

# ESTUDIO DE LA FACTIBILIDAD DE IMPLEMENTAR INYECCIÓN CÍCLICA DE VAPOR EN UN CAMPO COLOMBIANO

Erika Trigos<sup>1</sup>, Tatiana Zafra<sup>2</sup>, Yolet Garcia<sup>3</sup>, Samuel Muñoz<sup>4</sup>

## RESUMEN

Al momento de determinar el esquema de desarrollo de un campo, se deben evaluar diferentes alternativas para seleccionar la que mejor se ajuste a las condiciones del yacimiento, y así obtener el mayor incremento en el factor de recobro. En Colombia, los campos de crudo pesado se han convertido en el foco de la exploración y explotación de hidrocarburo, por lo que se vienen desarrollando estudios para implementar procesos como combustión in situ (CIS) y drenaje gravitacional asistido con vapor (SAGD). Sin embargo, teniendo en cuenta que la inyección cíclica de vapor es una alternativa más económica que ha mostrado su efectividad en yacimientos de crudo pesado, se buscó establecer la factibilidad técnica de implementar este proceso en el yacimiento de estudio usando simulación numérica y herramientas de optimización.

Uno de los factores determinantes del estudio fue la presencia de acuífero en el yacimiento. Para evaluar su efecto, se ubicaron los pozos a diferentes distancias del acuífero, buscando un equilibrio entre el mantenimiento de presión por el empuje de agua que favorece la producción, y los problemas que afectan la eficiencia térmica del proceso como la formación de canales de alta saturación de agua. Posteriormente, se desarrolló un análisis de sensibilidad para determinar los parámetros de operación relevantes sobre el proceso, bajo estas condiciones particulares de estudio. Entre las variables estudiadas se encuentran: ubicación y número de pozos, tasas y presiones de inyección/producción para cada ciclo, número de ciclos y duración de cada uno, calidad y cantidad de vapor, entre otras.

Finalmente, se seleccionaron las variables operacionales que tuvieron mayor incidencia en el análisis de sensibilidad, para llevar a cabo el proceso de optimización y de esta manera identificar los mejores escenarios para la implementación de la inyección cíclica de vapor. Los resultados fueron comparados con el caso de desarrollo del campo por producción en frío, usando parámetros de evaluación como el factor de recobro y relación vapor inyectado – Aceite producido (SOR), permitiendo concluir que la implementación de un proceso de inyección cíclica de vapor en el campo de estudio es factible desde el punto de vista técnico.

**Palabras Clave:** Acuífero, optimización, recobro térmico, simulación numérica.

<sup>1</sup> Magister en ingeniería de hidrocarburos. Ecopetrol. Piedecuesta, Colombia. E-mail: [erika.trigos@ecopetrol.com.co](mailto:erika.trigos@ecopetrol.com.co)

<sup>2</sup> Ingeniera de petróleos. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga, Colombia.

<sup>3</sup> Ingeniera de petróleos. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga, Colombia.

<sup>4</sup> Magister en ingeniería de hidrocarburos. Profesor Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga, Colombia. E-mail: [samuel@uis.edu.co](mailto:samuel@uis.edu.co)

## ABSTRACT

At moment of determine the schedule of develop of a field, should be evaluate different alternatives to select the best suited to the conditions of the reservoir, and obtain the largest increment in the recovery factor. In Colombia, the fields of heavy oil have been converted in the focus of exploration and exploitation of oil, so we are developing studies for implement process like in situ combustion and steam assisted gravity drainage (SAGD). However, taking into account that the cyclic steam injection is a cheaper alternative that has shown its effectiveness in heavy oil fields, was sought to establish the technical feasibility of implementing this process in the reservoir of study using numerical simulations and optimization tools.

