALES.....	16

### CAPITULO III

<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>17</b>
3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN .....	17
3.2 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	17
3.3 MÉTODOS USADOS EN LA EXPLOTACIÓN DE HIDRATOS DE GAS .....	18
3.3.1 DESPRESURIZACIÓN .....	18
3.3.2 ESTIMULACIÓN TÉRMICA .....	19
3.3.2.1 INYECCIÓN DE FLUIDOS CALIENTES.....	21
3.3.2.1.1 INYECCIÓN DE AGUA CALIENTE .....	21
3.3.2.2 GENERACIÓN DE CALOR IN-SITU .....	24
3.3.2.2.1 MÉTODO DE CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO .....	24
3.3.2.2.2 MÉTODO DE GENERACIÓN CATALÍTICA DE CALOR.....	26
3.3.3 INYECCIÓN DE INHIBIDORES QUÍMICOS .....	27
3.3.3.1 INYECCIÓN DE SALMUERAS .....	28
3.4 APLICACIONES DE METODOS DE EXPLOTACION DE HIDRATOS DE GAS .....	29
APLICACIÓN DEL MÉTODO DE DESPRESURIZACIÓN .....	30
APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ESTIMULACIÓN TÉRMICA .....	32
APLICACIÓN DEL MÉTODO DE INYECCIÓN DE INHIBIDORES.....	33

### CAPITULO IV

<b>4. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>34</b>
4.1 COMPARACIÓN DE MÉTODOS .....	34
4.1.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS .....	35
4.1.1.1 VENTAJAS.....	35
4.1.1.2 DESVENTAJAS.....	36

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA



## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura molecular del hidrato de gas .....	5
Figura 2. Proporciones volumétricas entre el agua y el gas en un hidrato de gas .....	6
Figura 3. Distribución de los hidratos en los sedimentos .....	9
Figura 4. Condiciones de estabilidad para ambientes de permafrost .....	11
Figura 5. Condiciones de estabilidad para ambientes marinos.....	12
Figura 6. Método de Despresurización en zona de permafrost .....	18
Figura 7. Método de estimulación térmica para la producción de gas a partir de hidratos .....	20
Figura 8. Técnicas térmicas para la explotación de yacimientos de hidratos de gas.....	21
Figura 9. Inyección Cíclica de fluidos.....	22
Figura 10. Inyección Continua de fluidos .....	23
Figura 11. Inyección continua de vapor de un yacimiento con hidratos de que recubre una zona de petróleo pesado.....	24
Figura 12. Calentamiento Electromagnético .....	25
Figura 13. Reacción catalítica en la recuperación de gas a partir de hidratos.....	26
Figura 14. Método de inhibidores para la producción de gas a partir de hidratos de gas .....	28
Figura 15. Inyección de agua de mar.....	29
Figura 16. Esquema del yacimiento de Messoyakha .....	30
Figura 17. Sistema de producción de gas por inyección de agua caliente con un par de pozos horizontales .....	32

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Localización de hidratos de gas en Zonas del Ártico .....	7
Tabla 2. Localización de hidratos de gas en zonas marinas .....	9
Tabla 3. Propiedades de la roca del yacimiento Messoyakha .....	31

## INTRODUCCIÓN

La energía es esencial para llegar a lograr objetivos sean estos económicos, sociales o ambientales para el desarrollo humano sostenible. El sistema energético es la combinación de servicios donde se adquiere energía y se entrega a destinos donde se necesite para cumplir esos objetivos, este sistema energético mundial se enfrenta actualmente a una serie de desafíos, relacionados con el aumento de los niveles de consumo, el acceso limitado y la seguridad energética, mientras que otros están relacionados con el medio ambiente, como el cambio climático y la contaminación de los recursos de agua y aire.

Los hidratos de gas son combinaciones de estructuras cristalina similares al hielo con gases naturales (comúnmente metano), son un recurso energético sin explotar hasta ahora. Los recientes programas científicos de evaluación y perforación sugieren que los hidratos de gas se encuentran en abundancia principalmente en entornos marinos, con aproximadamente el 1% de la distribución global de hidratos de gas en ambientes de permafrost.

Los recursos globales de metano en hidratos de gas son enormes, algunas estimaciones sugieren que la cantidad de hidrocarburos ligados a los hidratos de gas puede rivalizar con los recursos energéticos totales contenidos en otras fuentes convencionales de hidrocarburos como el carbón, el gas natural y el petróleo. Dado a los avances en el conocimiento científico sobre los hidratos de gas durante las últimas décadas, así como la innovación continua en las técnicas de recuperación de petróleo y gas, es probable que la producción a gran escala de gas natural a partir de hidratos de gas sea viable en las próximas décadas. Esto podría tener profundas implicaciones para el futuro sistema energético mundial.

Antes de disfrutar de los beneficios que puede brindarnos la explotación de hidratos de gas es necesario tener información sobre los métodos de explotación que existen para que estos yacimientos de hidratos sean un recurso energético rentable. Por lo que en este trabajo de investigación está enfocado en dar una descripción de los hidratos de gas, de las condiciones en que se encuentran, y realizar un estudio sobre los diferentes métodos existentes. En el capítulo I se describirá el planteamiento del problema con su debida justificación, seguido del capítulo II en donde se desarrolla el marco teórico que incluye

toda la información necesaria para ser la base conceptual del tema, en el capítulo III se recopilan los diferentes métodos existentes en la literatura, para luego revisar algunas aplicaciones de estos métodos en casos prácticos a nivel internacional, para que finalmente en el capítulo IV realizar una comparación entre los métodos , identificando las ventajas y falencias de cada uno de ellos.

# **CAPITULO I**

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

Con el aumento de la demanda energética y el agotamiento de los recursos energéticos, los hidratos de gas pueden verse como un combustible que puede satisfacer las necesidades energéticas de las generaciones futuras. Los hidratos de gas son fuente de gas que se encuentra en la estructura similar al hielo cristalino en las regiones de permafrost y debajo del mar en los márgenes continentales exteriores. Se estima que la cantidad total de carbono en forma de hidratos de gas sea casi el doble del contenido de carbono en todas las reservas de combustibles fósiles juntas.

Por ello una decisión de transición energética es el aprovechamiento de hidratos de gas, siendo esta una gran respuesta para los países que buscan alternativas y apuestan por energías renovables y limpias. Pero dado a la escasez de información es necesario realizar investigaciones sobre la naturaleza de los yacimientos de estos hidratos así como sus métodos actuales de explotación, para tener un amplio panorama de este potencial energético.

### **1.2 JUSTIFICACIÓN**

Los hidratos de gas constituyen una potencial fuente de energía, que cobra cada vez mayor importancia dada a la inmensa cantidad de metano almacenada en forma de acumulaciones de hidratos de gas, además de que el gas natural produce el escape menos contaminado de los hidrocarburos en contraste con el petróleo y especialmente el carbón

Debido a los pocos estudios llevados a cabo hasta la actualidad sobre los hidratos de gas, surge la idea para desarrollar este trabajo destinado a brindar la mayor información mediante una investigación exploratoria, centrándonos en el estudio de los métodos existentes para la explotación de yacimientos de hidratos de gas, siendo este un tipo de yacimiento no convencional y en la que la su explotación es diferente a los yacimientos convencionales debido a su estructura sólida y a las condiciones naturales en las que se encuentran. Teniendo presente las bajas investigaciones realizadas de yacimientos no convencionales frente a los convencionales, realizar este tipo de trabajo tomará mayor

relevancia al dar y brindar mayores conocimientos sobre este recurso energético encontrados en estos yacimientos.

El trabajo de investigación tiene como objetivo central realizar un estudio sobre la comprensión de los hidratos de gas, de la misma manera realizar una comparativa para la identificación de ventajas y desventajas sobre los métodos de explotación como lo es la despresurización, la estimulación térmica, la inyección de inhibidores, así como su aplicación para la eficaz explotación de este recurso.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL:**

- Realizar un estudio y comparar los métodos usados para la explotación de hidratos de gas.

#### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS:**

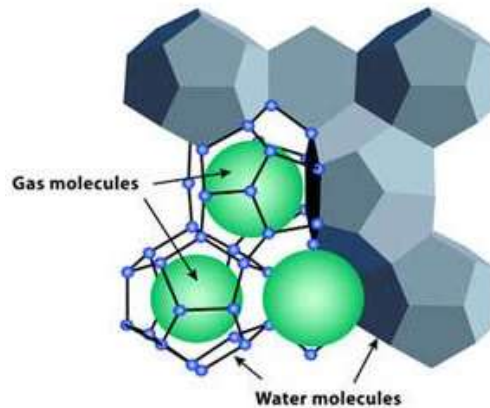
- Conocer el origen de los hidratos de gas y las implicaciones como recurso para garantizar la autosuficiencia energética a nivel mundial.
- Estudiar los diferentes métodos usados en la explotación de hidratos de gas con el fin de identificar sus ventajas/desventajas para su aplicación.
- Analizar las aplicaciones de los métodos que han sido probadas en diferentes países para la explotación de hidratos gas mediante la revisión de casos prácticos a nivel internacional.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO REFERENCIAL**

#### **2.1 HIDRATOS DE GAS**

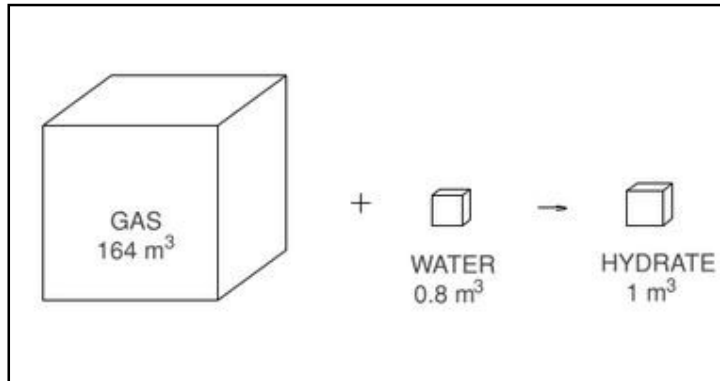
Los hidratos de gas son cristales sólidos similares al hielo, en los que las moléculas de gas principalmente metano, quedan atrapadas en la estructura del agua sólida. Desde las regiones polares hasta las regiones tropicales, los hidratos de gas natural se extienden por todos los márgenes continentales y en las plataformas de todo el mundo, se estima que su contenido de energía excede el de todas las demás fuentes de combustible combinadas.



