

COMPLEMENTACION DEL MARCO TEÓRICO, CONSISTENTE EN LA  
EVALUACION Y EL ANALISIS DE LOS PRINCIPALES FACTORES  
ASOCIADOS A LA EFICIENCIA TECNOLÓGICA EN EL PROCESO DE RSPDA.

 **unab**  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA

SISTEMA DE REGISTROS UNAB  
ACQUISICIONES

B. Jardín  B. Bosque  B. Calles  B. Alum  Precio S. 20000  
Clasificación \_\_\_\_\_ Sembrar \_\_\_\_\_  
Proveedor \_\_\_\_\_  
Compra \_\_\_\_\_ Donación  Cance \_\_\_\_\_ UVAE \_\_\_\_\_  
Fecha de ingreso: Dd \_\_\_\_\_ MM \_\_\_\_\_ Añ \_\_\_\_\_

YANETH MARCELA VIANA ARIZA

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BUCARAMANGA  
ESCUELA DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA FINANCIERA  
BUCARAMANGA, SANTANDER

2004

**COMPLEMENTACION DEL MARCO TEÓRICO, CONSISTENTE EN LA  
EVALUACION Y EL ANALISIS DE LOS PRINCIPALES FACTORES  
ASOCIADOS A LA EFICIENCIA TECNOLOGICA EN EL PROCESO DE RSPDA.**

**YANETH MARCELA VIANA ARIZA**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Financiera**

**Asesor**

**MIGUEL ANGEL HERNANDEZ REY**

**Economista**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BUCARAMANGA  
ESCUELA DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERIA**

**FACULTAD DE INGENIERIA FINANCIERA**

**BUCARAMANGA, SANTANDER**

**2004**

Nota de aceptación

---

---

---

---

Jurados

---

Jurado

---

Jurado

Bucaramanga 11 de Noviembre de 2004.

A mis padres que con su amor y apoyo incondicional siempre depositaron en mi su voto de confianza , a mi familia, que siempre estuvo a mi lado, y muy especialmente a este hijo que viene en camino que es mi principal motivación para salir adelante.

Yaneth Marcela

## **AGRADECIMIENTOS**

Al asesor del proyecto, Miguel Angel Hernandez Rey por su dedicación, por su confianza ofrecida desde el principio, por su paciencia, apoyo incondicional y valiosa colaboración durante el desarrollo del proyecto, por generar la idea del proyecto y proponer la realización de éste.

A mis padres quienes con su constante apoyo e interés, me ayudaron a seguir y a cumplir con mis metas trazadas.

## CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN	11
1. MARCO TEORICO	14
1.1 PRODUCCION EN COLOMBIA	14
2. DESCRIPCIÓN DE LOS METODOS DE PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO	16
2.1 RECUPERACIÓN PRIMARIA POR FLUJO NATURAL	16
2.2 RECUPERACIÓN PRIMARIA POR MEDIO DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL	17
2.3 RECUPERACION PRIMARIA POR METODO RATATORIO	17
2.4 RECUPERACIÓN SECUNDARIA POR INYECCIÓN DE AGUA	19
2.5 RECUPERACION SECUNDARIA POR INYECCIÓN DE GAS	21
3. COSTOS ASOCIADOS ALOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE PETROLEO	22
3.1 METODO DE PRODUCCIÓN POR "FLUJO NATURAL"	22
3.2 MÉTODOS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL	23
3.3 METODO DE RECUPERACIÓN SECUNDARIA	24
4. EL PROCESO DE PRODUCCIÓN	26
4.1 ESCENARIO 1	27
4.2 ESCENARIO 2	29
5. LA INVERSIÓN Y LOS COSTOS DE LA RECUPERACIÓN SECUNDARIA	31
5.1 COSTOS INVOLUCRADOS EN LA TECNOLOGÍA DE RECUPERACIÓN SECUNDARIA	33
6. FACTORES DETERMINANTES DE LA INVERSIÓN EN EL PROCESO DE RECUPERACIÓN SECUNDARIA POR	34

DESPLAZAMIENTO CON AGUA	
6.1 AGUA INYECTADA	39
6.2 NUMERO DE POZOS	39
6.3 INFRAESTRUCTURA	40
6.4 SISTEMAS DE BOMBAS DE INYECCION	40
6.5 ENERGIA	41
6.6 ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE	42
7. CONCLUSIONES	43
BIBLIOGRAFIA	44

## LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
GRAFICA 1. CURVA DEL NIVEL MÁXIMO DE PRODUCCIÓN	
GRAFICA 2. CURVA DEL BENEFICIO DEL PROCESO DE RECUPERACION	26
GRAFICA 3. CICLO DE VIDA DE UN YACIMIENTO DE PETROLEO	28
GRAFICO 4. CURVA DE BENEFICIO REALIZANDO UN CAMBIO AL PROCESO DE RECUPERACIÓN SECUNDARIA	29
GRAFICO 5. CICLO DE VIDA DE UN YACIMIENTO TOMANDO LA DECISION DE REALIZAR RECUPERACION SECUNDARIA	30
GRAFICA 6. CURVAS DE BENEFICIO APLICANDO DISTINTAS TECNOLOGIAS DE RECUPERACION DE PETROLEO TENIENDO EN CUENTA EL PRECIO DE LOS FACTORES.	31

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1. ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN DE PETROLEO	15
FIGURA 2. ESQUEMA DEL POZO POR FLUJO NATURAL	16
FIGURA 3. BOMBEO MECANICO	17
FIGURA 4. ESQUEMA DEL MÉTODO DE ROTACION	18
FIGURA 5. PROCESO DE RECUPERACIÓN SECUNDARIA	21

## LISTA DE TABLAS

	Pag.
TABLA 1. PRINCIPALES FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE RECUPERACIÓN SECUNDARIA	34
TABLA 2. FACTORES DE ORDEN TECNOLÓGICO QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE RECUPERACIÓN SECUNDARIA	37

## INTRODUCCIÓN

Los cambios tecnológicos a nivel mundial han producido alteraciones en el sector productivo, lo que ha hecho que cada día se exija a las empresas productoras a buscar sus puntos óptimos de producción para obtener los mejores resultados. Este fenómeno no ha sido ajeno a nuestro país pues hoy se encuentra expuesto a condiciones de competencia con otras economías tecnológicamente más avanzadas.

La eficiencia tecnológica es uno de los temas que mas a despertado interés en las organizaciones debido a que es una variable estratégica para obtener ventajas competitivas en un entorno complejo e inestable en estos tiempos y es una herramienta muy importante debido a las transformaciones económicas que están experimentando las empresas, muchas compañías han pensado en hacer que su producción sea mas eficiente por medio del cambio y mejora en sus procesos.

En este proyecto se analizara la tecnología de recuperación secundaria en el sector productivo petrolero, con el cual puede ser factible optimizar sistemas de explotación e impulsar a la reactivación de la perforación para recuperar eficientemente la eficiencia remanente.

La globalización de la economía, con sus características de complejidad e incertidumbre, aumenta la intensidad de la competencia y sitúa la tecnología como un arma estratégica que obliga a las empresas a desarrollarse en un espacio productivo global, pues ella permite los incrementos en el producto total sin aumentar el uso del factor trabajo. La incorporación de nuevas tecnologías generalmente requiere de importantes niveles de inversión ya que la misma se concreta y expresa, antes que nada, en los bienes de capital que se utilizan en la producción es por esto que la tecnología juega un papel crucial dentro del proceso productivo junto con los factores de producción capital y trabajo, Así que la producción de una empresa será medida entre la relación de la escala y la eficiencia es lo que se denomina rendimientos a escala, por este método se determina que es lo que ocurre con la producción cuando se incrementan todos

los factores en la misma proporción. La tecnología nos ayuda a organizar todos los conocimientos usados en la producción así la tecnología puede estar incorporada al capital en forma de maquinaria y equipo o en los trabajadores a través de una formación integral, la aplicación de la tecnología apropiada a un proceso productivo tiene la virtud de aumentar la calidad del bien o servicio que se requiere y de disminuir el costo de la producción del mismo. Por consiguiente la aplicación tecnológica es una potente herramienta de aumento de margen y de reducción dentro del proceso de producción.

