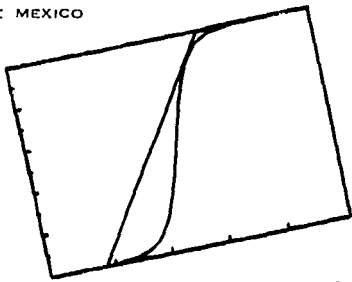


1 A
2 ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO



ESTIMACION DE LA RECUPERACION DE ACEITE POR
LOS METODOS DE BUCKLEY Y LEVERETT Y WELGE,
MEDIANTE UN PROGRAMA DE COMPUTO.

TESIS DE LICENCIATURA EN INGENIERIA PETROLERA.
ROBERTO AGUILAR RAZO

MEXICO, D. F., NOVIEMBRE DE 1991.

FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CONTENIDO

PROLOGO	VI
CAPITULO I	
PROPIEDADES PETROFISICAS Y DE LOS FLUIDOS	1
I.1. Porosidad	1
I.1.1. Determinación de la porosidad de una roca	3
I.2. Saturación	4
I.2.1. Saturación irreductible de agua	5
I.2.2. Determinación de las saturaciones de agua y aceite	5
I.2.3. Determinación de la saturación irreductible de agua	7
I.2.4. Saturación residual de aceite	8
I.3. Mojabilidad	8
I.4. Permeabilidad	9
I.4.1. Permeabilidad absoluta	10
I.4.2. Permeabilidad efectiva	10
I.4.3. Permeabilidad relativa	10
I.4.4. Curvas de permeabilidad relativa	11
I.5. Ley de Darcy	12
I.6. Medición de la permeabilidad absoluta	14
I.7. Efecto Klinkenberg	15
I.8. Determinación de permeabilidades relativas	16

I.9. Viscosidad	17
I.10. Movilidad	18
I.11. Relación de movilidades	19
CAPITULO II DESPLAZAMIENTO LINEAL Y ECUACIONES DE CONTINUIDAD Y FLUJO FRACCIONAL	20
II.1. Desplazamiento lineal	20
II.2. Teoría del desplazamiento frontal	21
II.3. Teoría del desplazamiento tipo pistón	22
II.4. Ecuación de continuidad	22
II.5. Ecuación de flujo fraccional	25
CAPITULO III METODO DE BUCKLEY Y LEVERETT	29
III.1. Teoría de Buckley y Leverett (Desplazamiento frontal)	29
III.2. Ecuación de avance frontal en una dimensión	30
III.3. Solución de la ecuación de avance frontal	34
III.4. Procedimiento general para la determinación de la distribución de saturaciones durante el desplazamiento	34
III.4.1. Procedimiento	35
III.5. Etapas del desplazamiento	37
III.6. Factores que afectan las etapas inicial y subordinada del desplazamiento	38
III.7. Características del desplazamiento inmiscible	38

CAPITULO IV	
METODO DE WELGE	40
IV.1. Introducción al método	40
IV.2. Derivación del método	42
CAPITULO V	
EVALUACION DEL DESPLAZAMIENTO	46
V.1. Simplificación del gradiente de saturación de agua	46
V.2. Producción acumulativa de aceite	47
V.3. Volumen acumulativo de agua	47
V.4. Tiempo al que se tiene una saturación S_{wj} en el extremo productor	47
V.5. Gastos de agua y aceite	48
V.6. Relación agua - aceite	48
CAPITULO VI	
PROGRAMA DE COMPUTO	49
VI.1. Elección del lenguaje	49
VI.2. Estructura	50
VI.2.1. Datos	50
VI.2.2. Resultados	50
VI.3. Algoritmos y diagramas de flujo	52
VI.3.1. Cálculo de la relación de permeabilidades	52
VI.3.2. Cálculo del flujo fraccional de agua	53
VI.3.3. Cálculo de la derivada del flujo fraccional de agua con respecto a la saturación de agua	53
VI.3.4. Cálculo de la distancia a la que se encuentra determinada saturación de agua	54

VI.3.5. Cálculo del volumen de agua inyectado	54
VI.3.6. Cálculo de la saturación media de agua atrás del frente	55
VI.3.7. Cálculo del tiempo en el que se tiene determinada saturación de agua, en el extremo productor, después de la surgencia	55
VI.3.8. Cálculo del volumen de aceite producido	56
VI.3.9. Cálculo del gasto de aceite	56
VI.3.10. Cálculo de la relación agua - aceite	57
VI.4. Algoritmo para el método de Buckley y Leverett	57
VI.5. Algoritmo para el método de Welge	60
VI.6. Código fuente	62
CAPITULO VII	
APLICACION DEL PROGRAMA	122
Ejemplo 1	122
Resultados numéricos	123
Resultados gráficos	124
Ejemplo 2	127
Resultados numéricos	128
Resultados gráficos	129
CAPITULO VII	
ANALISIS DE RESULTADOS	132
VIII.1. Ejemplo 1	132
VIII.1.1. Análisis de sensibilidad	133
VIII.2. Ejemplo 2	133
CAPITULO IX	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	135

PROLOGO

En 1941 S. E. Buckley y M. C. Leverett propusieron la teoría del desplazamiento frontal; en 1951 Henry Welge la simplificó, dando lugar a su propio método. Para la aplicación de ambos métodos se requiere elaborar algunas curvas basadas en la información disponible, lo que requiere tiempo considerable y además está sujeto al error humano que en las operaciones realizadas se puede cometer. La tecnología ha avanzado y ha permitido la creación de calculadoras programables y computadoras para ser utilizadas como una herramienta y aminorar el trabajo tedioso. Algunos autores han aprovechado este avance tecnológico y han desarrollado programas basados en los métodos antes mencionados; pero desde un punto de vista muy personal, esto puede ser considerado como una desventaja porque es relativamente más fácil tener acceso a una computadora personal que a una calculadora programable para las que fueron desarrollados dichos programas. Por esto, a 50 años de la proposición de Buckley y Leverett, se desarrolló un programa de cómputo, llamado BLW, que está basado en su teoría y en la simplificación de Welge, con 3 fines principales :

- Proporcionar apoyo en la impartición de la materia Recuperación Secundaria.
- Disponer de un programa fácilmente transportable (compatible).
- Proveer de una herramienta que permita evaluar rápidamente, dentro de las limitaciones de la teoría, la capacidad productiva de un yacimiento y que sirva de apoyo a la información de carácter no técnico con el fin de evaluar integralmente un proyecto de Recuperación Secundaria.

Las bases teóricas para el desarrollo de BLW se presentan en los capítulos I a VI. El capítulo I incluye los aspectos básicos para el entendimiento del desarrollo físico y matemático de un desplazamiento. En el capítulo II se desarrollan las dos ecuaciones básicas para el estudio de un proceso de inyección de agua, que son la ecuación de continuidad y la ecuación de flujo fraccional. El capítulo III expone la teoría de Buckley y Leverett, así como una serie de aspectos que caracterizan al proceso de inyección de agua. El capítulo IV presenta la simplificación de Welge, por lo que únicamente se describe el procedimiento y se desarrollan las ecuaciones para el cálculo de las saturaciones en el frente y media atrás del frente. En el capítulo V aparecen las ecuaciones empleadas para el cálculo de volúmenes, de aceite y agua, necesarios para

evaluar la eficiencia del desplazamiento. El desarrollo del programa se hace en el capítulo VI, donde se incluyen las funciones, algoritmos y diagramas de flujo empleados. La aplicación del programa aparece en el capítulo VII, y fue realizada con datos obtenidos de referencias que en su momento se indican. Se presentan los resultados numéricos y gráficos; el análisis de resultados se hace en el capítulo VIII incluyendo un análisis de sensibilidad para determinar los factores que afectan directamente al desplazamiento. En el capítulo IX se dan las conclusiones que se obtuvieron con base en la aplicación del programa. Finalmente, el apéndice contiene la forma en que se debe, o puede, utilizar el programa así como algunos de los mensajes que proporciona. Es conveniente mencionar que la saturación de agua en el frente obtenida por el método de Buckley y Leverett se designa mediante S_{wfB} y con S_{wfW} a la obtenida por el método de Welge.

Algo más, el título del presente trabajo no debe dar lugar a confusiones en el sentido de cuántos métodos se incluyen. Un método es el de Buckley Y Leverett, y el otro es el de Welge. Al combinar el nombre de ambos, y tratándose del plural de la palabra método, el título queda de la siguiente manera :

" ESTIMACION DE LA RECUPERACION DE ACEITE POR LOS METODOS DE
BUCKLEY Y LEVERETT Y WELGE, MEDIANTE UN PROGRAMA DE COMPUTO "

Hecha la aclaración, solamente resta desear que sirva como incentivo para el desarrollo de más y mejores programas enfocados a la resolución de problemas de Ingeniería Petrolera.

PROPIEDADES PETROFISICAS Y DE LOS FLUIDOS

La base para el desarrollo y aplicación de los métodos de Buckley y Leverett y Welge, tiene su origen en la comprensión de la forma en que se comportan los yacimientos. En este capítulo se presentan las propiedades más importantes y la forma, o método, para cuantificarlas. Aunque existen varios métodos, solamente se expone uno que puede ser modificado para dar lugar a otro método. Los aparatos empleados pueden ser obsoletos, pero la forma en que operan todavía es vigente.

