

Capítulo 4

El problema de las eficiencias areales de barrido

1.- Introducción

La teoría de avance frontal presupone que el flujo entre el inyector y el productor es lineal (es decir todas las líneas de flujo son rectas) y por lo tanto el 100% del volumen poral del reservorio es contactado por el agua de inyección.

Este tipo de comportamiento aparece en estructuras elongadas donde los fluidos son inyectados y producidos en toda la sección y no en punzados parciales de todo el espesor neto.

Muchos de los proyectos de secundaria se hacen sobre la base de los desarrollos de pozos siguiendo un modelo regular (pattern). Si estos "pattern" son simétricos, el paso más corto y el mayor gradiente de presión se produce precisamente a través de las líneas de flujo rectas entre inyector y productor. Por lo tanto el agua inyectada que se mueve rápidamente por estas líneas de flujo llega primero a los productores.

El agua que se mueve por las líneas de flujo más largas no alcanza el productor al momento del breakthrough, y por lo tanto parte del reservorio no es contactado por el agua en ese momento. La fracción del pattern contactada por el agua inyectada a un momento determinado se denomina **eficiencia de barrido en el pattern, E_p , o eficiencia de barrido areal, E_A .**

La eficiencia de barrido areal es función de la relación de movilidades, de la configuración geométrica del pattern, de las heterogeneidades del reservorio y de la cantidad de agua inyectada.

2.- Relación de movilidades

Uno de los parámetros más importantes en recuperación secundaria es la relación de movilidades, el cual se define como la relación entre la movilidad de fase desplazante a la de la fase desplazada, es decir

$$M = \frac{\lambda_{desplazante}}{\lambda_{desplazado}} = \frac{k_w / \mu_w}{k_o / \mu_o} = \frac{\mu_o k_{rw}}{\mu_w k_{ro}} \dots (4.1)$$

donde las permeabilidades relativas son obtenidas en dos puntos diferentes, mientras que k_{rw} se calcula en la zona barrida del reservorio, k_{ro} se calcula en la porción no barrida del mismo.

Como se puede ver, (4.1) muestra que M es función de la permeabilidad efectiva, es decir, es función de la saturación de fluidos. Recordando que por detrás del frente existe un gradiente de saturaciones, se genera la pregunta de cual es la saturación a utilizar para calcular correctamente k_{rw} , mientras que algunos autores se inclinan en señalar que los únicos puntos importantes son los extremos, otros prefieren calcularla a la saturación promedio al breakthrough². Un problema similar ocurre respecto a k_{ro} aunque en este caso se coincide en evaluarse a la S_{wi} .

Teniendo en cuenta que S_{wmed} permanece constante hasta el breakthrough, M es una constante hasta ese instante. Sin embargo, luego de la irrupción del frente, M aumenta continuamente como consecuencia del aumento de la S_{wmed} que se manifiesta con un aumento en k_{rw} .

El valor de M se utiliza en el cálculo de las eficiencias de barrido para los distintos patterns.

Teniendo en cuenta que la viscosidad del agua es función de la temperatura como de la salinidad, pero en general sus valores varían entre 0.4 y 0.8 cp una buena aproximación es 0.6 cp.

Por otro lado, si tomamos como valores típicos de permeabilidades relativas $k_{ro}=1$ y $k_{rw}=0.2$ esto permite estimar como regla práctica a la movilidad con la ecuación

$$M = 0.333\mu_o$$

3.- Distintos tipos de patterns

En general, cuando la secundaria comienza, el yacimiento ya se encuentra desarrollado, y como perforar pozos infill es caro, se trabaja con las mallas existentes. Sin embargo, uno debería prever cuando desarrolla el yacimiento, tanto la futura secundaria como también la posible aplicación de recuperación terciaria.

Desde el punto de vista clásico los principales tipos de mallas son:

1. línea recta directa
2. línea en zigzag
3. five spot
4. seven spot
5. nine spot

Vamos a repasar rápidamente el comportamiento de estas mallas.

Empuje en línea recta directa (direct line drive)

Como se señaló anteriormente este tipo de desarrollo permite una eficiencia de barrido areal de 100% cuando se alcanza el BT si se pudiera inyectar fluido en todo el plano vertical. Por supuesto, desde el punto de vista práctico esto es imposible pero se puede aproximar a esta situación teórica si los pozos productores e inyectores están algo desplazados.

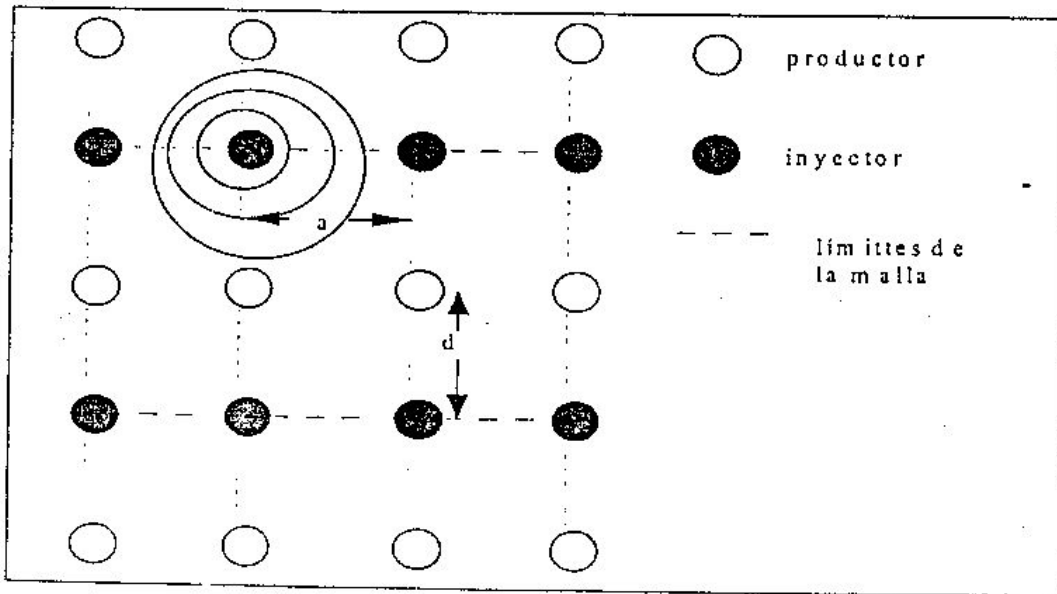


Fig.1:Malla de empuje en línea recta directa

La eficiencia de barrido en la malla, como se aprecia en la fig. 1, se mejora con el aumento de la relación d/a , siendo "d" la distancia entre inyector y el productor adyacentes y "a" la distancia entre dos productores de la misma fila.

