

# CÁLCULO DE LA EFICIENCIA TÉRMICA DE UN PROCESO DE INYECCIÓN CONTINUA VAPOR EN YACIMIENTOS ESTRATIFICADOS

Sandra M. Ruiz G<sup>1</sup>., Laura T. Cabrales <sup>2</sup>C., Luis R. Oliveros G<sup>3</sup>., Samuel F. Muñoz N.<sup>4</sup>

## RESUMEN

Los yacimientos de crudo pesado muestran una importancia predominante al estar asociados a las reservas más grandes del planeta. Por este motivo, se ha dado lugar al desarrollo de técnicas de recuperación mejorada como la inyección continua de vapor, para facilitar la producción de crudo pesado. Sin embargo, en la práctica común se ha evidenciado la presencia de arcillas en formaciones productoras, las cuales afectan negativamente la eficiencia de los procesos de recobro térmico.

El presente estudio se llevó a cabo a partir de la construcción de modelos conceptuales de simulación, con distintos espaciamientos entre los pozos y distinta relación arena-arcilla, con el propósito de analizar qué tanta de la energía suministrada a la formación productora a través del vapor está siendo aprovechada por la misma y que porción ha sido atrapada por las arcillas. Los resultados obtenidos muestran que la eficiencia térmica del proceso se ve afectada por la presencia de formaciones arcillosas, sobre todo cuando estas son de gran espesor, y esto se ve reflejado en el bajo índice de productividad. Por otra parte, se observó que al disminuir el espaciamiento entre los pozos se obtienen mejores factores de recobro debido a que el proceso de inyección continua de vapor resulta más eficiente. Los resultados finales de esta investigación llevaron a la elaboración de correlaciones que permiten el cálculo de la eficiencia térmica de un proceso de inyección continua de vapor en yacimientos de crudo pesado con intercalaciones de arcilla. Estas pueden ser aplicadas en posteriores estudios siempre y cuando las características de los modelos a evaluar sean similares a las empleadas en los modelos de estudio. Con este trabajo se pretende dar un aporte a la industria en el área de recobro mejorado para la producción de crudo de alta viscosidad.

**Palabras clave:** Eficiencia térmica, Relación arena-arcilla, Inyección continua de vapor, Yacimientos estratificados, Crudo pesado, Simulación numérica.

## CALCULATION OF THE THERMAL EFFICIENCY OF A STEAMFLOODING PROCESS IN STRATIFIED RESERVOIRS

## ABSTRACT

Heavy oil reservoirs show a predominant importance because they are associated with the largest reserves in the world. For this reason, it has resulted in the development of enhanced recovery techniques such as steamflooding, to facilitate the production of heavy oil. However, the common practice has evidenced the presence of shale within producing formations, which negatively affect the efficiency of thermal recovery processes.

This study was conducted from the construction of simulation conceptual models, with different spacing between wells and different sand-shale ratio, with the purpose of analyze how much of the energy supplied to the producing formation through the steam is being exploited by the same, and what portion has been trapped by shales. Results show that the thermal efficiency of the process is affected for the presence of shale formations, mainly when these are of great thickness,

1. Ingeniera de petróleos. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga. Colombia. sandraruiz1@correo.uis.edu.co

2. Ingeniera de petróleos. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga. Colombia. laura.cabrales@correo.uis.edu.co

3. M.Sc. en Ingeniería de Hidrocarburos. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga, Colombia. luis.oliveros@grmuis.co

4. M.Sc. en Ingeniería de Hidrocarburos. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga, Colombia. samuel@uis.edu.co

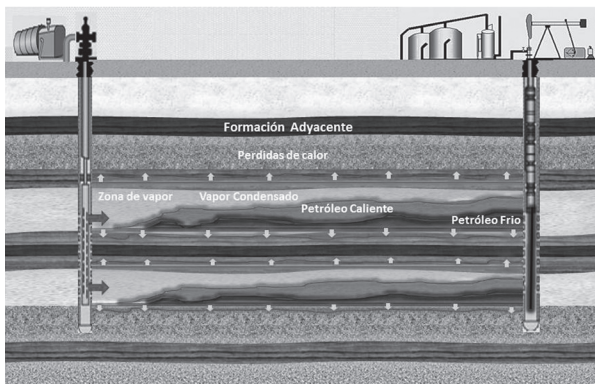
which has reflected in the index productivity low. Moreover, it was observed that decreasing the spacing between wells, allowed best recovery factors due to that steamflooding is more efficient. The final results of this investigation led to development of correlations that allow the calculation of the thermal efficiency of a steamflooding process in heavy oil reservoirs with shales intercalated. These correlations may be applied in subsequent studies as long as characteristics of models going to be evaluated are similar to in the models in this study. With this work it is sought to make a contribution to the industry in the area of enhanced oil recovery for producing high viscosity oil.

**Keywords:** Thermal efficiency, Sand-shale ratio, Steamflooding, Stratified reservoir, Heavy oil, Numerical simulation.

## INTRODUCCIÓN

Los yacimientos de crudo pesado son los escenarios más apropiados para la aplicación del proceso de inyección continua de vapor, debido a que este tipo de petróleo se produce generalmente en formaciones geológicas que son jóvenes, las cuales tienden a ser someras. Bajo esta condición física del yacimiento, se favorece la aplicación de la técnica de recuperación térmica, debido a que se minimizan las pérdidas de calor a través del pozo y además formaciones más profundas poseen mayor temperatura y no se logra aprovechar bien el calor del vapor.

Las propiedades petrofísicas y térmicas de la formación, además del desempeño de la inyección de vapor, influyen en la eficiencia térmica del proceso. La técnica de recuperación térmica se da mediante el aumento de la temperatura promedio de la formación por medio de la energía transportada por el vapor, permitiendo un cambio en la movilidad del aceite, como consecuencia de la reducción de la viscosidad. A su vez, este proceso contribuye a la reducción del petróleo residual [1]. No obstante, cuando existe la presencia de intercalaciones de arcillas en la formación, se ve afectada la transferencia de energía hacia la formación productora, lo cual se ve reflejado en el resultado de la eficiencia térmica del proceso, que determina que tanta de la energía suministrada por medio del vapor está siendo aprovechada por el yacimiento, y que porción de calor es atrapado por las formaciones no productoras [2]. La Figura 1 muestra el esquema general del proceso.



**Figura 1.** Esquema del proceso de inyección continua de vapor

## 1. PARÁMETROS QUE AFECTAN LA INYECCIÓN CONTINUA DE VAPOR EN YACIMIENTOS ESTRATIFICADOS

En los yacimientos estratificados existen parámetros que afectan en mayor proporción el efecto de la inyección de vapor. Los más importantes son:

### 1.1 HETEROGENEIDADES DE YACIMIENTO

Las intercalaciones de arcilla, la variación direccional en la permeabilidad, la baja saturación de aceite y la falta de continuidad lateral del yacimiento, provocan la formación de canales preferenciales de flujo, bajas eficiencias de barrido y pérdidas de calor hacia las formaciones no productoras reduciendo la eficiencia del proceso de recuperación térmica [3].

### 1.2 PATRONES DE INYECCIÓN

Los patrones de inyección determinan la eficiencia areal, que en combinación con la eficiencia vertical y de desplazamiento, ayudan a maximizar el factor de recobro. El patrón escogido debe tener en cuenta la continuidad del yacimiento, las propiedades del medio poroso y de los fluidos [4].

Los patrones más usados son los modelos de cinco puntos y el modelo de siete puntos normal o invertido [5].

### 1.3 ESPACIAMIENTO ENTRE POZOS

El espaciamiento entre pozos es fundamental para obtener una buena eficiencia de barrido y depende principalmente de las características del yacimiento [6]. El uso de espaciamientos más pequeños es decir, menores a 20234.5 m<sup>2</sup> (5 acres) a causa de altas viscosidades [7] reduce el tiempo de irrupción del vapor, las pérdidas de calor, la incertidumbre de encontrar barreras de no flujo y por consiguiente mejora el factor de recobro [8].

El principal aspecto a considerar para estimar el espaciamiento es la viscosidad del fluido, sin embargo, en yacimientos estratificados la relación arena-arcilla juega un papel importante.

#### **1.4 RELACIÓN ARENA-ARCILLA**

Esta relación cuantifica la arcilla presente en la zona de interés. En formaciones ideales no existe la presencia de estas, sin embargo, en la mayoría de yacimientos están presentes las formaciones arcillosas. Para estos casos, es ideal que la relación arena-arcilla tenga un valor alto con el fin de que no se generen grandes pérdidas de calor en la formación. [9]

## **2. EFICIENCIAS DE UN PROCESO DE INYECCIÓN CONTINUA DE VAPOR**

Cuando se lleva a cabo la aplicación de un proceso de inyección continua de vapor, es importante que dicho proceso resulte eficiente tanto técnica como económicamente. La economía de un proyecto está sujeta a dos importantes factores que son la eficiencia de recobro del aceite y la eficiencia térmica del vapor.