I.1. Porosidad

La porosidad es una medida del espacio de una roca no ocupado por la estructura sólida de ésta. Se define como la fracción del volumen total de la roca no ocupado por sólidos y se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\phi_a = \frac{V_t - V_s}{V_t} \quad (1)$$

donde ϕ_a = Porosidad absoluta.

V_t = Volumen total, o geométrico, de la roca.

V_s = Volumen ocupado por sólidos.

El término porosidad absoluta se explicará en el siguiente párrafo. La porosidad también se puede expresar de la siguiente forma:

$$\phi_a = \frac{V_v}{V_t} \quad (2)$$

donde V_v es el volumen de espacios vacíos.

Las ecuaciones 1 y 2 son idénticas, debido a que el volumen de espacios vacíos es exactamente igual al volumen total de la roca menos el volumen de sólidos.

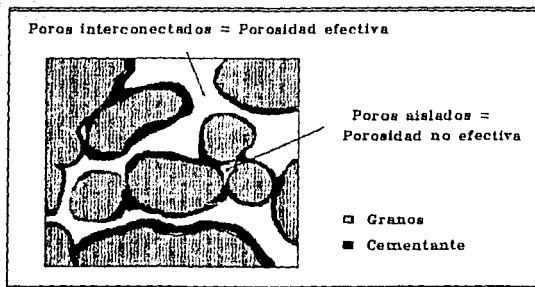


FIGURA 1.- Tipos de porosidad

A medida que los sedimentos se acumulan para formar la roca, algunos de los espacios vacíos que se han formado son aislados de otros espacios debido a un exceso de cementación, dando lugar a la existencia de espacios vacíos conectados entre sí y de otros que están aislados de estos últimos. A los espacios que están conectados entre sí se les

denomina poros, o también, espacios interconectados. Por lo anterior, se han definido dos tipos de porosidad que dependen de qué volumen de espacios vacíos sea medido. Estos tipos son la porosidad absoluta y la porosidad efectiva. Ver figura 1. La porosidad absoluta es la que incluye el volumen de espacios vacíos interconectados y no conectados; las ecuaciones anteriores se refieren a esta porosidad y se emplea el subíndice a , de absoluta. En cambio, la porosidad efectiva es aquella en la que se incluye únicamente el volumen de espacios vacíos interconectados, es decir :

$$\phi_e = \frac{V_{ei}}{V_r} \quad (3)$$

donde ϕ_e = Porosidad efectiva.

V_{ei} = Volumen de espacios vacíos interconectados.

La porosidad generalmente se expresa en porcentaje, sin importar el tipo del que se trate, por esta razón las ecuaciones anteriores pueden aparecer multiplicadas por 100.

En un yacimiento, los fluidos viajan distancias considerables para llegar a los pozos productores. Si los fluidos ocuparan los espacios vacíos no conectados, entonces éstos no podrían ser recuperados debido a que no pueden fluir. Por lo tanto, la porosidad de interés en la Ingeniería Petrolera es la porosidad efectiva, ya que únicamente los fluidos que se encuentran en los espacios vacíos interconectados pueden fluir hacia los pozos productores.

Como se mencionó en el párrafo anterior, la porosidad efectiva es la que interesa en el estudio de un yacimiento, por lo que debe ponerse énfasis en la determinación de dicho valor.

A continuación se describirá un método, de varios existentes, para la determinación de la porosidad efectiva de una roca.

I.1.1. Determinación de la porosidad de una roca

Se puede observar en la ecuación 3, que la porosidad puede determinarse conociendo los valores de V_i y V_{ei} , y por esto se mencionará la forma de obtener dichos valores. El método que se describirá, por ser de los más sencillos, es de los llamados Métodos de Saturación. El volumen de poros de una muestra puede ser determinado saturándola completamente con un líquido de densidad conocida y obteniendo el incremento de peso que sufre. Un aparato para este procedimiento se muestra en la figura 2. El procedimiento que se emplea es el siguiente:

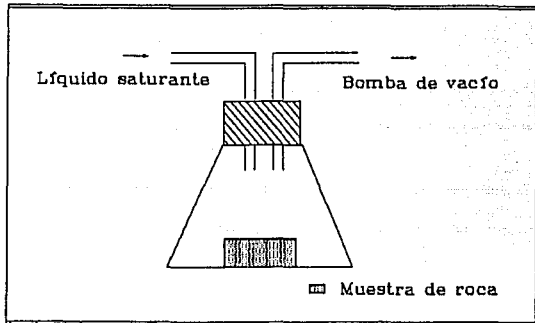


FIGURA 2.- Aparato de saturación para la determinación de volúmenes

Se pesa la muestra seca y se coloca dentro del frasco. Se acciona la bomba de vacío, lo que permite la entrada de un fluido, comúnmente keroseno, hasta que cubre a la muestra. Se extrae la muestra con pinzas, se le quita el exceso de líquido y se pesa. El volumen de poros se determina mediante:

$$V_{ei} = \frac{W_s - W_d}{\rho_l} \quad (4)$$

donde W_s = Peso de la muestra saturada.

W_d = Peso de la muestra seca.

ρ_l = Densidad del líquido saturante.

Este procedimiento es válido, debido a que el líquido solamente entrará, o fluirá, por los poros interconectados, como se mencionó anteriormente.

El valor de V_i puede obtenerse a partir de la forma geométrica que presente la muestra; por ejemplo, para una muestra cúbica el valor de V_i se obtiene multiplicando longitud por ancho por profundidad. Una vez obtenidos los valores de V_e y V_i se determina el valor de la porosidad.

I.2 Saturación

Con base en la historia de la formación de un yacimiento, se estableció que los poros de la roca, al momento de la migración del aceite, se encuentran llenos con agua. En cierto momento el aceite y el gas se mueven hacia la roca almacenadora, desplazando el agua hasta dejar una cantidad residual. Por esta razón, cuando se descubre un yacimiento pueden existir agua, aceite y gas distribuidos de alguna manera. Se utiliza el término saturación, para definir la extensión de ocupación de los poros de la roca por un fluido. La saturación de un fluido se define como la fracción, o porcentaje, del volumen de poros ocupado por un fluido en especial. En forma de ecuación, para el aceite, agua y gas, se tienen :

$$S_o = \frac{V_o}{V_p} \quad (5)$$

$$S_w = \frac{V_w}{V_p} \quad (6)$$

$$S_g = \frac{V_g}{V_p} \quad (7)$$

donde S_o = Saturación de aceite.

S_w = Saturación de agua.

S_g = Saturación de gas.

V_o = Volumen de aceite.

V_w = Volumen de agua.

V_g = Volumen de gas.

I.2.1. Saturación irreductible de agua

En la mayoría de los yacimientos los fluidos llegan a un estado de equilibrio, y por diferencia en sus densidades se encuentran segregados, es decir, en orden ascendente con respecto a su posición en el yacimiento, agua, aceite y gas. En las zonas de aceite y gas, también existe agua aunque en cantidad mínima y es a ésta a la que se le denomina saturación irreductible de agua, S_{oi} . El agua permanece en las zonas de aceite y gas debido a fuerzas capilares, que son significativas solamente en poros capilares. La saturación irreductible de agua es un factor muy importante, porque determina el espacio poroso que puede ser llenado con aceite. Como ejemplo, pueden considerarse dos muestras de roca con igual valor de porosidad e idéntica geometría. La saturación irreductible de agua de una muestra es de 10 % y de 20 % para la otra. Si se saturan ambas muestras con aceite, la cantidad que podrá aceptar la roca cuya saturación es de 20 % será menor a la de la otra muestra, esto es :

$$S_o = 100 - S_{wi} \quad (8)$$

I.2.2. Determinación de las saturaciones de agua y aceite

Como se verá posteriormente, el conocimiento de los valores de saturación de agua y aceite es de gran importancia en la determinación de los volúmenes de fluidos en el yacimiento y producidos. La determinación de los valores de saturación, requiere el conocimiento de los volúmenes de cada fluido que se encuentran en los poros de una roca. Existen diversos métodos para medir estos volúmenes; el método que se presenta es el de la Retorta y en la figura 3 se muestra el aparato empleado en este método.

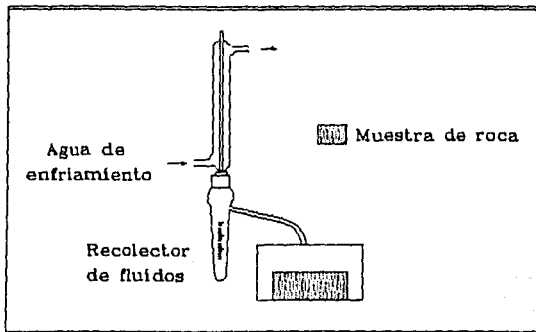


FIGURA 3.- Aparato para la medición de fluidos (Retorta)

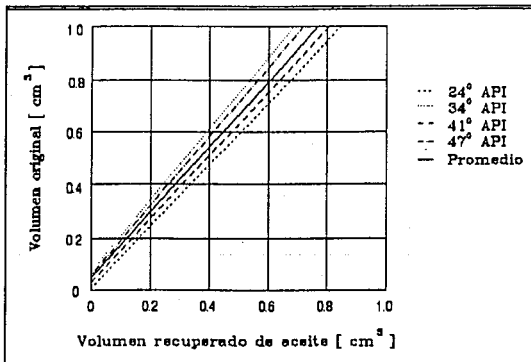
Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

Método de la Retorta : Se coloca una muestra relativamente grande, 100 a 200 g, dentro del recipiente metálico y se calienta aproximadamente a 400 °F durante un tiempo que va de 20 minutos a una hora y que depende del tipo de aceite que contenga la muestra. Si el aceite es ligero, el tiempo será menor y mayor si se trata de aceite pesado. Durante este periodo el agua y la fracción ligera del aceite son destilados y su volumen es medido. La muestra de líquidos destilados puede centrifugarse para obtener cada volumen por separado. Cuando el volumen destilado se mantiene casi constante durante unos minutos, se incrementa la temperatura hasta 1200 °F para destilar la fracción pesada del aceite. De igual forma, este volumen también es medido. Cualquier cantidad de agua que se recupere en este periodo, se considera de origen intercrystalino, y no debe tomarse en cuenta para el cálculo de la saturación de agua. El método de la retorta tiene las siguientes ventajas :

- Es rápido y fácilmente adaptable en el laboratorio.
- El tamaño relativamente grande de la muestra proporciona una mejor aproximación de los valores reales.
- Los volúmenes de aceite y agua son medidos directamente.