La relación entre d/a y E_{abt} se muestra en la fig.2 cuando la relación de movilidades es 1.

La relación entre inyectores y productores es 1 en este tipo de mallado.

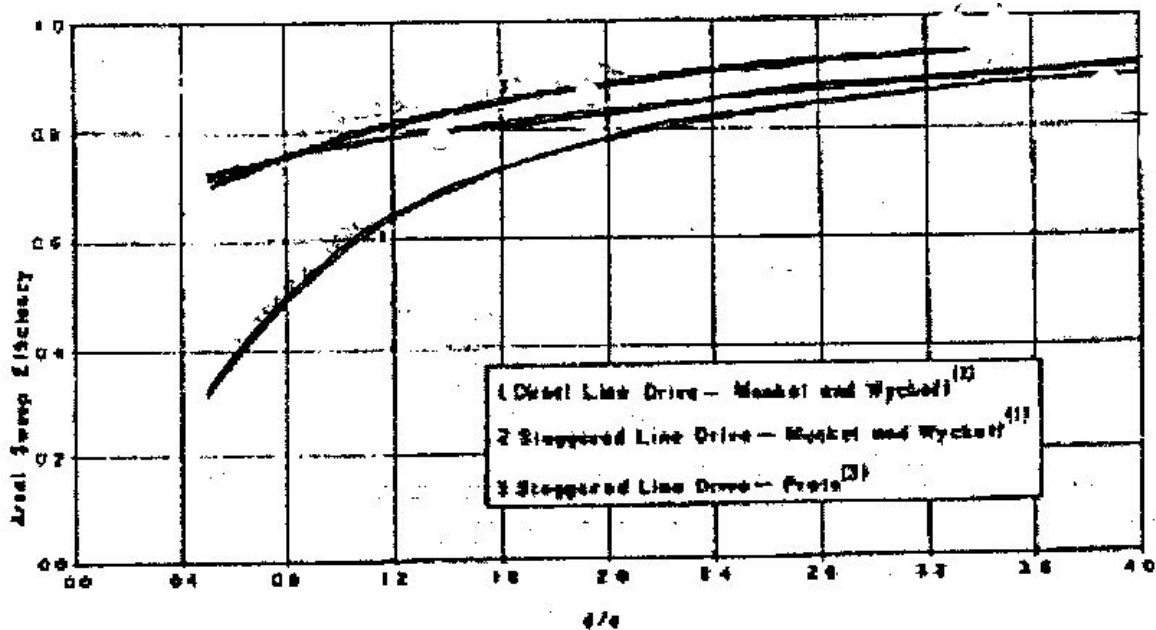
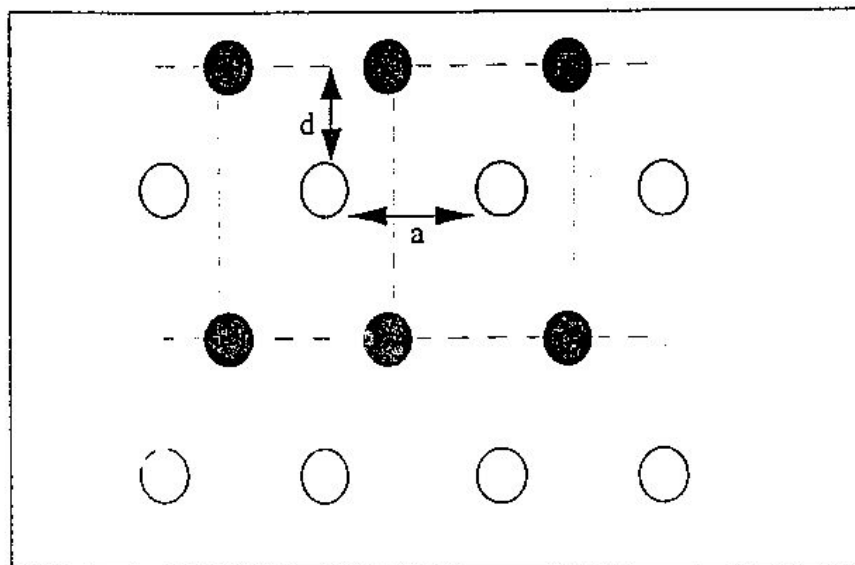


Fig.2: Eficiencia de barrido para esquemas de barrido lineal y en zig-zag (línea desplazada) con distintas relaciones d/a

Empuje en línea desplazada

Este tipo de mallado es simplemente una modificación del mallado anterior, de tal forma que los productores están desplazados a la mitad de la distancia entre pozos.

La consecuencia de este desplazamiento es que mejora la eficiencia al BT como se puede apreciar en la fig.2 comparada con el mallado en línea recta, especialmente cuando la relación d/a disminuye. Este tipo de mallado es preferible al descrito anteriormente.



Five spot

Este mallado es un caso especial del mallado desplazado donde la relación $d/a=0.5$, y es el mallado de barrido más utilizado. La ubicación de los pozos es regular y los mismos forman un cuadrado con una relación inyectores/productores igual a 1.

Este tipo de pattern presenta una muy buena eficiencia de barrido y simultáneamente al haberse realizado la perforación en forma regular, puede cambiarse el pattern simplemente cambiando la posición de inyectores y productores, como puede ser el caso de mallados 4 spot, 9 spot o 9 spot invertido.