### **2.1 EFICIENCIA DE RECOBRO DE ACEITE**

El término de eficiencia de recobro, relaciona la cantidad de aceite que puede ser recuperado mediante la aplicación de una determinada técnica de producción, con el volumen inicial de aceite presente en la formación al momento de iniciar el proceso de recuperación [10].

### **2.2 EFICIENCIA TÉRMICA**

La administración de calor es uno de los aspectos de mayor interés en la aplicación de técnicas de recobro térmico. Durante un proceso de inyección continua de vapor, debe tenerse en cuenta que no todo el calor transportado por el vapor desde el generador, es transferido al aceite presente en la formación [11].

## **3. DESARROLLO DE MODELOS CONCEPTUALES DE SIMULACIÓN**

La construcción de los modelos conceptuales de simulación para el desarrollo de este trabajo, se realizó partiendo de la elaboración de un modelo conceptual base.

En este modelo se representa un yacimiento con características propias de un crudo pesado de viscosidad 1125 cp., siendo este, un escenario óptimo para implementar la inyección continua de vapor como método de recobro térmico.

El objetivo planteado en esta investigación consiste en representar otros escenarios con diferente relación arena-arcilla y espaciamiento, que permitan analizar el efecto de dichas condiciones durante el proceso de recuperación. Para el desarrollo del mismo, se hizo uso del simulador térmico STARS (Steam Thermal and Advanced Processes Reservoir Simulator 2012) de la compañía CMG (Computer Modelling Group LTD).

### **3.1 ELABORACIÓN DEL MODELO BASE DE SIMULACIÓN**

Los modelos conceptuales de simulación emplean propiedades promedio a través de todo el yacimiento, para evaluar el comportamiento de este cuando es sometido a diversos esquemas de explotación [12].

A continuación se presenta la información empleada para el desarrollo del modelo base de simulación.

#### **3.1.1 SELECCIÓN DEL ENMALLADO DE SIMULACIÓN Y DIMENSIONES DEL GRID A UTILIZAR**

Para simular un proceso de inyección continua de vapor, se escoge un enmallado tipo cartesiano debido a que la región de afectación del flujo de vapor ocurre más allá de las cercanías del pozo y este es considerado lineal según su comportamiento a lo largo de la extensión del yacimiento sobre el cual se aplica la técnica.

Este modelo de trabajo representa un área de 20234.5 m<sup>2</sup> (5 acres), con un espesor neto de 30.4 m (100 pies) y un tope de formación que se encuentra a 425.8 m (1400 pies).

#### **3.1.2 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS**

Para este estudio en particular, el modelo de fluidos se generó a partir de un PVT sintético creado en IMEX-CMG mediante el uso de correlaciones. En la Tabla 1 se pueden ver las propiedades iniciales del fluido.

**Tabla 1.** Propiedades iniciales de los fluidos presentes en la arena productora

Aceite	
Peso molecular	181.4 Kg/mol
Densidad del aceite	915.8 Kg/m <sup>3</sup>
Gravedad API	13.5
AGUA	
Propiedades estándar	

### 3.1.3 PROPIEDADES DE LAS ROCAS

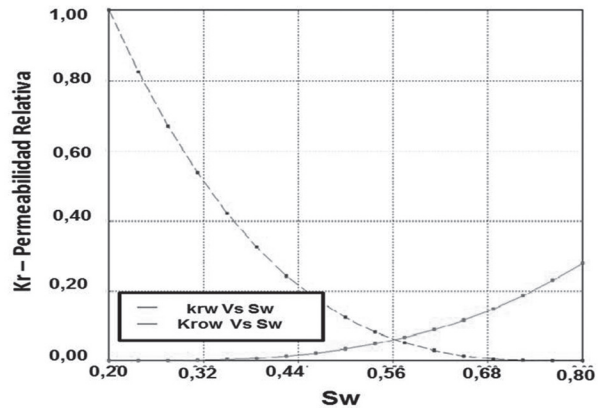
La Tabla 2 presenta las propiedades escogidas para este modelo. Se asignaron las propiedades de la arena productora dentro del simulador y se establecieron las propiedades de las formaciones adyacentes, con el propósito de tener en cuenta las pérdidas hacia el overburden y hacia el underburden.

**Tabla 2.** Propiedades de las rocas

Arena productora	
Permeabilidad Horizontal	809 mD
Relación Kv/Kh	0.6
Porosidad	0.29
Compresibilidad de la formación	7.25 E-5 1/kPa
Conductividad Térmica	1.7308 W /m K
Formación adyacente (formación arcillosa)	
Conductividad térmica	2.1635 W /m K

### 3.1.4 PROPIEDADES ROCA-FLUIDO

En la Figura 2 se presentan las curvas de permeabilidades relativas para la fase agua-aceite en función de la saturación de un fluido. Según esta curva, el yacimiento se encuentra mojado por agua, lo cual beneficia al proceso debido a que esta condición es favorable al desplazamiento del aceite en contraste con el agua, por consiguiente la producción de aceite será mayor.



**Figura 2.** Curvas de permeabilidad relativa de las fases Agua – Aceite

### 3.1.5 CONDICIONES INICIALES

Las propiedades del yacimiento tales como: presión, temperatura y saturación de los fluidos en el momento de su descubrimiento, juegan un papel fundamental en el comportamiento del mismo. De igual forma, es importante tener en cuenta el estado actual de dichas propiedades al momento de implementar un proceso de recuperación. El escenario planteado en este trabajo, es un yacimiento que se encuentra a una temperatura de 305.4 K (°F) y a una presión de 2757.9 KPa (400 psi) a 425.8 m (1400 pies) de profundidad.

### 3.1.6 CONDICIONES DE OPERACIÓN

Del diseño de las variables operacionales dependen los resultados óptimos del proceso. Entre las variables con mayor relevancia se encuentran la tasa de inyección del vapor, la temperatura de inyección y la calidad del vapor. A continuación se describe cada una de ellas.

#### 3.1.6.1 Parámetros operacionales para implementación de la inyección continua de vapor

En el modelo cartesiano desarrollado en este trabajo, se busca simular una producción en frío por 182 días (6 meses) y posteriormente implementar el proceso de inyección continua de vapor por 1462 días (4 años), mediante el diseño de un patrón de cinco puntos invertido que encierra un área de 20234.5 m<sup>2</sup> (5 acres). En la Tabla 3 se muestran las condiciones de operación que fueron utilizadas para llevar a cabo este proceso.

**Tabla 3.** Condiciones de operación para la inyección continua de vapor

Pozos productores	
Presión mínima de fondo	689.5 KPa
Tasa máxima de líquido en superficie	477 m <sup>3</sup> /día
POZO INYECTOR	
Presión máxima de fondo	9652.5 KPa
VAPOR	
Temperatura de inyección del vapor	538.7 K
Calidad del vapor	0.65

### 3.1.6.2 Sensibilidad a la tasa de inyección de vapor

Durante la implementación del proceso de inyección continua de vapor se planeó el uso de una tasa constante durante los cuatro años de inyección del vapor, con el fin de facilitar posteriores análisis de eficiencia térmica. En la determinación de la tasa de inyección de vapor óptima para el proceso, se realizó una serie de sensibilidades con el propósito de encontrar una tasa que garantizará el máximo aprovechamiento de la misma. En la Tabla 4 se presentan las tasas de inyección planteadas y el correspondiente factor de recobro de cada una.

**Tabla 4.** Tasas de inyección de vapor utilizadas durante la sensibilidad

Caso	Tasa de inyección m <sup>3</sup> /día	FR %
Caso 1	318	0.69
Caso 2	239	0.66
Caso 3	159	0.57

La determinación de la tasa de inyección de vapor apropiada, tuvo en cuenta la capacidad de inyección del yacimiento. En la Figura 3 el comportamiento de la tasa de inyección de vapor en función del tiempo, muestra la tendencia de la curva que reproduce dicho comportamiento. Se evidencia claramente que el yacimiento responde de forma adecuada a una tasa de 1000 barriles diarios (159 m<sup>3</sup>), es decir, según lo que muestra la curva todo lo que está siendo inyectado al yacimiento es recibido por el mismo, siendo esta la tasa más conveniente a utilizar durante la implementación del proceso de recuperación térmica.