**Figura 1 Estructura molecular del hidrato de gas**  
Fuente: (MIDAS, 2014)

El hidrato de gas es una sustancia química que consiste en una red de un tipo de molécula que atrapa y contiene a un segundo tipo de molécula (Figura 1). Se forma bajo condiciones muy específicas de temperatura y de presión cuando las moléculas de metano quedan atrapadas físicamente dentro capas de hielo. En el lecho marino profundo, se producen grandes cantidades de metano por la descomposición de la materia orgánica y como un subproducto de la actividad microbiana. A medida que el metano se dirige hacia el fondo marino, llega a una zona conocida como Zona de Estabilidad de Hidratos de Gas (GHSZ), donde las presiones y temperaturas son adecuadas para que el metano quede atrapado como Hidrato de Gas.

A menudo los hidratos de gas actúan como concentradores de gases, por lo tanto, se aumenta la densidad de energía. Para el caso del metano un volumen de hidrato contiene más de 160 volúmenes de gas a presión y temperatura ambiente (Giavarini Carlo, 2011) tal como se muestra en la figura 2.



**Figura 2. Proporciones volumétricas entre el agua y el gas en un hidrato de gas**  
**Fuente: (Giavarini Carlo, 2011)**

## **2.2 DISTRIBUCIÓN DE LOS HIDRATOS DE GAS**

Los hidratos de gas naturalmente se hayan en dos regiones, dentro de las zonas árticas debajo de la zona conocida como permafrost, y en zonas marinas debajo de las plataformas continentales a cientos de metros del fondo marino.

### **2.2.1 HIDRATOS PRESENTES EN ZONAS ÁRTICAS**

Los hidratos de gas presentes en el permafrost están ubicados en zonas como: El sector Norte de Alaska, en el Ártico canadiense y en el norte de Siberia. La presencia de estos hidratos representaría un alto potencial para convertirse en fuentes económicamente rentables de gas natural, por la posición en la que se encuentran que es relativamente cercana a donde existen yacimientos de gas convencionales, por lo que ya se cuenta con infraestructura para su transporte.

Los hidratos formados en las zonas de permafrost están contenidos normalmente dentro de estructuras geológicas estables, por lo cual no representan un riesgo, a menos de que existan factores externos que alteren su estabilidad por lo tanto tienen el mismo potencial de contaminación que el de un yacimiento de gas convencional.

Se presume que algunas de las acumulaciones de hidratos del Ártico poseen buena porosidad y saturación de gas porque se encuentran principalmente en las arenas gruesas con alta permeabilidad intrínseca lo que proporciona una barrera de baja permeabilidad a la fuga de gas durante la extracción. Un ejemplo de un campo en que se ha atribuido



producción de gas natural es el campo de los hidratos de gas Messoyakha situado en Siberia Occidental. (GONZÁLEZ, 2013) .

A continuación, se muestra una tabla donde se enlistan las zonas de permafrost en la que se tiene evidencia de la presencia de hidratos.

<b>LOCALIZACIÓN</b>	<b>EVIDENCIA</b>
Talud Norte, Alaska	Muestras
Delta Mackenzie, Canadá	Registros
Islas del Ártico, Canadá	Registros
Provincia Timan-Pechora, ex-Unión Soviética	Gas
Campo Messokayha, ex-Unión Soviética	Muestras
Cratón Siberiano Este, ex-Unión Soviética	Gas
Noreste de Siberia, ex-Unión Soviética	Gas
Kamchatka, ex-Unión Soviética	Gas

**Tabla 1. Localización de hidratos de gas en Zonas del Ártico**

**Fuente: (Baltazar Montes, 2002)**

**Elaborado por : Fabián Osorio Chávez**

### **2.2.2 HIDRATOS PRESENTES EN ZONAS MARINAS**

Los hidratos se encuentran entre 150 y 750 metros por debajo del lecho marino. A diferencia de las trampas de yacimiento convencionales que se encuentran en a profundidades mayores y en materiales compactos (rocas sedimentarias) en la mayoría de los casos.

Con sus cuantiosas manifestaciones de gas en aguas profundas, el Golfo de México es posiblemente la provincia marítima más prometedora de hidratos de gas en aguas de EE. UU y México. No obstante, no ha habido ni una actividad de investigación de hidratos con objetivos comerciales en ese sitio.

A continuación, se muestra una tabla donde se enlistan las zonas marinas en la que se tiene evidencia de la presencia de hidratos.

<b>LOCALIZACIÓN</b>	<b>EVIDENCIA</b>
Océano Pacífico de Panamá	BSR
Trinchera de Costa Rica (Centro américa)	BSR
Trinchera de Nicaragua (Centroamérica)	Muestras
Trinchera de Guatemala (Centroamérica)	BSR
Trinchera de México (Norteamérica)	Muestras
Cuenca del River de California	BSR
E. Aleutian Trinchera de Alaska	BSR
Beringian Margen de Alaska	BSR
Trinchera de Alaska	BSR
Comedero Nankai en Japón	BSR
Comedero Timor en Australia	Gas
Comedero Hikurangi en Nueva Zelada	BSR
Margen Wilkes Land en Antártida	BSR
Oeste del Mar Ross en Antártida	BSR
Trinchera Perú-Chile en Perú	BSR
Complejo Ridge Barbados en Barbado	BSR
Basamento Colombia en Panamá y Colombia	BSR
Oeste del Golfo de México en México	BSR
Golfo de México en USA	Muestras
Blake Outer Ridge , Sureste de USA	BSR
Rise Continental en Este de USA	BSR
Shelf Labrador en Newfoundland	BSR
Mar Beaufort en Alaska	BSR
Mar Beaufort en Canadá	Registros
Cuenca Svedrup en Canadá	Registros
Pendiente Continental Oeste de Noruega	BSR
Pendiente Continental Suroeste de África	Descensos
Margen Makran, Golfo de Omán	BSR

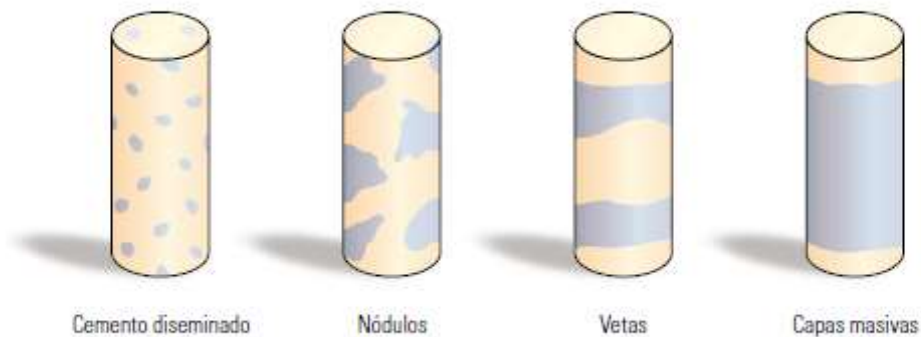
Mar Negro, ex Unión Soviética	Muestras
Mar Caspio, ex-Unión Soviética	Muestras
Mar Okhotsk, ex-Unión Soviética	Muestras
Lago Baikal, ex-Unión Soviética	Muestras

**Tabla 2. Localización de hidratos de gas en zonas marinas**  
**Fuente: (Baltazar Montes, 2002)**  
**Elaborado por: Fabian Osorio Chavez**

### 2.3 FORMAS EN QUE SE ENCUENTRAN LOS HIDRATOS DE GAS

Los hidratos de gas se tiene la posibilidad de encontrar de diferentes maneras, localizándose en especial en espacios porosos primarios, secundarios y además en las fracturas de los sedimentos. La acumulación de los hidratos se ve afectada por la tasa de depositacion de sedimentos, y por la disponibilidad de los recursos necesarios para su formación.

La clasificación de los hidratos de gas se la hace según en la manera en las que dichos se encuentren, siendo estos en forma de cemento diseminado, nódulos, capas masivas y en vetas como se ilustra en la figura siguiente (GONZÁLEZ, 2013)



**Figura 3 Distribución de los hidratos en los sedimentos**  
**Fuente: (Collett, 2000)**

**Cemento diseminado:** Esto ocurre cuando la magnitud del cristal, no excede la medida de los poros que forman el medio, se considera que probablemente se formaron en el sitio del origen del gas.

**Nódulos:** Ocurre cuando la magnitud del cristal cambia a partir de milímetros hasta algunos centímetros, en esta situación se genera la destrucción del espacio poroso en cual estos hidratos pasan actuar como material cementante.

**Vetas:** Ocurre cuando existen un aumento adicional de los nódulos generando acumulaciones de hidratos en maneras de vetas que tienen la posibilidad de llegar a tener decenas de milímetros de espesor y de ancho, estas pueden verse alternadas por capas de sedimentos.

**Capas masivas:** Bajo las condiciones idóneas las acumulaciones de hidratos tienen la posibilidad de conformar grandes depósitos, llegando a tener varios metros de espesor y extenderse por cientos de metros, se forman a lo largo de una zona de falla empujando los bloques hacia los lados.

## **2.4 CONDICIONES DE ESTABILIDAD DE LOS HIDRATOS DE GAS**

Los hidratos de gas natural están formados de manera natural y se puede combinar un suministro suficiente de metano y agua a una alta presión y temperatura subjetivamente baja. El metano en sí es producido por la descomposición del carbono orgánico, y este generalmente migra hacia arriba por medio de sedimentos llenos de agua. En las condiciones idóneas, esto desencadena la formación de hidratos de gas. Los hidratos de gas natural se pueden formar naturalmente en la zona de estabilización de gas natural (ZEHG), que es una formación rocosa permeable, generalmente roca sedimentaria, cuya presión y temperatura corresponden a las condiciones estables del hidrato de gas natural. Los hidratos tienen la posibilidad de existir en el rango de temperatura de 264 a 300 ° K.