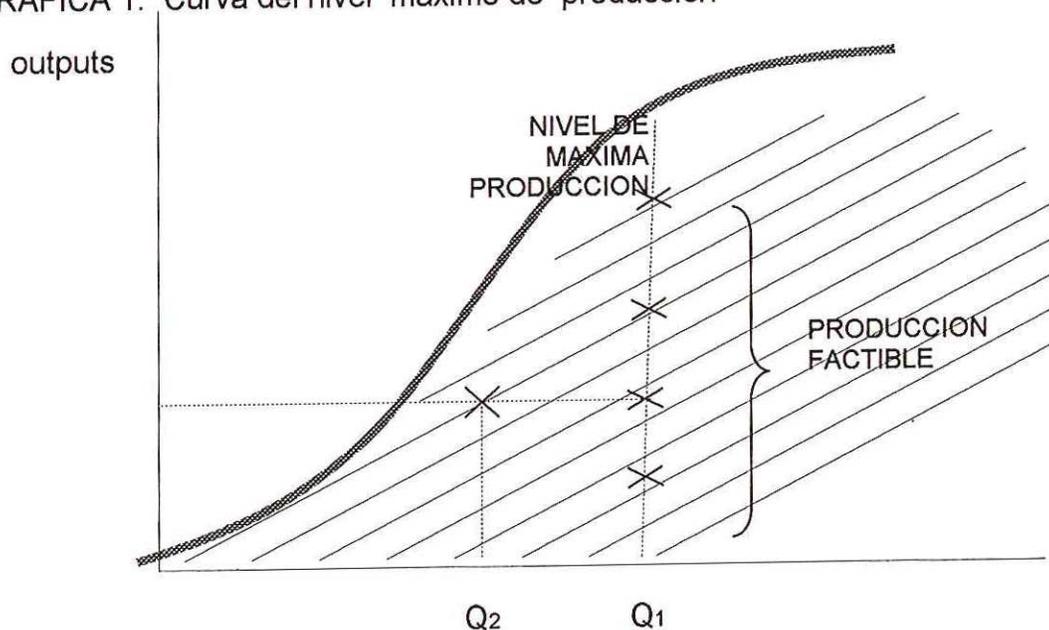
La eficiencia tecnológica es un determinante fundamental para lograr o mantener ventajas competitivas. Ser eficiente tecnológicamente significa por una parte lograr mejor producción con mejor tecnología.

Por medio de la eficiencia tecnológica podemos utilizar de una mejor manera los factores de producción como el capital y el trabajo para obtener un nivel óptimo de producción, de esta forma la producción también dependería de la tecnología implantada a los factores:

$$\text{máx } Q = f(K, L)$$

Sr: Tecnología

GRAFICA 1. Curva del nivel máximo de producción



Se toma la tecnología utilizada asociada a los factores de producción para obtener el máximo nivel de producción.

$$Y = \{(inputs, outputs) / output \text{ es max con tecnología asociada a inputs}\}$$

Las expectativas con las que se había diseñado la propuesta que eran construir el estado del arte de la eficiencia tecnológica aplicada al proceso de recuperación secundaria del sector energético petrolero y proponer un modelo alternativo para la toma de decisiones de inversión en dicho subsector no se lograron en su cabalidad, por la falta de información, las pocas fuentes bibliográficas, el corto tiempo con el que se disponía, la complejidad del tema ya que para realizar el modelo se requiere la integración de todos los enfoques de eficiencia y la prueba empírica que es la que permitirá establecer las ponderaciones de las variables, entonces lo que se logro fue la complementación del marco teórico consistente en la evaluación y análisis de los principales factores asociados a la eficiencia tecnológica.

Lo primero que se realizo en este trabajo de investigación fue identificar la problemática por la cual atraviesa el sector petrolero colombiano, luego se identificaron los desarrollos conceptuales sobre los principales métodos de producción de petróleo específicamente en el proceso de recuperación secundaria y a su vez los costos asociados a cada uno de los procesos, a su vez se identificaron los principales factores que intervienen en la toma de decisiones de inversión aplicando la eficiencia tecnológica en el proceso de recuperación secundaria por desplazamiento con agua y se llevo a cabo el correspondiente análisis para las mas relevantes.

## 1. MARCO TEORICO

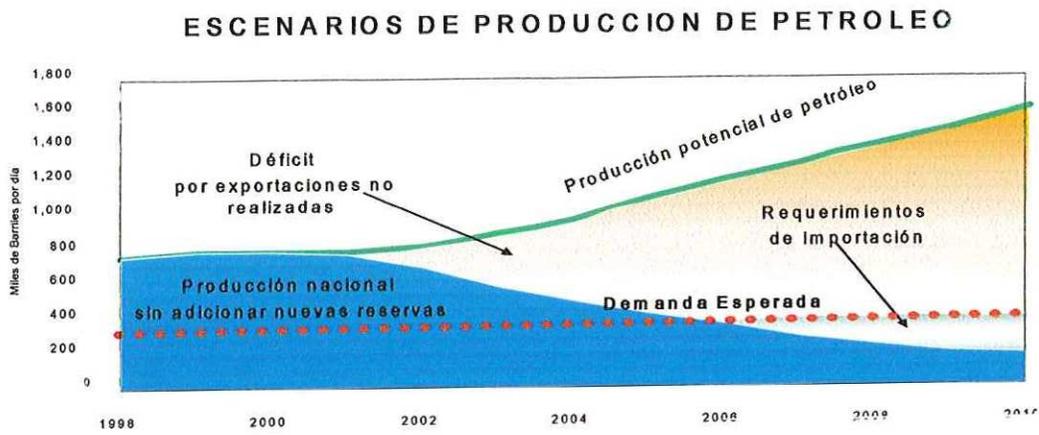
### 1.1. PRODUCCION EN COLOMBIA

Un buen porcentaje de los pozos en Colombia ya han superado la etapa de recuperación primaria y se encuentran sellados a la espera de la aparición de nuevas tecnologías que involucren menos costos, y teniendo en cuenta que en los últimos años en Colombia se vive una preocupante reducción en la producción y en las reservas de petróleo además en los fallidos intentos de exploración ( Ver Figura 1), Dada la declinación de reservas y la baja probabilidad de localizar nuevos campos importantes, los productores han buscado incrementar la recuperación final de hidrocarburos de campos abandonados a través de una segunda alternativa que es efectuar la recuperación secundaria mediante el desplazamiento con agua ya que "este método ha tomado gran impulso en los últimos años debido a su alto grado de aplicabilidad en diferentes campos que han dejado de producir por los métodos primarios, obteniendo así gran porcentaje de aceite. Este método presenta una gran eficiencia pues extrae el aceite libre en los espacios porosos, el sostenido por fuerzas capilares y el retenido por adhesión a la superficie de la roca"<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> ARCINIEGAS, Julio Mario Tesis: Estudio sobre inundación de agua e inyección de gas como métodos usados en recuperación secundaria, Universidad Industrial de Santander, paginas ii-iii.

Figura 1. Escenarios de producción de petróleo  
Fuente: Departamento Nacional de Planeación



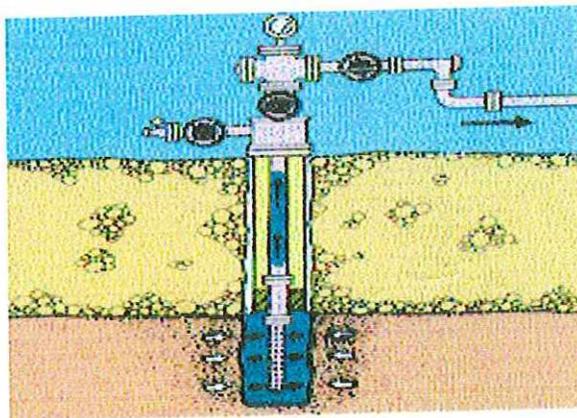
## 2. DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO

### 2.1. RECUPERACIÓN PRIMARIA POR FLUJO NATURAL

Cuando se encuentra petróleo la extracción puede realizarse utilizando diferentes métodos, " Cuando la presión o energía natural del yacimiento es suficiente para que el petróleo salga por sí solo por los pozos productores y desde el fondo de estos hasta la superficie, se dice que los pozos producen por flujo natural; este tipo de pozos necesitan de muy poco equipo, solo es necesaria una tubería de succión que es introducida en el interior del pozo con un sello para impedir que el petróleo fluya por el espacio anular que está entre el tubo de succión y la cubierta del pozo. Este sistema permite además explotar formaciones subyacentes desde el mismo pozo, mediante la introducción de otra tubería de succión, que será colocada en la profundidad requerida. El sello, al impedir el flujo por el espacio anular, evita además el deterioro de la cubierta del pozo, que no tiene la misma resistencia a la abrasión y corrosión causadas por el fluido. En la superficie, el pozo de flujo natural necesita de un conjunto de válvulas y equipos de control para regular el flujo proveniente del interior de la tierra".<sup>2</sup> ( Ver Figura 2).