**Figura 3.** Sensibilidad a la tasa de inyección

## 4. MODELOS CONCEPTUALES DE SIMULACIÓN CON DIFERENTE RELACIÓN ARENA-ARCILLA Y DISTINTO ESPACIAMIENTO

La construcción de los escenarios con diferentes espaciamentos entre los pozos, es decir, escenarios en donde la distancia existente entre pozo productor - productor cambia comparada con el modelo base, y distintos espesores de arcilla para el análisis de la eficiencia térmica durante el proceso de inyección continua de vapor, se realizan partiendo del modelo base. Los datos necesarios para la elaboración de estos modelos se presentan en la Tabla 5, donde las siglas RAA describen el valor de la Relación Arena-Arcilla.

**Tabla 5.** Datos de los modelos con diferente relación arena-arcilla

RAA	Capas arena	Espesor (m)	Capas arcilla	Espesor (m)
1	5	6.1	4	7.6
2.5	5	6.1	4	3.1
5	5	6.1	4	1.5

### 4.1 PLANTEAMIENTO DE MODELOS CON DIFERENTE ESPACIAMIENTO

Manteniendo el mismo patrón de inyección y las mismas condiciones de operación en los nuevos modelos con diferente relación arena arcilla (RAA), se realizaron reducciones de áreas partiendo del área base de 20234.5 m<sup>2</sup> (5 acres) a 10117 y 5058.6 m<sup>2</sup> (2.5 y 1.25 acres), con espaciamentos de 5058.6, 2529.3 y 1264.6 m<sup>2</sup> respectivamente. Las vistas superiores y 3D de estos modelos se muestran en las Figuras 4 y 5. Los modelos

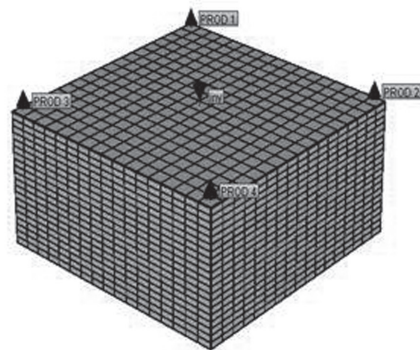
fueron manejados con los nombres de área por patrón, que en este caso hace referencia al área total del modelo, pues los pozos productores se encuentran ubicados en

los extremos del enmallado y no con un anillo a su alrededor.

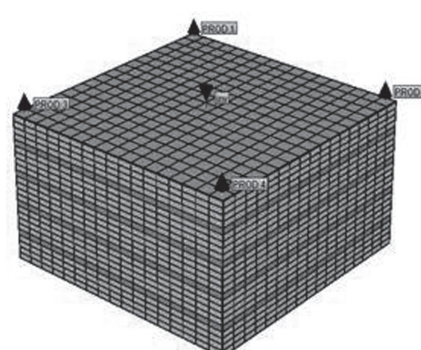


Figura 4. Vista superior para los modelos de 20234.5, 10117 y 5058.6 m<sup>2</sup>

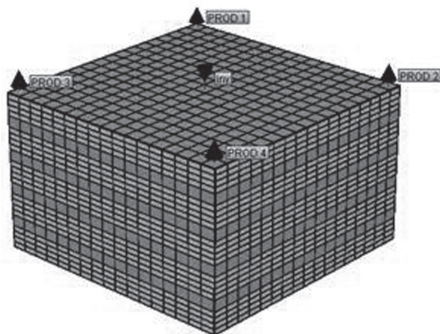
Caso Base--- Área por patrón de 5 acres



RAA=5--- Área por patrón de 5 acres



RAA=2.5--- Área por patrón de 5 acres



RAA=1--- Área por patrón de 5 acres

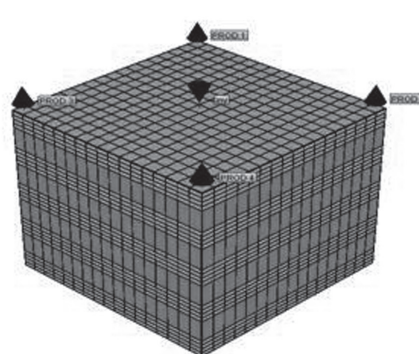


Figura 5. Vista 3D modelos con diferente relación RAA para un área por patrón de 20234.5 m<sup>2</sup> (5 acres).

#### 4.2 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE RUPTURA Y LA RELACIÓN VAPOR-ACEITE EN CADA MODELO

Para realizar un completo análisis del proceso de inyección continua de vapor fue necesario identificar el tiempo de ruptura y el límite económico de los

escenarios planteados.

##### 4.2.1 TIEMPO DE RUPTURA

Se considera como el tiempo que tarda el vapor en irrumpir en el pozo productor. Éste depende en gran medida del área por patrón empleada en el sistema a

modelar, y por consiguiente, del espaciamiento entre los pozos acorde a dicha área.

Para determinar el tiempo de ruptura de los modelos implícitos en este estudio, se visualiza el comportamiento de las curvas referentes a energía producida acumulada y tasa de producción de agua, mostradas en la Figura 6 al final del artículo, para modelos con áreas por patrón de 20234.5 m<sup>2</sup> (5 acres). Del mismo modo se determinó este punto en los demás escenarios de estudio.

Cuando se lleva a cabo una reducción en el espaciamiento, el tiempo en alcanzar la ruptura es menor en comparación con áreas mayores donde al haber más espaciamiento entre pozo inyector-productor, el vapor debe recorrer una distancia superior. Una vez alcanzada la ruptura se obtiene la tasa máxima de producción tanto de aceite como de agua. Luego de este periodo, las producciones de aceite y de agua se reducen, siendo mayor la producción de agua. Para sistemas en donde no existe arcilla es recomendable que el tiempo de ruptura no sea tan pronto, de manera que la tasa de producción de aceite no decline de forma acelerada y por ende que no se presente un apresurado límite económico [13]. Sin embargo, en estos casos donde si existe la presencia de arcillas, es conveniente que el tiempo de ruptura se alcance rápido para no generar grandes pérdidas de energía en la formación.

#### 4.2.2 RELACIÓN VAPOR – ACEITE (SOR)

El límite económico de un proyecto es determinado mediante la relación vapor-aceite (SOR, por sus siglas en ingles), el cual es un factor importante cuando se quiere evaluar la eficiencia de recuperación de un proceso. La relación SOR se define como el número de barriles de vapor equivalentes para producir un barril de petróleo en superficie[14] y varía según las necesidades del proyecto y de los criterios económicos e ingenieriles.

Para la determinación del límite económico, fue necesario analizar el comportamiento de la relación SOR junto con la producción de aceite. En la Figura 7 ubicada al final del artículo se puede apreciar el comportamiento del SOR, la tasa de aceite y el factor de recobro para los modelos de 20234.5 m<sup>2</sup> (5 acres).

Se determinó un valor de SOR equivalente a seis para el límite económico, teniendo en cuenta el costo promedio en Colombia del combustible (gas) y del barril de petróleo producido, para garantizar que la producción se mantuviera rentable. También se tuvo en cuenta un análisis cualitativo y cuantitativo de las variables claves

del proceso al llegar a este punto en donde se observó que la producción de aceite comenzaba a declinar notablemente.

Durante el comienzo de la inyección del vapor, la producción de aceite incremental declina como consecuencia del cambio que experimenta el yacimiento, al pasar de producir en frío a la aplicación de un proceso térmico de recuperación. Los modelos en alcanzar más rápido el límite económico fueron los de 5058.6 m<sup>2</sup> (1.25 acres), debido a la pequeña distancia que hay entre los pozos, esto provoca un menor contacto del vapor con la formación no productora y disminuye las pérdidas de calor, favoreciendo la transferencia de calor hacia el fluido de interés dando como resultado una mayor producción de aceite en contraste con los otros casos que se plantearon.

Los modelos de 20234.5 y 10117 m<sup>2</sup> con RAA=1, debido a las grandes pérdidas de energía a causa de los altos espesores de arcilla pueden representar un proyecto no rentable.

### 4.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

De los modelos planteados en este estudio se realizaron los siguientes análisis a los resultados que se obtuvieron de la simulación.

#### 4.3.1 COMPORTAMIENTO DEL FACTOR DE RECOBRO

Las curvas correspondientes a las Figuras 8, 9, 10 muestran el comportamiento del factor de recobro durante la implementación de la inyección continua de vapor, a partir de ésta, las arcillas empiezan a generar un efecto notable en el factor de recobro, lo cual provoca diferencias entre los modelos y tendencias claramente definidas.