- **Condiciones de estabilidad para ambientes de permafrost**

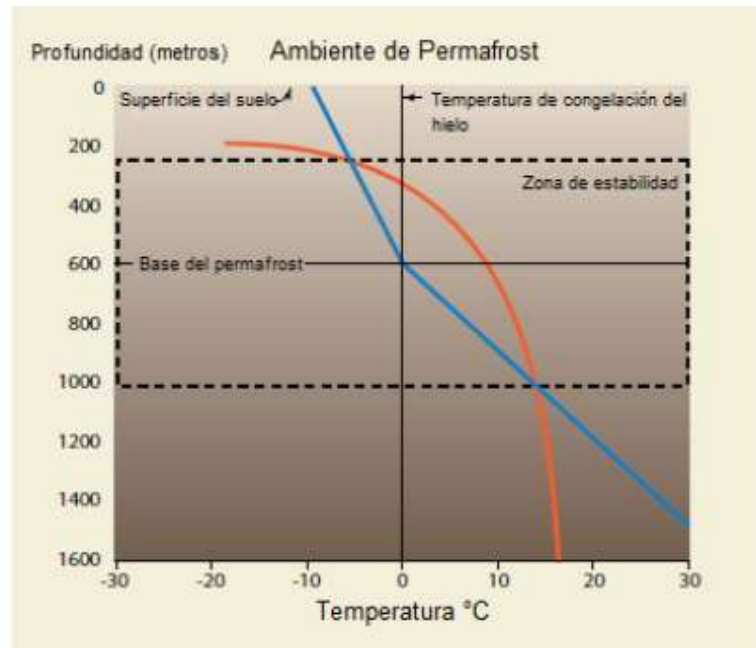
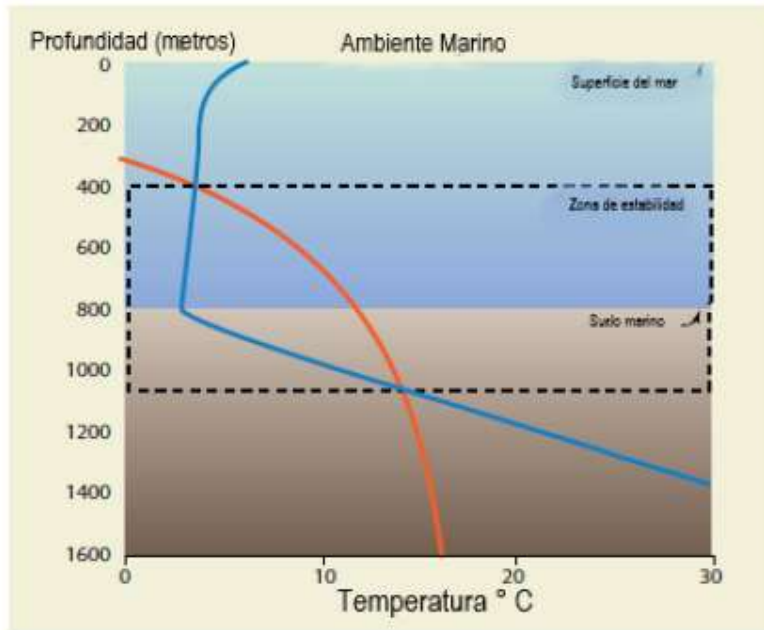


Figura 4 Condiciones de estabilidad para ambientes de permafrost  
Fuente: (Barbosa Hernandez, 2014)

En la región ártica donde las temperaturas del aire frío crean zonas de suelos congelados permanentemente (permafrost), la parte superior de la ZEHG generalmente se encuentra a unos 300-400 metros debajo de la superficie de la tierra. En los océanos o lagos profundos donde se generan altas presiones de 300-500 metros o más de agua suprayacente, la parte superior de la ZEHG se encuentra dentro de la columna de agua, y la base está a cierta distancia debajo del fondo del mar.

- **Condiciones de estabilidad para ambientes marinos**

El hidrato puede existir a profundidades donde la temperatura (curva azul) es menor que la temperatura máxima estable de los hidratos de gas (determinada por la curva de estabilidad del hidrato de color naranja). La presión y la temperatura aumentan a medida que aumenta la profundidad de la Tierra, y aunque los hidratos pueden existir a temperaturas más cálidas cuando la presión es alta (curva naranja), la temperatura en la Tierra (curva azul) se calienta demasiado para que el hidrato sea estable, lo que limita la estabilidad del hidrato a la parte superior ~ 1 km o menos de sedimento.



**Figura 5 . Condiciones de estabilidad para ambientes marinos**  
Fuente: (Barbosa Hernandez, 2014)

## 2.5 POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS HIDRATOS DE GAS

### 2.5.1 DISTRIBUCIÓN EN EL ÁMBITO MUNDIAL

A lo largo de investigaciones y expediciones se ha podido hacer detecciones de hidratos de gas en diferentes zonas del mundo por medio de indicadores geofísicos, geológicos y geoquímicos. Se tienen registros de aproximadamente 50 zonas de presencia de Hidratos de Gas en zonas marinas y 7 en zonas de permafrost.

El crecimiento del interés de los yacimientos de hidratos de gas favorecerá a los países con un alto consumo interno de gas como por el ejemplo Canadá, el cual posee un consumo anual de 115,7 billones de metros cúbicos  $Gm^3$  ( $4.3 Tft^3$ ), siendo el quinto mayor consumidor de este recurso, después de Irán y China. Los hidratos de gas podrían suplir la necesidad de consumo de gas por un periodo de promedio prospectivo de 500 años.

De la misma forma Estados Unidos antecede a Japón en las investigaciones referente a los hidratos de gas y así mismo tiene la mayor densidad de gas a través de este recurso, contando con 256 trillones de metros cúbicos  $Tm^3$  ( $9060Tft^3$ ). Este desarrollo es motivado por ser el mayor consumidor mundial de gas con una tasa anual de  $817.1 Gm^3$  ( $28.8Tft^3$ )

según datos obtenidos en el 2018 y con cerca de tan solo 14 años de reservas restantes. Se podría suplir la demanda energética del país hasta unos 300 años. Las reservas referentes al golfo de México están incluidas en un porcentaje de las de Estados Unidos, los cuales se reparten de la siguiente manera: 52.8 % en los mares de Alaska, 19.1% en el pacífico occidental, 11.9% en el golfo de México, y 0.2% en tierra de Alaska.

En el ártico occidental, la cuenca del ártico del interior de Alaska y el noreste de Canadá tienen  $3.85 \times 10^5 \text{ km}^2$  de permafrost continuo y de gas sin descubrir. La cuenca del Ártico de Alaska tiene 725 mayor volumen de gas sin descubrir que la cuenca del interior del noroeste del de Canadá a pesar de ser solo dos tercios de su tamaño, Por ende, la cuenca del Ártico de Alaska es más prospectiva que la del noroeste de Canadá con 16 trillones de metros cúbicos,  $\text{Tm}^3$  ( $590 \text{ Tft}^3$ ), de otra manera el gas de hidrato en permafrost podría ser considerado el 1% ( $37 \text{ Tm}^3 - 1313 \text{ Tft}^3$ ) global de este recurso. (URBINA BUSTAMANTE, 2019)

## **2.5.2 IMPLICACIONES DEL DESARROLLO DE HIDRATOS DE GAS**

Al considerar la energía para el desarrollo sostenible, entran en juego los siguientes factores:

- Impactos económicos, como impulsar la productividad para un crecimiento económico sostenible.
- Consideraciones geopolíticas, como la seguridad energética.
- Impactos ambientales como la contaminación del aire y las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Impactos sociales como mejorar el nivel de vida y mejorar la seguridad.

### **2.5.2.1 IMPLICACIONES ECONÓMICAS**

Comprender el impacto económico de los hidratos de gas implica evaluar una amplia gama de variables. Los hidratos de gas son una fuente potencialmente vasta de gas natural. Uno de los aspectos más atractivos de esta nueva fuente potencial de gas es que los grandes reservorios pueden distribuirse ampliamente en entornos marinos y de permafrost en todo el mundo, incluso en aquellas regiones con el mayor crecimiento esperado en demanda de energía. Los posibles beneficios directos del mercado de los recursos de hidratos de gas se derivan fundamentalmente de la venta del gas natural producido. Los

recursos adicionales de gas natural podrían traducirse no solo en una actividad económica nueva y ampliada, empleo, y pagos de impuestos y regalías, entre otros beneficios, sino también en disponibilidad de energía adicional, mitigación de los precios de la energía y disminución de la volatilidad de los precios.

La investigación y el desarrollo de los hidratos de gas también proporciona información sobre la naturaleza de los riesgos geográficos relevantes para la perforación convencional de petróleo y gas con importantes impactos económicos en el desarrollo de las aguas profundas y la energía del Ártico. Además, dada la naturaleza fundamental de gran parte de la investigación y el desarrollo continuos de hidratos de gas, nuevos esfuerzos destinados a permitir la producción generarán conocimiento científico sobre el desarrollo y la naturaleza física / química de los sedimentos que contienen hidratos de gas. El valor científico y, en última instancia, económico de este conocimiento podría ser potencialmente considerable.

#### **2.5.2.2 IMPLICACIONES DE SEGURIDAD ENERGÉTICA**

El suministro ininterrumpido y accesible de servicios de energía vital es una alta prioridad para todas las naciones. Sin embargo, el concepto de seguridad energética depende en gran medida del contexto. Para la mayoría de los países industrializados, la seguridad energética está relacionada con la dependencia de las importaciones. Muchas economías emergentes sin recursos energéticos suficientes tienen vulnerabilidades nacionales, como la capacidad inadecuada y el rápido crecimiento de la demanda. En muchos países de bajos ingresos con una falta similar de recursos energéticos suficientes, las vulnerabilidades de oferta y demanda se superponen, lo que las hace especialmente inseguras.

Se puede lograr una mayor seguridad energética para las regiones mediante un mayor uso de las fuentes de energía domésticas y aumentando la diversidad y la capacidad de recuperación de los sistemas energéticos. Como fuente adicional de energía primaria, el desarrollo de hidratos de gas podría aumentar la diversidad y la participación doméstica de la energía primaria en muchas partes del mundo, disminuyendo potencialmente la dependencia de las importaciones.

El petróleo se ubica por delante de la electricidad en términos de consumo final de energía y sigue siendo la forma de suministro de energía dominante en el mundo para la economía



en general, por lo que es esencial para la seguridad. Las preocupaciones por el suministro de gas natural son principalmente regionales, debido al papel limitado del gas natural en el comercio mundial. Sin embargo, el comercio de gas natural licuado conecta cada vez más los mercados de gas natural a nivel mundial. La transición hacia el uso de gas en la generación de electricidad podría generar mayores problemas de seguridad energética debido a la mayor dependencia de las importaciones.

Los hidratos de gas parecen estar ampliamente distribuidos en todo el mundo y, por lo tanto, son muy atractivos para los países que no cuentan con recursos energéticos domésticos convencionales. A medida que los recursos de hidratos de gas se encuentran cerca de muchas de las economías más grandes y de crecimiento más rápido del mundo, como China, India, Japón y Estados Unidos, brindan oportunidades para mejorar la seguridad energética al reducir la dependencia de estos países en las importaciones de energía. A nivel mundial, este aumento en la medida de la autosuficiencia puede tener un efecto atenuante sobre la posible discordia futura resultante de la competencia por el acceso a fuentes de energía externas.