One of the determining factors of the study was the presence of aquifer. To evaluate its effects, the wells were located at different distances for in the aquifer, looking for balance between maintaining of pressure by the push of water to favor the production, and the problems affecting the thermal efficiency of the process such as the formation of canals of high saturation of water. Subsequently, was realized a sensitivity analysis to determine the relevant operational parameters to the process under these conditions of study, such as the rate and injection pressure, the number and duration of cycles, quality and quantity of steam, among others.

Finally, were selected the operational variables that had greater impact on the sensitivity analysis to carry out the optimization process and in this way were identified the best scenarios for implementing a process of cyclic steam injection. The results were compared with the case of developing the field in cold, using parameters of evaluation how the recovery factor and steam / oil ratio (SOR), and this allowed us to conclude that the process of cyclic steam injection in the study's field is feasible technically.

**Keywords:** Aquifer, optimization, thermal recovery, numerical simulation.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La inyección cíclica de vapor es uno de los procesos de recobro térmico más usados para la recuperación de crudos pesados, su propósito es aumentar la movilidad del crudo por la disminución de su viscosidad, esto gracias al incremento de la temperatura en las zonas cercanas al pozo. Contrario a otras técnicas de recuperación térmicas como SAGD o inyección continua de vapor, se considera una tecnología que no requiere altas inversiones de capital y presenta rápidos incrementos de producción [1].

La Inyección Cíclica de Vapor, consiste en suministrar calor a la formación productora inyectando un alto volumen de vapor húmedo durante días o semanas; dicho tiempo dependerá de la viscosidad del crudo, así como también de la cantidad de vapor inyectado. Después del periodo de inyección, se cierra el pozo para la homogenización de la zona calentada y estabilización de la presión del yacimiento. El tiempo de remojo debe ser lo suficientemente corto para evitar pérdidas excesivas de calor a los estratos no productores, pero no debe ser tan pequeño de manera que el vapor sea capaz de entregar calor a la roca. Una vez el vapor ha calentado la formación y la presión del yacimiento se ha estabilizado, el pozo es abierto y puesto en producción.

Al inicio se registran grandes cantidades de agua a altas temperaturas resultado de la condensación del vapor inyectado, luego la tasa de producción de agua comenzará a disminuir poco a poco, mientras que la producción de aceite alcanzará su tasa máxima pocos días después de haber iniciado la producción y luego declinará [2].

Colombia cuenta con un gran potencial en yacimientos de crudo pesado con características particulares como grandes profundidades, alta relación arena arcilla o presencia de acuífero; siendo esta última la característica principal del campo evaluado en este trabajo.

Con el fin de plantear un esquema de desarrollo para el campo en estudio, se evaluará la factibilidad de implementar un proceso de inyección cíclica de vapor, usando simulación numérica de yacimientos y herramientas de optimización. Se incluye la determinación de la ubicación del piloto, análisis de sensibilidad a los parámetros de operación y finalmente un proceso de optimización para identificar los mejores escenarios que garanticen la viabilidad técnica del proceso.

## 2. EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL ACUÍFERO.

La principal característica del yacimiento en estudio, es la presencia de un acuífero parcialmente activo. El efecto de estos cuerpos de agua sobre la recuperación térmica ha sido estudiado por otros autores, llegando a determinar que de acuerdo al espesor y el tamaño del acuífero, la inyección de vapor puede verse seriamente afectada [3].

De acuerdo a lo anterior, es necesario identificar si en este caso el acuífero ejerce algún impacto sobre la inyección cíclica de vapor, y de acuerdo a esto seleccionar la mejor ubicación del piloto.

La metodología desarrollada consta de tres fases: en la primera, se eligen tres zonas del yacimiento con diferente grado de afectación del acuífero; luego se seleccionan las condiciones base de operación, a partir de experiencias análogas de campo; y finalmente se analizan los resultados obtenidos en variables como: producción diaria de aceite, agua y SOR.