Al comparar cada modelo en el límite económico, el escenario con un mayor factor de recobro se presenta cuando la RAA=5, lo cual obedece en primer lugar a una mejor distribución del vapor a través del yacimiento, en segundo lugar a la condensación del vapor y finalmente al desplazamiento del frente de condensados. Debido a que estos estratos arcillosos no son tan gruesos, la eficiencia de barrido ejercida por el vapor inyectado y el frente de condensados es mayor lo cual se ve reflejado en la cantidad de fluidos recuperados.

En el caso del modelo homogéneo, tanto el tiempo de ruptura como el de límite económico es menor

comparado con los demás casos, esto ocurre como respuesta al fenómeno de overriding que segrega los fluidos y a su vez superpone el frente de vapor dejando capas sin ser barridas totalmente, presentándose así una disminución en el factor de recobro.

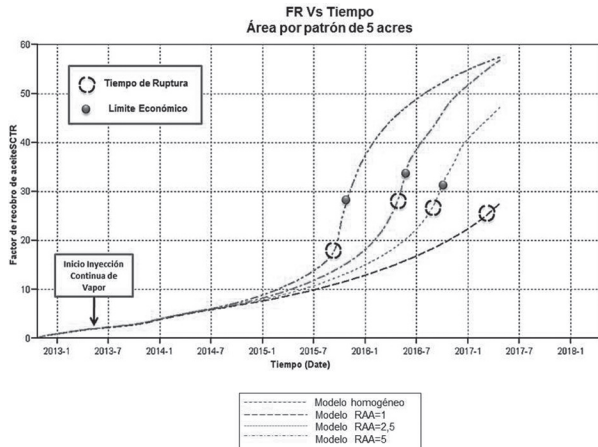


Figura 8. Comportamiento del factor de recobro para un área por patrón de 20234.5 m<sup>2</sup> (5 acres).

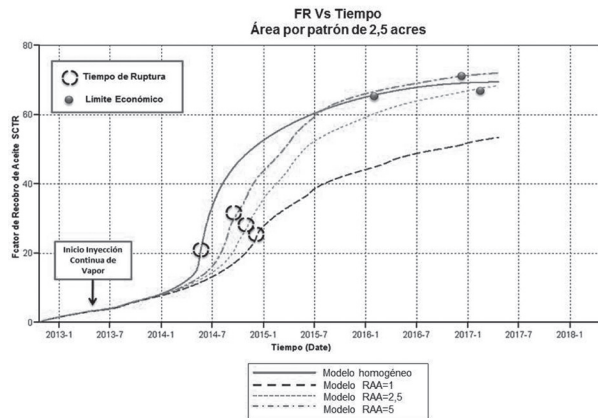


Figura 9. Comportamiento del factor de recobro para un área por patrón de 10117 m<sup>2</sup> (2.5 acres).

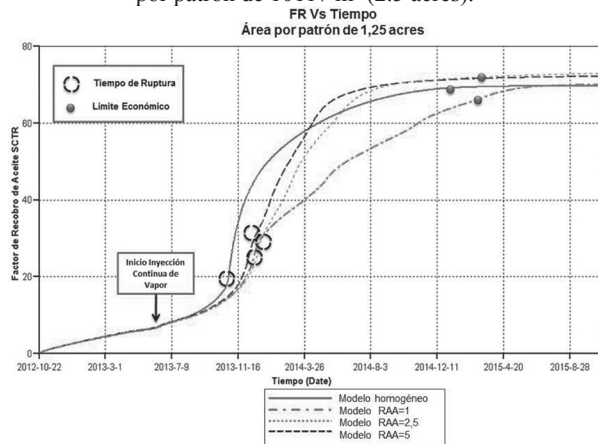


Figura 10. Comportamiento del factor de recobro para un área por patrón de 5058.6 m<sup>2</sup> (1.25 acres).

### 4.3.2 COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DE LA FORMACIÓN

De acuerdo a la cantidad de arcilla presente en la formación de interés, la variación de la temperatura producto de la inyección del vapor, provoca una determinada tendencia en la formación. Las Figuras 11, 12 y 13 muestran este comportamiento.

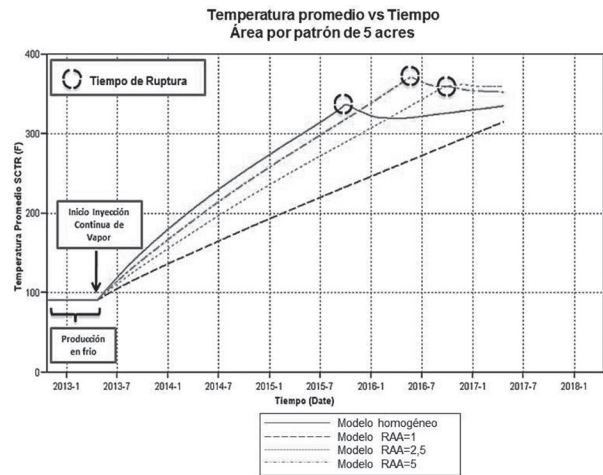


Figura 11. Comportamiento de la temperatura promedio en el yacimiento, modelos de 20234.5 m<sup>2</sup> (5 acres).

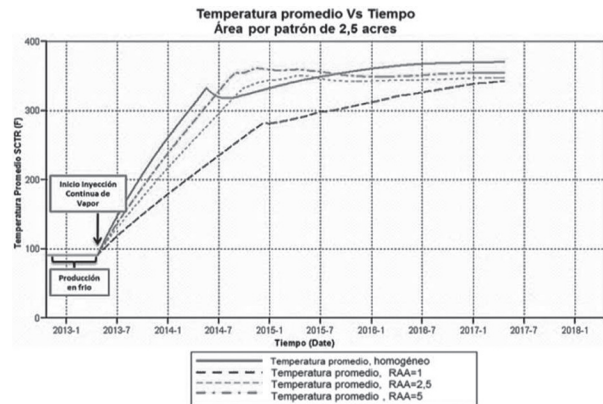
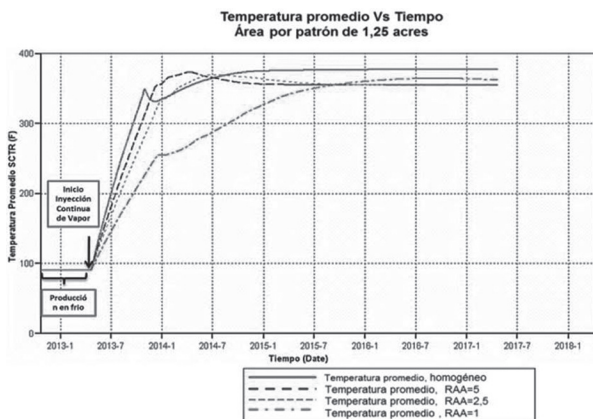


Figura 12. Comportamiento de la temperatura promedio en el yacimiento, modelos de 10117 m<sup>2</sup> (2.5 acres).

Del comportamiento de las curvas se observa que a medida que el área por patrón se reduce la temperatura promedio de la formación es mayor antes de alcanzar el tiempo de ruptura, esto como consecuencia de la mínimas pérdidas de calor hacia las arcillas. Lo anterior se concluye debido a la inclinación de la pendiente de la curva de temperatura durante esta etapa. Una vez ocurrida la ruptura del vapor la temperatura tiende a estabilizarse.





**Figura 13.** Comportamiento de la temperatura promedio en el yacimiento modelos de 5058.6 m<sup>2</sup> (1.25 acres).

El modelo que mantiene más la temperatura es el homogéneo, debido a que este no posee intercalaciones de arcilla. Por el contrario de los modelos estratificados, el que contiene una RAA=1 se muestra como el modelo menos favorable debido a los grandes espesores de arcilla.

## 5. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA EN UN PROCESO DE INYECCIÓN CONTINUA DE VAPOR

La eficiencia térmica es un factor de estudio importante en la inyección continua de vapor, debido a que permite cuantificar que tanta cantidad de energía de la que se inyectó, está presente en la formación que almacena el fluido de interés, y a su vez que porcentaje se pierde hacia las arcillas. El flujo de calor hacia estas formaciones se considera pérdidas, debido a que las arcillas no son formaciones productoras.

El espaciamiento entre los pozos, el espesor de la arena y la tasa de inyección son factores importantes que afectan este tipo de pérdidas de calor [15]. La eficacia térmica se conoce como la fracción de calor inyectada que permanece en el intervalo de inyección [16] y se define como [17]:

$$EF = \frac{\text{Energía remanente en las arenas productoras}}{\text{Total energía inyectada}} \quad (1)$$

Esta ecuación fue utilizada para determinar la eficiencia térmica de los modelos planteados, teniendo en cuenta los resultados arrojados por las simulaciones realizadas para el desarrollo de este trabajo.