### **2.5.2.3 IMPLICACIONES MEDIOAMBIENTALES**

El metano es un poderoso gas de efecto invernadero. Las actividades de extracción y recolección de gas natural conducen directamente a emisiones de metano a través de fugas durante las actividades de perforación, completación y estimulación. En tuberías de transporte y otras infraestructuras. La escala de estos impactos en la extracción de gas no convencional no se conoce bien, ni está claro si la producción de hidrato de gas tendrá efectos similares.

Cuando el metano derivado de hidrato de gas se quema, produce dióxido de carbono, como lo haría cualquier hidrocarburo. Por lo tanto, contribuirá a las emisiones de carbono. Sin embargo, la cantidad de dióxido de carbono por unidad de energía liberada que se produce durante la combustión del metano es hasta un 40% menor que la producida por el carbón o aproximadamente un 20% menor que el petróleo. Debido a esta eficiencia, cualquier desplazamiento neto de combustibles con mayor emisión de gases de efecto invernadero por metano dará como resultado una mitigación neta de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. El gas natural emite menos contaminantes cuando se quema, incluyendo menos partículas, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno.

Además, no produce productos de desecho que requieran gestión, como cenizas de carbón o desechos nucleares.

La investigación de producción y los estudios de desarrollo sugieren que los yacimientos de hidratos de gas en entornos marinos y de permafrost se pueden producir utilizando técnicas y métodos ya empleados por la industria de hidrocarburos en todo el mundo. Por lo tanto, es razonable anticipar que las consideraciones ambientales también serán similares. Es probable que los problemas cíclicos incluyan la mitigación de peligros, la interrupción de ecosistemas sensibles y los impactos acumulativos del desarrollo.

Es de destacar que los hidratos de gas generalmente se encuentran a profundidades más bajas que la mayoría de los reservorios de gas que producen actualmente. En entornos marinos, esta poca profundidad y la falta asociada de consolidación de los estratos del huésped significan un mayor potencial de hundimiento del fondo marino. Como resultado, este impacto potencial se está considerando de cerca en los programas iniciales de investigación y desarrollo de campo. Finalmente, si bien se pueden estudiar las tasas y los costos económicos de la producción de hidratos de gas, las implicaciones ambientales pueden ser más difíciles de estimar.

#### **2.5.2.4 IMPLICACIONES SOCIALES**

A medida que la ciencia y la industria trabajan para encontrar nuevas fuentes de energía, es importante comprender las implicaciones sociales del desarrollo de recursos potenciales. El tamaño del recurso, su viabilidad económica y sus impactos ambientales juegan un papel en la determinación del verdadero valor de los hidratos de gas para la sociedad.

Los posibles impactos sociales positivos de la explotación de hidratos de gas incluyen niveles de vida mejorados y mayor seguridad tanto en países desarrollados como en desarrollo. Especialmente en los países en desarrollo, una mayor explotación local de gas natural tiene el potencial de mejorar la infraestructura para la electrificación y todas las necesidades domésticas. Los beneficios potenciales de las operaciones de hidratos de gas gestionados de manera responsable incluyen el aumento del empleo local, la transferencia de habilidades técnicas y comerciales, el desarrollo de la capacidad local y una participación en los ingresos fiscales a nivel local.

## **CAPITULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN**

El presente trabajo de investigación se considera de tipo exploratoria debido a que está centrado estudiar un tema poco conocido respaldándonos con el material literario que exista a su vez esta investigación representa uno de los primeros acercamientos hacia el estudio de Hidratos de gas que han sido poco abordados, produciendo a su vez un punto de partida para realizar investigaciones de mayor profundidad.

#### **3.2 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

El trabajo de investigación se enfoca en dar toda la información que se tiene hasta la fecha sobre los métodos existentes para la explotación de Hidratos de gas. Para la realización del presente estudio se llevó a cabo la siguiente metodología:

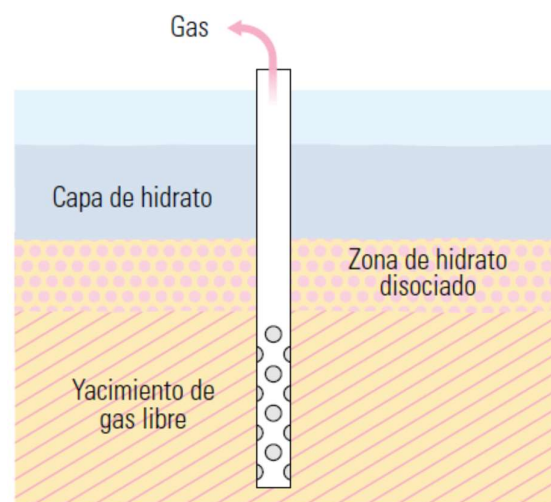
- Una recopilación de material bibliográfico existente hasta la actualidad sobre los métodos de explotación, en esta fase las actividades comprendidas fueron desarrolladas a través de búsqueda de información derivada de fuentes como tesis de grado, consultas a libros relacionados con el tema, investigación y artículos publicados a nivel internacional.
- Revisión de casos de estudio a nivel internacional en donde se ha llevado a cabo la aplicación de los métodos estudiados.
- Interpretación de la información recopilada para una posterior presentación de los resultados al realizar una comparación de las condiciones para la aplicación de los métodos de estudio, mostrando ventajas y desventajas de la implementación de cada método.
- Por último, se procederá a dar las debidas conclusiones y recomendaciones del trabajo realizado.

A continuación, se presenta los métodos usados actualmente en la explotación de hidratos de gas.

### 3.3 MÉTODOS USADOS EN LA EXPLOTACIÓN DE HIDRATOS DE GAS

#### 3.3.1 DESPRESURIZACIÓN

La despresurización es un método económico y común siendo uno de los más recomendados actualmente. La técnica de despresurización de hidratos implica en exponer los hidratos a un entorno de baja presión, por debajo del valor de equilibrio trifásico (hidrato, agua líquida y vapor de hidrocarburo), donde son inestables (alterando su equilibrio) y se descomponen en metano y agua (Barbosa Hernandez, 2014)



**Figura 6 Método de Despresurización en zona de permafrost**  
Fuente: (Collett, 2000)

Este método implica la inducción de la disociación del hidrato mediante la despresurización, que se logra al reducir la presión del hidrato en la zona estable, lo que significa la reducción de la presión dentro del pozo haciendo que el hidrato sea inestable, el propósito es reducir la presión en la zona de gas libre por debajo de la zona estable descomponiendo así el hidrato que se encuentra dentro de la base de la zona de estabilidad. (Demirbas, 2010)

Durante el proceso de despresurización, los hidratos sometidos a condiciones bajas de presión se vuelven inestables, descomponiéndose en metano y agua, en este caso el metano liberado se puede recuperar mediante tecnologías convencionales. Este método de despresurización implica la perforación direccional en la zona de abajo del gas libre, porque a medida que es producido el gas libre, el hidrato ubicado arriba se despresuriza

y libera el gas. La eliminación continua del gas producido mantiene la presión provocada por la disociación de la base de la zona de hidratos.

Para el proceso de despresurización, el yacimiento tendrá un comportamiento de sistema cerrado sin límites, por lo que se deben considerar los siguientes factores:

1. Una vez que la presión del yacimiento cae por debajo de la presión de disociación y la presión del yacimiento, el hidrato se disociara, permitiendo que el gas fluya directamente hacia la zona de gas libre.
2. La descomposición de los hidratos es proporcional a la tasa de despresurización siguiendo un modelo cinético de primer orden.
3. La expansión de la roca y del agua durante la producción del gas natural se consideran insignificantes.
4. El modelo ignora la transferencia de calor entre el yacimiento y sus alrededores.
5. El yacimiento es producido por un pozo ubicado en un yacimiento de gas convencional.

Los mecanismos importantes en la despresurización de los hidratos de gas son: La disociación, transferencia de calor incluida la conducción por agua y gas. Se debe considerar que al momento de que se forma el hielo, se reduce la permeabilidad al gas lo que afecta directamente su producción.

El método de despresurización cuenta con algunos inconvenientes, esto se debe a que la disociación del hidrato requiere a una gran cantidad de energía, considerando que la temperatura del yacimiento bajará cuando se reduzca la presión, la temperatura bajara en algunos casos hasta 0°C, en estas condiciones el hielo y el gas se disociaran creando condiciones desfavorables porque el hielo puede bloquear la formación y detener el proceso de disociación. Por lo tanto, debe usarse la despresurización en yacimientos que tengan temperaturas de 0°C.

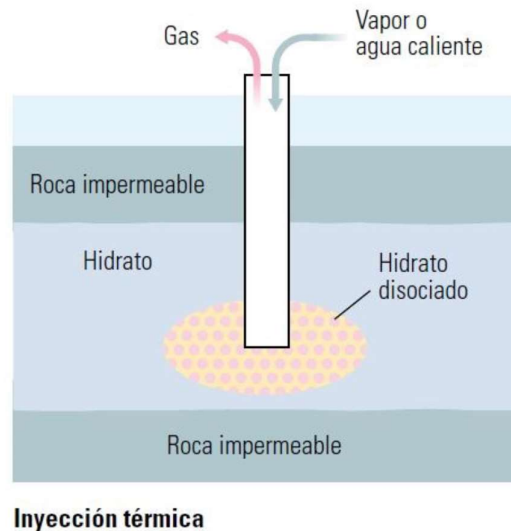
### **3.3.2 ESTIMULACIÓN TÉRMICA**

Este método consiste en cambiar las condiciones de temperatura para poder provocar cambios en la estabilidad térmica, en este caso la fuente de calor se coloca directamente como agua caliente, vapor inyectado o cualquier tipo de líquido caliente o se coloca

electrónicamente. La fuente de calor proporcionada se aplica a la zona de estabilización del hidrato, aumentando así su temperatura, disociando el hidrato.