En la primera fase se consideran tres escenarios: zonas a distancia corta, media y lejana del acuífero. Para cada escenario, se perforan tres pozos en áreas con diferentes propiedades petrofísicas, incluyendo al estudio el efecto de las heterogeneidades del yacimiento. Dada la complejidad del proceso a representar, se realizó un refinamiento cartesiano de  $60 \times 60 \times 1$ , con el cual se puede observar el comportamiento del proceso cada 4 pies. La ubicación de los escenarios y pozos, así como la representación gráfica del refinamiento usado se puede observar en la Figura 1.

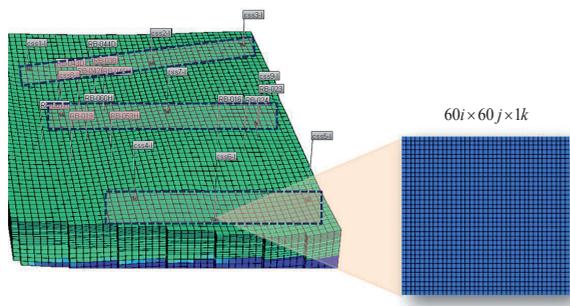


Figura 1. Escenarios de evaluación y refinamiento de pozos.

Una vez seleccionada la ubicación de los pozos para evaluar el efecto del acuífero, se procedió a determinar las condiciones base de operación, para lo cual se usó un software de analogías que a partir de datos ingresados de propiedades de roca y fluido, determina cuales son los

campos a nivel mundial que cumplen con la condición de contar con procesos de inyección cíclica de vapor a escala piloto o comercial [4].

Los campos seleccionados y los parámetros obtenidos a partir del análisis mediante analogías, se presentan en la tabla 1.

Adicional a la información analógica presentada, se consideraron las experiencias de campo con inyección cíclica de vapor en los yacimientos de la cuenca del valle medio del magdalena [5].

Acorde a la información consultada se decidió usar un diferencial entre la presión de inyección y la presión de yacimiento en un rango de 2070 a 2750 KPa y una tasa de inyección de 300 m<sup>3</sup>/día por un periodo de 7 días. Teniendo en cuenta las pérdidas de energía, se estima que el vapor llega a la cara de la formación con calidad del 65%. Se fijó un periodo de producción de ocho meses.

Tabla 1. Resultados de campos análogos.

	CAMPOS ANÁLOGOS				
	Bachaquero	Cat canyon	Nirm	Wilmington	Marmul
Presión de Yacimiento ( KPa )	7170	9653	10245	2068	5495
Presión de Inyección ( KPa )	11859	14479	13996	4481	7495
Tasa de Inyección (m <sup>3</sup> /d)	124	202	59	NR	47
Tiempo de Inyección (días)	18	5	17	6	15
Tiempo de Remojo (días)	7	3	4	5	5
Tiempo de Producción (días)	270	165	286	750	46

En la ubicación mostrada y con los parámetros de operación presentados anteriormente se corrió la simulación numérica. Los resultados mostraron que a medida que los pozos se acercan al cuerpo de agua, se incrementa el efecto negativo de éste sobre el proceso. Esto se debe a que el acuífero avanza progresivamente, invadiendo zonas y generando canales de alta saturación de agua en las regiones adyacentes a los pozos, que actúan como zonas ladronas de calor.

La Figura 2 y la Figura 3, muestran bajos niveles de producción de aceite e incrementos en la producción de agua en las cercanías del acuífero. Otro indicio del efecto negativo del acuífero es el incremento del SOR, el cual pasa de 1.4 a 2.3.

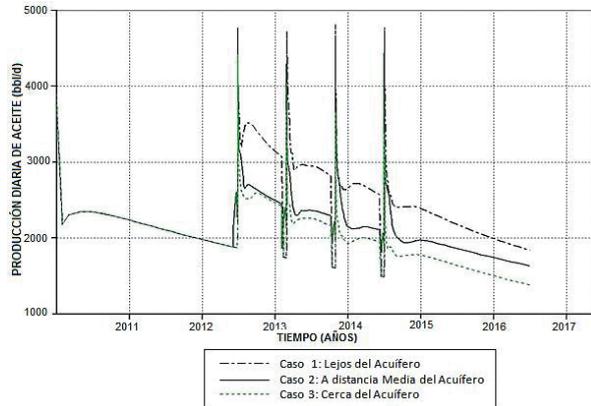


Figura 2. Efecto de la distancia del acuífero sobre la producción de aceite.