Las desventajas de este método son :

- Se tiende a craquear el aceite y a la formación de coque.
- La densidad del aceite recuperado es mayor a la del aceite original, y por lo tanto afecta el volumen obtenido.



GRAFICA 1.- Factor de corrección del aceite destilado

Debido a esto, el Instituto Americano del Petróleo, API, publicó en 1960 el artículo titulado "Recommended practice for core analysis procedure", donde aparece una gráfica en la que se muestran curvas que permiten obtener el volumen real de aceite, en función de la densidad del aceite destilado. Ver gráfica 1. Una vez corregido el valor de saturación de aceite, el error que se tiene es de $\pm 5\%$.

I.2.3. Determinación de la saturación irreductible de agua

Para determinar la saturación irreductible de agua, Bruce y Welge propusieron la técnica de presión capilar. En la figura 4 se presenta un esquema del equipo utilizado. El procedimiento consiste en saturar al 100 % una muestra con agua de formación y colocarla encima de la membrana semipermeable, que también está saturada al 100 % con agua. Se permite el paso del aire a la cámara y se incrementa la presión hasta que una pequeña cantidad de agua sea desplazada hacia la membrana y de ésta hacia un cilindro graduado. La presión se mantiene constante hasta que no se desplace más agua, lo que puede llevar días o semanas. Se extrae la muestra y se pesa, para determinar la saturación de agua. El proceso se repite hasta que el valor sea el mínimo posible. Con los valores de presión del aire y de saturación se puede elaborar la gráfica 2.

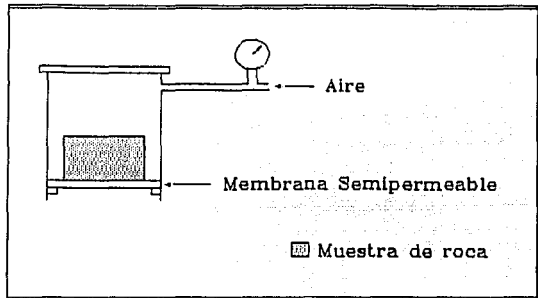


FIGURA 4.- Aparato para mediciones de presión capilar

Debido a que la presión requerida para desplazar el agua es exactamente igual a las fuerzas capilares que la retienen en los poros una vez alcanzado el equilibrio, los valores de la presión del aire pueden tomarse como valores de presión capilar, y si se desca convertirlos a altura sobre el nivel libre de agua. Puede observarse en la gráfica 2, que la saturación de agua alcanza un valor mínimo que es el valor de la saturación irreductible de agua. La presión capilar se define como la diferencia de presión que existe en la interfase que separa a dos fluidos inmiscibles. La ecuación para determinar la altura sobre el nivel libre de agua en función de la presión capilar en un tubo capilar es la siguiente :

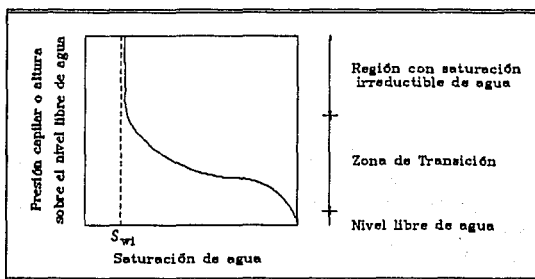
$$P_c = h (\rho_w - \rho_o) g \frac{2 \sigma \cos \theta}{r} \quad (9)$$

donde P_c = Presión capilar.

h = Altura sobre la superficie libre del líquido.

ρ_w = Densidad del agua.

- ρ_o = Densidad del aceite.
 g = Aceleración gravitacional.
 σ = Tensión superficial.
 θ = Angulo de contacto.
 r = Radio del tubo capilar.



GRAFICA 2.- Determinación de la saturación irreductible de agua

I.2.4. Saturación residual de aceite

A medida que se avanza en la explotación de un yacimiento, la saturación de aceite se va reduciendo hasta alcanzar un valor mínimo. A este valor mínimo de saturación se le denomina saturación residual de aceite. Esta saturación es el resultado del rompimiento de una fase continua, el aceite, lo que provoca que gotas de aceite queden retenidas en el centro de los poros y no puedan fluir. La saturación residual de aceite se representa mediante S_{or} , e indica la cantidad de aceite que no se puede extraer del yacimiento.

I.3. Mojabilidad

El concepto de mojabilidad puede ilustrarse con ayuda de la figura 5. Tres gotas de diferentes líquidos, mercurio, aceite y agua, se colocan sobre una placa de vidrio. Si se hace un corte transversal a las gotas se observa que el mercurio adopta forma esférica, el aceite semiesférica y el agua trata de expandirse al máximo. Puede decirse que la mojabilidad es la tendencia de un líquido a adherirse y expandirse sobre una superficie sólida. Esta tendencia puede ser mejor expresada en función del ángulo de contacto. El ángulo de contacto siempre se mide a través del líquido y hacia el sólido.

Puede verse que el ángulo de contacto decrece a medida que la mojabilidad aumenta. La mojabilidad completa se presenta cuando el ángulo de contacto es igual a cero y nula cuando es igual a 180° . Se ha definido que la mojabilidad intermedia se presenta en un rango del ángulo de contacto de 60° a 90° . En general, líquidos con ángulo de contacto mayor a 90° tienden a presentar repulsión por parte del sólido y los que presentan ángulo menor a 90° son atraídos hacia el sólido. Debe notarse en la figura 5, que se requiere la presencia de dos fluidos inmiscibles para la formación de una interfase entre ambos.

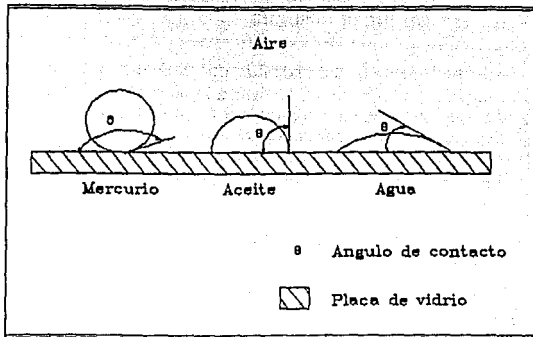


FIGURA 5.- Tipos de mojabilidad

Como se mencionó en la sección 1.2.1 existen al menos dos fluidos en los poros de la roca del yacimiento, aceite y agua, y puede considerarse que el agua es el fluido que moja a la roca, es decir, el agua es la fase mojante, aunque existen algunos yacimientos en los que la fase mojante es el aceite. La fase mojante cubrirá totalmente la superficie de la roca y se mantendrá en los poros más pequeños debido a la capilaridad.

1.4. Permeabilidad

La facilidad con la que un fluido puede moverse a través de los poros interconectados de una roca, indica el grado de permeabilidad de la misma. La roca es más o menos permeable dependiendo si permite el paso del fluido con mayor o menor facilidad. La permeabilidad es tan importante como la porosidad, debido a que además de que exista una cantidad considerable de aceite también es necesario que éste pueda fluir, ya que de otra manera el yacimiento no resulta económicamente explotable.

Como se podrá notar en el párrafo anterior, para que exista permeabilidad a un fluido se requiere que éste presente en los poros de la roca. En función del volumen de fluido, o saturación de éste, presente en la roca se han definido los siguientes tipos de permeabilidad: absoluta, efectiva y relativa.

I.4.1. Permeabilidad absoluta

Se define como la facilidad de fluir que tiene un fluido cuando éste ocupa el 100 % del espacio poroso de una roca; se utiliza la letra K para representarla. La permeabilidad absoluta es independiente del fluido presente en la roca y, por lo tanto, siempre tiene un valor constante. Sin embargo, cuando se utiliza un gas como fluido saturante, se tiene diferencia en el valor obtenido. Esta diferencia fue observada por Klinkenberg y se le conoce como Efecto Klinkenberg, que se explicará en la sección 1.7.

I.4.2. Permeabilidad efectiva

Hasta el momento se ha hablado de una roca que contiene un solo fluido, pero al menos existen dos en el yacimiento. Por lo tanto, el concepto de permeabilidad absoluta debe modificarse para describir de manera más o menos satisfactoria las condiciones de flujo de los fluidos presentes en el yacimiento.