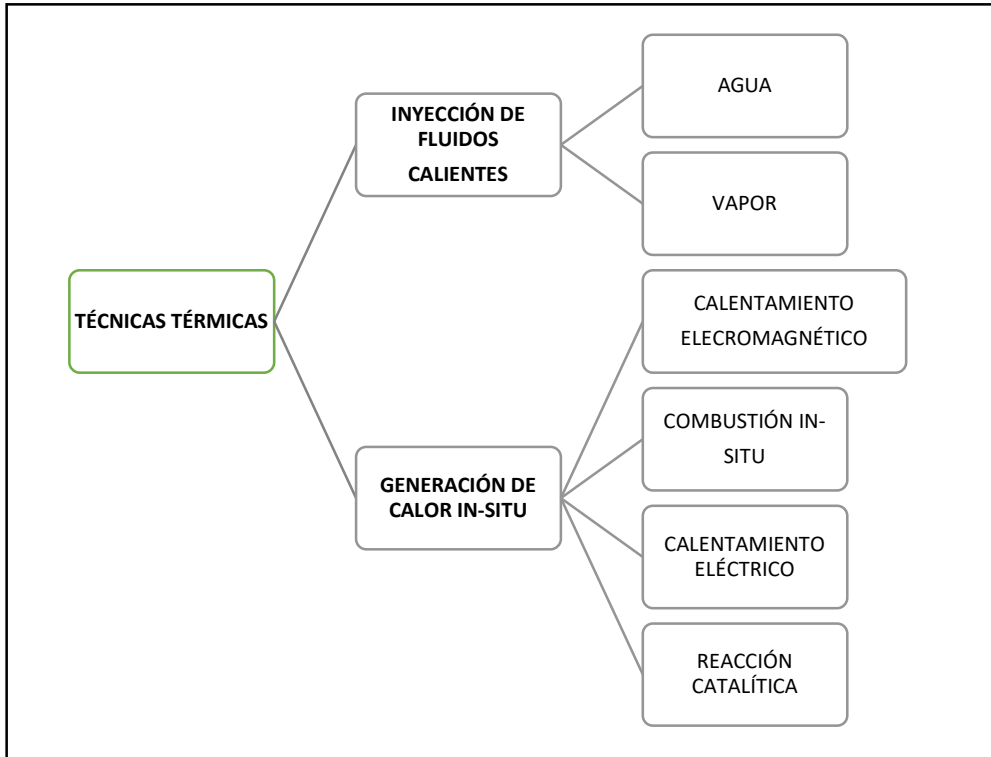
El principio básico del método de estimulación térmica es liberar energía en la capa donde se encuentra el hidrato de metano para así poder disociar el gas.

La descripción del proceso de estimulación térmica es la siguiente: se empieza bombeando vapor o agua caliente al pozo perforado para modificar la estructura cristalina del gas encerrado en el mismo, y así se pueda liberar el metano que este contenido en ella y que el gas sea bombeado desde el yacimiento hacia la superficie por medio de otro pozo. Una vez en el pozo, el gas natural se puede producir con tecnología convencional teniendo en cuenta las condiciones del pozo y la formación que atraviesa. (GONZÁLEZ FRANCO, 2013)



**Figura 7. Método de estimulación térmica para la producción de gas a partir de hidratos Fuente: (Collett, 2000)**

La Figura 8 muestra la clasificación de las técnicas térmicas para la explotación de yacimientos de hidratos de gas, estos se subdividen en: inyección de fluidos calientes y la generación de calor in-situ. La mayoría de estas técnicas no poseen muchas prácticas en campos.



**Figura 8. Técnicas térmicas para la explotación de yacimientos de hidratos de gas**  
 Elaborador por: Fabian Osorio Chavez

### **3.3.2.1 INYECCIÓN DE FLUIDOS CALIENTES**

En esta técnica se suministra calor al yacimiento inyectando fluido caliente (agua o vapor) para así elevar la temperatura hasta la temperatura de equilibrio del hidrato provocando la disociación.

La energía térmica se libera en la formación de hidrato de metano para disociar el gas, este proceso produce un buen balance neto, porque la energía térmica requerida para la disociación es aproximadamente el 6% de la energía contenida en el gas liberado.

#### **3.3.2.1.1 INYECCIÓN DE AGUA CALIENTE**

Esta técnica consiste en inyectar agua previamente calentada en la superficie para romper la estabilidad del hidrato elevando la temperatura del yacimiento por encima de la temperatura de equilibrio, para que sea exitosa la inyección se debe de tomar en cuenta las siguientes condiciones:

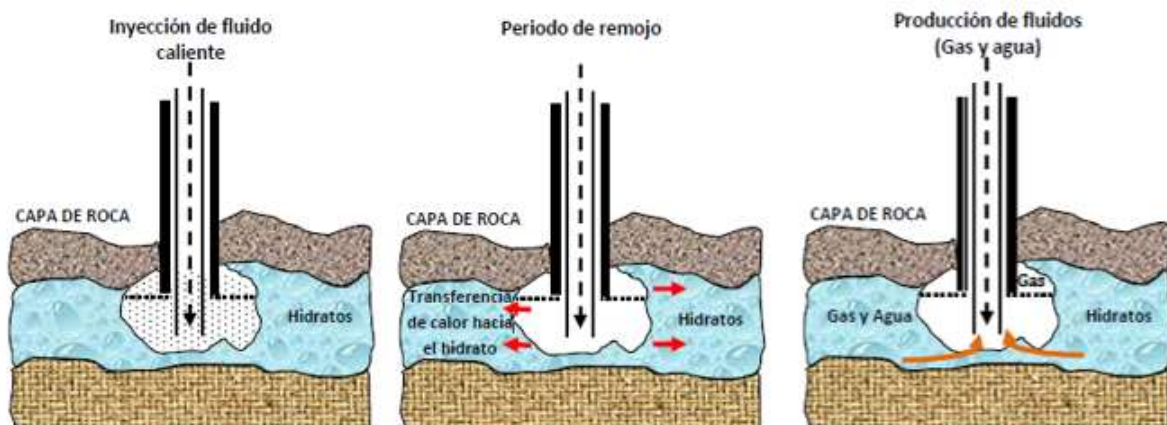
- La inyectabilidad suficiente de la formación, hace que la inyección de agua sea factible, de lo contrario, será necesaria la fracturación hidráulica para lograr una gran cantidad de penetración de agua en el yacimiento y obtener la disociación.
- Para minimizar la pérdida de calor de la formación, la formación debe tener un espesor considerable.

La inyección de agua caliente se la puede realizar de forma cíclica o de forma continua:

### 🚦 Inyección cíclica

Esta inyección se realiza por el mismo pozo en tres periodos diferentes:

1. Periodo de inyección: Se inyecta el fluido previamente calentado
2. Periodo de remojo: Se mantiene el pozo cerrado en un tiempo determinado, para que el fluido inyectado y el hidrato de gas puedan intercambiar calor y realizar la disociación.
3. Periodo del gas disociado.



**Figura 9. Inyección Cíclica de fluidos**  
**Fuente: Barbosa Hernández, 2014**

### 🚦 Inyección continua

Para este tipo de inyección es necesario un arreglo de pozos productores e inyectoras, los cuales se utilizan para inyectar agua y extraer gas disociado, respectivamente. La permeabilidad in-situ de la mayoría de los yacimientos de hidratos es muy baja, por lo que, debido a la fractura del pozo, es imposible inyectar agua caliente a la tasa alta necesaria con una eficiencia térmica aceptable, ya que el agua inyectada puede migrar



directamente al pozo de producción y una pequeña parte de la energía térmica se utilizara para la disociación de los hidratos, lo que una menor eficiencia térmica.

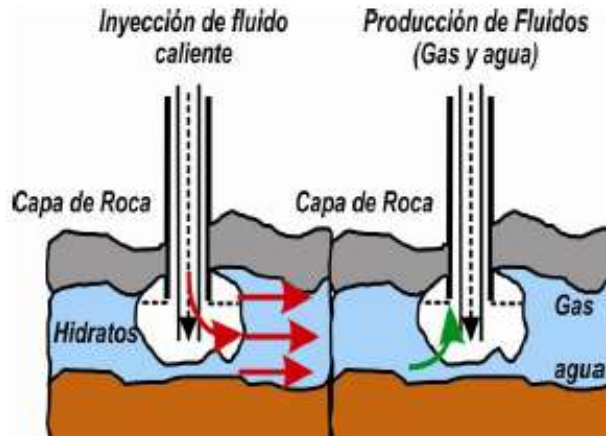


Figura 10. Inyección Continua de fluidos  
Fuente: Barbosa Hernández, 2014

### 3.3.2.1.2 INYECCIÓN DE VAPOR

Esta técnica es común para la recuperación de crudos pesados, y que se adaptó para ser aplicado en los yacimientos de hidratos de gas. Esta técnica muestra una mayor inyectabilidad, pero en comparación a la inyección de agua las pérdidas de calor son mayores. Se la realiza en forma continua y de forma cíclica.

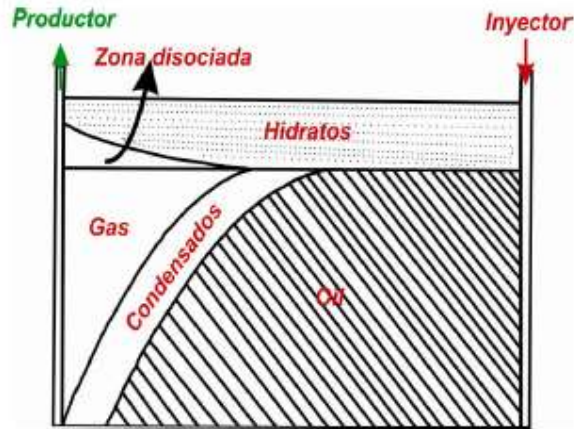
#### 🚦 Inyección cíclica de vapor

Este proceso es similar a la de inyección de fluidos calientes al presentar los mismos periodos. Se inyecta vapor dentro de la zona donde está localizado los hidratos en el yacimiento causando la disociación cerca de la cara del pozo.

#### 🚦 Inyección continua de vapor

La diferencia de esta técnica con de la inyección de agua, son la gran inyectabilidad de vapor en contraste a la de la inyectabilidad del agua y las mayores pérdidas de calor generada en la inyección de vapor.

Para los yacimientos donde existen hidratos de gas, la inyección continua de vapor se visualiza de la siguiente manera: Inicialmente cuando el vapor penetra la zona de petróleo pasará rápidamente a través de la parte superior del yacimiento, el hidrato se disociará en agua y gas cuando entre en contacto con la parte superior de la capa de vapor. Los hidratos se consideran relativamente impermeables, por lo que los depósitos comenzarán a formarse delante del frente de vapor. (Camilo & Isdwar, 2008)



**Figura 11. Inyección continua de vapor de un yacimiento con hidratos de que recubre una zona de petróleo pesado**  
**Fuente: Barbosa Hernández, 2014**

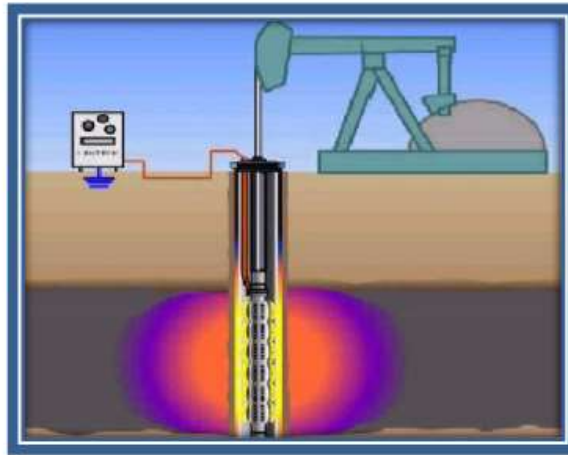
La zona de disociación actúa como una zona ladrona debido a que posee mayor permeabilidad. Debido a la disociación del hidrato, el gas generado in-situ aumentará la presión de la zona de vapor, lo que puede tener diversos efectos, por ejemplo, el gas disociado del hidrato actuará como mecanismo de extracción por solvente; al banco de agua caliente aumenta su tamaño a medida que se condensa el vapor, esto mejora la eficiencia de barrido de la inyección de vapor y el gas disociado reduciría la viscosidad y densidad del crudo.