Nine spot

Este mallado desarrollado también, como en el caso anterior perforando los pozos en un cuadrado, tiene la característica que la relación inyectores/productores es igual a 3 y es muy útil cuando se necesita una gran capacidad de inyección como consecuencia de problemas como baja permeabilidad.

El **nine spot invertido** probablemente se utilice más dado que la relación inyectores/productores precisamente se ha invertido, siendo útil en reservorios donde la inyectividad es elevada.

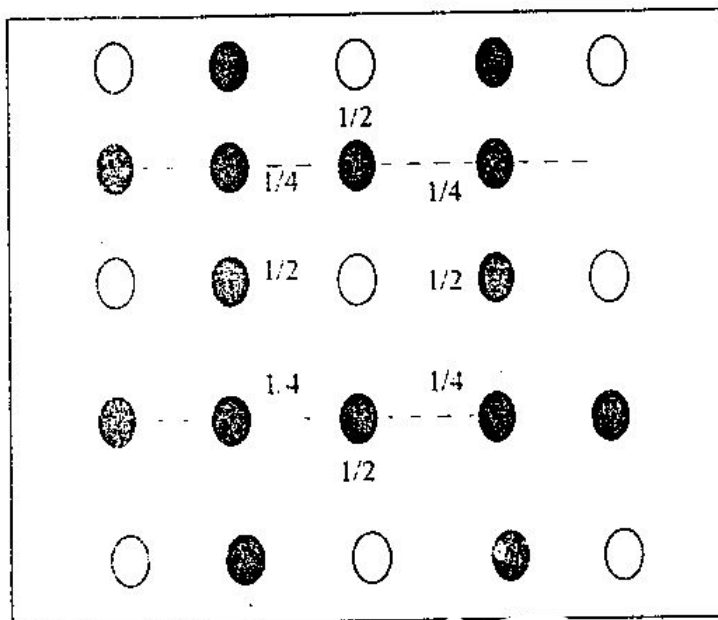


Fig.4: arreglo de mallado 9 spot

Una de las mayores ventajas de este mallado es su flexibilidad.

La aparición de un BT prematuro o el descubrimiento de permeabilidades preferenciales pueden necesitar un mayor grado de conversión. Ciertos mallados

para su reconversión necesitan un programa exhaustivo de perforación infill, mientras que el mallado nine spot invertido puede convertirse en una relación de inyector a productor igual a uno, tanto como five spot o barrido en línea recta con sólo realizar las conversiones adecuadas.

Seven spot

Este sistema tiene dos inyectores por cada productor, siendo su principal uso en reservorios de baja inyectividad, sin embargo, se trata de un mallado poco utilizado.

El desarrollo del pattern está basado en un triángulo equilátero o en un sistema de barrido lineal donde la relación $d/a=0.866$. si el yacimiento no fue desarrollado previendo este pattern se requiere la perforación de muchos pozos infill para que este pattern sea factible.

El pattern seven spot invertido también se lo conoce como *four spot* donde se presenta una relación inyectores a productores igual a 0.5.

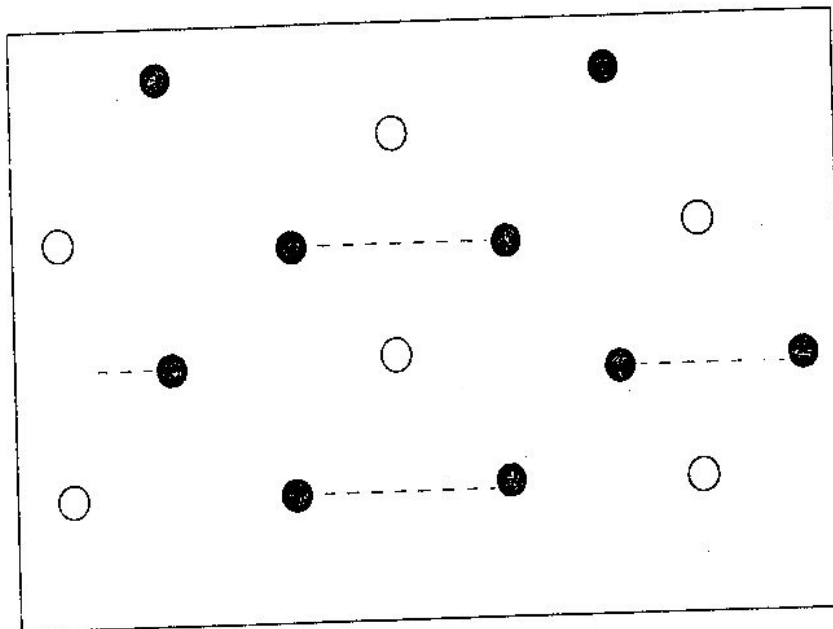


Fig.5: Mallado seven spot

4.-Eficiencia de barrido areal

La cantidad de petróleo que puede recuperarse mediante el desplazamiento con agua directamente proporcional a la eficiencia de barrido areal. Esto se expresa con

$$N_{PD} = NE_D E_A E_V \cdots (6.2)$$

siendo

- E_D = Eficiencia de desplazamiento
- E_A = Eficiencia de desplazamiento areal
- E_V = Eficiencia de desplazamiento vertical

Eficiencia de barrido areal

Los dos factores que controlan este tipo de eficiencia son

- la relación de movilidades
- el mallado elegido

El efecto de las movilidades ya ha sido estudiado y como conclusión general puede decirse que la disminución de M aumenta la eficiencia de barrido.

En la bibliografía se presentan correlaciones de la eficiencia de barrido en función de la relación de movilidades. Desgraciadamente desde el punto de vista práctico, en recuperación secundaria no tenemos herramientas para modificar M . Esta situación cambia cuando se plantean proyectos de recuperación asistida o terciaria donde se pueden modificar las permeabilidades relativas, la mojabilidad o la viscosidad.

En cambio, la selección del pattern es el primer factor en la determinación de la distribución de presiones dentro del reservorio. El conocimiento de esta distribución es sumamente importante ya que las mismas definen la presencia de las líneas equipotenciales, perpendicular a las cuales se mueven las líneas de flujo (stresmlines).