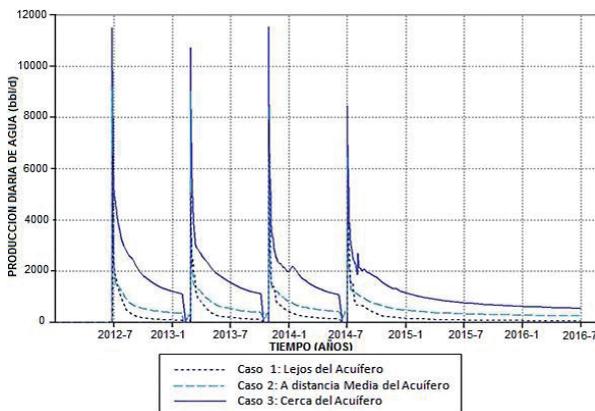


Figura 3. Efecto de la distancia del acuífero sobre la producción de agua.

### 3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD A LAS VARIABLES DE DISEÑO.

Acorde a los resultados obtenidos en la evaluación del efecto del acuífero, se decidió ubicar el piloto de evaluación lejos del acuífero.

El piloto está conformado por seis pozos que cubren un área de 20 acres (80937 m<sup>2</sup>) y un volumen de aceite original in situ (OOIP) de 1.4x10<sup>7</sup> barriles (2.2258x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>). Cada pozo produce en frío por 18 meses, después de este periodo se implementan cinco ciclos de estimulación con vapor.

El análisis de sensibilidad consiste en determinar el efecto de la tasa de inyección, diferencial de presión, calidad del vapor y tiempos de remojo y producción sobre factor de recobro, corte de agua y SOR. La Tabla 2 presenta los valores usados para el análisis de sensibilidad. Los resultados se presentan en forma de diagramas tornados en las Figuras 4, 5 y 6, donde se observa que la tasa de inyección es la variable de mayor impacto.

Tabla 2. Parámetros usados en el análisis de sensibilidad.

Parámetro	Mínimo	Base	Máximo
Diferencia de Presión (KPa)	1390	2070	2750
Tasa de Inyección ( m <sup>3</sup> /d)	252	300	395
Tiempo de Remojo (días)	1	3	6
Tiempo de Producción (días)	210	270	330
Calidad del Vapor (%)	55	60	65



Figura 4. Diagrama tornado para el factor de recobro.

Los diagramas tornados indican que a mayores tasas de inyección se maximiza el factor de recobro, ya que se requieren menores tiempos de inyección y por ende se minimizan las pérdidas de energía. Una mayor producción de aceite ocasiona también una reducción del SOR y del corte de agua.

El diferencial de presión y la calidad del vapor presentan el mismo efecto que la tasa de inyección. A mayor presión, mayor temperatura, incrementándose la transferencia de energía, que junto con una máxima calidad en la cara de la formación, mejora la movilidad del crudo, permitiendo que este se desplace hacia el pozo y pueda ser producido.

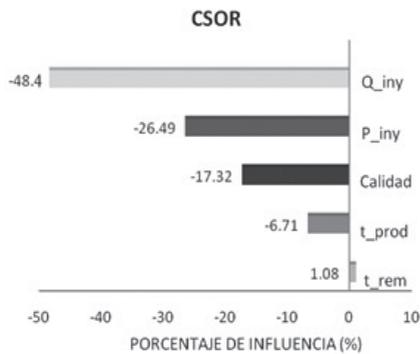


Figura 5. Diagrama tornado para el SOR.