### **3.3.2.2 GENERACIÓN DE CALOR IN-SITU**

En la producción de Yacimientos de hidratos de gas uno de los principales mecanismos es la generación de calor para disociar los hidratos. Este calor es necesario para compensar el efecto endotérmico de la disociación de los hidratos. Al generar calor usando algunos de los métodos que se tratará a continuación, será posible evitar la pérdida de calor en el pozo, lo que resultará en una mayor eficiencia del proceso.

#### **3.3.2.2.1 MÉTODO DE CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO**

Este método consiste en irradiar ondas electromagnéticas fuertes de alta frecuencia (HF EMW), desde un electrodo ubicado en el fondo del pozo a un medio adyacente (una formación que contiene hidratos de gas) para lograr la disociación calentando estos hidratos.



**Figura 12. Calentamiento Electromagnético**  
**Fuente: Dorelys & Pérez, 2013**

Makagon Yuri<sup>1</sup> interpreta que cuando las ondas electromagnéticas se propagan en un yacimiento de hidratos, interactúan con las moléculas existentes para generar fuentes de calor, fuerzas y momentos electromagnéticos distribuidos por todo el volumen del depósito.

La existencia de estos campos electromagnéticos de alta frecuencia tiene un impacto significativo en determinados fenómenos físicos y químicos tales como: la electrocapilaridad, las tensiones superficiales, algunos procesos electrocinéticos, filtraciones en el medio poroso, procesos de difusión y adsorción.

La interacción entre los yacimientos de hidratos y las ondas electromagnéticas de frecuencias altas (HF EMW) dan como resultado cambios en las condiciones termodinámicas dentro del yacimiento, por ejemplo: el aumento de la temperatura debido a las fuentes internas de calor, cuando la temperatura alcanza el valor necesario para la disociación el hidrato empieza a descomponerse, el agua y el gas formaran regiones de altas presiones promoviendo la filtración hacia el pozo.

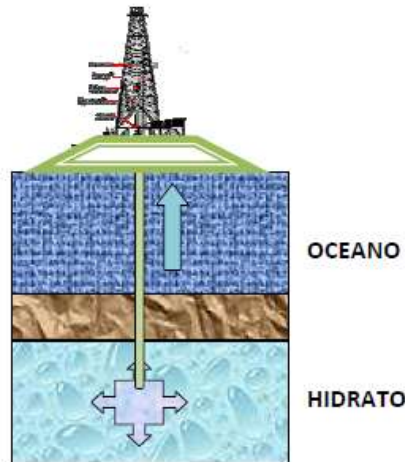
El principio de este método a diferencias en yacimientos convencionales, es de suministrar la energía directamente al yacimiento por medio de las ondas electromagnéticas (HF EMW) y no por hidrodinámica o transferencia de calor, por lo que la distribución de temperatura dentro del estrato será determinada por las propiedades electro-físicas del yacimiento.

---

<sup>1</sup> Makagon, Yuri. Hydrates of Hydrocarbons.

### 3.3.2.2 MÉTODO DE GENERACIÓN CATALÍTICA DE CALOR

En comparación con la inyección de fluidos calientes, este método implica menos pérdidas de calor. Involucra el uso de reacciones catalíticas exotérmicas para disociar los hidratos proporcionando el calor necesario.



**Figura 13. Reacción catalítica en la recuperación de gas a partir de hidratos**  
Fuente: (Camilo & Isdwar, 2008)

El calor generado por la disociación de los hidratos se obtiene directamente de la zona de los hidratos a través de la reacción catalítica exotérmica de oxidación del gas natural. Estos procesos pueden ser por combustión catalítica parcial y oxidación parcial para síntesis de gas. El proceso de oxidación parcial para síntesis de gas combina la generación de calor para la disociación de los hidratos, también es utilizado para la obtención de hidrocarburos más pesados como por ejemplo (gasolinas, lubricantes, etc.)

Los otros métodos para la generación in-situ son los de la combustión in-situ que este proceso es similar al que se utiliza en procesos de recobro de crudos pesados, y también existe el calentamiento eléctrico, que su principio se basa en la localización de una resistencia eléctrica en el fondo del pozo que generaría el calor necesario para la disociación del hidrato.

### 3.3.3 INYECCIÓN DE INHIBIDORES QUÍMICOS

Este método implica desplazar el hidrato de gas hacia una condición de equilibrio más allá de la zona de estabilidad del hidrato, esto gracias a la inyección de un inhibidor químico en estado líquido junto al hidrato. Para ello, el yacimiento debe tener una buena porosidad, este proceso se lleva a cabo inyectando inhibidores como el metanol en la zona de hidratos de gas, que alteran el equilibrio presión-temperatura y la volverán inestable. Los hidratos provocan la disociación del área de contacto entre el inhibidor y el hidrato.

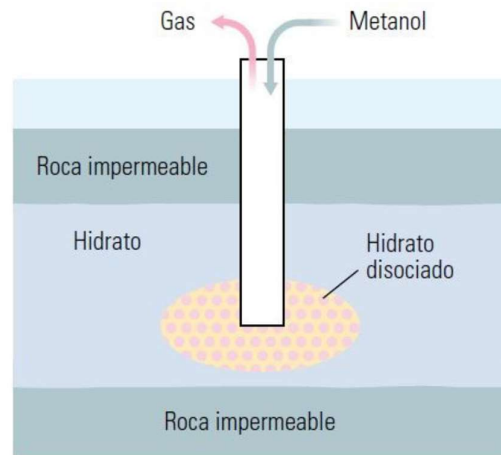
El proceso de producción de gas en hidratos con inhibidores puede constar de 4 etapas.

1. La inyección inicial
2. Dilución del inhibidor
3. Disociación del hidrato
4. Salida del gas

Independientemente del proceso que se utilice la producción de gas a partir de hidratos tendrán varios efectos debido a factores geológicos y geofísicos que incluyen:

- Tipo de fluido libre (gas natural o agua) en contacto con el hidrato de gas.
- Espesor de la fase líquida libre.
- Parámetros que determinan la estabilidad del hidrato de gas sean estos: temperatura, presión, composición del gas y salinidad.
- Yacimientos con permeabilidad y porosidad.
- La disponibilidad de un sello.
- Concentración del gas confinado dentro del hidratos de gas.
- La heterogeneidad del yacimiento de hidratos de gas (distribución espacial de la concentración de hidrato)

En la figura 14 se muestra de forma esquemática el proceso de producción de metano a partir de hidratos utilizando un inhibidor (en este caso metanol).



**Inyección de un inhibidor**

**Figura 14. Método de inhibidores para la producción de gas a partir de hidratos de gas Fuente: (Collet S., 2000)**

Las salmueras también pueden ser utilizadas en este tipo de procesos, ya que representan una opción más económica además de tener un desempeño similar a inhibidores como el glicol y etanol, que son los más utilizados para este tipo de esquemas de producción.

### **3.3.3.1 INYECCIÓN DE SALMUERAS**

La salmuera permite reducir la temperatura de disociación, lo que reduce los requisitos de calor y reduce las pérdidas a las formaciones adyacentes. El calentamiento con salmueras se lo puede realizar por medio de inyecciones cíclicas o continuas teniendo similitud a la inyección de agua y vapor.

En entornos cercanos al océano generalmente es común encontrar salmueras calientes en yacimientos geotermales cercanos a los yacimientos de hidratos de gas, en los que se encuentran temperaturas de 300°F y 700°F a profundidades de 3280 pies y 4220 pies con salinidades entre el 0.5-2 % en su peso.

El proceso en estos ambientes se describe en siguiente figura:

El paso del agua de mar es permitido que pase por medio del dispositivo (36), hacia la tubería (20) siendo concéntrica con el revestimiento (10), la salmuera descenderá hacia el fondo del pozo (22) entrando en contacto con los hidratos (18) logrando la disociación, tanto el agua, el gas y las salmueras serán retiradas por el anular (38), la salmuera es devuelta al mar (34) y el gas será extraído a través de una válvula (44) comprimido, luego de ya iniciada la circulación continuará por si sola, debido a la menor columna hidrostática en el anular (38) causada por las burbujas del gas liberado (40).

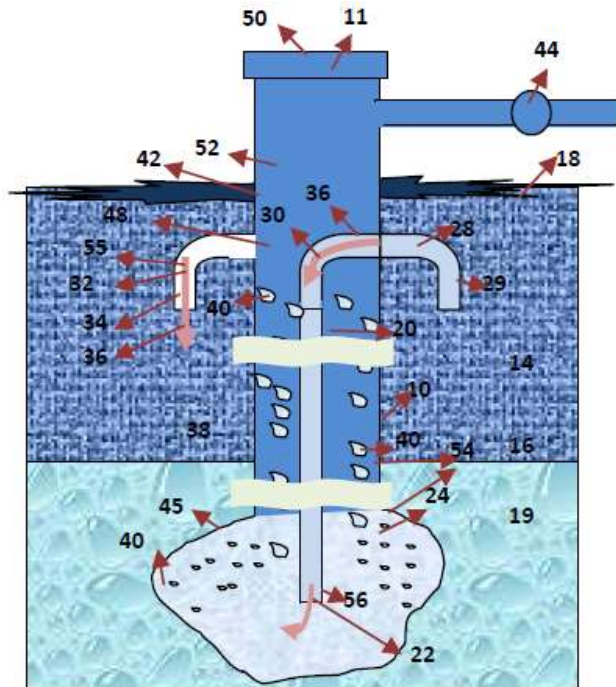


Figura 15 Inyección de agua de mar  
Fuente: (Camilo & Isdwar, 2008)

### 3.4 APLICACIONES DE METODOS DE EXPLOTACION DE HIDRATOS DE GAS

En esta sección se dará información obtenida a través de literatura sobre casos de estudios registrados sobre la aplicación de los métodos para la producción de gas a través de la explotación de hidratos de gas en diferentes partes del mundo.