La modificación da como resultado el concepto de permeabilidad efectiva a un fluido en particular. Se define como la permeabilidad a un fluido, que presenta una roca, cuando la saturación de éste es menor a 100 %. Para el aceite, agua y gas, la permeabilidad se representa mediante :

K_o = Permeabilidad efectiva al aceite.

K_w = Permeabilidad efectiva al agua.

K_g = Permeabilidad efectiva al gas.

La permeabilidad efectiva, a cualquier fase, puede variar de cero, cuando la saturación de la fase de interés se encuentra entre cero y su valor crítico, al valor de la permeabilidad absoluta, cuando la saturación de la fase de interés es del 100 % ; esto es :

$$0 \leq K_o, K_w, K_g \leq K \quad (10)$$

I.4.3. Permeabilidad relativa

La permeabilidad relativa se define como la relación entre los valores de permeabilidad efectiva a una fase y la permeabilidad absoluta, es decir :

$$K_{ro} = \frac{K_o}{K} \quad (11)$$

$$K_{rw} = \frac{K_w}{K} \quad (12)$$

$$K_{rg} = \frac{K_g}{K} \quad (13)$$

donde K_{ro} = Permeabilidad relativa al aceite.

K_{rw} = Permeabilidad relativa al agua.

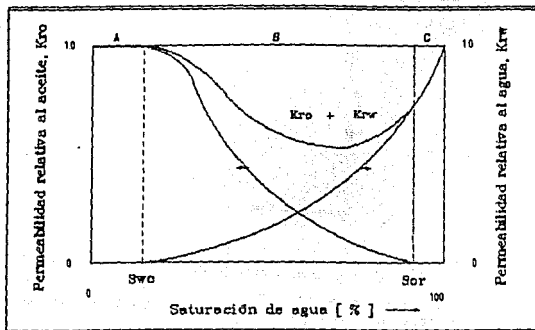
K_{rg} = Permeabilidad relativa al gas.

La permeabilidad relativa es de gran utilidad debido a que indica que tanto se reduce la permeabilidad a una fase en particular, por la presencia de otra fase. Por ejemplo, una permeabilidad relativa al aceite de 60 % indica que la permeabilidad al aceite se ha reducido en 40 % como resultado de la presencia de agua o gas. El límite inferior de la permeabilidad relativa es cero, cuando la saturación de la fase de interés se encuentra entre cero y su valor crítico, y el superior es uno, cuando la saturación de la fase de interés es de 100 % ; esto es, dividiendo la expresión 10 entre K , :

$$0 \leq K_{ro} , K_{rw} , K_{rg} \leq 1 \quad (14)$$

I.4.4. Curvas de permeabilidad relativa

El comportamiento de las permeabilidades relativas, o efectivas, está directamente relacionado con la saturación de cada fase. Para explicarlo, considérese un sistema de dos fases, aceite y agua, y la gráfica 3. El espacio poroso está completamente lleno con aceite y agua, por lo que $S_o + S_w = 1$ para todo tiempo. Para visualizar lo que ocurre, asuma que la roca está originalmente saturada 100 % con aceite. Ahora, se inyecta agua a todos los poros simultáneamente y se establece el equilibrio de mojabilidad por agua. Esto es físicamente imposible y sólo se hace con fines explicativos. Cuando el agua entra, es absorbida por la roca y mantenida inmóvil, tanto en la superficie de la roca como en las esquinas alrededor de los granos. Dicha inmovilidad está indicada por $K_{rw} = 0$ en la región A. Observe, sin embargo, que K_{ro} es esencialmente constante e igual a uno, en la misma región. A medida que el proceso continúa, la saturación de agua alcanza un valor crítico, S_{wc} , a partir de la cual el agua deja de ser inmóvil ($K_{rw} > 0$). A partir de este momento, fluyen aceite y agua; la saturación de agua se incrementa, al igual que K_{rw} , y la saturación y permeabilidad relativa al aceite disminuyen, Región B. El incremento en la saturación de agua ocasiona que la saturación de aceite llegue a su valor residual, S_{or} , a la cual el aceite se vuelve inmóvil ($K_{ro} = 0$), y solamente el agua fluye. Este es el mínimo valor de saturación de aceite que puede obtenerse mediante inyección de agua.



GRAFICA 3.- Curvas de permeabilidad relativa

Si fuera posible remover el aceite residual por otros medios, el valor de K_{rw} continuaría incrementándose hasta alcanzar el valor de uno. Puede observarse que la permeabilidad total a ambas fases, $K_{ro} + K_{rw}$, es menor a uno en las regiones B y C.

I.5. Ley de Darcy

Cuando se considera la permeabilidad de una roca, inmediatamente se debe pensar en términos de la fuerza que hace a los fluidos fluir a través del medio poroso. Esta fuerza es la presión. En 1856, el ingeniero francés Henry Darcy realizó pruebas con filtros de agua, compuestos por arenas no consolidadas, que le permitieron estudiar los factores que afectan al flujo de un fluido a través de un medio poroso.

Las siguientes suposiciones son necesarias para el desarrollo de la ecuación de flujo :

- Existen condiciones de régimen permanente.
- El espacio poroso de la roca está saturado 100 % con el fluido fluyente. Bajo esta restricción se tiene la permeabilidad absoluta.
- La viscosidad del fluido fluyente permanece constante. Esto no es verdad debido a que $\mu = f(T,P)$ para todos los fluidos reales. Sin embargo, este efecto es despreciable si se utiliza el valor de viscosidad a la presión media, y si las dos siguientes condiciones se cumplen.
- Condiciones isotérmicas.
- Flujo laminar y lineal.

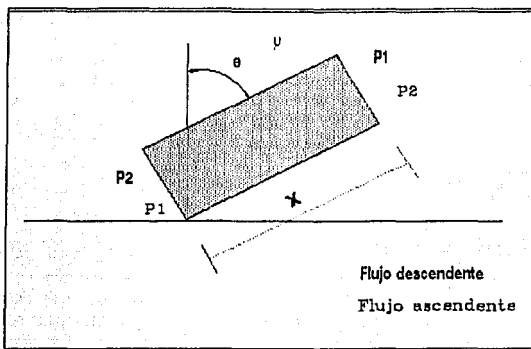


FIGURA 6.- Flujo de un fluido a través de un medio poroso
(Ley de Darcy)

Considerando la figura 6, la ley de Darcy se expresa de la siguiente forma :

$$V = - \frac{K}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial X} \pm 9.868 \times 10^{-7} \rho g \cos \theta \right) \quad (15)$$

donde V = Velocidad del fluido fluyente, [cm/s].

K = Permeabilidad absoluta, [darcy].

μ = Viscosidad del fluido fluyente, [cp].

ρ = Densidad del fluido fluyente, [g/cm³].

θ = Angulo de inclinación con respecto a la vertical, [grados].

g = Aceleración gravitacional, [cm/s²].

$\frac{\partial P}{\partial X}$

= Gradiente de presión en la dirección del flujo, [atm/cm].

$\frac{\partial P}{\partial X}$

El gradiente de presión, tomándolo como la presión de salida menos la presión de entrada y dividido entre la longitud del medio poroso, siempre es negativo si sólo se toma en cuenta la caída de presión por fricción. Por otra parte, el término $(\rho g \cos \theta)$, término por presión hidrostática, tendrá signo negativo si el flujo es descendente, como en la inyección de gas, y positivo cuando el flujo es ascendente, que es el caso de la inyección de agua.

La unidad de medida de la permeabilidad es el darcy, que se define como la permeabilidad que tiene un medio poroso cuando a través de él fluye un fluido con densidad de 1 g/cm^3 , viscosidad de 1 cp , a un gasto de $1 \text{ cm}^3/\text{s}$ y una velocidad de 1 cm/s , bajo la acción de un gradiente de presión de 1 atm/cm . Un darcy es un valor relativamente grande, porque la mayoría de las rocas presentan valores menores. Para evitar el uso de fracciones en el valor de la permeabilidad, se utiliza el milidarcy, md, que es equivalente, como su nombre lo indica, a la milésima parte de un darcy :

$$1 \text{ md} = 0.001 \text{ darcy.}$$

1.6. Medición de la permeabilidad absoluta

La determinación de la permeabilidad absoluta de una roca se hace a partir de pruebas de flujo. Se emplea un gas, usualmente aire, por las siguientes razones :

- Se alcanza fácilmente el régimen permanente.
- El aire no altera los minerales constituyentes de la roca.
- Se obtiene fácilmente la saturación del 100 % .

Instrucciones específicas sobre la medición de permeabilidad se presentan en el "API Code # 27" . Esquemáticamente el aparato para efectuar la medición en una muestra

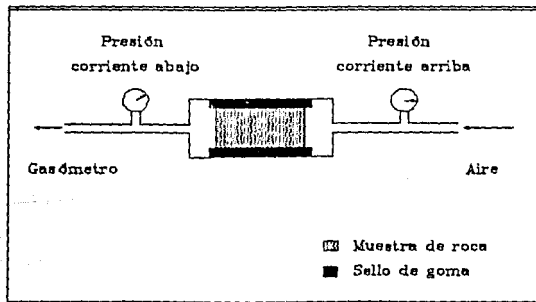


FIGURA 7.- Aparato empleado para la medición de permeabilidad absoluta

pequeña se presenta en la figura 7. La muestra se coloca en el contenedor, que sella los extremos y permite únicamente el flujo lineal. La diferencia de presión se registra con ayuda de dos manómetros. El gasto puede cuantificarse con un medidor de orificio o de otra manera, dependiendo de la preferencia de la persona que efectúa la medición. Se hace fluir aire, se registran las presiones y con ayuda de la siguiente ecuación se calcula el valor de la permeabilidad absoluta :

$$K = \frac{q_m \mu L}{A (P_e - P_s)} \quad (16)$$

donde K = Permeabilidad absoluta. [darcy].

q_m = Gasto de aire a condiciones medias. [cm^3/s]. Ver efecto Klinkenberg en la sección 1.7 .