Figura 2. Esquema del pozo por flujo natural

Fuente: [www.monografias.com](http://www.monografias.com)

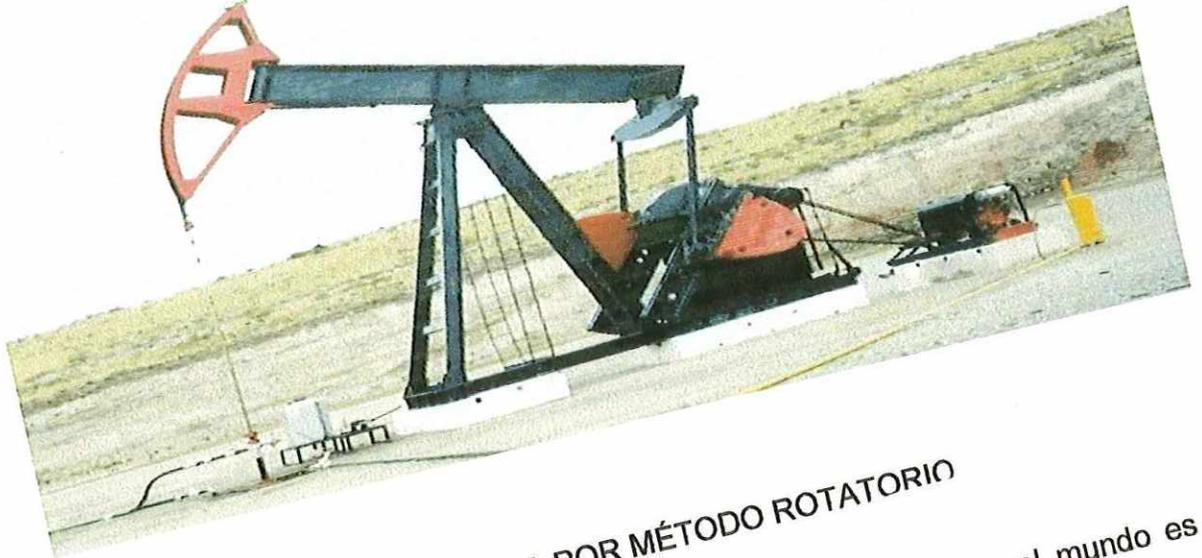


<sup>2</sup> [www.monografias.com](http://www.monografias.com), Por Juan Pedro Azcona

## 2.2. RECUPERACIÓN PRIMARIA POR MEDIO DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL

Cuando la presión del pozo no es suficiente para llevar el hidrocarburo hacia la superficie y de esta forma suministrar energía al petróleo que esta en el pozo es necesario utilizar un proceso de recuperación primaria por medio de un levantamiento artificial por bombeo mecánico (machin) (Ver Figura 3), este método consiste en bajar una "bomba de profundidad" que suministre energía adicional e impulse el fluido. La bomba es unida a una sarta de varillas, y estas en la superficie conectadas al aparato de bombeo que le dan movimiento para que el petróleo vuelva a fluir.

Figura 3. Bombeo mecánico  
Fuente: [www.monografias.com](http://www.monografias.com)



## 2.3. RECUPERACIÓN PRIMARIA POR MÉTODO ROTATORIO

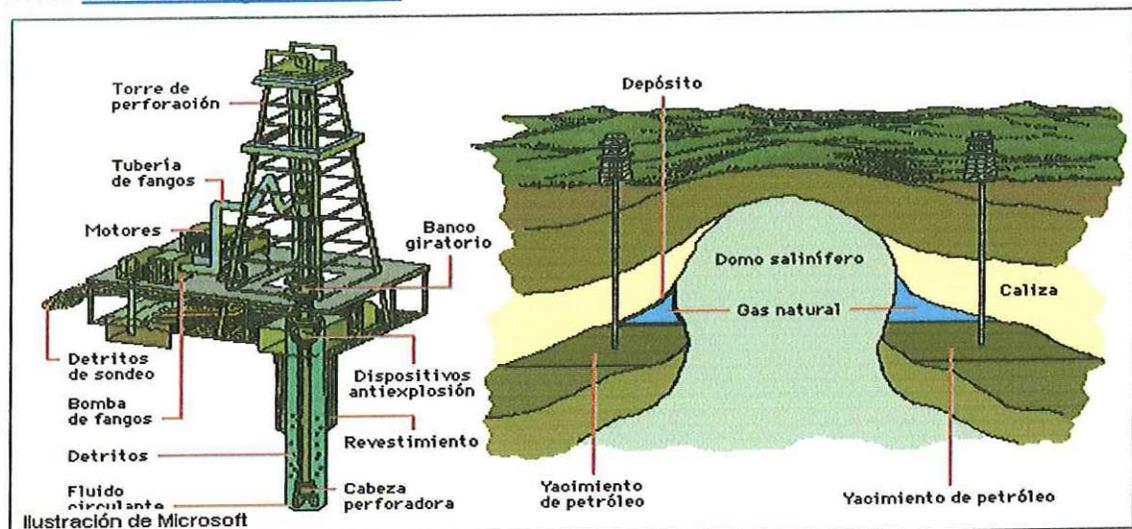
Otro método de recuperación primaria altamente difundido en el mundo es el método rotatorio. En este tipo de perforación rotatoria, una torre sostiene la cadena de perforación, formada por una serie de tubos acoplados. La cadena se hace girar uniéndola al banco giratorio situado en el suelo de la torre. La broca de

perforación situada al final de la cadena suele estar formada por tres ruedas cónicas con dientes de acero endurecido. La roca se lleva a la superficie por un sistema continuo de fluido circulante impulsado por una bomba.

El crudo atrapado en un yacimiento se encuentra bajo presión; si no estuviera atrapado por rocas impermeables habría seguido ascendiendo debido a su flotabilidad hasta brotar en la superficie terrestre. Por ello, cuando se perfora un pozo que llega hasta una acumulación de petróleo a presión, el petróleo se expande hacia la zona de baja presión creada por el pozo en comunicación con la superficie terrestre. Sin embargo, a medida que el pozo se llena de líquido aparece una presión contraria sobre el depósito, y pronto se detendría el flujo de líquido adicional hacia el pozo si no se dieran otras circunstancias. La mayoría de los petróleos contienen una cantidad significativa de gas natural en solución, que se mantiene disuelto debido a las altas presiones del depósito. Cuando el petróleo pasa a la zona de baja presión del pozo, el gas deja de estar disuelto y empieza a expandirse. Esta expansión, junto con la dilución de la columna de petróleo por el gas, menos denso, hace que el petróleo aflore a la superficie (Ver Figura 4).

Figura 4. Esquema del método de Rotación

Fuente: [www.monografias.com](http://www.monografias.com)



Finalmente, la velocidad de flujo del petróleo se hace tan pequeña, y el costo de elevarlo hacia la superficie aumenta tanto, que el coste de funcionamiento del pozo es mayor que los ingresos que se pueden obtener por la venta del crudo (una vez descontados los gastos de explotación, impuestos, seguros y rendimientos del capital). Esto significa que se ha alcanzado el límite económico del pozo, por lo que se abandona su explotación.

En la rama de la explotación de hidrocarburos existen diversas tecnologías que deben ser consideradas para la incorporación de reservas y el mejoramiento de la producción. La tendencia va hacia la superación de las dificultades para localizar y evaluar nuevos yacimientos petrolíferos y para explotarlos eficientemente.

Actualmente se estima que los yacimientos que se consideran económicamente agotados contienen todavía alrededor de la tercera parte de su volumen original de hidrocarburos, y es posible que con la producción primaria que se ha llevado a cabo, solo se haya recuperado solo un 20% del hidrocarburo contenido en el yacimiento, lo cual quiere decir que queda un 80% del petróleo hallado, por ello la industria petrolera ha desarrollado sistemas para complementar la recuperación primaria conocido como tecnología de recuperación secundaria de petróleo que ayuda a mejorar la extracción de petróleo aumentándola hasta en un 33% . En la actualidad se emplean dos métodos de recuperación secundaria: La inyección de agua y la inyección de gas.

#### **2.4. RECUPERACIÓN SECUNDARIA POR INYECCIÓN DE AGUA**

“La inyección de agua se descubrió aproximadamente hacia mediados del siglo XIX. La primera aplicación de la cual se tiene conocimiento fue producto de un accidente en el área de Pithole City en Pensilvania, alrededor de 1865. La gran mayoría de procesos de inyección iniciales ocurrieron en forma similar, a través de grietas presentes en formaciones almacenadoras de agua, o por acumulaciones de agua en superficie, que entraron a los pozos perforados. A finales del Siglo XIX,

la función principal del agua era mantener la presión del yacimiento, aumentando con ello la vida productiva de los pozos.

En las primeras aplicaciones de la inyección, la técnica empleada era inyectar primero en un solo pozo, y progresivamente en los pozos restantes del campo, a medida que estos se venían en agua, formando un empuje periférico. Posteriormente la inyección periférica se combino con el empuje en línea. En 1924, se empleo por primera vez un patrón de inyección de cinco puntos, en el campo Bradford Pensilvania. Simultáneamente, se iniciaban proyectos de recuperación por inyección de agua en otras regiones de los Estados Unidos, pero no fue hasta 1950 que su uso se generalizo a nivel mundial. Desde entonces, se ha registrado un enorme desarrollo de esta tecnología, mejorando notoriamente los resultados<sup>3</sup>.

“La inyección de agua es el método de recuperación secundaria mas utilizado en el mundo entero. La operación consiste en inyectar agua a presión por unos pozos especiales abiertos alrededor de un pozo central o pozo productor, para obligar a que el petróleo se desplace hacia la superficie, y así aumentar la eficiencia de recuperación. El agua se comporta como un pistón que desplaza el petróleo que encuentra en su camino, hacia el pozo productor, con este mecanismo se puede lograr una recuperación total primaria<sup>4</sup>. ( Ver Figura 5).