## ➤ APLICACIÓN DEL MÉTODO DE DESPRESURIZACIÓN

Un ejemplo de la aplicación de este método fue en el que se ejecutó en el campo de gas Messoyakha que se encuentra localizado en Siberia, Rusia. Este campo se encuentra dentro una trampa estructural anticlinal. Este campo posee una zona de permafrost de 420-480 m (1379 – 1575 pies) de espesor, como se muestra en la siguiente figura

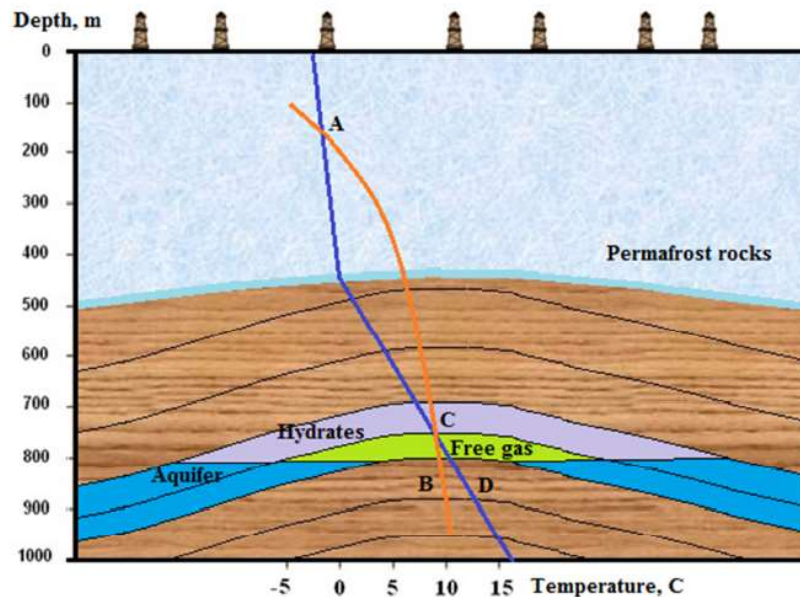


Figura 16 Esquema del yacimiento de Messoyakha  
Fuente: (OMELCHENKO, 2012)

El campo de gas de Messoyakha se describe como un reservorio de gas con capa de hidratos de gas, es decir, la parte superior del yacimiento contiene gas en estado hidrato y la parte inferior del depósito contiene gas libre. La parte superior se encuentra en la zona de hidratos termodinámicamente estable y la parte inferior se encuentra fuera de la zona de estabilidad de hidratos. En la parte superior, los hidratos son estables y en la parte inferior son inestables y, por lo tanto, están ausentes.

### Propiedades de la roca

Las propiedades de las rocas en Messoyakha son muy heterogéneas. El rango de las propiedades de la roca, sus valores promedio, el gradiente geotérmico y la presión inicial del yacimiento se dan en la Tabla 3



Propiedad	Rango
Porosidad	38 %
Permeabilidad	500 md
Gradiente geotérmico	4,2°C/100m
Saturación de agua residual	29-50 %
Presión inicial (interface hidrato-gas libre)	1150 psi
Temperatura inicial	51,6 °F

**Tabla 3. Propiedades de la roca del yacimiento Messoyakha**  
**Fuente: (Tarun, Moridis, & Holditch, 2008)**  
**Elaborado por: Fabian Osorio Chavez**

### Composición de gas

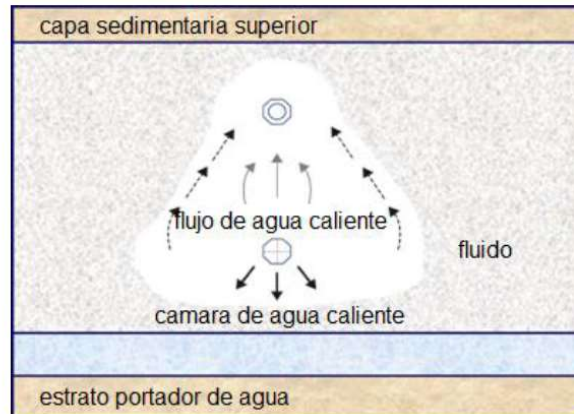
La composición del gas en Messoyakha consiste en una gran cantidad de metano y otros componentes menores. La composición del gas consiste en 98,6% de metano, 0,1% de etano, 0,1% de propano, 0,5% de CO<sub>2</sub> y 0,7% de N<sub>2</sub>

Las reservas volumétricas de gas estimadas en Messoyakha oscilan entre 1.3 y 14 TPC (trillones pies cúbicos) Las estimaciones oscilan entre 0,5 y 17 Tpc. También existe incertidumbre para el gas en forma de hidrato en el campo de gas Messoyakha. Se calculó que 2,2 tpc de gas estaban en forma de hidrato en la parte superior de Messoyakha y 0,6 tpc de gas estaban presentes como gas libre en la parte inferior de Messoyakha. Recientemente) informaron que el gas in situ inicial (gas libre) en Messoyakha era 848 BCF y las reservas producibles del estado de hidrato eran 424 BCF. En esencia, no queda muy claro a partir de los datos disponibles sobre el porcentaje exacto de gas en forma de hidrato en Messoyakha.

Las tasas de producción de los pozos que se perforaron en la parte de hidrato, es decir, la parte superior del yacimiento, fueron mucho menores que las de los pozos que se perforaron en la parte más profunda de gas libre del yacimiento. Cuando se realizó la despresurización en la capa de hidratos, se disociaron los hidratos. Cuando los hidratos se disocian, se produce una disminución de la temperatura en la formación rocosa circundante. El agua y el gas producidos por disociación vuelven a reaccionar juntos para formar hidratos secundarios cerca del pozo y, por lo tanto, taponan las perforaciones. Por otro lado, cuando se despresurizó la zona inferior de gas libre, la producción de gas no tuvo problemas. Por lo tanto, los pozos terminados en la zona de gas libre más profunda pudieron operar a altas tasas de flujo.

## ➤ APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ESTIMULACIÓN TÉRMICA

La explotación del reservorio de hidratos se realizó en Nankai Trough, Japón utilizando el sistema de inyección de agua caliente con un par de pozos horizontales. La tecnología de estimulación térmica usada se basó principalmente en el drenaje por gravedad asistido por vapor (SAGD) y la estimulación cíclica de vapor (CSS), que se utilizan habitualmente para la explotación de petróleo pesado.



**Figura 17 Sistema de producción de gas por inyección de agua caliente con un par de pozos horizontales**  
Fuente: (Na, Lei, Hui, Jian, & Xinjun, 2016)

Con la ayuda del Consorcio de Investigación MH21, se presentaron un sistema de inyección de agua caliente con un par de pozos horizontales (similar a SAGD) para explotar hidratos de gas y realizaron cálculos de simulación numérica correspondientes. El sistema constó de dos pozos horizontales perforados hasta la capa de hidratos con un espaciamiento vertical de 3-5 m. El pozo horizontal de abajo está diseñado para la inyección de agua caliente y el pozo horizontal de arriba se utiliza para producir gas natural y agua.

Se realizó una simulación numérica para la explotación del reservorio de hidratos de Nankai Trough en Japón utilizando el sistema de inyección de agua caliente con un par de pozos horizontales.

En cuanto a los parámetros básicos en el mismo, la temperatura del agua caliente inyectada fue de 85°C, la tasa de inyección fue de 1000 t/ d, la longitud horizontal del pozo horizontal fue de 500 m, el espesor del reservorio de hidratos fue de 20 m, la vertical la permeabilidad fue de 25 mD, la permeabilidad horizontal fue de 100 mD y la saturación promedio del hidrato fue del 46%.

Durante el proceso de simulación, primero se inyectó agua caliente en el sistema de pozos y luego se hizo circular durante 90 días para precalentar el depósito alrededor del pozo. Luego, a medida que se inyectaba más agua caliente a través del inyector, se formó una cámara de agua caliente y se expandió gradualmente. Se establecieron canales de alta permeabilidad verticales disociados entre los pozos horizontales debajo y arriba, y la cámara de agua caliente se expandió hacia abajo, lo que provocó que el área calentada del reservorio aumentara y produjera gas continuamente.

En resumen, la producción acumulada de gas por el uso del sistema de inyección de agua caliente con un par de pozos horizontales alcanzó  $6 \times 10^6$  m<sup>3</sup> en dos años, y el pico de producción ocurrió cuando el agua caliente irrumpió en el productor desde el inyector de abajo. Después de eso, la tasa de producción de gas se redujo gradualmente a un nivel estable y se mantuvo una estabilidad a largo plazo. La tecnología muestra mejores efectos en reservorios heterogéneos que en reservorios homogéneos.

#### ➤ **APLICACIÓN DEL MÉTODO DE INYECCIÓN DE INHIBIDORES.**

Durante el proceso de producción del Campo Messoyakha, cuando los hidratos se disociaron, se produjo una disminución de la temperatura en la formación rocosa circundante. El agua y el gas producidos por la disociación volvieron a reaccionar juntos para formar hidratos secundarios cerca del pozo y, por lo tanto, obstruyeron las perforaciones.

Se perforaron 61 pozos dentro de la estructura de Messoyakha con un espacio promedio entre 500 y 1000 m. Los pozos que se completaron en la zona de hidrato fueron estimulados mediante el uso de productos químicos como cloruro de calcio y metanol. Estos productos químicos son inhibidores de la formación de hidratos, o, en otras palabras, hacen que los hidratos sean inestables al cambiar la curva de equilibrio. Esta estimulación química ayudó a desestabilizar los hidratos, lo que resultó en la fusión de los hidratos cerca del pozo. Después de estimular los pozos, fue posible operar los mismos pozos a presiones de cabeza de pozo más altas. En cierta forma se puede decir que en ese campo implementaron combinaciones de métodos los cuales compensan uno con otro como en este caso inhibidores para evitar formación de hidrato en la producción mediante despresurización permitiendo trabajar a tasas más altas.

## CAPITULO IV

### INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1 COMPARACIÓN DE MÉTODOS

Para el análisis de los métodos expuestos en el capítulo anterior, se presentarán algunas consideraciones que son necesarias para la aplicabilidad de los mismos, ya que para todos los métodos se sugiere tomar en cuenta lo siguiente:

- Conocer la permeabilidad  $K$ , y porosidad  $\emptyset$ , de los yacimientos y de las zonas adyacentes.
- Los tipos de yacimientos deberán tener contacto con el petróleo o con una capa de gas libre, yacimientos parcialmente saturados, o saturados, con el fin de ejecutar la fase de explotación.
- Conocer la cantidad de hidratos presentes en el yacimiento, para un respectivo análisis de viabilidad económica de producción, independientemente del método que se empleé.
- Poseer la información del tipo de ambiente geológico, para identificar la formación en donde se halla la presencia de hidratos de gas en el yacimiento.
- En base a la consideración anterior se conocerá el tipo de hidrato de gas que están presente en el yacimiento.
- Determinar la movilidad de los tipos de fases existentes en el yacimiento.
- Identificar los tipos de hidratos de gas que se encuentran presentes en el yacimiento.
- Conocer las condiciones termodinámicas de temperatura, presión y composición.
- Definir las zonas adyacentes del yacimiento, así como las propiedades termodinámicas.