μ = Viscosidad del gas a temperatura de prueba. [cp].

L = Longitud de la muestra. [cm].

A = Area de la sección transversal de la muestra. [cm^2].

P_e = Presión del aire corriente arriba. [atm].

P_s = Presión del aire corriente abajo. [atm].

1.7. Efecto Klinkenberg

En 1941, L.J. Klinkenberg observó que las mediciones de permeabilidad hechas con un gas como el fluido fluyente, muestran resultados diferentes a los obtenidos cuando se utiliza un líquido. El valor que se obtiene cuando se utiliza un gas es mayor al obtenido utilizando un líquido. Klinkenberg propuso, con base en sus estudios de laboratorio, que los líquidos tienen una velocidad igual a cero en la superficie sólida de la roca, mientras que el gas tiene una velocidad mayor a cero. En otras palabras, el gas patina sobre la superficie de la roca. Este patinaje resulta en un gasto mayor utilizando gas para una diferencia de presión dada. Klinkenberg también encontró que a medida que se incrementa la presión media, el valor de permeabilidad se reduce. La presión media se define como :

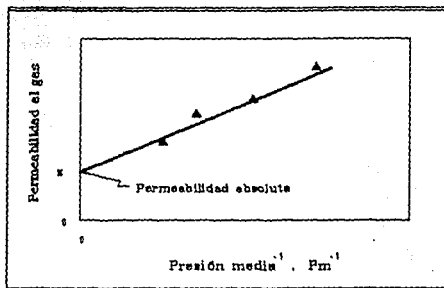
$$P_m = \frac{P_e + P_s}{2} \quad (17)$$

donde P_m = Presión media.

P_e = Presión corriente arriba.

P_s = Presión corriente abajo.

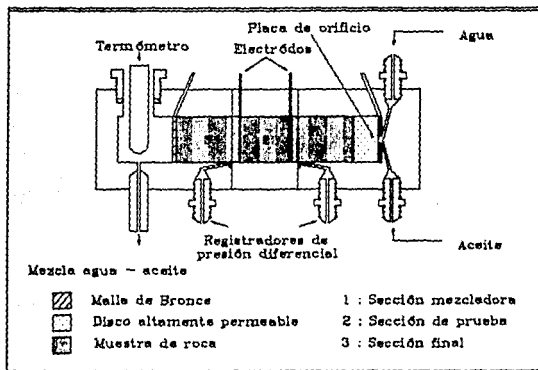
Si se construye una gráfica del valor de permeabilidad contra el inverso de la presión media, para diferentes valores de presión media, se puede ajustar una recta cuya ordenada al origen, esto es cuando P_m tiende a infinito, es equivalente a la permeabilidad absoluta. Ver gráfica 4.



En general, para la medición de la permeabilidad absoluta se emplea aire debido a que no reacciona con los materiales constituyentes de la roca.

GRAFICA 4.- Determinación de la permeabilidad absoluta en mediciones efectuadas con gas

1.8. Determinación de permeabilidades relativas



Un método muy común para la determinación de las permeabilidades relativas a dos fases, aceite y agua, se presenta en la figura 8. Este es una ligera modificación del método de la Universidad Estatal de Pensilvania, que fue desarrollado por Morse et al. La muestra de prueba se coloca en medio de dos muestras de propiedades similares. Se mantiene íntimo contacto entre los tres núcleos para eliminar los efectos capilares en los extremos, especialmente en el lado corriente abajo. Esto asegura que la distribución de saturación de cada fluido será uniforme durante el flujo en régimen

FIGURA 8.- Aparato utilizado para la medición de permeabilidades relativas

en los extremos, especialmente en el lado corriente abajo. Esto asegura que la distribución de saturación de cada fluido será uniforme durante el flujo en régimen

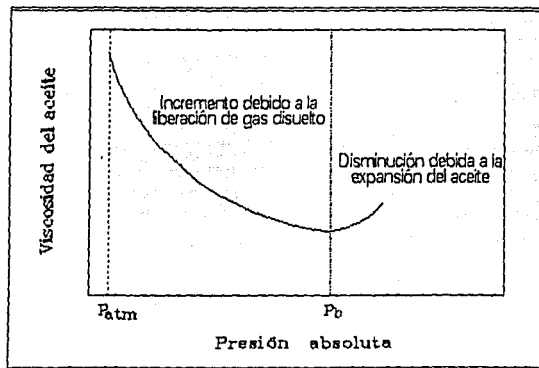
permanente. El núcleo corriente arriba sirve como cabeza mezcladora de los fluidos inyectados. Los núcleos se saturan primero con aceite y se registra el peso del núcleo de prueba. Se establece un gasto constante de aceite y se establece una caída de presión. Después se reduce ligeramente el gasto de aceite y se comienza a inyectar agua a un gasto que mantenga constante la caída de presión establecida originalmente. El equilibrio se logra cuando los gastos de entrada y salida son iguales. La saturación se determina extrayendo la muestra y pesándola, o eléctricamente midiendo la resistencia del núcleo. Se reduce el gasto de aceite y el gasto de agua se incrementa proporcionalmente. La repetición de este procedimiento, para diversas saturaciones, permite obtener los valores para construir la gráfica 3.

I.9. Viscosidad

La viscosidad denota, en general, la resistencia interna que presenta un fluido al escurrimiento. La viscosidad es la característica de un fluido que relaciona un esfuerzo cortante con el gradiente de velocidad que se produce en el fluido debido a fuerzas externas. Un fuerza cortante es aquella que actúa tangencialmente sobre una superficie. Esfuerzo cortante es la fuerza cortante por unidad de área. Generalmente el

esfuerzo cortante se expresa en dinas/cm². La unidad que se utiliza para medir la viscosidad es el poise, que se tiene cuando se requiere una fuerza de una dina para mantener un gradiente de velocidad de 1 cm/s, entre moléculas paralelas de un fluido, cuya área de sección transversal es unitaria y que están separadas 1 cm. La viscosidad se representa mediante μ . Al igual que el darcy, el poise es una unidad relativamente grande para el rango de valores que presentan los fluidos del yacimiento, y se utiliza el centipoise, cp, que equivale a la centésima parte de un poise, es decir :

$$1 \text{ cp} = 0.01 \text{ poise.}$$



GRAFICA 5.- Variación de la viscosidad del aceite con respecto a la presión

En general, la viscosidad de un fluido se incrementa al incrementarse la presión y se reduce al incrementarse la temperatura. Comparando la viscosidad del aceite a condiciones estándar y a condiciones de yacimiento se tiene lo siguiente :

La temperatura del aceite en el yacimiento es superior, está sujeto a presión y contiene gas disuelto. El efecto del gas disuelto consiste en reducir la densidad del líquido y por lo tanto presenta menor viscosidad. El comportamiento de viscosidad contra presión se presenta en la gráfica 5. Del valor de la presión inicial al de saturación se reduce la viscosidad del aceite debido a su expansión, hasta llegar al valor mínimo que se tiene a la presión de saturación. A presiones menores a la de saturación, el gas disuelto se libera parcialmente, presentándose una tendencia a incrementar el valor de viscosidad hasta obtener su máximo valor a la presión atmosférica.

Por su parte, el agua presenta un incremento en la viscosidad al reducirse la temperatura o aumentar la presión, o bien si aumenta la salinidad.

1.10. Movilidad

Una vez definidas las propiedades de la roca y de los fluidos presentes en el yacimiento, se puede definir un concepto básico en el flujo de fluidos a través de medios porosos. Este concepto se denomina movilidad y se define como la relación entre la permeabilidad efectiva a un fluido y la viscosidad de éste; esto es , tomando como ejemplo al aceite, :

$$\lambda_o = \frac{K_o}{\mu_o} \quad (18)$$

donde λ_o es la movilidad del aceite.

Esta es una combinación de una propiedad de la roca con una del fluido. Como se observa, la movilidad incluye a la permeabilidad, por lo que también es función de la saturación del fluido que fluye en el medio poroso. Como se mencionó, la permeabilidad es representativa de la facilidad de fluir que tiene un fluido debido a las características de la roca. La movilidad, en cambio, incluye dicha facilidad y además incluye el efecto de las características físicas del fluido. Por lo tanto, además de ser obvio, este término aparece en todas las ecuaciones de flujo de fluidos a través de medios porosos.

I.11. Relación de movilidades

Cuando se tiene el flujo de dos fluidos a través de un medio poroso, es la movilidad de cada uno la que determina el gasto que podrá fluir. La relación de movilidades, cuando un fluido desplaza a otro, se establece mediante :

$$M = \frac{\lambda_{fd}}{\lambda_{fD}} \quad (19)$$

donde M = Relación de movilidades.

λ_{fd} = Movilidad del fluido desplazante.