---

<sup>3</sup> ARCINIEGAS, Julio Mario Tesis, Estudio sobre inundación de agua e inyección de gas como métodos usados en recuperación secundaria, Universidad Industrial de Santander, paginas 1,2.

<sup>4</sup> FRANCO SANDOVAL, Leonardo Tesis, Conectividad hidráulica entre pozos en modelos de recobro por inyección de agua, Por Leonardo Franco Sandoval, Universidad Industrial de Santander, páginas 1,2.

Figura 5. Proceso de Recuperación secundaria

Fuente: tesis mexicana

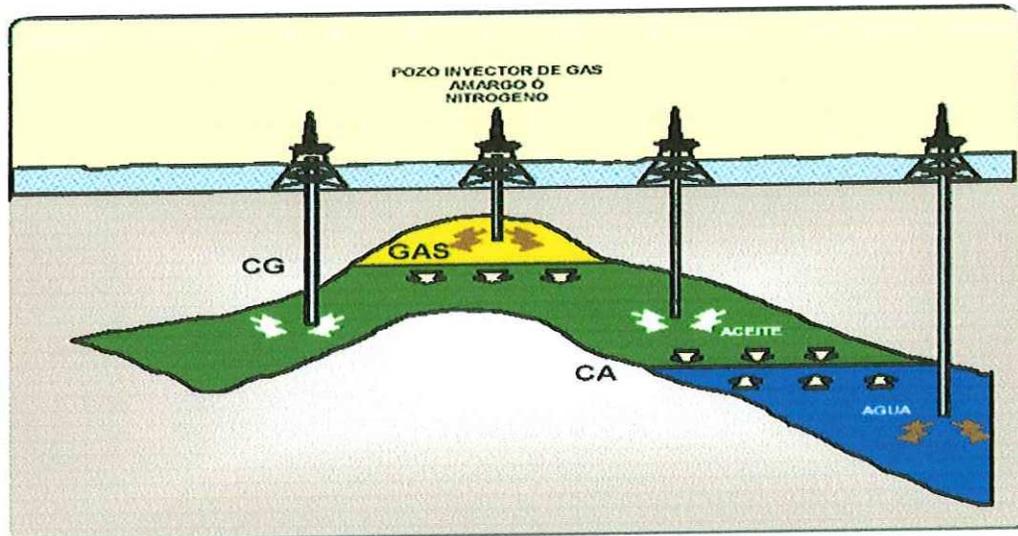


Fig 10 Pozo inyector de gas amargo

## 2.5. RECUPERACIÓN SECUNDARIA POR INYECCIÓN DE GAS

La inyección de gas también es empleada pero en yacimientos en donde el petróleo es mucho más viscoso, el vapor no sólo desplaza el petróleo, sino que también reduce mucho la viscosidad, al aumentar la temperatura del yacimiento, con lo que el crudo fluye mucho más de prisa a una presión dada.

“ Además de inyección de agua o de gas, se suele aplicar otro método llamado de recuperación terciaria que es utilizado con el calentamiento del yacimiento ( inyección de vapor) o con el ensanchamiento de los pozos empleando productos químicos tales como inyección de anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ )”<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> [www.monografias.com](http://www.monografias.com), Por Juan Pedro Azcona

### 3. COSTOS ASOCIADOS A LOS PROCESOS DE PRODUCCION DE PETROLEO

#### 3.1 MÉTODO DE PRODUCCIÓN POR " FLUJO NATURAL "

"Los costos de estos equipos de perforación, de los insumos utilizados para la perforación por flujo natural depende mucho de la demanda del mercado, de las capacidades del mismo, de las características del yacimiento ( profundidad, tipo de formación, localización geográfica e.t.c )"<sup>6</sup>. Además de estos elementos que son importantes para la perforación es necesario contratar personal que se encargue del proceso, como los ingenieros especializados que son los responsables de la explotación de los yacimientos de petróleo descubiertos. Por lo general, son especialistas en una de las categorías de operaciones de producción:

- \* Instalaciones de perforación y de superficie,
- \* Análisis petrofísico y petroquímico del depósito,
- \* Estimación de las reservas,

especificación de las prácticas de especialización de explotación optima y control, y seguimiento de la producción. El ingeniero de perforación determina y supervisa el programa concreto para perforar el pozo, el tipo de lodo de inyección empleado, la forma de fijación del revestimiento de acero que aísla los estratos productivos del pozo perforado e.t.c.

---

<sup>6</sup> [www.monografias.com](http://www.monografias.com). La búsqueda del petróleo-exploración. Por: Lorena Tau.

## 3.2. MÉTODOS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL

**3.2.1. Método por Bombeo Mecánico.** Los principales costos de este método dependen de la unidad de bombeo que se utilice. Este método es mas costoso que el anterior porque se requiere el siguiente equipo adicional:

1. Motor primario, provee la energía necesaria al sistema
2. La unidad de transmisión de energía o caja reductora de velocidades
3. Equipo de bombeo en superficie
4. La sarta de varillas, la cual transmite el movimiento de bombeo a superficie y la energía a la bomba del subsuelo
5. La bomba de subsuelo
6. costos de mantenimiento y limpieza

**3.2.2. Método Rotatorio.** La tecnología del método rotatorio, a diferencia del bombeo mecánico es mas eficiente ya que sus costos en energía son menores. Los costos de perforación con este método depende del siguiente equipo:

\*\* Equipo de perforación que consiste en un sistema mecánico o electromecánico compuesto por una torre, de unos veinte o treinta metros de altura que permite el movimiento de tuberías con sus respectivas herramientas, que es accionado por una transmisión energizada por motores a explosión o eléctricos. Este mismo conjunto impulsa simultánea o alternativamente una mesa de rotación que contiene al vástago (kelly), tope de la columna perforadora y transmisor del giro a la tubería.

\* Elementos auxiliares tales como tuberías, bombas, tanques.

\* Un sistema de seguridad que consiste en válvulas de cierre del pozo para su control u operaciones de rutina.

\* Generadores eléctricos de distinta capacidad según el tipo de equipo, etc.

\* Honorarios del personal técnico, depósito/s, taller, laboratorio, etc. y el personal directo e indirecto involucrado en la perforación de un pozo".

### 3.3. MÉTODO DE RECUPERACIÓN SECUNDARIA

Aunque los costos de la tecnología utilizada en el proceso de recuperación secundaria son altos, existen costos ya asumidos por los procesos anteriores tales como:

- \* La exploración
- \* La perforación de los pozos productores
- \* La Limpieza de los pozos productores

“Este proceso de inyección de agua predomina por diversos factores como la disponibilidad general de agua ,además presenta costos bajos respecto a otros procesos de inyección ( polímeros, miscelas, e.t.c.), facilidad de inyección del agua dentro de la formación y alta eficiencia de desplazamiento de aceite”<sup>7</sup>.

En el estudio de recuperación secundaria se debe tener en cuenta la tecnología que será utilizada como costos propios del proceso:

- \* Bombas de inyección
- \* Estimar el costo de desarrollo del trabajo
- \* Tecnología de la planta y maquinaria que son necesarias de subsuelo y de superficie
- \* Nuevos pozos que se van perforar
- \* Se debe calcular el costos de producción unitaria y un balance económico, teniendo en cuenta la futura utilidad que dependerá de las posibilidades y mejoras del mercado, todo esto con la finalidad de aminorar los costos. Para hacer un balance económico se debe tener en cuenta el costo de desarrollo del método, el valor de la producción y una ganancia aceptable.

Además se debe realizar un estudio de la fuente de aprovisionamiento del fluido a inyectar y de que forma se le piensa dar el tratamiento pues a esta agua se le agregan aditivos que facilitan el debilitamiento de las fuerzas adhesivas del petróleo a los granos de la roca, causada por fuerzas de tensión interfacial, todas

---

<sup>7</sup> RODRÍGUEZ RICO, Ramón . Evaluación del proceso de inyección de agua en el campo DINA Cretáceos, mediante el software OFM, 2001. Universidad Industrial de Santander, Pág. 24-26.

estos factores hay que tenerlos en cuenta para el buen éxito de toda recuperación secundaria.

La eficacia de un proceso de inyección de agua depende de su estrategia de desarrollo; el diseño de ésta se basa en las características del yacimiento principalmente en: la geología y propiedades de la formación productora, de los fluidos involucrados en el desplazamiento y de las estrategias de manejo del campo durante su etapa primaria de producción.

#### 4. EL PROCESO DE PRODUCCIÓN

En la teoría de la producción se resalta la selección de los factores de producción para minimizar los costos totales a niveles alternativos de producción.

El costo total de producir un cierto nivel de producción dependerá, por un lado, de los precios que tenga que pagar por los factores de producción y, por otro lado, de la técnica de producción. La producción se refiere a cualquier operación en la que los factores de producción se transforman en producción.