El efecto menor del tiempo de producción se debe a que para el rango establecido (210 y 330 días), se ha iniciado la etapa de enfriamiento causando que la producción tienda nuevamente a la tasa de inicio de la estimulación. Por otra parte, aunque el tiempo de remojo no es tan relevante como otras variables, se puede observar que cuando se incrementa su duración, se incurren en pérdidas de producción por mantener el pozo cerrado.

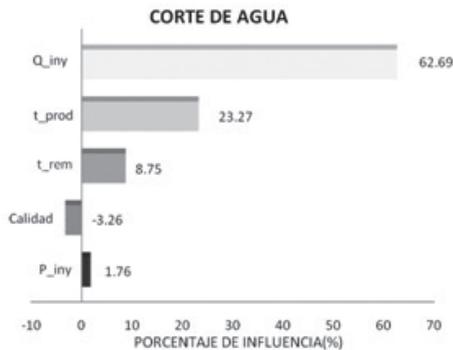


Figura 6. Diagrama tornado para el corte de agua.

#### 4. OPTIMIZACIÓN DE LAS VARIABLES DE DISEÑO.

El proceso de optimización consiste en definir una función objetivo a maximizar o minimizar mediante la variación de una serie de variables. El uso de herramientas especializadas facilita este proceso ya que se enlazan al simulador y descartan estadísticamente los valores de menor impacto [6].

En este caso, se usó la herramienta CMOST (Computer Assisted History Matching, Optimization and Uncertainty Assessment Tool) de la compañía CMG en conjunto con el simulador STARS de la misma compañía.

La ventaja de CMOST, radica en que permite automatizar la creación de un conjunto de simulaciones que a su vez ayudan a generar resultados más representativos, presentándolos de un modo gráfico, analítico y de fácil interpretación. Cabe resaltar que la veracidad de estos resultados depende de la capacidad de análisis del ingeniero y de los datos que haya tomado como punto de partida [7].

El proceso de optimización que realiza CMOST, tiene su fundamento matemático en el algoritmo DECE (Designed Exploration and Controlled Evolution), algoritmo que requiere del establecimiento de una función objetivo y de parámetros de entrada, bloqueando los parámetros que él reconoce como no beneficiosos para éxito del proyecto e imitando el trabajo que desarrolla un ingeniero de yacimientos para encontrar las mejores condiciones para aplicación de un proceso [8].

A partir de los resultados del análisis de sensibilidad se determinaron las variables y valores a usar en la optimización. Se usaron diferenciales de presión de 2068, 2413, 2757 y 3100 KPa. Las tasas de inyección usadas están acordes a las especificaciones de los generadores que se encuentran en el mercado. Como para tiempos de remojo cercanos a seis días, no se generaba ningún beneficio, se escogió un rango de dos y cuatro días. El tiempo de producción se acortó a un rango de 190 a 230 días, teniendo en cuenta que después de este límite el efecto de la movilidad del crudo se ve reducido y es necesaria la aplicación de una nueva estimulación.

Para la definición de la función objetivo se usó el valor presente neto (VPN), ya que esta variable involucra tanto los ingresos por venta de crudo como los costos de tratamiento de fluidos y generación de vapor. En la Tabla 3 se presentan los valores usados para el cálculo del VPN.

Tabla 3. Valores para el cálculo del VPN.

DETALLE	Valor
Precio de Venta del Crudo (US/B)	32
Costo de tratamiento agua de producción (US/BW)	0,5
Costo de generar vapor (US/BEW)	6
Tasa de descuento anual (%)	10

Los resultados mostraron que las variables que favorecen el proceso son: tiempo de producción de 190 o 200 días, tiempo de remojo de 2 días, y diferencial de presión ente 2413 y 3100 KPa. La Tabla 4 presenta un resumen de los mejores escenarios y los resultados en factor de recobro y SOR.