La velocidad a la cual un fluido se mueve por estas líneas de flujo es proporcional, de acuerdo a la ley de Darcy, al gradiente de presión, y la máxima velocidad se produce sobre la línea de flujo más corta, que corresponde a la diagonal, y por lo tanto esta será la primera en alcanzar el BT. Simultáneamente las velocidades menores se producen a lo largo de flujo más externas, y esta porción del reservorio, por supuesto, permanece no barrida al momento del BT.

Matemáticamente se define la eficiencia de barrido areal como la relación entre el área barrida al área total. Para un mallado five spot con fluidos de relación de movilidad igual a 1 esta eficiencia es típicamente del 70%.

Cuando la relación de movilidades es $M > 1$ existe menor resistencia al fluido que se inyecta, como consecuencia las líneas de flujo no diagonales se hacen más largas que cuando $M = 1$, por lo tanto la eficiencia de barrido areal disminuye. Lo opuesto también es cierto, para $M < 1$, la velocidad es mayor y por lo tanto la eficiencia de barrido areal es mayor.

Los efectos de la movilidad sobre la eficiencia de barrido areal se puede ver en la fig.6 donde se comparan los resultados obtenidos por diferentes autores para el arreglo five spot donde los valores de la eficiencia de barrido se obtuvo suponiendo espesor constante en una formación homogénea y con infinitas repeticiones del arreglo a fin de evitar que las líneas de flujo sufrieran distorsiones fuera o dentro del arreglo donde se efectuó el cálculo.

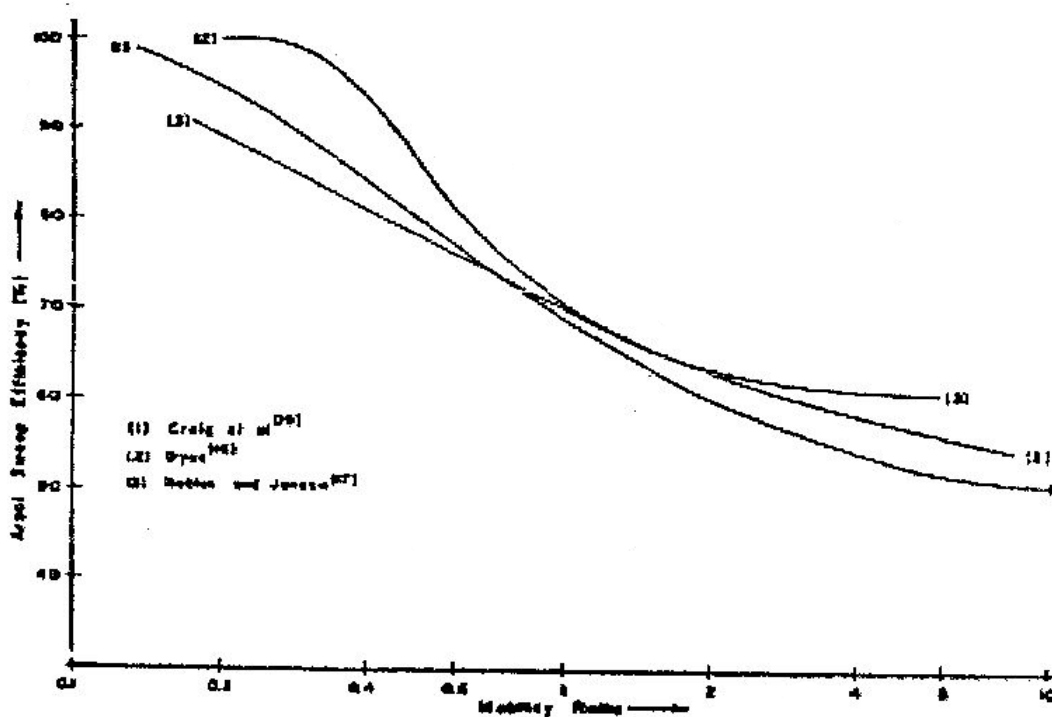


Fig.6:Eficiencia areal al BT en función de la movilidad para un pattern five spot (tomado de Smith³)

Eficiencia de barrido areal al BT

El cálculo de la E_A puede consultarse en el libro de Craig⁴, y en general los valores de E_A se grafican vs. el logaritmo de M para cada mallado.

Se presentan cuatro tipos de patterns:

- mallados aislados: cuando no se aprecian los límites y no hay otros pozos. En este tipo de patterns pueden producirse eficiencias de barrido al BT mayores al 100% como consecuencia de que el fluido desplazante puede barrer petróleo fuera del pattern.
- Mallados desarrollados: cuando todo el yacimiento ha sido desarrollado con el mismo pattern, siendo este tipo de mallado el que más aplicación tiene.
- Mallados invertidos: hay un solo inyector.

La fig.7 muestra E_A para un pattern five spot y la fig.8 muestra un pattern aislado, otro normal y un invertido. Aquí se puede ver que la E_A puede ser mayor que 100%.

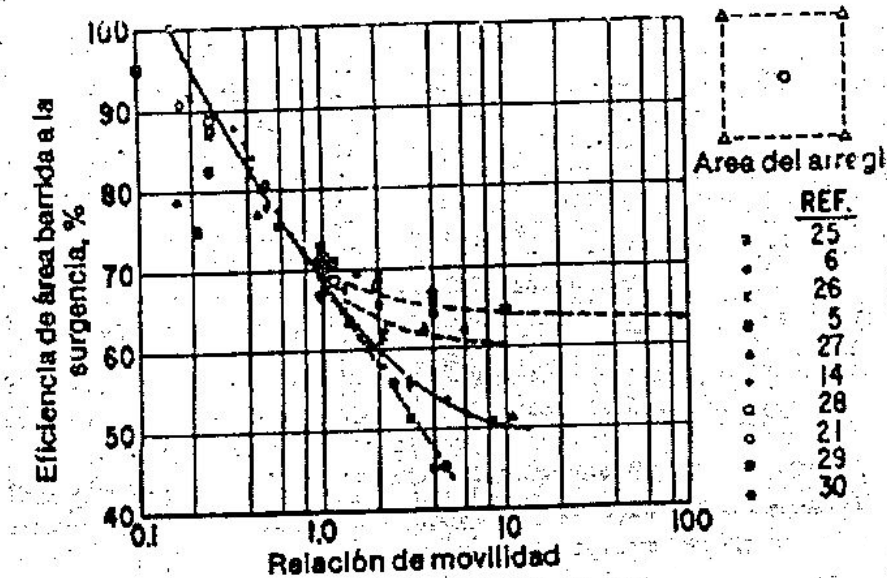


Fig.7: Eficiencia de barrido para un arreglo desarrollado (tomado de Craig⁴)