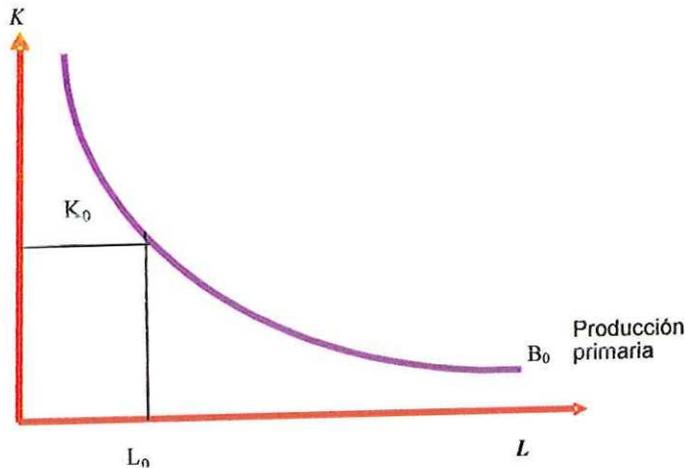
La toma de decisiones de inversión en el proceso de recuperación secundaria por desplazamiento con agua surge como una comparación de los escenarios antes del proyecto y con el proyecto.

Antes de proyecto se refiere a las condiciones finales de yacimiento en que se agota la fase de levantamiento artificial de la producción primaria.

El segundo proceso o con proyecto, define todos los factores de producción que requiere al realizar proceso de recuperación secundaria por desplazamiento con agua.

## 4.1 ESCENARIO 1

*GRAFICA 2. Curva del beneficio del proceso de recuperación*

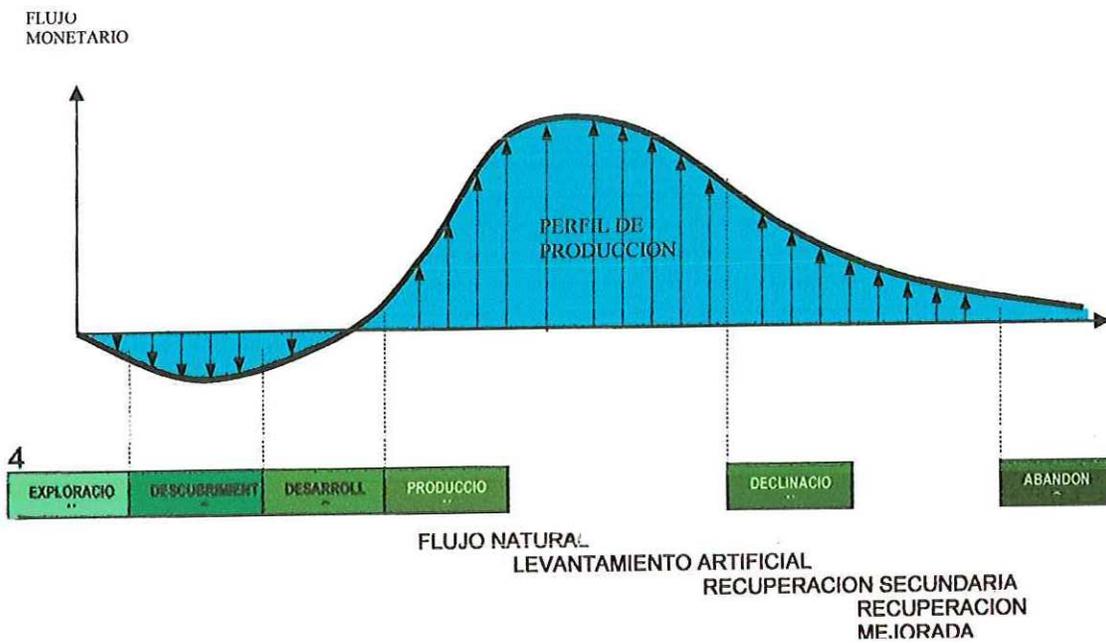


En el escenario 1 se combinaron los factores de producción (  $K_0$ ,  $L_0$  ), los cuales permitieron obtener el máximo beneficio en la producción primaria de petróleo (  $B_0$  ) con una inversión determinada.

Se llega a un punto en que la producción primaria llega a su fin por la baja tasa de recuperación de petróleo, la cual obliga al abandono o cierre del yacimiento.

La razón por la cual se abandona el yacimiento es de orden tecnológico: los factores comprometidos originalmente (  $L_0$ ,  $K_0$  ), ya no responden al beneficio (  $B_0$  ) esperado debido a que la tecnología utilizada no permite recuperar el crudo existente en el yacimiento ( Ver grafico 2).

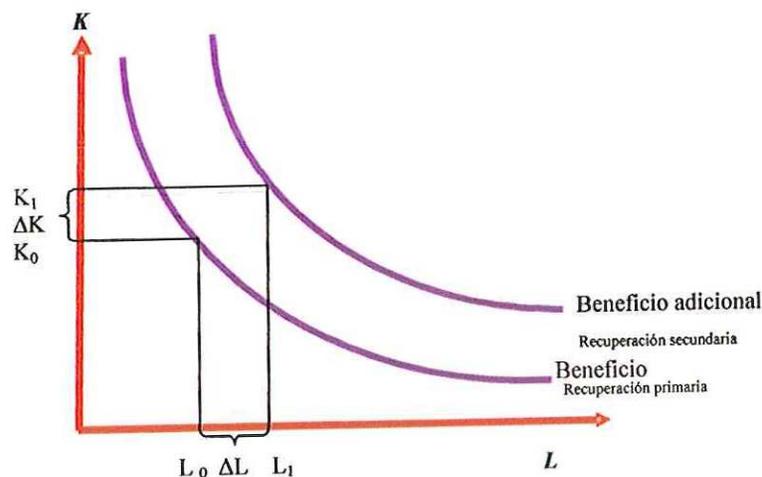
GRAFICA 3. Ciclo de vida de un yacimiento de petróleo



En este proceso nos podemos dar cuenta que luego de una producción alta en el proceso de recuperación primaria, la producción tiende a disminuir de tal forma que se toma la decisión del abandono del yacimiento.

## 4.2 ESCENARIO 2

GRAFICA 4: Curva de beneficio adicional realizando un cambio al proceso de recuperación secundaria.



“Para cualquier nivel de producción se pueden elegir una infinidad de combinaciones factibles de factores de producción”.<sup>8</sup>

Con la finalidad de aumentar mi nivel de producción realizo un aumento en el factor capital con un incremento en el factor mano de obra, en el modelo a largo plazo puedo cambiar todos los factores de producción (Ver Grafico 4).

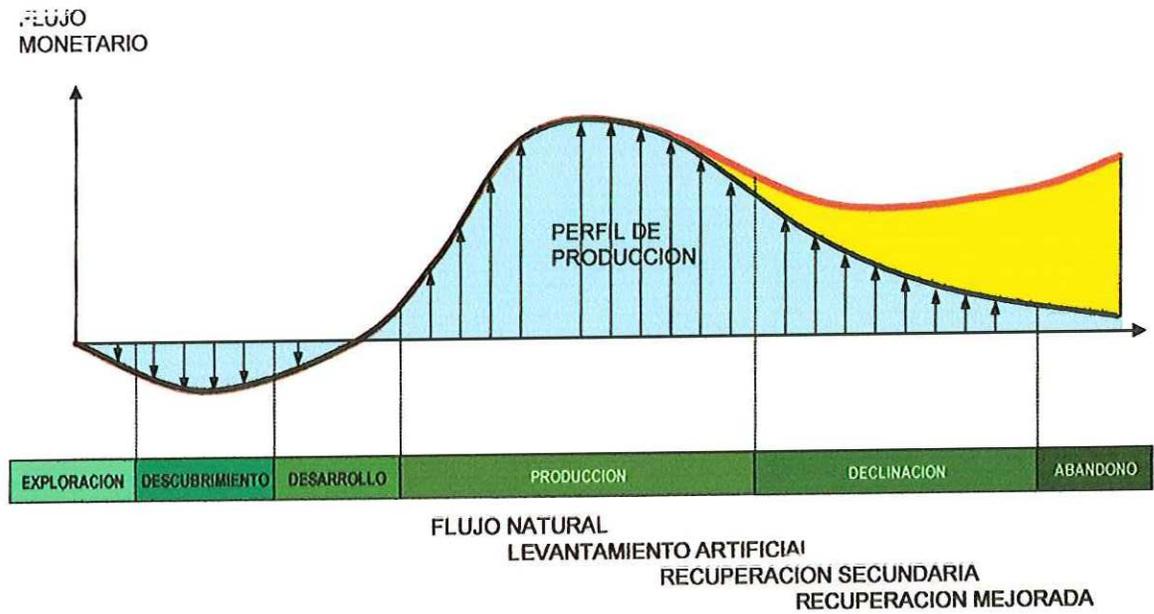
La nueva tecnología de recuperación secundaria por desplazamiento con agua implicara la incorporación una inversión adicional ( $\Delta K$ ) de una masa adicional de trabajo ( $\Delta L$ ), la cual permitirá un nivel de beneficio adicional  $B_1$  ( Ver grafico 4 ). Entonces la relación tecnología de eficiencia estará determinada por:

$$Q_1 = F(L_1, K_1)$$

La rentabilidad de la inversión comprometida en el proyecto de recuperación secundaria por desplazamiento con agua dependerá de los costos comprometidos en el proceso y de la tasa de recuperación final de petróleo en este nuevo escenario.