## 5.1 DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA EN EL YACIMIENTO

Para cuantificar el calor almacenado en la formación productora, se determinan la cantidad de calor transferido hacia las intercalaciones de arcilla y hacia el overburden y underburden. Así mismo se tiene en cuenta el calor producido durante el proceso de inyección continua de vapor una vez se haya alcanzado el tiempo de ruptura.

Para determinar el contenido de calor en la zona productora a causa de la inyección del vapor se realiza el siguiente balance de energía:

$$Q_i = Q_{z \cdot \text{productora}} + Q_{\text{loss}} + Q_{\text{prod}} \quad (2)$$

Dónde:

$Q_i$ : Tasa de inyección de calor [Btu]

$Q_{z \cdot \text{productora}}$ : Calor presente en la formación productora [Btu]

$Q_{\text{loss}}$ : Pérdida de calor [Btu]

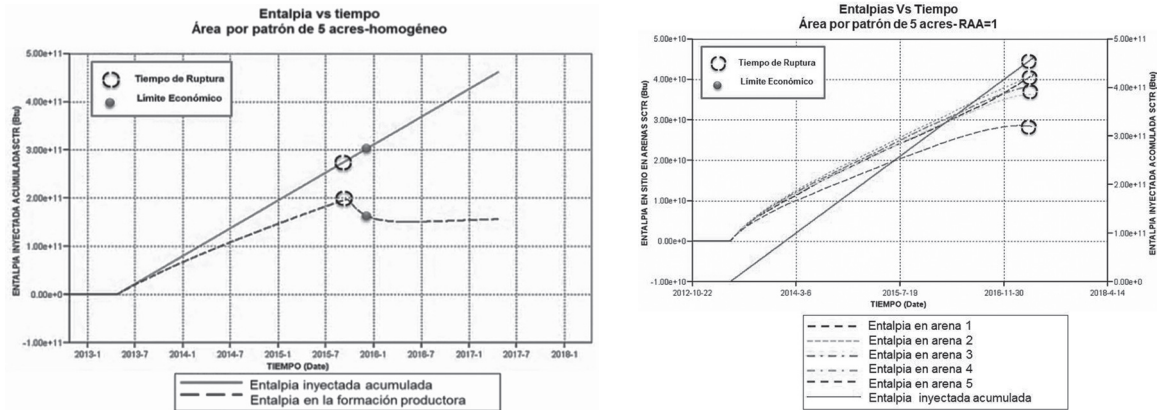
$Q_{\text{prod}}$ : Calor producido [Btu]

## 5.2 DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA

Para determinar la eficiencia térmica de los diferentes escenarios planteados, se calculó la cantidad de energía presente en la formación productora y la cantidad de energía inyectada, en función del tiempo. Este procedimiento se realizó con el fin de determinar qué tan efectivo térmicamente es el proceso antes de que el vapor irrumpa en el pozo productor y al mismo tiempo conocer como las arcilla actúan dentro de este intervalo de tiempo. Del mismo modo, se analizó el comportamiento del proceso térmico desde el momento de la ruptura del vapor hasta llegar al límite económico en cada escenario.

En la Figura 14 se observa la entalpía inyectada acumulada y la entalpía presente en las arenas al tiempo de ruptura y al límite económico en el modelo homogéneo y en el modelo con una RAA=1 en un área por patrón de 20234.5 m<sup>2</sup> (5 acres).

Este mismo cálculo se realizó para modelos con una área de 10117 m<sup>2</sup> (2.5 acres) y 5058.6 m<sup>2</sup> (1.25 acres). La información obtenida fue utilizada para el posterior cálculo de eficiencia.



**Figura 14.** Curvas de entalpía en función del tiempo para escenarios homogéneos y con una RAA=1 en un área de 20234.5 m<sup>2</sup> (5 acres).

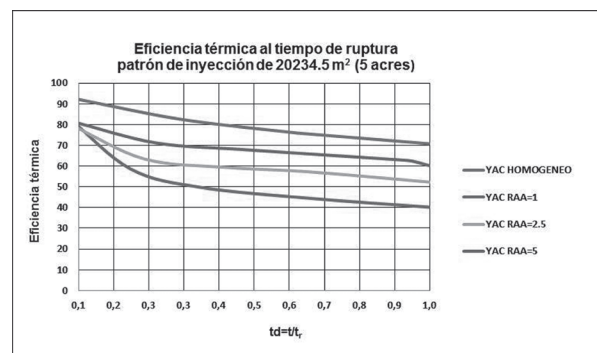
Como se observa en la Figura 14, la cantidad de calor almacenado en las arenas en el tiempo de ruptura es mayor en el caso homogéneo. En el caso de yacimientos con intercalaciones, el calor disponible para calentar la formación ahora es dividido entre las arcillas y las arenas presentes en el yacimiento, lo cual provoca un bajo calentamiento de la formación productora y por ende del fluido de interés, resultando así un bajo índice de productividad.

Durante el proceso de inyección continua de vapor, cuando se alcanza el tiempo de ruptura, se genera una disminución de la energía almacenada en las arenas como consecuencia de la producción de vapor. Considerando el área de cada uno de los patrones utilizados en el planteamiento de los modelos, los patrones más pequeños alcanzan de forma rápida la ruptura [18]. Disminuyendo el tiempo de contacto del vapor con las arcillas. Permitiendo un mayor almacenamiento de energía en las arenas.

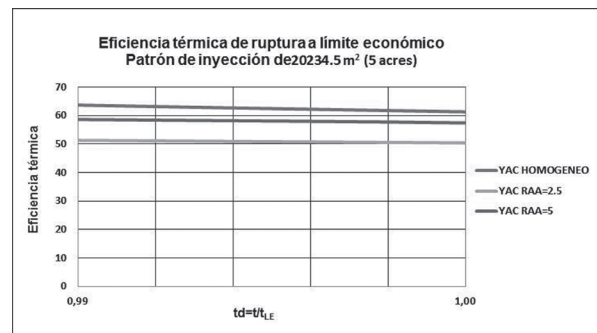
### 5.2.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Identificar el tiempo de ruptura y el límite económico de los escenarios planteados fue de vital importancia para la determinación de la eficiencia térmica en estos puntos. Las siguientes figuras (figuras 15, 16, 17, 18, 19 y 20) presentan el comportamiento de la eficiencia térmica del proceso antes de alcanzar el tiempo de ruptura y desde este tiempo hasta alcanzar el límite

económico de cada escenario planteado. Para facilitar el análisis, las curvas fueron divididas en dos gráficas para observar claramente el comportamiento de esta función.



**Figura 15.** Curvas de eficiencia térmica desde el inicio del proceso hasta el tiempo de ruptura



**Figura 16.** Curvas de eficiencia térmica desde el tiempo de ruptura hasta alcanzar el límite económico

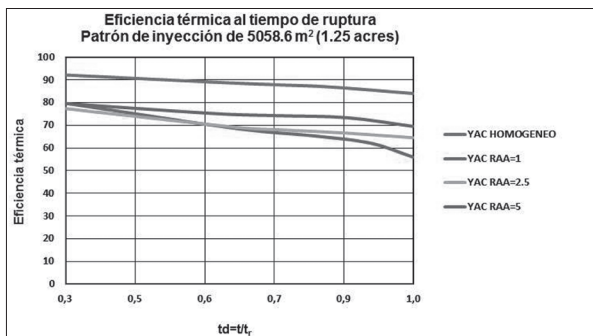


Figura 17. Curvas de eficiencia térmica desde el inicio del proceso hasta el tiempo de ruptura

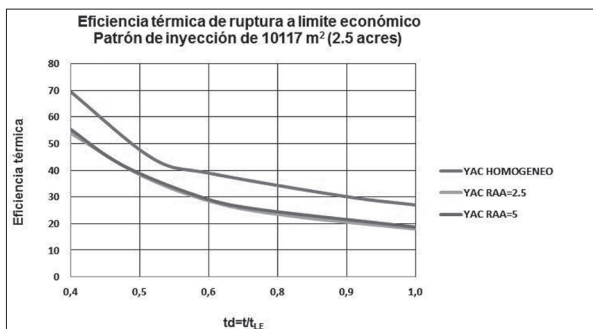


Figura 18. Curvas de eficiencia térmica desde el tiempo de ruptura hasta alcanzar el límite económico.

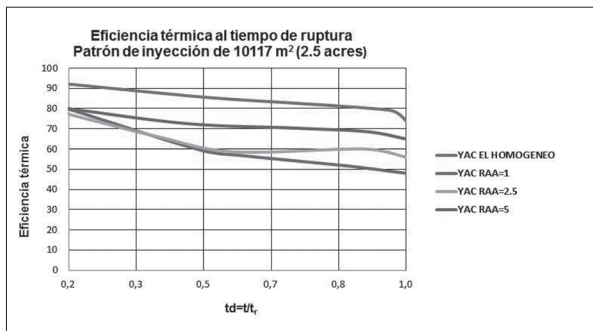


Figura 19. Curvas de eficiencia térmica desde el inicio del proceso hasta el tiempo de ruptura.