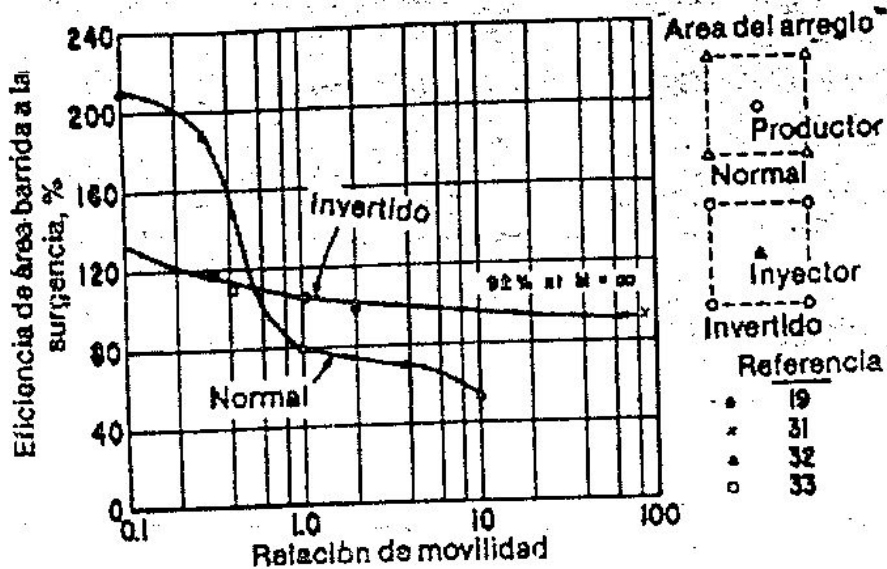


Fig.8: Eficiencia de barrido para un arreglo five spot normal e invertido aislado (tomado de Craig⁴)

Las figuras 9 y 10 muestran correlaciones de E_A vs. la relación de movilidades para un five spot luego del BT.

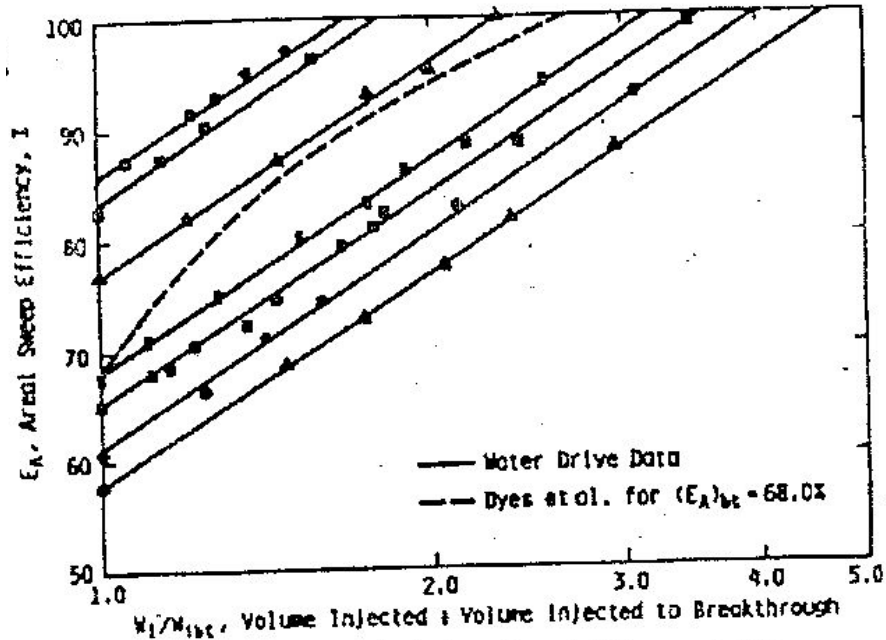


Fig.9. Correlación de la eficiencia de barrido areal luego del BT respecto a la relación Volumen inyectado/Volumen inyectado al BT (de Willhite⁵)

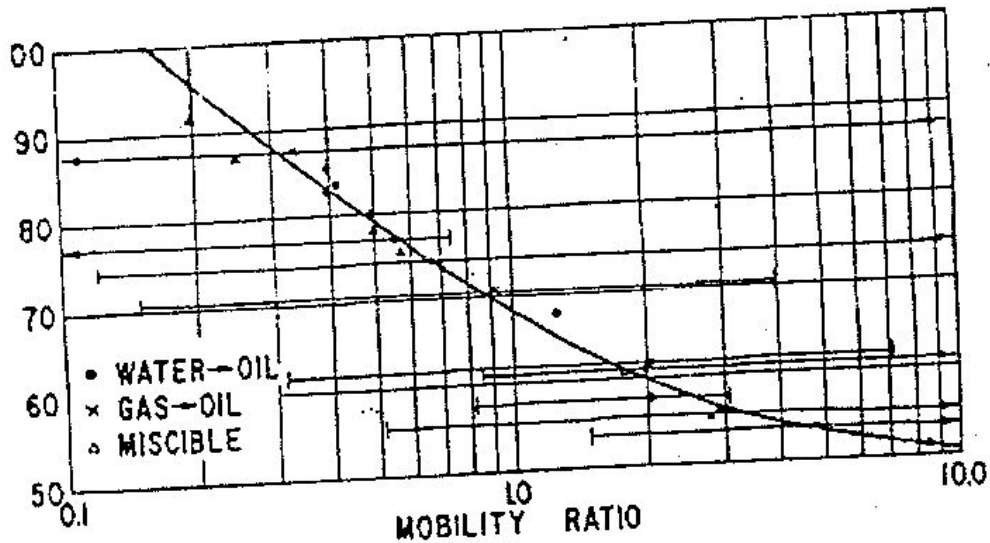


Fig.10: Correlación de la eficiencia de barrido areal en función de la movilidad para desplazamiento miscible e inmisible en un pattern five spot (de Willhite⁵)