<sup>8</sup> Hal, Varian. Análisis microeconómico. Editado por: Antoni Bosch. Pág. 6,7.

GRAFICA 5. Ciclo de vida de un yacimiento, tomando la decisión de realizar recuperación secundaria.



En el gráfico 5, la parte amarilla nos indica la producción adicional que se puede alcanzar tomando la decisión de no abandonar el yacimiento, y de realizar el proceso de recuperación secundaria por desplazamiento con agua.

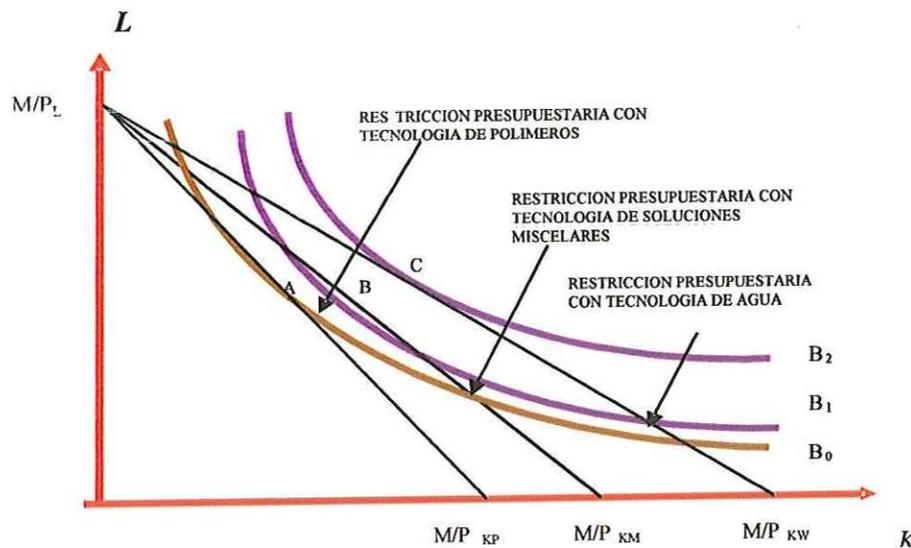
## 5. LA INVERSION Y LOS COSTOS DE LA RECUPERACION SECUNDARIA

Según experiencias llevadas a cabo por las empresas petroleras, los costos de la tecnología utilizada en el proceso de recuperación secundaria son altos, Sin embargo ya existen costos aportados por los procesos anteriores tales como:

- \* La exploración
- \* La perforación de los pozos productores
- \* Facilidades de superficie en flujo natural y levantamiento artificial

Asumiendo que hay disponibilidad de fuentes de agua, adicionalmente, facilidades de inyección del agua dentro de la formación y alta eficiencia de desplazamiento de aceite. El proceso de recuperación secundaria por desplazamiento de agua compromete menores costos en comparación con otras opciones tecnológicas como ( polímeros o con soluciones miscelares).

GRAFICA 6: Curvas de beneficio aplicando distintos procesos de recuperación de petróleo teniendo en cuenta el precio de los factores.



Si asumimos que:

M= Monto de la inversión

K= Factores asociados al capital

$L$ = Factor asociado a la mano de obra

$P_K$ = Precio del capital

$P_L$ = Precio de la mano de obra

$P_{KP}$ = Precio de los factores para la recuperación de crudo con polímeros

$P_{KM}$ = Precio de los factores para la recuperación de crudo con soluciones miscelares.

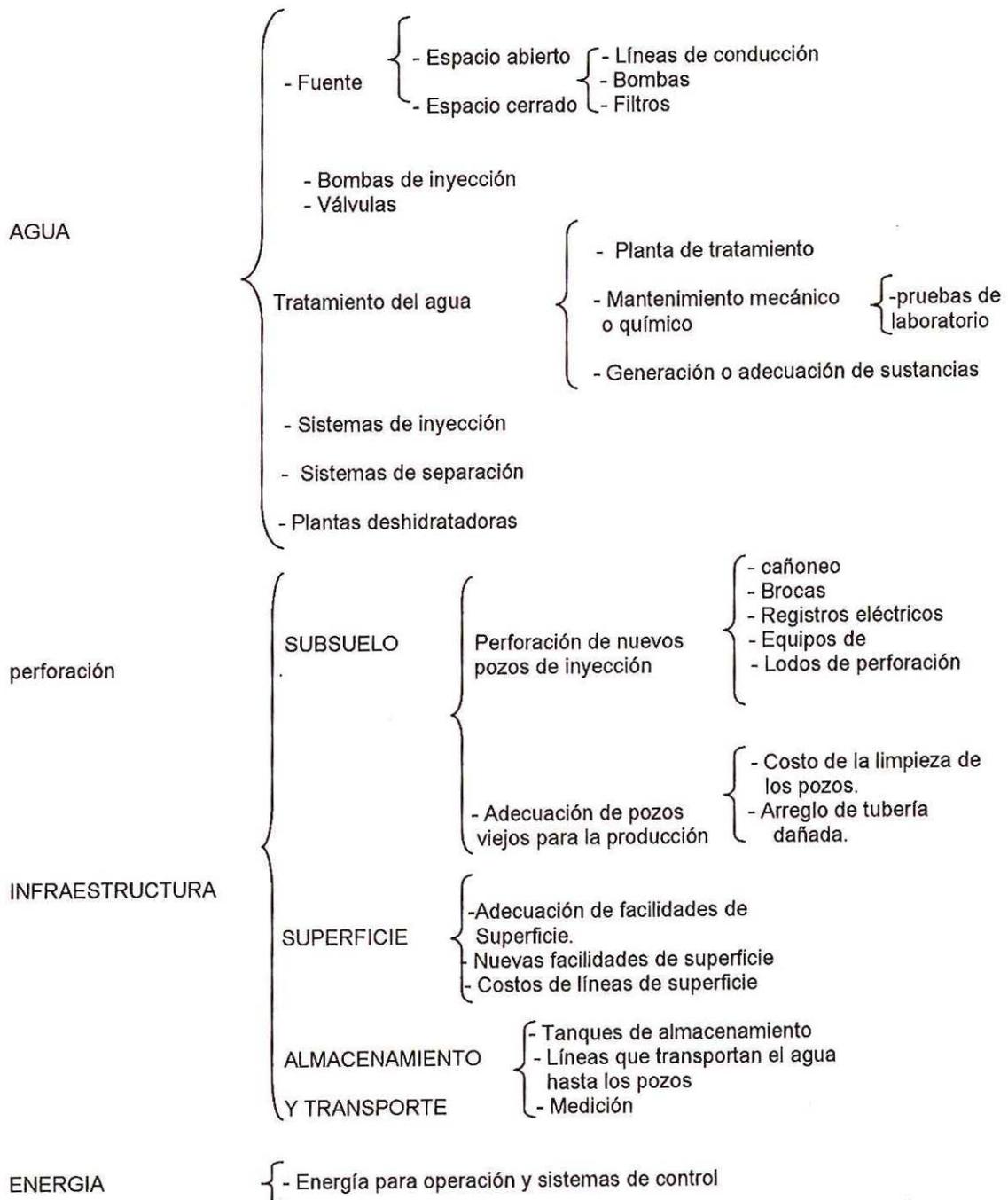
$P_{KW}$ = Precio de los factores para la recuperación de crudo con desplazamiento con agua.

En función de los costos (precios de los factores) comprometidos en la inversión en el proceso de recuperación secundaria por desplazamiento con agua permite alcanzar un beneficio superior en comparación con las alternativas tecnológicas de polímeros, y soluciones miscelares ( Ver grafico 6 ).

En este caso específico el precio de los factores utilizados en el proceso de recuperación secundaria por desplazamiento con agua (  $P_{kw}$  ) son menores, lo cual quiere decir que la inversión ( $M$ ) va a aumentar su rendimiento , el nivel de producción de petróleo va a ir aumentando su beneficio a medida que el precio de los factores de capital sean menores.

## 5.1. COSTOS INVOLUCRADOS EN LA TECNOLOGÍA DE RECUPERACIÓN SECUNDARIA

En el estudio de recuperación secundaria se debe tener en cuenta la tecnología que será utilizada como costos propios del proceso:



## 6. FACTORES DETERMINANTES DE LA INVERSIÓN EN EL PROCESO DE RECUPERACIÓN SECUNDARIA POR DESPLAZAMIENTO CON AGUA

Los principales factores que participan en la toma de decisiones de hacer recuperación secundaria por desplazamiento de agua se resumen en el siguiente modelo:

$$\text{Rentabilidad de la inversión} = f(W_i, N_p, I, B_i, E, T, A_t, \mu_i)$$

TABLA 1. Principales factores que intervienen en el proceso de recuperación secundaria.