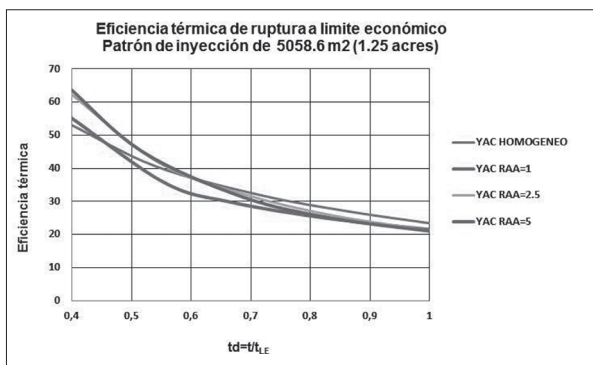


Figura 20. Curvas de eficiencia térmica desde el tiempo de ruptura hasta alcanzar el límite económico.

El comportamiento de las curvas permite ver claramente la tendencia que presenta la eficiencia térmica en cada uno de los escenarios planteados, durante la inyección continua de vapor. De estas curvas se puede resaltar que los modelos homogéneos presentan una mayor cantidad de calor almacenada en las arenas y a medida que el tamaño del patrón se hace menor este valor se incrementa, esto sucede gracias a que las pérdidas que se presentan en el sistema son únicamente causadas por la presencia de formaciones adyacentes al límite superior e inferior del sistema.

La presencia de intercalaciones de arcilla ocasiona que el calor que es entregado a la arena disminuya en la medida que el espesor de la formación no productora aumenta; sin embargo, la entrega de calor hacia la formación productora en el tiempo de ruptura es mayor cuando se utilizan pequeños patrones de inyección. Con respecto a la transferencia de calor hacia las arcillas este fenómeno no es muy cambiante con el tamaño del patrón, cuando el estrato arcilloso es pequeño y a su vez es menor a la capa de arena. Pero cuando la formación contiene estratos arcillosos con un espesor superior a la capa de arena, pequeños patrones de inyección provocan menores transferencias de calor hacia las arcillas; es decir, el tamaño del patrón sí influye en las pérdidas de calor hacia las arcillas.

Un comportamiento importante de analizar se encuentran los primeros 150 días de la inyección continua de vapor para los escenarios con intercalaciones de arcillas, durante este periodo la eficiencia térmica del proceso es mayor para los escenarios con RAA=1 para todos los patrones de inyección planteados, con respecto a las demás RAA trabajadas.

Las intercalaciones de arcillas presentes en los yacimientos que contienen múltiples arenas, por su característica de impermeabilidad restringen la migración vertical del vapor pero no necesariamente del calor, lo cual es transportado a través de estas capas por conducción [19]. Esto explica que debido al diferencial de temperatura que se encuentra entre la zona productora y las zonas ladronas de calor al inicio del proceso de inyección de vapor, la arcilla con mayor espesor tenderá a tomar más calor y a su vez más energía, parte de esta energía es transferida a la arena que se encuentra en la capa superior; es decir, la arena que se encuentra inmediatamente arriba de la arcilla existente, llega a ser calentada por un proceso llamado hot-plate heating o preheating. El vapor inyectado tiende a desplazarse hacia arriba de la formación por efecto de la gravedad y moverse a través del tope del

yacimiento, esto promueve el calentamiento de la arena superior a través de la barrera de la arcilla [19].

En los escenarios planteados en un patrón de inyección de 20234.5 m<sup>2</sup> (5 acres), la energía transferida hacia las arenas es relativamente igual en el tiempo de ruptura y en el límite económico. Esto se debe a que el tiempo de ruptura se alcanza tarde y como consecuencia de esto el límite económico se alcanza rápidamente; por lo tanto, en el lapso entre el tiempo de ruptura y el límite económico las pérdidas de calor hacia las intercalaciones y formaciones adyacentes no varían mucho. La disminución de eficiencia térmica se debe principalmente a la fracción de calor producido al alcanzar el límite económico.

Cuando el vapor ha irrumpido en el pozo productor la cantidad de calor que se produce es significativo perjudicando la transferencia de calor hacia la formación productora. Este comportamiento es más notorio en pequeños patrones de inyección, debido a la rapidez con la que el vapor alcanza la ruptura, provocando una disminución de la eficiencia térmica del proceso desde la ruptura hasta alcanzar el límite económico de aproximadamente del 30%.

### 5.3 DESARROLLO DE CORRELACIONES ESTADÍSTICAS

En respuesta del comportamiento de la eficiencia térmica desde el inicio del proceso hasta el tiempo de ruptura y posteriormente hasta el límite económico del proyecto, se elaboraron tres correlaciones descritas a continuación.

Las correlaciones obtenidas durante el desarrollo de este proyecto, pueden ser aplicadas como primera medida para determinar la eficiencia térmica de un proceso de inyección continua de vapor utilizando un patrón de inyección de cinco puntos invertidos; este dato puede ser obtenido tanto para yacimiento homogéneo como para yacimiento con intercalaciones de arcillas; en el caso del yacimiento homogéneo se codifico con una RAA=0 para facilitar el procedimiento. Estas correlaciones fueron elaboradas para un crudo pesado de gravedad API de 13.5.

Según el espaciamiento del patrón de inyección utilizado durante la implementación del proceso de recobro térmico, se creó una correlación para cada condición:

### 5.3.1 CORRELACIÓN PARA ESCENARIOS PLANTEADOS

Con los resultados de eficiencia térmica obtenidos a partir de la simulación de los modelos elaborados, se obtuvieron las siguientes correlaciones que representan la curva generada a partir de los datos suministrados al software CurveExpert.

La siguiente ecuación (Ec 3) tiene en cuenta las variables relación arena-arcilla (RAA) y tiempo, y puede ser utilizada para determinar la eficiencia térmica del proceso de inyección continua de vapor en áreas de 20234.5 10117 y 5058.6 m<sup>2</sup> (5,2.5, 1.25 acres), utilizando un patrón de cinco puntos invertido y de características similares a las utilizadas en este estudio. La ecuación desarrollada es la misma para todos los modelos, lo único que cambia son los coeficientes implícitos en cada una los cuales dependen del área a emplear. A continuación se muestra la correlación propuesta.

$$EF = a + b * RAA + c * t + d * RAA^2 + e * t^2 + f * RAA^3 + g * t^3 + h * RAA * t + i * RAA^2 * t + j * RAA * t^2 \quad (3)$$

Dónde:

**RAA:** Relación arena-arcilla [adimensional]  
**t:** Tiempo [días]

Los coeficientes de la correlación planteada en la ecuación 3 son mostrados en las tablas 6, 7 y 8 respectivamente.

**Tabla 6.** Coeficientes de correlación para determinar la eficiencia térmica de los escenarios planteados con un área por patrón de 20234.5 m<sup>2</sup>

a	1.03510214580106E+02
b	-4.13748094104571E+01
c	-9.81648419437545E-02
d	1.942733792328980E+01
e	1.004015511550540E-04
f	-2.376924278595300E+00
g	-3.59868435100401E-08
h	4.13603326215782E-03
i	3.564787315745730E-04
j	-3.37447174514434E-06

**Fuente:** CurveExpert Professional 1.6

Con el fin de determinar la precisión de la correlación se graficaron los resultados de eficiencia térmica dados por el simulador y por la correlación para obtener el coeficiente de determinación, que define la similitud de los resultados generados por la simulación y por la correlación; según los valores obtenidos, el coeficiente de determinación para esta correlación es  $R^2=0.96$  como lo muestra la Figura 21. Las Figuras 22 y 23 muestran el cálculo del coeficiente de determinación para la correlación creada para los modelos de 10117 y 5058.6 m<sup>2</sup> (2.5 y 1.25 acres).