Las curvas de la figura 9 se representan con las siguientes ecuaciones

$$E_A = E_{ABT} + 0.633 \ln \frac{W_i}{W_{iBT}} \dots (6.3)$$

$$E_A = E_{ABT} + 0.274 \ln \frac{W_i}{W_{iBT}} \dots (6.4)$$

donde E_{ABT} es la eficiencia al BT y E_A es la fracción del área que ha sido barrida cuando la saturación de agua es S_{wemed} .

El valor de E_{ABT} se estima de la correlación mostrada en la figura 10 la cual es ajustada con la ecuación

$$E_{ABT} = 0.54602036 + \frac{0.03170817}{M_{\bar{s}}} + \frac{0.30222997}{e^{\frac{M_{\bar{s}}}{s}}} \dots (6.5)$$

Siendo $M_{\bar{s}}$ la relación de movilidades cuando la k_{rw} se calcula para S_{wemed} detrás del frente.

La ecuación (4.5) es válida para

$$0.16 \leq M_{\bar{s}} \leq 10$$

En la figura 11 se muestra una correlación alterna de la eficiencia de barrido areal en función de la relación de movilidades para un pattern desarrollado y que se aplica luego de alcanzarse el BT. En el apéndice D del libro de Craig⁴ se muestran correlaciones semejantes para otros patterns.

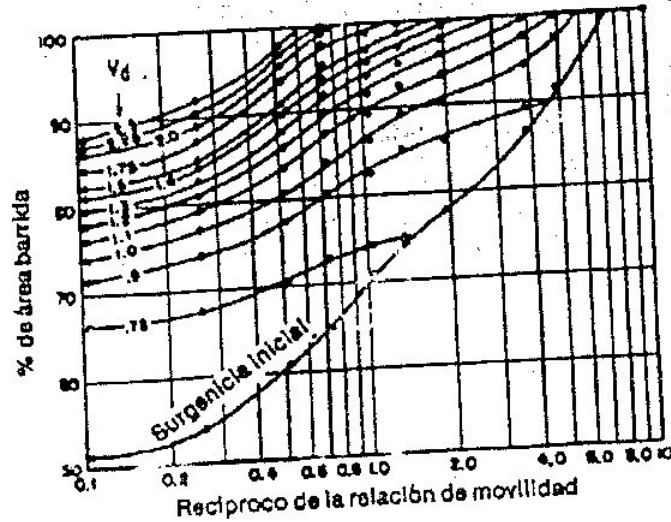


Fig.11: Efecto de la relación de movilidad sobre los volúmenes desplazados para un arreglo 5 spot (de Craig⁴ apéndice D)

Para el desarrollo de estas correlaciones se define dos factores obtenidos experimentalmente

- El volumen desplazable, V_D

$$V_D = \frac{W_i}{V_{Pmalla} (\Delta S_o)_{\max}} = \frac{W_i}{V_{Pmalla} (1 - S_{wir} - S_{or})} \dots (6.6)$$

donde

V_P es el volumen poral de la malla
 $(\Delta S_o)_{\max}$ es la saturación de petróleo máxima que puede desplazarse

- Fracción de flujo de la región barrida, Ψ_S , que se define como la fracción del flujo total que proviene de la región barrida (esto será igual al f_w si se asume que sólo el agua fluye de la zona barrida).

Otros factores que afectan la eficiencia de barrido areal

La mayoría de las correlaciones fueron desarrolladas para reservorios ideales. Cuando se utilizan las mismas para predecir la eficiencia de barrido, uno debe tener en cuenta los distintos factores relacionados con sistemas bajo recuperación secundaria y que pueden causar variaciones significativas en las predicciones. Algunos de los más importantes son:

- **Fracturas**

Si la malla se desarrolla en la dirección de las fracturas, los resultados pueden llegar a ser realmente desastrosos dado que se produce un BT temprano con muy baja eficiencia de barrido. Teóricamente puede lograrse solucionar este problema ubicando la línea de inyectores-productores en dirección perpendicular a la orientación de las fracturas. Desgraciadamente esta es una solución más teórica que real, ya que es muy difícil saber la orientación de las fracturas.

Amoco sugiere que si el inyector está fracturado, para no afectar la E_A es aconsejable que x_f/L sea menor que 0.15 donde x_f es la longitud media de la fractura y L es la distancia inyector-productor.

- **Permeabilidad direccional**

La presencia de permeabilidades direccionales tienen el mismo efecto que el de la presencia de fracturas, aunque su efecto no es tan drástico como en el caso anterior.

Los inyectores y los productores deben colocarse en una línea perpendicular a la dirección de máxima permeabilidad.

Las fig. 12 y 13 comparan las eficiencias de barridos en sistemas five spot donde se opera el arreglo bajo condiciones favorables y desfavorables.