Un proceso de inyección cíclica de vapor se considera eficiente cuando el factor de recobro del primer ciclo se sitúa entre 0.75 y 1%, mientras que el SOR toma valores entre 2 y 3 [9].

En los mejores escenarios generados en la optimización se obtuvo un factor de recobro cercano a 0.8% en el primer ciclo y el SOR fue muy cercano a 1.35, por lo que se puede concluir que la inyección cíclica de vapor es una alternativa atractiva para el campo de estudio. Sin embargo, una decisión final requiere criterios de evaluación económica tales como payback, tasa interna de retorno (T.I.R.) y tasa promedio de retorno (T.P.R.).

**Tabla 4.** Resultados de la optimización.

MEJORES ESCENARIOS	CASO 1	CASO 2	CASO 3
Presión (Psia)	7930	7584	7930
Temperatura (°C)	294	291	294
Tasa de inyección (m <sup>3</sup> /d)	394	394	394
Tiempo de inyección (días)	6	6	6
Tiempo de remojo (días)	2	2	2
Tiempo de producción (días)	200	200	190
Aceite incremental (m <sup>3</sup> )	24,600	23,300	23,000
FR con CSS (%)	3.21	3.18	3.10
FR Incremental (%)	1.12	1.06	1.04
FR % (1er Ciclo)	0.82	0.81	0.80
SOR	1.36	1.37	1.38

## 5. CONCLUSIONES

A partir del análisis de la relación vapor inyectado/aceite producido (SOR) y del factor de recobro incremental, se concluye que la implementación de un proceso de inyección cíclica de vapor en el campo de estudio es factible desde el punto de vista técnico.

La presencia del acuífero en el yacimiento impacta negativamente los resultados del proceso de inyección cíclica de vapor, debido a que ocasiona pérdidas de energía reduciendo la eficiencia térmica de la estimulación, dando como resultado poco aumento en la movilidad del crudo, además de la irrupción temprana de agua en los pozos productores, lo que implicaría altos

costos de tratamiento del agua según su disposición final.

A partir del análisis de sensibilidad realizado se estableció que los parámetros operacionales de mayor influencia para el campo de estudio en su orden son: tasa de inyección, presión de inyección, tiempo de producción y tiempo de remojo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. FAROUQ ALI, S. M. "Practical Heavy Oil Recovery by steamflooding". 2006. p. 7.
2. BOBERG, T. C.: "Thermal Methods of Oil Recovery. AN EXXON MONOGRAPH, John Wiley & Sons, Inc. 1988. p. 69.
3. FAROUQ ALI, S. M.: "Effect of Bottom Water and Gas Cao on Thermal Recovery", paper SOE 11732.p.4.
4. GONZALES, D. "Análisis e Interpretación de Yacimientos sometidos a Inyección Cíclica de Vapor mediante analogías". Proyecto de grado. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga 2005.
5. FRANCO. y LEON, E: "Evaluación del Sistema de Inyección Cíclica de Vapor en un Campo Petrolero Colombiano". Proyecto de Grado, Universidad Industrial de Santander, 2003.
6. TREBOLLE, R.L., CHALOP, J.P. and COLMENARES, R.: "The Orinoco Heavy-Oil Belt Pilot Projects and Development Strategy", paper SPE 25798.p.2.
7. TREBOLLE R.L., DE PAZ M.E, AND MARTINEZ D.E.: "Parametric Study of the Design Factors for Cyclic Steam Injection in Lake Maracaibo Oil Fields", Paper SPE 25810.
8. Tutorial: Computer Assisted History Matching, Optimization and Uncertainty Assessment Tool (CMOST), 2009. p. 2-26.
9. CHAN, M.Y.S. and SARIOGLU, G. "Numerical Modelling of Cyclically and Fractured Methods". SPE-AIME 5584, 1975.

*Recepción:* 3 de mayo de 2012

*Aceptación:* 29 de junio de 2012