PRINCIPALES FACTORES QUE INTERVIENEN EL PROCESO DE RECUPERACION SECUNDARIA	DEFINICIÓN	EFECTO EN LA INVERSIÓN
Agua de inyección ( $W_i$ )	Es el agua que se va a necesitar para realizar la inyección, los costos en esta etapa dependen de la fuentes de donde se va a tomar el agua, pues si es un campo abierto esta necesitara un tratamiento mas costoso, además necesitara líneas de conducción, plantas de tratamiento del agua, filtros, y la adición de sustancias para adecuar el agua a las condiciones del yacimiento.	Si la calidad del agua es baja los costos se incrementara, pues hay que darle un tratamiento antes de ser inyectada, otros factores que influyen son la ubicación topográfica y la distancia de las fuentes igualmente comprometen mayores costos para el proyecto.

<p>Numero de pozos de inyección ( <math>W_i</math> )</p>	<p>Es el número de pozos que se necesitaran para realizar la inyección del agua, estos dependerán de las características del yacimiento.</p>	<p>La relación entre el número de pozos y la inversión, es inversa: a mayor numero de pozos , mayores costos pero la tasa de recuperación puede ser mayor.</p>
<p>Infraestructura ( I ):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Unidades de bombeo</li> <li>- Tanques</li> <li>- Líneas ( tubería)</li> <li>- Separadores</li> <li>- Sistemas de medición y control.</li> </ul>	<p>Es todo lo que tiene que ver con el equipo necesario para la extracción de petróleo, adecuación de superficie, incluye la instalación de tubería.</p>	<p>Gran parte de esta infraestructura se dispone del proceso de recuperación primaria, los costos adicionales reducen la relación beneficio/ costo en la inversión.</p>
<p>Sistema de bombas de inyección de agua ( <math>B_i</math> )</p>	<p>El número de bombas que necesitan para realizar la inyección, dependen de la dimensión y características del yacimiento</p>	<p>Si el número de bombas es muy elevado se incrementan los costos por lo tanto se desestimula la inversión.</p>
<p>Energía ( E )</p>	<p>Todo el proceso de perforación, adecuación de los pozos y el uso de bombas e infraestructura para la recuperación secundaria necesitaran de energía ( eléctrica, gas e.t.c.), para que estas actividades se puedan llevar a cabo.</p>	<p>Un aumento en los costos de la energía desestimularia la inversión.</p>
<p>Tiempo de la fase de recuperación secundaria ( T )</p>	<p>El tiempo de realizar la recuperación secundaria depende de la profundidad y de las condiciones geológicas y técnicas: La reducción del tiempo</p>	<p>Si el tiempo de realizar la recuperación secundaria es alto, mayores serán los costos del proceso.</p>

	de recuperación de las reservas remanentes de crudo implica el incrementote costos en el montaje, de una infraestructura que maneje mayores volúmenes y presiones.	
Almacenamiento y Transporte ( At )	Es el desplazamiento del petróleo y el agua recolectado ya sea por carrotanques, oleoductos hacia los tanques o plantas en donde se hará el almacenamiento y el debido tratamiento.	Parte de estos costos ya han sido asumidos por la fase anterior. Entre mas altos sean los costos de almacenamiento y transporte la inversión se desestimula.

Existen otros factores de orden tecnológico propios de la ingeniería de petróleos que intervienen en la decisión de realizar o no inversión en el proceso de recuperación secundaria por desplazamiento con agua:

Rentabilidad de la inversión (  $\mu_i$  ) =

$$F ( Fr, RFA, Q, \text{ vs } Q_r, RAP \text{ vs } R, K, S_w, M, Pf, P_r, U_o, V_w )$$

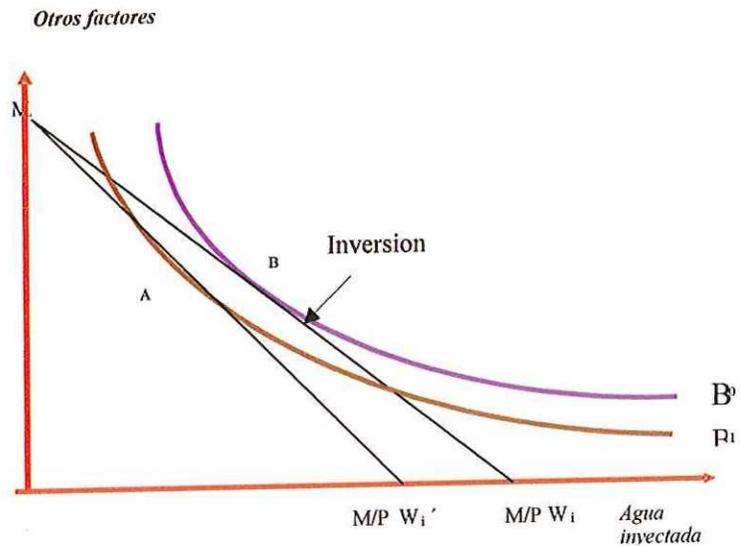
TABLA 2. Factores de orden tecnológico que intervienen en el proceso de recuperación secundaria.

OTROS FACTORES DE ORDEN TECNOLÓGICO QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE RECUPERACION SECUNDARIA	EFECTO EN LA INVERSION
Factor de recobro ( Fr )	Si aquellas cantidades recuperadas de petróleo aumentan, estimula a la inversión en el proceso de recuperación secundaria.
Recuperación Final de aceite ( RFA )	Si la recuperación final de aceite es muy baja, se desestimula la inversión ya que no sería viable arriesgar tanto capital
Tasa de inyección vs Tasa de recuperación ( $Q_i$ vs $Q_r$ )	Si $Q_i$ es menor que $Q_r$ es viable realizar la inversión porque el petróleo recuperado va a ser mayor a comparación del agua inyectada.
Relación agua petróleo vs Recuperación ( RAP vs R )	Si el petróleo recuperado es mayor que el agua recuperada es factible hacer la inversión.
Permeabilidad ( K )	Si es alta la cantidad de petróleo recuperable es mayor, por lo tanto el agua inyectada se desplaza más rápidamente y con mayor facilidad y los costos tienden a reducirse, la inversión es menor.
Saturación de agua ( $S_w$ )	Cuando la $S_w$ es baja, la cantidad recuperable de aceite es máxima por lo que es bueno realizar la inversión, en caso contrario no puede recuperarse aceite.
Razón de movilidad ( M )	Entre menor sea este valor, más efectivo será el proceso de inyección de agua, ya que el petróleo se desplaza con mayor facilidad por lo tanto la inversión es menor.
Profundidad del yacimiento ( Pf )	La profundidad de los estratos productivos tienen gran importancia pues entre más profundo es más costoso el bombeo, por lo tanto la inversión es más alta. Un equipo para perforar pozos profundos será más costoso.

Porosidad ( Pr)	A mayor porosidad se optimizan los recobros y aceleran la recuperación de inversiones.
Viscosidad del aceite ( Uo)	Los aceites con alta viscosidad serán mas difíciles de desplazar y casi siempre el porcentaje de la recuperación es bajo, aumentan los costos del proceso de inyección de agua y se desestimula la inversión
Volumen del agua inyectada ( V )	Entre mayor sea el volumen de agua necesitado para inyectar, mayores serán los costos en el tratamiento de la misma por lo tanto se desestimula la inversión.

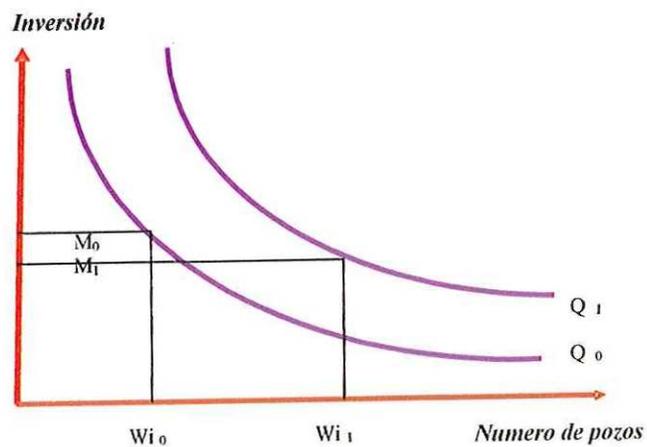
La ponderación de cada uno de los factores participantes en la toma de decisiones de inversión, es determinada por las características particulares del yacimiento. Esta ponderación será determinada en el ejercicio de campo que se efectuara en uno de los campos que pertenecen a ECOPETROL mediante un convenio UNAB-ICP.