λ_{fD} = Movilidad del fluido desplazado.

Por ejemplo, si el valor de la relación de movilidades es igual a 2, y con base en la ley de Darcy, el gasto del fluido desplazante será :

$$q_{fd} = 2 q_{fD} \quad (20)$$

CAPITULO
II

DESPLAZAMIENTO LINEAL Y ECUACIONES DE CONTINUIDAD Y FLUJO FRACCIONAL

Es importante definir o explicar los conceptos que servirán como base para el desarrollo de los siguientes capítulos. Se desarrollarán dos de las más importantes ecuaciones utilizadas en el estudio de un desplazamiento de aceite por agua, o gas, que son la ecuación de continuidad y la ecuación de flujo fraccional.

A partir de este momento se empleará el término saturación inicial de agua, S_{wi} , para designar a la existente al inicio del desplazamiento, debido a que como mínimo se tiene este valor y para concordar con la nomenclatura que aparece en la literatura.

II.1. Desplazamiento lineal

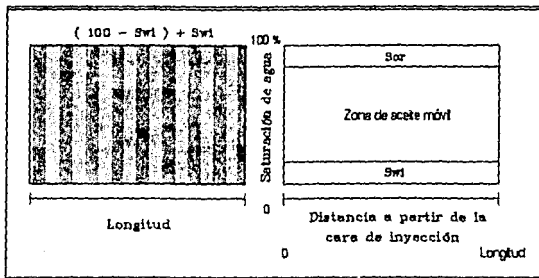


FIGURA 9.- Bloque con saturaciones inicial de agua y residual de aceite y su representación gráfica

Para explicar lo que ocurre cuando un fluido desplaza a otro, considere la figura 9, que representa un bloque del medio poroso que contiene agua y aceite uniformemente distribuidos cuyos valores son S_{wi} y $(100 - S_{wi})$ respectivamente. La figura representa los valores de saturación de agua y de aceite en cada punto del medio poroso. Se

representan los dos valores que siempre existen, que son la saturación irreducible de agua y la saturación residual de aceite, cuyos valores son constantes en cualquier punto

del medio poroso. Ahora, se puede definir que un desplazamiento lineal es aquél en el que la velocidad del fluido desplazante tiene una dirección constante en cualquier punto para todo tiempo.

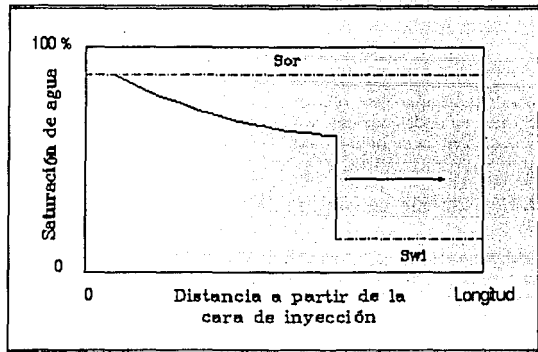
El estudio del desplazamiento lineal se divide en dos partes, que son :

- Teoría del desplazamiento frontal.
- Teoría del desplazamiento tipo pistón.

Con ayuda de las gráficas 6 y 7 se explicará brevemente cada teoría. Cabe mencionar un término que se emplea en el estudio de un desplazamiento, que es el de frente de desplazamiento y que equivale al punto más lejano a partir de la cara de inyección, en donde se tiene fluido de inyección .

II.2. Teoría del desplazamiento frontal

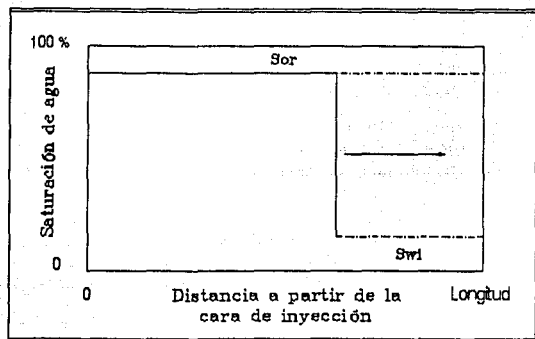
La teoría del desplazamiento frontal fue propuesta por Buckley y Leverett, y posteriormente ampliada por Welge. Esta teoría considera que desde el inicio del desplazamiento se forma un gradiente de saturación dentro del medio poroso, que es mayor en las cercanías de la cara de inyección y que se reduce hasta el valor de cero en algún punto dentro del mismo. A medida que continúa el desplazamiento, la saturación de agua se va incrementando y se tiende a que en ningún punto del medio poroso el gradiente de saturación sea cero; gráfica 6. Debido a la formación del gradiente de saturación, el agua no es capaz de desplazar todo el aceite móvil y por lo tanto, el valor de la saturación de aceite que permanece en el medio poroso es mayor al de la saturación residual. Al momento de la surgencia, solamente se habrá recuperado una parte del aceite móvil; es decir, el aceite móvil no puede recuperarse en su totalidad.



GRAFICA 6.- Perfil de saturaciones en el desplazamiento frontal

La saturación de agua se va incrementando y se tiende a que en ningún punto del medio poroso el gradiente de saturación sea cero; gráfica 6. Debido a la formación del gradiente de saturación, el agua no es capaz de desplazar todo el aceite móvil y por lo tanto, el valor de la saturación de aceite que permanece en el medio poroso es mayor al de la saturación residual. Al momento de la surgencia, solamente se habrá recuperado una parte del aceite móvil; es decir, el aceite móvil no puede recuperarse en su totalidad.

II.3. Teoría del desplazamiento tipo pistón



GRAFICA 7.- Perfil de saturaciones en el desplazamiento tipo pistón

Esta teoría es una simplificación del problema del desplazamiento de un fluido por otro. En ésta se considera que el agua no forma un gradiente de saturación, sino que desde el inicio de la inyección se desplaza todo el aceite móvil, y por lo tanto la saturación de aceite detrás del frente de desplazamiento, y al final del desplazamiento, será la saturación residual.

Ver gráfica 7. Bajo

estas suposiciones, se requiere un volumen menor de agua, comparado con el que se requiere en el desplazamiento frontal, para desplazar todo el aceite móvil y al momento de la surgencia se habrá recuperado dicha cantidad.

II.4. Ecuación de continuidad

El flujo de fluidos a través de un medio poroso está descrito por la ecuación de continuidad, que es la derivada parcial de la ecuación de conservación de la masa en cualquier punto del medio poroso.

- La principal suposición que se hace es que no hay transferencia de masa entre las fases, es decir, que no existe emulsión de aceite en agua.
- Se considerará que fluyen aceite y agua. El procedimiento se hará para el flujo de aceite, pero es el mismo para el flujo de agua.

Considere un elemento diferencial del medio poroso, cuyas dimensiones son dX , dY y dZ , como se indica en la figura 10.

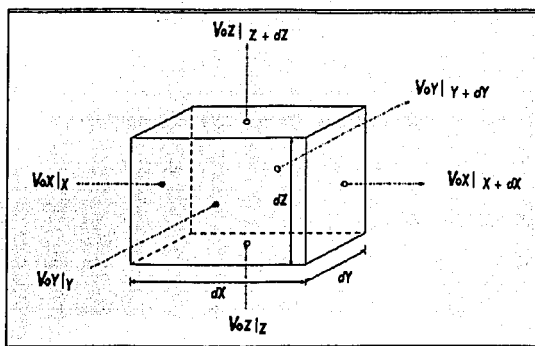


FIGURA 10.- Elemento diferencial

Haciendo un balance de materia a través del elemento diferencial, para cada fase, se tiene :

$$\begin{array}{r}
 \text{Masa de aceite} \\
 \text{que entra en} \\
 \text{el incremento de} \\
 \text{tiempo } dt
 \end{array}
 -
 \begin{array}{r}
 \text{Masa de aceite} \\
 \text{que sale en} \\
 \text{el incremento de} \\
 \text{tiempo } dt
 \end{array}
 =
 \begin{array}{r}
 \text{Masa de aceite} \\
 \text{que se acumula en} \\
 \text{el incremento de} \\
 \text{tiempo } dt
 \end{array}
 \quad (21)$$

Con base en la figura 10, la masa de aceite que entra en el incremento de tiempo dt es :

$$[(\rho_o V_{ox})_x dYdZdt + (\rho_o V_{oy})_y dXdZdt + (\rho_o V_{oz})_z dXdYdt] \quad (22)$$

en donde cada término representa la masa de aceite que fluye en los planos X, Y y Z en el incremento de tiempo dt .

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

La masa de aceite que sale en el incremento de tiempo dt es :

$$(\rho_o V_{ox})_x \cdot dx \, dYdZdt + (\rho_o V_{oy})_y \cdot dy \, dXdZdt + (\rho_o V_{oz})_z \cdot dz \, dXdYdt \quad (23)$$

La masa de aceite que se acumula en el incremento de tiempo dt es :

$$(\rho_o S_o \phi \, dXdYdZ)_{t+\Delta t} - (\rho_o S_o \phi \, dXdYdZ)_{t} \quad (24)$$

en donde $\phi \, dXdYdZ$ es el volumen de poros.