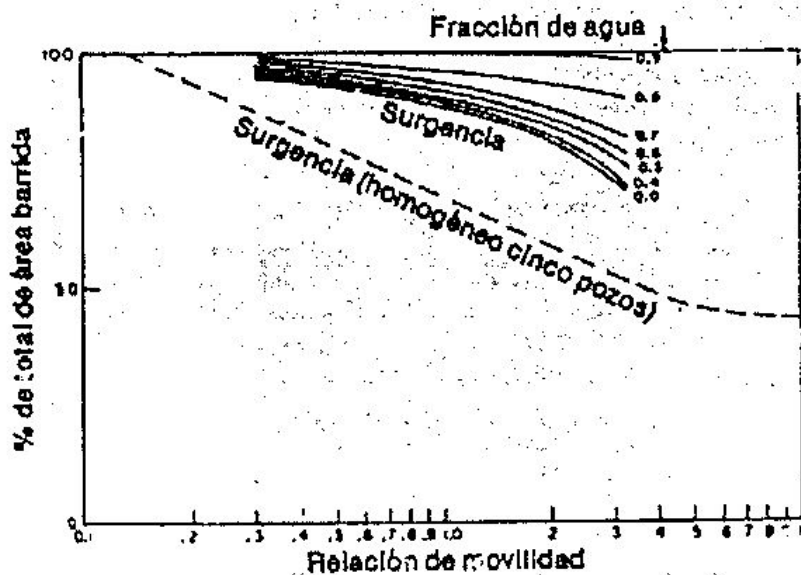


Fig.12: Eficiencia de barrido para un arreglo de 5 pozos con permeabilidad horizontal anisotrópica. El arreglo más favorable sigue siendo la dirección de máxima k paralela a las líneas que pasan a través de los inyectores (de Craig)

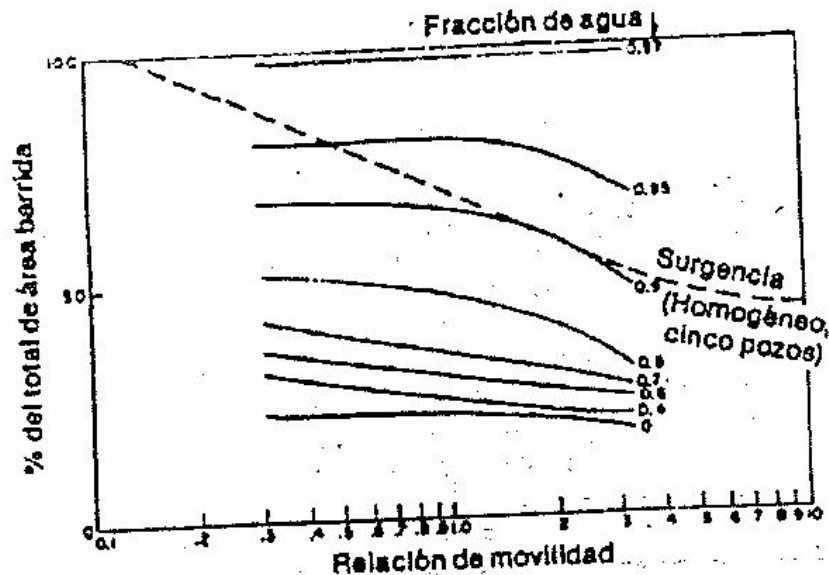


Fig.13: Eficiencia de barrido para un arreglo de 5 pozos con permeabilidad horizontal anisotrópica. El arreglo menos favorable sigue siendo la dirección de máxima k paralela a las líneas que va del pozo productor al inyector (de Craig)

- **Variaciones de permeabilidad areal**

Las variaciones de permeabilidad areal pueden generarse como consecuencia de cambios en la compactación, efectos de depositación ambiental, etc. En términos generales, este tipo de variaciones debe manejarse en función de cada caso particular y su efecto sobre la eficiencia de barrido puede determinarse a través de modelos matemáticos o directamente a través de la experiencia en el propio yacimiento.

- **Ángulo de buzamiento**

- **Mallados irregulares**

El efecto general de los mismos es la aparición de BT prematuros en los pozos cercanos al inyector.

- **Mallados aislados**

Cuando un yacimiento se desarrolla usando un pattern repetitivo, cada malla tiende a comportarse independientemente de las otras dado que el petróleo y el agua en esa porción del reservorio están confinados por la influencia de los mallados vecinos.

Si el mallado en cambio, es por ejemplo un piloto, es posible calcular eficiencias mayores al 100% en función de los fluidos que se producen. La figura 14 muestra esta situación.

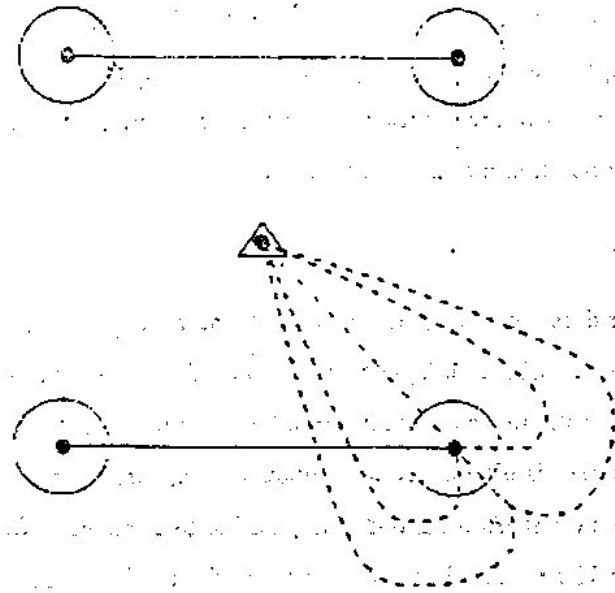


Fig.14: Eficiencia de barrido para un five spot invertido aislado (de Cobb⁶)

- **Saturación inicial de gas**

La mayoría de los estudios de laboratorio fueron conducidos en modelos con saturación de 100% de líquidos. Sin embargo, en muchos reservorios, cuando comienza la secundaria existe una saturación de gas.

Cuando el agua se inyecta en reservorios con una saturación inicial de gas, los estudios de Craig *et al*². mostraron que el agua inyectada se moverá radialmente hasta que:

- ✓ el banco de petróleo contacte a otro banco de petróleo formado por un inyector adyacente
- ✓ el banco de petróleo alcance un productor

En estas condiciones, la eficiencia de barrido areal al BT con gas inicial es igual a la del sistema con 100% de líquido. En otras palabras, el comportamiento del sistema en el BT como posteriormente a él, es similar para ambos yacimientos, con o sin gas presente.