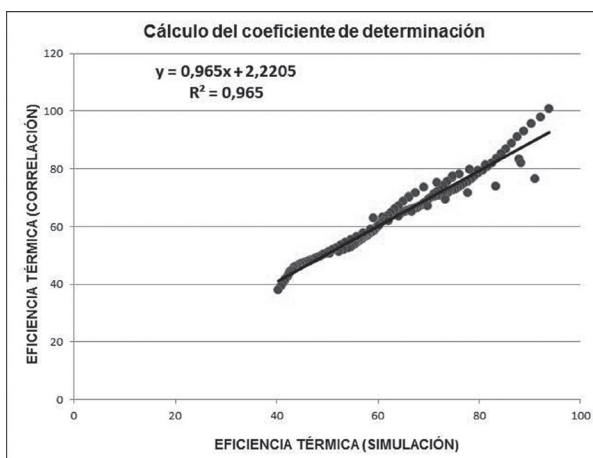


Figura 21. Cálculo del coeficiente de determinación, área de 20234.5 m<sup>2</sup> (5 acres).  $R^2=0.96$

Tabla 7. Coeficientes de correlación para determinar la eficiencia térmica de los escenarios planteados con un área por patrón de 10117 m<sup>2</sup>

Coeficiente de correlación	
a	9,77373178055910E+01
b	-1,68524272535941E+01
c	-7,77435204331275E-02
d	5,20920460848596E+00
e	-2,59685034595934E-05
f	-4,77501525012901E-01
g	3,05085505861477E-08
h	1,68817172118538E-02
i	-1,60530360199826E-03
j	-5,66844465610530E-06

Fuente: CurveExpert Professional 1.6

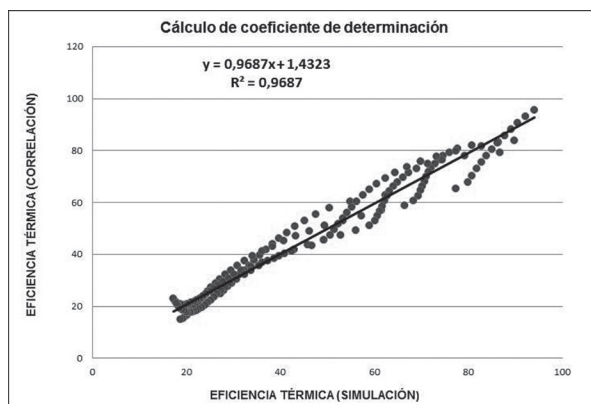


Figura 22. Cálculo del coeficiente de determinación, área de 10117 m<sup>2</sup> (2.5 acres).  $R^2=0.97$

Tabla 8. Coeficientes de la correlación para determinar la eficiencia térmica de los escenarios con área por patrón de 5058.6 m<sup>2</sup>

Coeficiente de correlación	
a	1.01245981544892E+02
b	-1.60535929707481E+01
c	-1.02919793215198E-01
d	4.90600983553079E+00
e	-4.22472240860071E-04
f	-4.79529949672724E-01
g	6.45746923795974E-07
h	3.79941684775192E-02
i	-3.04144510083735E-03
j	-3.17537318989923E-05

Fuente: CurveExpert Professional 1.6.5

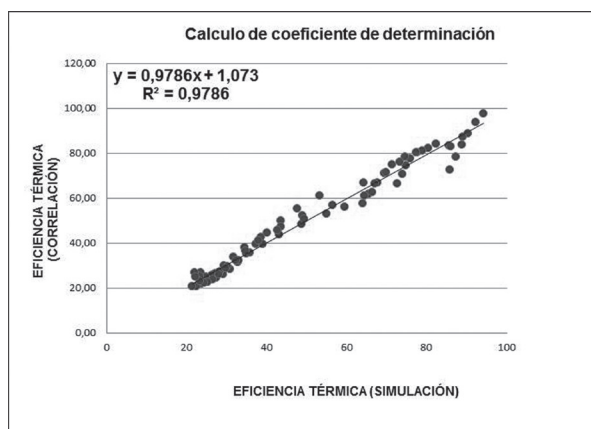


Figura 23. Cálculo del coeficiente de determinación, área de 5058.6 m<sup>2</sup> (1.25 acres).  $R^2=0.98$

Las correlaciones planteadas en este artículo fueron diseñadas para facilitar el cálculo de la eficiencia térmica de un proceso de inyección continua de vapor, implementado en escenarios homogéneos y con intercalaciones de arcillas en áreas por patrón de 20234.5, 10117 y 5058.6 m<sup>2</sup>.

La aplicación de las correlaciones exige que el escenario cumpla con las características con las que estas fueran planteadas. Al inicio del artículo se presentan todas las propiedades del modelo base a partir del cual se crearon los demás escenarios y de donde se calcularon las eficiencias térmicas para hacer posible estos resultados.

## CONCLUSIONES

- El desempeño del proceso de inyección continua de vapor en modelos que representan yacimientos con intercalaciones, fue menos efectivo desde el punto de vista térmico, debido a que en ellos se presentan pérdidas de calor por la presencia de zonas no productoras como las arcillas.
- La existencia de arcillas de pequeño espesor en un yacimiento sometida a inyección de vapor, favorece la distribución del vapor a través de la formación, debido a que estas intercalaciones actúan como barreras porque son consideradas litológicamente impermeables.
- La implementación de la inyección continua de vapor en modelos que representan un yacimiento homogéneo, provoca que grandes zonas no sean invadidas por el vapor a consecuencia del overriding,
- Cuando se planea desarrollar en un yacimiento la inyección continua de vapor, mediante el uso de un patrón de inyección inverso de cinco puntos, es importante identificar la tasa de inyección de vapor adecuada, para garantizar el mayor aprovechamiento del calor en la formación productora.
- Analizando el tiempo de ruptura se encontró que el vapor tarda más en irrumpir en el pozo productor en yacimientos con intercalaciones de arcilla de gran espesor, esta condición no es favorable para el desempeño del proceso ya que está directamente relacionada con las pérdidas de calor.
- Las correlaciones planteadas en esta investigación, utilizadas para determinar la eficiencia térmica, constituyen una gran herramienta para evaluar el comportamiento de la inyección continua de vapor en diferentes escenarios.

## RECOMENDACIONES

- Este estudio se analizó el efecto de diferentes relaciones de arena arcilla en un proceso térmico, variando el espesor de la arcilla. Para una investigación más completa es recomendable tener en cuenta la variación del espesor de la arena productora en la evaluación de la eficiencia térmica.
- Debido a la influencia que tiene la tasa de inyección de vapor en las pérdidas de calor, resultaría muy importante realizar este estudio teniendo en cuenta la tasa adecuada de vapor de acuerdo al área del patrón.