Sustituyendo las ecuaciones 22, 23 y 24 en 21 y ordenando términos se tiene :

$$\begin{aligned} & - [(\rho_o V_{ox})_x \cdot dx \, dYdZdt - (\rho_o V_{ox})_x \, dYdZdt] \\ & - [(\rho_o V_{oy})_y \cdot dy \, dXdZdt - (\rho_o V_{oy})_y \, dXdZdt] \\ & - [(\rho_o V_{oz})_z \cdot dz \, dXdYdt - (\rho_o V_{oz})_z \, dXdYdt] \\ & = (\rho_o S_o \phi \, dXdYdZ)_{t+\Delta t} - (\rho_o S_o \phi \, dXdYdZ)_{t} \end{aligned} \quad (25)$$

Dividiendo la ecuación 25 entre $dXdYdZdt$, se tiene :

$$\begin{aligned} & - \frac{(\rho_o V_{ox})_x \cdot dx - (\rho_o V_{ox})_x}{dX} \\ & - \frac{(\rho_o V_{oy})_y \cdot dy - (\rho_o V_{oy})_y}{dY} \\ & - \frac{(\rho_o V_{oz})_z \cdot dz - (\rho_o V_{oz})_z}{dZ} \\ & = \frac{(\rho_o S_o \phi)_{t+\Delta t} - (\rho_o S_o \phi)_{t}}{dt} \end{aligned} \quad (26)$$

El límite de la ecuación 26, cuando dX, dY, dZ y dt tienden a cero, es la ecuación de continuidad para el flujo de aceite. Este límite representa una porción infinitesimal del medio poroso a través del cual fluye el fluido.

En forma diferencial se tiene :

$$-\frac{\partial}{\partial X}(\rho_o V_{ox}) - \frac{\partial}{\partial Y}(\rho_o V_{oy}) - \frac{\partial}{\partial Z}(\rho_o V_{oz}) = \frac{\partial}{\partial t}(\rho_o S_o \phi) \quad (27)$$

De forma análoga se obtiene la ecuación para el flujo de agua :

$$-\frac{\partial}{\partial X}(\rho_w V_{wx}) - \frac{\partial}{\partial Y}(\rho_w V_{wy}) - \frac{\partial}{\partial Z}(\rho_w V_{wz}) = \frac{\partial}{\partial t}(\rho_w S_w \phi) \quad (28)$$

donde ρ_w = Densidad del agua.

ρ_o = Densidad del aceite.

V_{ij} = Velocidad de la fase i en la dirección j .

S_i = Saturación de la fase i .

ϕ = Porosidad del medio.

La aplicación de la ecuación de continuidad al desplazamiento de un fluido por otro se hará en el capítulo III.

II.5. Ecuación de flujo fraccional

El flujo fraccional, de una fase cualquiera, se define como la fracción del volumen total que fluye por un punto X al tiempo t . Las suposiciones para el desarrollo de la ecuación de flujo fraccional son :

- Las mismas que para la ley de Darcy.
- La diferencia entre las presiones del agua y del aceite está representada por la presión capilar.

Para el aceite y agua se tienen las siguientes ecuaciones :

$$f_o = \frac{q_o}{q_t} = \frac{q_o}{q_o + q_w} \quad (29)$$

$$f_w = \frac{q_w}{q_t} = \frac{q_w}{q_o + q_w} \quad (30)$$

De las ecuaciones 29 y 30 se observa que $f_o + f_w = 1$.

Desarrollando una expresión para el flujo fraccional de agua se tiene lo siguiente :

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

De la definición de flujo fraccional para el agua :

$$q_w = f_w q_t \quad (31)$$

y para el aceite :

$$q_o = f_o q_t = (1 - f_w) q_t \quad (32)$$

Igualando la ecuación 32 con la ley de Darcy, para el flujo de aceite se tiene :

$$(1 - f_w) q_t = - \frac{K_o A}{\mu_o} \left(\frac{\partial P_o}{\partial X} + \rho_o g \cos \theta \right) \quad (33)$$

y la ecuación 31 para el flujo de agua :

$$f_w q_t = - \frac{K_w A}{\mu_w} \left(\frac{\partial P_w}{\partial X} + \rho_w g \cos \theta \right) \quad (34)$$

Simplificando las ecuaciones :

$$- (1 - f_w) \frac{q_t \mu_o}{A K_o} = \frac{\partial P_o}{\partial X} + \rho_o g \cos \theta \quad (35)$$

y

$$- f_w \frac{q_t \mu_w}{A K_w} = \frac{\partial P_w}{\partial X} + \rho_w g \cos \theta \quad (36)$$

Las derivadas que aparecen en las ecuaciones 35 y 36 pueden representarse en términos de presión capilar, restando la ecuación 36 de la ecuación 35, es decir la fase no mojanante menos la fase mojanante, considerando que :

$$P_c = P_o - P_w \quad (37)$$

$$\frac{\partial P_c}{\partial X} = \frac{\partial P_o}{\partial X} - \frac{\partial P_w}{\partial X} \quad (38)$$

Es decir, despejando las derivadas de 35 y 36 y sustituyendo en 38 se tiene :

$$-\frac{q_f \mu_o}{A K_o} + \frac{q_f f_w}{A} \left(\frac{\mu_o}{K_o} + \frac{\mu_w}{K_w} \right) = \frac{\partial P_c}{\partial X} + \Delta \rho g \cos \theta \quad (39)$$

donde $\Delta \rho = \rho_o - \rho_w$.

Despejando f_w de 39 :

$$f_w = \frac{\frac{\mu_o}{K_o}}{\frac{\mu_o}{K_o} + \frac{\mu_w}{K_w}} + \frac{\frac{A}{q_f} \left(\frac{\partial P_c}{\partial X} + \Delta \rho g \cos \theta \right)}{\frac{\mu_o}{K_o} + \frac{\mu_w}{K_w}} \quad (40)$$

simplificando :

$$f_w = \frac{1}{1 + \frac{K_o \mu_w}{K_w \mu_o}} + \frac{\frac{K_o A}{\mu_o q_f} \left(\frac{\partial P_c}{\partial X} + \Delta \rho g \cos \theta \right)}{1 + \frac{K_o \mu_w}{K_w \mu_o}} \quad (41)$$

y finalmente :

$$f_w = \frac{1}{1 + \frac{K_o \mu_w}{K_w \mu_o}} + \frac{\frac{1.127 K_o A}{\mu_o q_f} \left(\frac{\partial P_c}{\partial X} + 0.433 \Delta \rho g \cos \theta \right)}{1 + \frac{K_o \mu_w}{K_w \mu_o}} \quad (42)$$

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

donde f_w = Flujo fraccional de agua. [adimensional].
 K_o = Permeabilidad efectiva al aceite. [darcy, md].
 K_w = Permeabilidad efectiva al agua. [darcy, md].
 μ_o = Viscosidad del aceite. [cp].
 μ_w = Viscosidad del agua. [cp].
 A = Area de la sección transversal, [pie²].
 q_t = Gasto total, [bl/día].

$\frac{\partial P_c}{\partial X}$ = Gradiente de presión capilar, [Lb/pg²/pie].

ρ_o = Densidad del aceite. [g/cm³].
 ρ_w = Densidad del agua. [g/cm³].
 θ = Inclinación de la formación con respecto a la vertical, [grados].

La ecuación 42 puede multiplicarse por 100 para expresar el flujo fraccional de agua en porcentaje.

METODO DE BUCKLEY Y LEVERETT

En el año de 1941, S.E. Buckley y M.C. Leverett, prepararon un trabajo en el que se expuso el comportamiento de un proceso inmiscible y la forma de determinar la saturación de la fase desplazante durante el mismo. Esta teoría ha servido como base para el desarrollo de otros métodos, como el de Welge; es básicamente la representación en una dimensión del flujo simultáneo y paralelo de las fases desplazante y desplazada. Su extensión al espacio multidimensional es solamente tratable con la ayuda de métodos numéricos.

III.1. Teoría de Buckley y Leverett (Desplazamiento frontal)

El aceite no tiene la habilidad de autoexpulsarse, y por lo tanto debe ser desplazado por la acción de otros fluidos. Los fluidos desplazantes normalmente disponibles son el gas y el agua, los cuales, se encuentran asociados al aceite y son los que aportan la energía para el desplazamiento del aceite. La producción de aceite se lleva a cabo como resultado de la acumulación de gas o de agua y la cantidad recuperada de aceite está limitada al volumen de éstos que se haya acumulado .

La cantidad de gas libre, para una presión dada, depende de la presión de saturación de la mezcla y de la cantidad de gas que puede mantener en solución. Cuando la presión sobre la mezcla llega al valor de la presión de saturación, el gas disuelto empieza a liberarse y expandirse, ocasionando que la mezcla fluya hacia una zona de menor presión. Es por esto que la acumulación y expansión del gas aportan la energía para desplazar a la mezcla.

Por otra parte, el agua se encuentra presente en los poros de la roca desde antes de la migración del aceite y como agente expulsor se presenta mediante la entrada de agua al yacimiento debida a un acuífero.

Para que el desplazamiento se realice, es necesario que la saturación del fluido desplazante sea alta y que éste invada la zona de alta saturación de fluido desplazado. El fluido desplazante se mueve de una zona de alta saturación de fluido desplazado hacia una zona de menor saturación de fluido desplazante, removiendo el aceite y convirtiendo

a la región invadida en una zona de mayor saturación de fluido desplazante.