## 6.1 AGUA INYECTADA



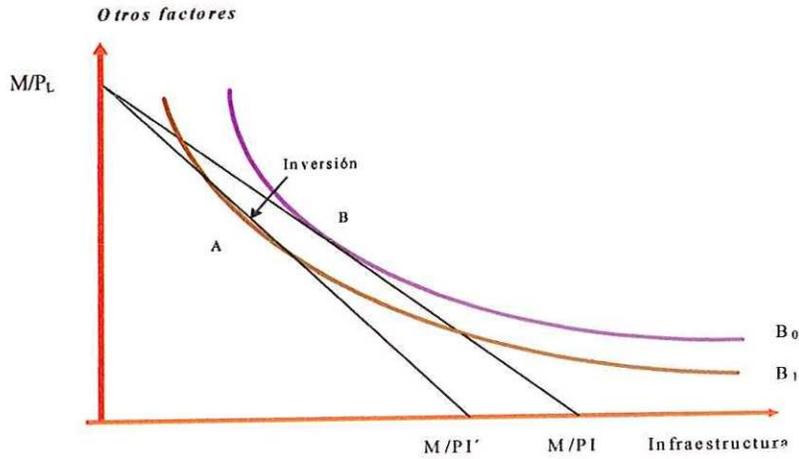
A medida que aumenta el precio del agua inyectada la inversión se vuelve menos rentable, ya que el beneficio comienza a disminuir.

## 6.2 NUMERO DE POZOS



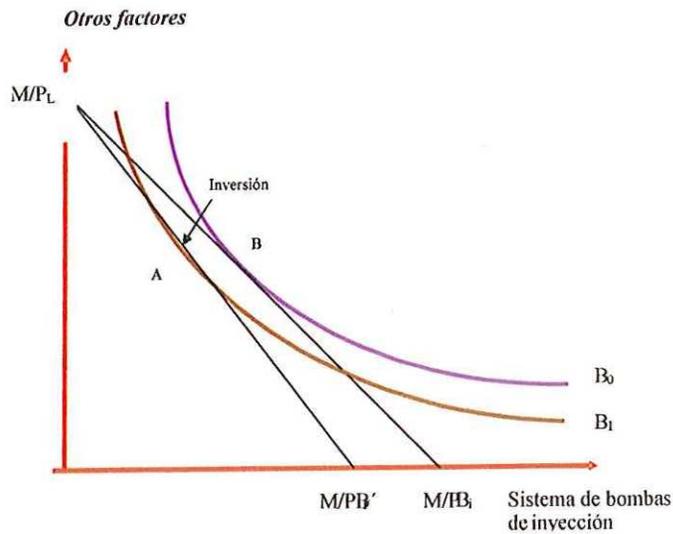
A mayor cantidad de pozos se desestimula la inversión y la tasa de producción tiende a disminuir.

### 6.3 INFRAESTRUCTURA



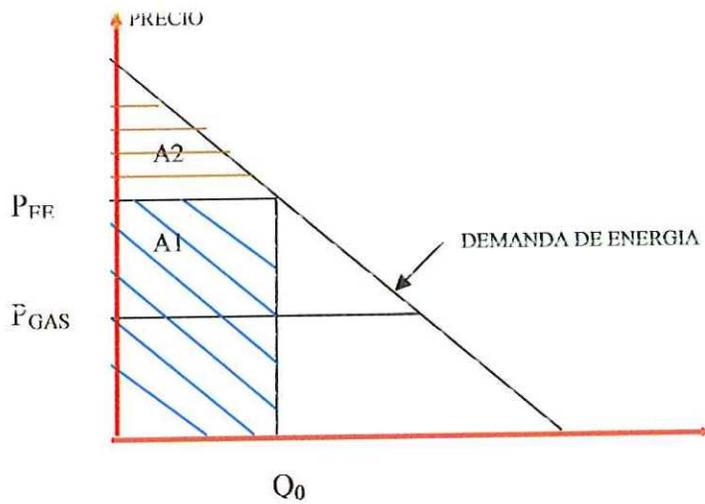
A medida que aumenta el precio de la infraestructura se reduce la relación beneficio/costo en la inversión, por lo tanto disminuye su rentabilidad.

### 6.4 SISTEMAS DE BOMBAS DE INYECCIÓN



Si aumenta el precio y la cantidad de las bombas de inyección se incrementaran los costos, por lo tanto la relación beneficio/ costo disminuye y la inversión se desestimularia.

## 6.5 ENERGÍA



A1: Excedente del consumidor por consumir gas.

A2: Excedente del consumidor por consumir E.E.

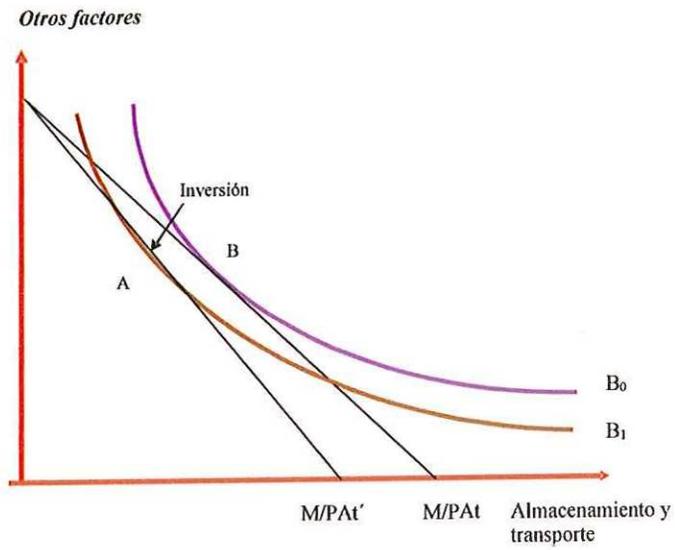
$Q_0$ : Cantidad de energía requerida por el proyecto.

$P_{EE}$ : Precio de la energía eléctrica.

$P_{GAS}$ : Precio de la energía de gas natural.

Si  $A1 > A2$ , la mejor opción para el proyecto es la energía de gas natural pues es menos costosa, y si  $A2 > A1$  la mejor opción sería la energía eléctrica.

## 6.6 ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE



Entre mas altos sen los costos de almacenamiento y transporte, el beneficio disminuye, lo cual quiere decir que la relación beneficio- costo se reduce.

## 7. CONCLUSIONES

- La base para la evaluación económica de los factores tecnológicos serán las teorías de la variación compensadora y el excedente al consumidor.
- El ejercicio teórico realizado que recomienda la R.S.P.D.A. se basa en los supuestos recomendados por la Universidad Industrial de Santander y el ICP, cuando sugieren que los costos del agua son inferiores a las soluciones miscelares y polímeros además se tiene en cuenta que nuestro país presenta unas fuentes hídricas abundantes.
- Se realizó un análisis teórico que permitirá interpretar las variables asociadas a la tecnología en el ejemplo de aplicación que se realizara el próximo año.
- La disponibilidad del tipo de factores (agua, energía, infraestructura e.t.c.), permitirá el acceso a los mismos a unos costos mas bajos, disponiendo de mayores volúmenes de los mismos con la misma inversión.
- La Evaluación integral del proyecto se deberá hacer incorporando los factores evaluados a las eficiencias empresarial, social y adaptativa.

## BIBLIOGRAFÍA

SANDOVAL FRANCO, Leonardo Tesis: Conectividad Hidráulica entre pozos en modelos de recobro por inyección de agua, Universidad Industrial de Santander. Paginas 1,2.

DIAZ SIERRA, Javier, GOMEZ RODRÍGUEZ German Ricardo, Tesis Estudio de control de permeabilidad mediante el uso de soluciones combustoleo-Agua, en proceso de inyección de agua, Universidad Industrial de Santander, Paginas 65-81

ARCINIEGAS, Julio Mario Tesis: Estudio sobre inundación de agua e inyección de gas como metodos usados en recuperación secundaria, , Universidad Industrial de Santander, paginas ii-iii.

RUEDA MEJIA Hilda, VALENCIA DIAZ Carmen Amparo Tesis Análisis del comportamiento de inyección de agua Bloque III Arenas superiores- Campo Casabe con base en trazadores radioactivos. , Universidad Industrial de Santander, Paginas 27-35.

GUEVARA RODRÍGUEZ Myriam, GOMEZ GOMEZ Julian Alberto, Tesis Evaluación de los tratamientos realizados al agua de inyección del campo Casabe. , Universidad Industrial de Santander, Paginas 1-13.

RODRÍGUEZ RICO Ramon, Evaluación del proceso de inyección de agua en el campo DINA Cretaceos mediante el Software OFM, , Universidad Industrial de Santander , Paginas 24-38.

ARIAS TORO Andres Camilo, RAMÍREZ ROA Rafael Eduardo, Evaluación Técnica y económica del proceso de separación dela agua en fondo y su inmediata inyección en otro horizonte dentro del mismo pozo. , Universidad Industrial de Santander , Paginas 107-124, 160-169.

HAL VARIAN Análisis Microeconomico

[www.monografias.com](http://www.monografias.com), Por Juan Pedro Azcona

GANESH C. THAKUR, ABDUS SATTER, Integrated WaterFlood Asset  
Management