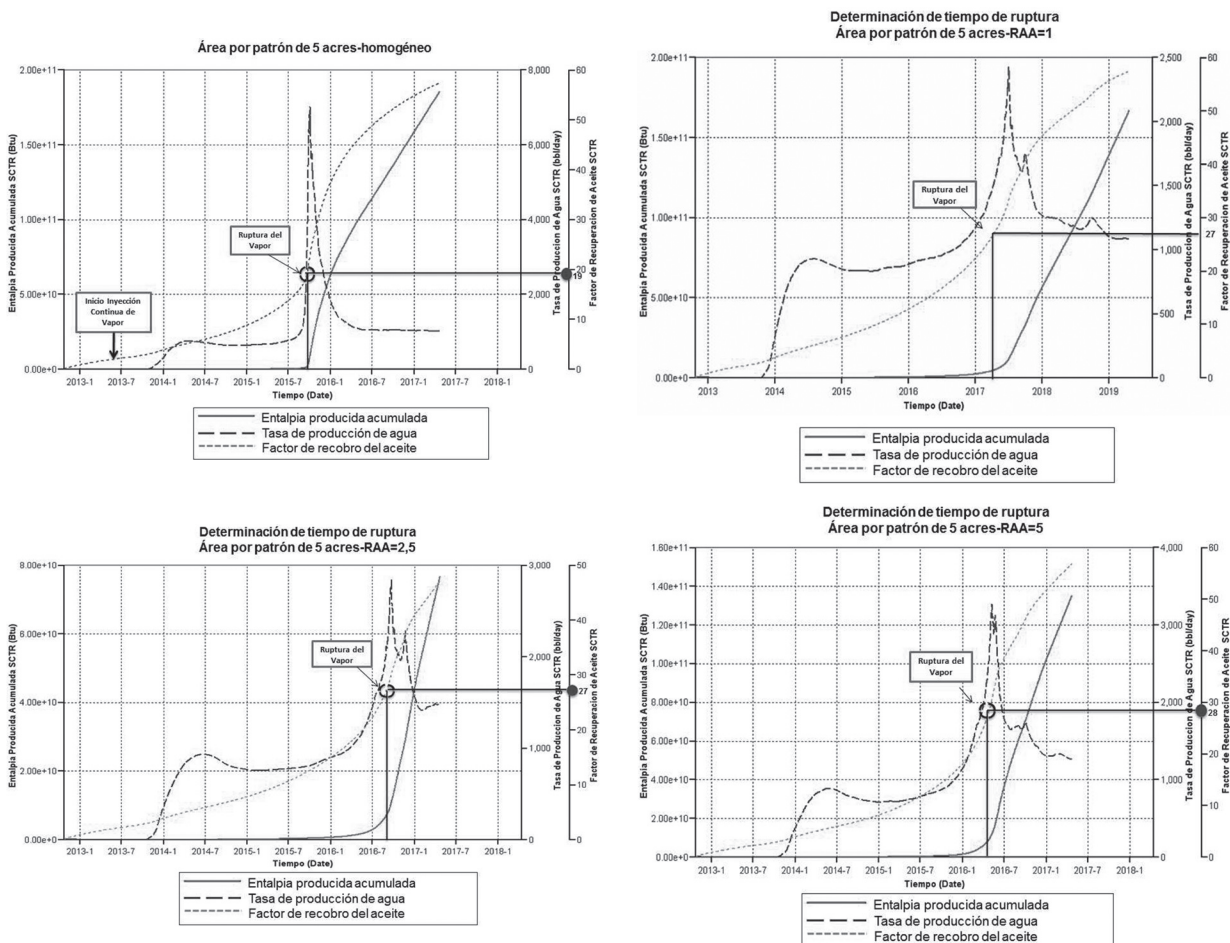
## AGRADECIMIENTOS

Grupo de investigación Recobro Mejorado GRM-UIS. ICP-Ecopetrol. Línea de investigación de inyección de vapor-GRM.

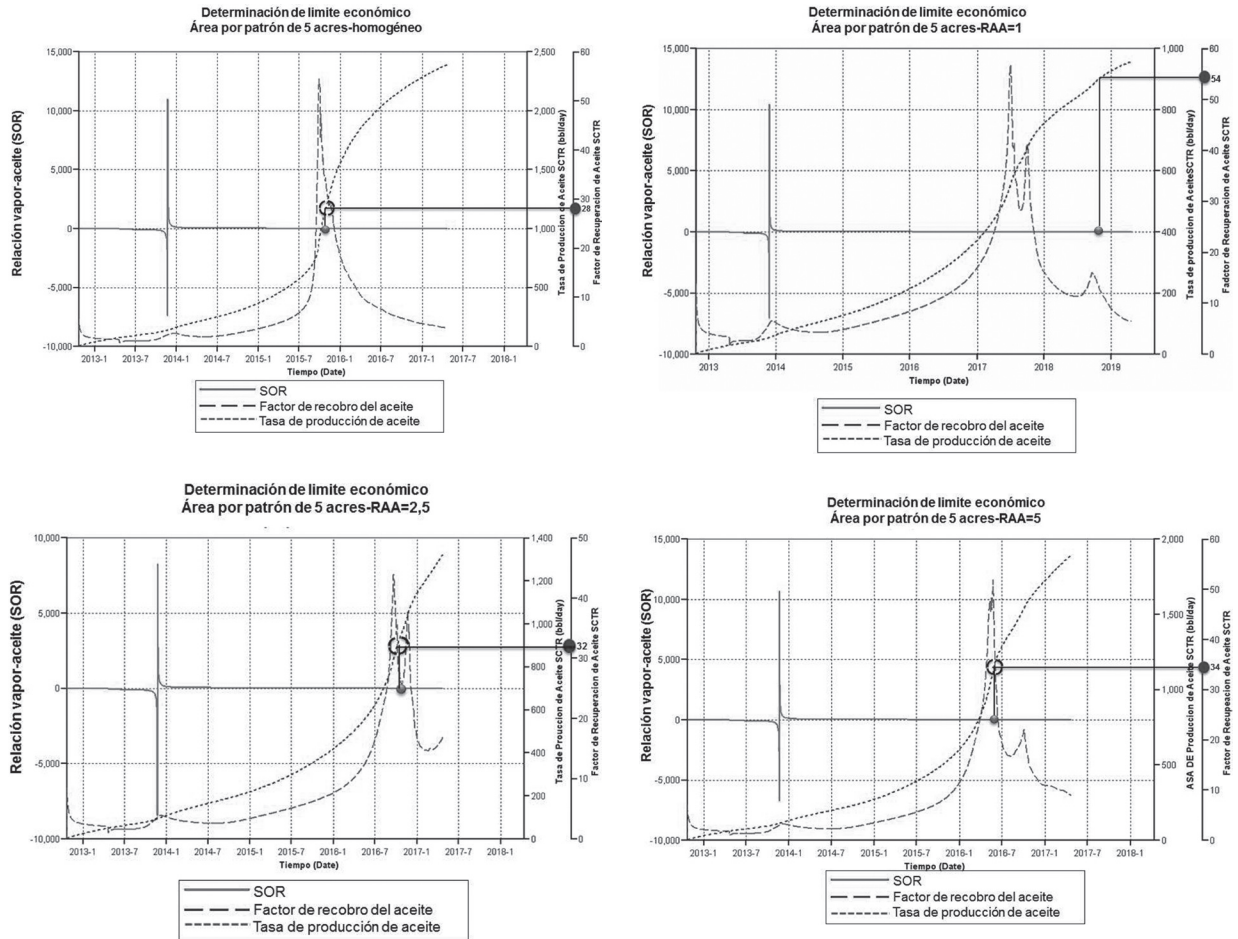
## REFERENCIAS

1. CHU, CHIEH, GETTY OIL CO.: "State-of-the-Art Review of Steamflood Field Projects". Journal of Petroleum Technology. 37(10). SPE 11733-PA. October 1985.
2. ALVARADO D, BANZER C.: "Recuperación Térmica de Petróleo". Capítulo 2. Propiedades Térmicas de Rocas y Fluidos. Universidad del Zulia. Maracaibo, Noviembre 1998.
3. ALI FAROUQ. "Practical Heavy Oil Recovery". Chapter 7. Steamflooding. 2006. P 7-1.
4. GONZALO G.L.: "Recuperación Mejorada de Hidrocarburos: Inyección Cíclica y Continua de Vapor". Capítulo 1. Noviembre de 1989.
5. BURSELL, C.G. AND PITTMAN, G.M.: "Performance of Steam Displacement the Kern River
6. LONDONI A. y ASTIZ B.L.: "Oil Well Spacing a Technical and Economic Analysis". SPE 8111. Conference paper in 5th World Petroleum Congress, May 30 - June 5, 1959, New York, USA.
7. BELTRAN JESUS ENRIQUE: "Análisis e interpretación de yacimientos sometidos a inyección continua de vapor mediante analogías" Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. 2005.
8. BOBAR A.R.: "Reservoir Engineering Concepts on

- Well Spacing”. SPE 15338-MS. Enero de 1985.
9. MATEUS, YESSICA.: “Evaluación Técnica y Económica del Uso de Vapor para Acelerar el Factor de Recobro en Yacimientos Estratificados de Crudo Pesado”. Tesis Universidad Industrial de Santander. Proyecto de grado. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga 2011.
  10. GREEN, DON W. y WILLHITE, G. Paul. Enhanced Oil recovery. Society of petroleum Engineers. Texas, 1998.
  11. PRATS MICHAEL ET AL.: “The Heat Efficiency of Thermal Recovery Processes”. Journal of Petroleum Technology. 21(3). SPE 2211-PA.1969.
  12. OSORIO G.: “Introducción a la simulación numérica de yacimientos”. Capítulo 1.
  13. PARIS M.: “Inyección de Agua y Gas en Yacimientos Petrolíferos”. Capítulo cuatro. Desplazamientos de fluidos inmiscibles. Segunda edición.
  14. CURTIS CARL.: “Yacimientos de Petróleo Pesado”. Revista Oil Fiel Review 15 (4): 32-55, 2003.
  15. ESCOBAR F. y SEPULVEDA J.: “Simulación de yacimientos: Principios, Conceptos y Construcción de Mallas”. Unidad 1.
  16. BOBERG C. THOMAS. “Thermal methods of oil recovery” pag 139
  17. PRATS MICHAEL. :” The heat efficiency of thermal recovery processes pag 329
  18. BUTLER. M, ROGER.: “Thermal Recovery of Oil and Bitumen”. Prentice Hall. Alberta, Canada. p.180.
  19. HONG, K.C.: Steamflood Reservoir Management. PennWell Books, Tulsa, Oklahoma. 1994. P. 279.



**Figura 6.** Determinación del tiempo de ruptura para los modelos con área de 5 acres  
**Fuente:** Computer Modeling Group, CMG, STARS, Results Graph.



**Figura 7.** Determinación del límite económico en los modelos de 5 acres

**Fuente:** Computer Modeling Group, CMG, STARS, Results Graph

*Recepción:* 10 de Mayo de 2013

*Aceptación:* 14 de Junio de 2013