## **4.1.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS**

### **4.1.1.1 VENTAJAS**

El procedimiento del método de despresurización no muestra mayores pérdidas de calor comparándolo con el método de estimulación térmica en donde se genera grandes pérdidas, no obstante, en este proceso no se produce la degradación de gas natural como si se crea en el proceso de combustión in-situ, el método de despresurización no hay altas pérdidas de químicos costosos, en semejanza con el método de inyección de inhibidores donde los químicos sí son costosos.

En el método de inyección de vapor como en el de la combustión in-situ las pérdidas de calor podrían ser muy altas en especial para zonas que poseen poco espesor, pero si se lo realiza en zonas que posean espesores mayores de 4.5 metros, las dos técnicas mencionadas se podría ser térmicamente eficientes.

Para el método de inyección de fluidos calientes, la eficiencia está en proporción con la zona de mayor permeabilidad existente en el yacimiento, en donde si los valores de permeabilidad estimados son altos se aplica el método de inyección, caso contrario a esto se debe realizar mediante fracking o fracturamiento hidráulico.

Dentro de las eficiencias térmicas el proceso de inyección de salmueras es considerado el más eficaz comparado con el de inyección de vapor debido al resultado producido por la sal sobre la proporción del hidrato.

El método de inyección de salmueras, podría aplicarse en contacto con los acuíferos geotérmicos en donde se hayan temperaturas significantes.

La generación de calor in-situ es una técnica para soluciones de pérdidas de calor dentro del pozo, pero su aplicabilidad y el desarrollo de herramientas para la generación catalítica de calor se encuentra aún en investigaciones.

#### **4.1.1.2 DESVENTAJAS**

El método de despresurización no se recomienda aplicarlo para yacimientos cercanos del punto de congelación del agua, debido a que el hidrato se disocia en hielo y en gas, por lo que se procedería a ocasionar un taponamiento dentro de la formación debido a que el hielo es impermeable por ende impediría el flujo del gas, en casos como estos el método podría estar acompañado de procesos seas estos térmicos o químicos. Se deberá controlar la temperatura en el yacimiento para evitar esta formación de hielo.

Dentro del método de estimulación térmica, presenta una gran desventaja en la inyección de fluidos calientes, esto se debe a que el calor que se inyecta antes del inicio de la disociación provocaría que una considerable cantidad de calor se consuma al momento de calentamiento de formaciones contiguas, provocando algunas pérdidas de calor del 10 al 60%.

En la inyección de vapor, para formaciones delgadas se presentan grandes cantidades de pérdidas de calor, en comparación a la inyección de agua caliente que presentan menos, sin embargo, siendo esta inyectabilidad de agua caliente la que determina la aplicabilidad del método.

En el método de inyección de inhibidores químicos, el uso de elementos como son el glicol y metanol para realizar la disociación de hidratos representarían excesivos costos, aparte de se requieren grandes cantidades de los elementos mencionados para asegurar una suficiente producción de gas, lo que en la práctica resultaría un método atractivamente bajo en cuestión económica. El uso de la inyección de salmueras es una alternativa más económica y con desempeños similares.

## CONCLUSIONES

- Los hidratos de gas son una fuente potencial de energía limpia para la humanidad en un futuro próximo. Dada su distribución geográfica y la gran cantidad de recursos de hidratos de gas que se encuentran en ellas, la producción de este recurso tendría un impacto mucho mayor en la economía global que el impacto del gas natural actualmente, llevando a la aceleración de transición energética solventando las futuras necesidades de los países por nuevas fuentes de energía.
- El método de despresurización es ideal para ser aplicados en campos donde existan yacimientos con gas libre asociados con capas de hidratos, como se pudo evidenciar en el caso de estudio en el Campo de Messoyakha, donde se presentaron altas tasas de flujo al aplicar este método, es la técnica más prometedora de los métodos presentados. Dado que no es necesario ingresar energía al yacimiento de hidratos; sin embargo, se deben considerar varios problemas, como el hundimiento del suelo, los deslizamientos de tierra submarinos y la reformación de hidratos.
- El método de estimulación térmica, tiene su beneficio debido a que en el proceso de la disociación de los hidratos y la tasa de producción de gas podrían controlarse regulando la cantidad y la tasa de calor inyectado; sin embargo, desde un punto de vista económico, este método no es adecuado para la explotación de hidratos en la región del permafrost (capas de hielos congelados) donde la temperatura ambiente es muy baja y esta capa muy gruesa.
- Con respecto al método de inyección química, esta técnica está limitada desde el punto de vista económico y de protección ambiental, y también limitada para regiones con hidratos con baja permeabilidad, pero las investigaciones la indican como una buena técnica de complemento para el método despresurización para evitar la reformación de hidratos permitiendo que se puedan obtener tasas más altas de producción.

## RECOMENDACIONES

- El potencial que posee los hidratos de gas, sería altamente valorados como recursos energéticos para naciones con opciones limitadas de energía, por lo que es necesario desarrollar un conocimiento científico de las implicaciones y las consecuencias ambientales de la producción de hidratos de gas antes de su producción a gran escala.
- Darles continuidad a estudios más profundos acerca del comportamiento de los hidratos de gas y la implementación de diferentes técnicas eficientes para su explotación.
- Realizar estudios posteriores analizando variables que afecten la selección de un método de explotación, basado en más avances en las investigaciones desarrolladas a nivel mundial.
- Realizar un mayor desarrollo de simulaciones numéricas, para comprender los mecanismos inherentes de explotación de hidratos de gas, como se realizó en el caso de estudio realizado en Nankai Trough, Japón.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Arora, A., Swaranjit Singh Cameotra, & Chandrajit Balomajumder. (2014). Natural Gas Hydrate as an Upcoming Resource of Energy. *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*, 6 p.
- [2] Arora, A., Swaranjit Singh Cameotra, & Chandrajit Balomajumder. (2015). Techniques for Exploitation of Gas Hydrate (Clathrates) an Untapped. *Journal of Microbial & Biochemical Technology*, 4 p .
- [3] Baltazar Montes, M. E. (2002). Hidratos de Metano. *Tesis*. Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Mexico D.F.
- [4] Barbosa Hernandez, A. (2014). Tecnicas para la explotacion y produccion de Hidratos de gas. *Proyecto de grado*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- [5] Birchwood, R., & Dai, J. (2012). Developments in Gas Hydrates. *Oilfield Review*, 16 p .
- [6] Camilo, G. S., & Isdwar, R. P. (2008). Metodos utilizados para la recuperacion de gas natural en formaciones de hidratos de lechos marinos. *Trabajo de Grado*. Universidad Industrial Santander, Bucaramanga.
- [7] CÉSAR, H. V. (2009). “LOS HIDRATOS DE METANO, UNA FUENTE DE GAS NATURAL NO CONVENCIONAL”. *TESIS*. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA, MEXICO DF.
- [8] Collett, T. S. (2000). El creciente interés en los hidratos de gas. *Oilfield Review*.
- [9] Dallimore, S., & Ray Boswell. (2014). *FROZEN HEAT A GLOBAL OUTLOOK ON METHANE GAS HYDRATES, VOLUME TWO*. GRID-Arendal.
- [10] Demirbas, A. (2010). *Methane Gas Hydrate*. Springer.
- [11] Dorelys, G., & Pérez, G. (2013). METODOLOGÍA PARA LA APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE RECUPERACIÓN MEJORADA QUE PERMITAN AUMENTAR EL FACTOR DE RECOBRO. *Trabajo de Grado*. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- [12] Giavarini Carlo, H. K. (2011). Immense Energy Potential and Environmental Challenges. En H. K. Giavarini Carlo, *Gas Hydrates*.
- [13] GONZÁLEZ FRANCO, D. (2013). EVALUACIÓN PETROLERA Y MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN DE HIDRATOS DE METANO, UN RECURSO NO CONVENCIONAL. *TESIS*. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- [14] GONZÁLEZ, F. D. (2013). EVALUACIÓN PETROLERA Y MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN DE HIDRATOS DE METANO, UN RECURSO NO CONVENCIONAL. *Tesis de grado*. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

- [15] Liu, B., & Chang-Yu Sun. (2012). Experimental Simulation of the Exploitation of Natural . *energies*, 29 p.
- [16] MIDAS. (2014). *MANAGING IMPACTS OF DEEP SEA RESOURCE EXPLOITATION*. Obtenido de <https://www.eu-midas.net/science/gas-hydrates>
- [17] Na, S., An Lei, Deng Hui , Sun Jian, & Guang Xinjun. (2016). Discussion on natural gas hydrate production technologies . *CHINA PETROLEUM EXPLORATION*, 11p .
- [18] Na, S., Lei, A., Hui, D., Jian, S., & Xinjun, G. (2016). Discussion on natural gas hydrate production technologies. *CHINA PETROLEUM EXPLORATION*, 11p.
- [19] OMELCHENKO, R. Y. (2012). ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT OF THE MESSOYAKHA GAS FIELD:.. *Thesis*. Texas A&M University, Texas.
- [20] Tarun, G., Moridis, G., & Holditch, S. A. (2008). Analysis of reservoir performance of Messoyakha Gas hydrate Field. *Article*. Texas A&M University, TEXAS.
- [21] URBINA BUSTAMANTE, C. (2019). DEFINICION DE TENDENCIAS Y NUEVAS TECNOLOGIAS PARA LA EXPLOTACION DE HIDRATOS DE GAS. *TRABAJO DE GRADO*. UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, BUCARAMANGA.
- [22] Villegas, G. D. (2018). ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD PARA SELECCIÓN DE INHIBIDORES DE BAJA DOSIS PARA EL CONTROL DE LA FORMACIÓN DE HIDRATOS EN EL TRANSPORTE DE GAS. *Trabajo de grado*. Escuela Politecnica Nacional, Quito.
- [23] Waite, W., Ray Boswell, & Scott Dallimore. (2014). *FROZEN HEAT A GLOBAL OUTLOOK ON METHANE GAS HYDRATES, VOLUME ONE*. GRID-Arendal.