El petróleo total producido, sin embargo, en un sistema con gas inicial será menor a aquel saturado sólo con líquido en una cantidad igual a la del volumen ocupado inicialmente por el gas.

Si el llenado del reservorio con gas ocurre a un barrido mayor que aquel de un sistema lleno de líquido, el barrido areal en sistemas con gas puede ser mejor que el predicho por las correlaciones de eficiencia de barrido.

5.-Flujos en línea y periféricos

En contraste con los mallados repetitivos, el barrido periférico utiliza los pozos de los bordes del reservorio como inyectores.

Si una sola línea de pozos en un borde o en el medio del reservorio se utiliza como inyectores, se define a este modo de empuje como flujo en línea. Este tipo de barrido se utiliza, en general, pocos inyectores respecto a los productores, y por lo tanto la inversión inicial para comenzar la secundaria es relativamente baja. El corte de agua asociado a este tipo de barrido, también en general es bajo. Esto último es más evidente cuando el operador cierra aquellos pozos donde se alcanzó el BT, continuando la producción con la siguiente línea de productores.

Ferrel *et al.*⁷ estudiaron detalladamente la recuperación secundaria mediante barridos lineales y encontraron que si el mismo se conduce hasta el final, se necesita inyectar menos agua para recuperar el petróleo con una muy buena eficiencia de berrido, siempre y cuando los pozos en los que se alcanza el BT se cierran inmediatamente. Para usar este procedimiento, por supuesto, se necesita que la permeabilidad del reservorio sea lo suficientemente alta para permitir que el frente de agua se mueva largas distancias desde el inyector a la presión de inyección.

Un método alternativo a lo anterior, es ir convirtiendo en inyectores los productores en los que se alcanza el BT. El problema de esta solución es que se generan largas líneas de inyectores con un gasto considerable.

El barrido periférico tiene la ventaja de ser muy flexible, permitiendo el cambio de mallado a otro más denso si el comportamiento del yacimiento así lo sugiere.

El principal inconveniente de iniciar un barrido con un desplazamiento periférico se encuentra en yacimientos con alta saturación de gas inicial, ya que no se observará ninguna respuesta del mismo hasta que todo el espacio ocupado por el gas sea reemplazado por el agua. Como consecuencia de esto habrá un retardo importante de tiempo con un gasto de agua considerable.

6.-Selección del mallado

La elección del tipo de pattern es una de las decisiones más importantes que debe tomar el ingeniero a cargo del diseño de la secundaria. En su análisis debe entrar en consideración distintos aspectos, tales como:

- ✓ la distribución de los pozos que tiene
- ✓ la geología del reservorio
- ✓ los objetivos de inyección y producción
- ✓ la necesidad de perforar la menor cantidad de pozos infill posibles

Muchos de los arreglos de pozos existentes pueden permitir varios tipos de mallados, así por ejemplo, un yacimiento desarrollado en forma de cuadrado puede ser barrido con sistemas tipo five spot, nine spot invertido o normal, en línea, periférico o four spot desplazado. La selección del mallado, en estas situaciones está determinado primeramente por la geología.

La capacidad de inyección del reservorio también es importante, ya que siguiendo el ejemplo anterior, cada uno de los posibles patterns ofrecen diferentes relaciones de pozos productores a inyectores (1:1 en five spot, 2:1 en four spot desplazado, 3:1 para un nine spot invertido o 1:3 para el nine spot normal). Así si se necesita presurizar el yacimiento, y el mismo tiene alta capacidad de inyección, el nine spot normal aparece como un buen candidato. Sin embargo, no debe olvidarse que la geología y las razones económicas pueden cambiar la selección natural.

Siguiendo a Craig⁴ un correcto mallado debe satisfacer los siguientes criterios

- 1) Dar el máximo caudal posible de petróleo
- 2) Dar la capacidad de inyección necesaria para satisfacer el caudal de petróleo
- 3) Maximizar la recuperación de petróleo con el mínimo corte de agua
- 4) Ser compatible con los pozos ya perforados, requiriendo un mínimo de nuevos pozos a perforar
- 5) Eventualmente ser compatible con las operaciones de secundaria de otros operadores cuando el yacimiento tiene continuidad (por ejemplo entre la secundaria de Chihuidos de la Sierra Negra operado por YPF S.A. y El Trapial operado por San Jorge)

7.-Conclusión

El diseño y operación de un proyecto de secundaria requiere la mayor eficiencia de barrido areal, y esto sólo se puede alcanzar cuando la relación de movilidades es baja y el mallado seleccionado puede sacar ventajas de las heterogeneidades del reservorio.

Comparar las distintas correlaciones, y realizar simulaciones numéricas permiten mejorar la selección y predicción del comportamiento del yacimiento, pero la base de todo esto se encuentra en una correcta caracterización del reservorio, de ahí que no se deben ahorrar esfuerzos en alcanzarla.

Bibliografía

1. **Dake, L.P.:** *The Practice of Reservoir Engineering*, Elsevier, 1994
2. **Craig, F.F.Jr.Geffen, T.M. and Morse, R.A.:** “*Oil Recovery Performance of Pattern Gas or Water Injection Operations from Model Tests*”, Trans AIME(1955)204,7-15
3. **Smith, C.R.:** *Secondary Oil Recovery*, Robert E. Kriger Publishing Co. 1966
4. **Craig F.F.Jr.:** “*Aspectos de la Ingeniería de Reservorios para la Inyección de Agua*”, SPE Monograph 3, 1971
5. **Willhite, G.P.:** *Waterflooding*, SPE Textbook Series vol 3, 1986
6. **Cobb, W.:** *Waterflooding*, curso dictado en C. Rivadavia, 1995
7. **Ferrel, H. Irby, T.L. Pruitt G.T. and Crawford P.B.:** “*Model Studies for Injection-Production Well Conversión During a Line Drive Water Flood*”, Trans. AIME(1960),219,94/98