Sin importar si el fluido desplazante es gas o agua, éste no se comporta como un pistón que expulsa el aceite fuera de los poros y que ocupa su lugar, sino que el fluido desplazante y el aceite fluyen simultáneamente a través de los mismos poros. Si el desplazamiento se comportara como un pistón, implicaría que al final del desplazamiento la saturación residual de aceite, en la zona de aceite móvil, es cero. Debido a que el flujo de fluidos es simultáneo, el desplazamiento nunca es 100 % efectivo, debido a que se rompe la fase continua que forma el aceite, por la acción de las fuerzas viscosas y por efecto de flotación, dando lugar a una saturación residual de aceite en la zona de aceite móvil.

La cantidad de aceite desplazado durante el proceso depende de la facilidad con la que los fluidos pueden fluir y como se mencionó en el capítulo I, esta facilidad depende de la saturación.

Cuando se inicia el desplazamiento la saturación de aceite puede ser alta y la del fluido desplazante baja, por lo tanto, el aceite fluye más fácilmente que el fluido desplazante. En esta etapa, el fluido desplazante debe ser casi 100 % efectivo, ya que todavía no se han formado canales de flujo y el agua funciona como un pistón micrométrico que desplaza el aceite a través del centro de los poros. A medida que el desplazamiento continúa, la permeabilidad al aceite disminuye y la permeabilidad al fluido desplazante aumenta, ambas continua y simultáneamente, hasta la etapa final en la que el fluido desplazante solamente remueve una pequeña cantidad de aceite.

La recuperación de aceite está determinada por la disponibilidad de fluido desplazante y por la acumulación neta durante el desplazamiento; El ritmo neto de acumulación del fluido desplazante, que es igual al del aceite desplazado, es proporcional a la diferencia entre los gastos de fluido desplazante que entran y salen del medio poroso.

III.2. Ecuación de avance frontal en una dimensión

El modelo de Buckley y Leverett fue desarrollado aplicando la ley de la conservación de la masa al flujo de dos fluidos en una dirección (X) cualquiera.

Las suposiciones que se hacen para su desarrollo son las siguientes :

- Fluidos incompresibles.
- El flujo fraccional depende únicamente de la saturación de agua.
- No hay transferencia de masa entre las fases.
- Flujo en una dirección.
- Medio poroso homogéneo e isótropo.
- La distribución inicial de fluidos es uniforme .

Cuando el aceite es desplazado por agua en una dirección, las ecuaciones 27 y 28 se transforman en las siguientes :

$$- \frac{\partial}{\partial X} (\rho_o V_{ox}) = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_o S_o \phi) \quad (43)$$

$$- \frac{\partial}{\partial X} (\rho_w V_{wx}) = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w S_w \phi) \quad (44)$$

Las ecuaciones 43 y 44 pueden escribirse en función del gasto y del área, esto es :

$$- \frac{\partial}{\partial X} (\rho_o q_o) = A \frac{\partial}{\partial t} (\rho_o S_o \phi) \quad (45)$$

$$- \frac{\partial}{\partial X} (\rho_w q_w) = A \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w S_w \phi) \quad (46)$$

En el modelo de Buckley y Leverett, el agua y el aceite se consideran incompresibles, por lo tanto ρ_o y ρ_w son constantes. Con base en estas suposiciones, las ecuaciones 45 y 46 se transforman en :

$$- \frac{\partial q_o}{\partial X} = A \phi \frac{\partial S_o}{\partial t} \quad (47)$$

$$- \frac{\partial q_w}{\partial X} = A \phi \frac{\partial S_w}{\partial t} \quad (48)$$

Sumando las ecuaciones 47 y 48 , se tiene :

$$- \frac{\partial}{\partial X} (q_o + q_w) = A \phi \frac{\partial}{\partial t} (S_o + S_w) \quad (49)$$

Recordando que $S_o + S_w = 1$, y sustituyendo en 49 se tiene la siguiente ecuación :

$$\frac{\partial}{\partial X} (q_o + q_w) = 0 \quad (50)$$

o bien :

$$q_o + q_w = q_t = \text{constante.}$$

Esto se debe a que el aceite y el agua se consideraron incompresibles y por lo tanto, el gasto total en un punto X al tiempo t es constante.

Sustituyendo la ecuación 30 en 48, se obtiene :

$$-\frac{\partial f_w}{\partial X} = \frac{\phi A}{q_t} \frac{\partial S_w}{\partial t} \quad (51)$$

Para obtener una solución de la ecuación 51 es necesario encontrar una ecuación equivalente a ésta. El valor de $\partial S_w / \partial t$ se obtiene aplicando la regla de la cadena.

Se observa que la saturación de agua es función de dos variables independientes que son X y t . Por lo tanto, se puede escribir que :

$$S_w = S_w(X, t) \quad (52)$$

o diferenciando :

$$dS_w = \left(\frac{\partial S_w}{\partial X} \right)_t dX + \left(\frac{\partial S_w}{\partial t} \right)_X dt \quad (53)$$

Si el interés se tiene en saber que pasa a una saturación en particular, S_w , es posible sustituir $dS_w = 0$ en la ecuación 53 y ordenando términos :

$$\left(\frac{dX}{dt} \right)_{S_w} = - \frac{\left(\frac{\partial S_w}{\partial t} \right)_X}{\left(\frac{\partial S_w}{\partial X} \right)_t} \quad (54)$$

El término $(dX / dt)_{S_w}$, representa la velocidad con la que se mueve la saturación S_w a través del medio poroso.

Cuando se supone que el flujo fraccional de agua es función únicamente de la saturación de agua, se puede aplicar la regla de la cadena :

$$f_w = f_w (S_w)$$

$$\left(\frac{\partial f_w}{\partial X} \right)_t = \left(\frac{\partial f_w}{\partial S_w} \right)_t \left(\frac{\partial S_w}{\partial X} \right)_t \quad (55)$$

Sustituyendo las ecuaciones 54 y 55 en 51 se obtiene :

$$- \left(\frac{\partial f_w}{\partial S_w} \right)_t \left(\frac{\partial S_w}{\partial X} \right)_t = - \frac{\phi A}{q_t} \left(\frac{\partial S_w}{\partial X} \right)_t \left(\frac{dX}{dt} \right)_{S_w} \quad (56)$$

y finalmente :

$$\left(\frac{dX}{dt} \right)_{S_w} = \frac{q_t}{\phi A} \left(\frac{\partial f_w}{\partial S_w} \right)_t \quad (57)$$

La ecuación 57 establece que el ritmo de avance o velocidad de un plano de saturación fija S_w , es proporcional al cambio en composición del flujo debido a un pequeño cambio en la saturación del fluido desplazante.

A la ecuación 57 se le llama ecuación de avance frontal.

III.3. Solución de la ecuación de avance frontal

Considere que el medio poroso está inicialmente saturado con aceite y agua, cuyo valor es el inicial, S_{wi} . En el tiempo $t = 0$, el agua se empieza a inyectar a un gasto constante q_i . A medida que el tiempo avanza, se forma un perfil de saturación en el medio poroso, que varía desde S_{wi} hasta $1 - S_{or}$ en $X = 0$.

La distancia X_{s_w} de una saturación S_w , puede obtenerse integrando la ecuación 57 con respecto al tiempo :

$$\int_0^{X_{s_w}} dX_{s_w} = \frac{q_i}{\phi A} \int_0^t \left(\frac{\partial f_w}{\partial S_w} \right)_t dt \quad (58)$$

Cuando $\partial f_w / \partial S_w$ es solamente función de S_w , la ecuación 57 puede integrarse directamente :

$$X_{s_w} = \frac{q_i t}{\phi A} \left(\frac{\partial f_w}{\partial S_w} \right)_{s_w} \quad (59)$$

Las limitaciones de la solución de la ecuación de avance frontal provienen de las suposiciones que se hicieron para su obtención, y por lo tanto la aplicación a problemas en los que sus condiciones no sean similares a las supuestas, problemas reales, dará resultados diferentes a los observados en el campo.

A partir de este momento se utilizará f' para representar el valor de $\partial f_w / \partial S_w$.

III.4. Procedimiento general para la determinación de la distribución de saturaciones durante el desplazamiento

Los datos que se requieren para determinar la distribución de saturaciones de agua durante el desplazamiento, considerando todas las variables de la ecuación 42, son los siguientes :

a).- Del agua

- Valores de K_w , o K_{rw} , en función de la saturación de agua.
- Viscosidad.
- Densidad.

b).- Del aceite

- Valores de K_o , o K_{ro} , en función de la saturación de agua.
- Viscosidad.
- Densidad.

c).- Del medio poroso

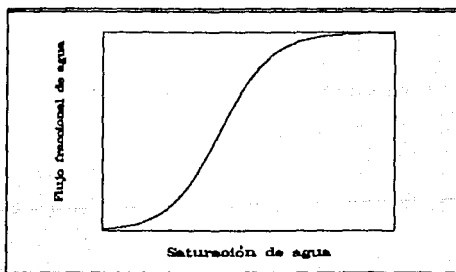
- Area de la sección transversal o espesor y ancho de la formación.
- Porosidad.
- Longitud.
- Echado de la formación. Con ayuda de éste se determina el ángulo de inclinación con respecto a la vertical.
- Tiempo de inyección.
- Gasto de inyección.

Si se utilizan valores de permeabilidades relativas, también se requiere el valor de la permeabilidad absoluta, recordando que :

$$K_f = K K_{rf}$$

III.4.1. Procedimiento

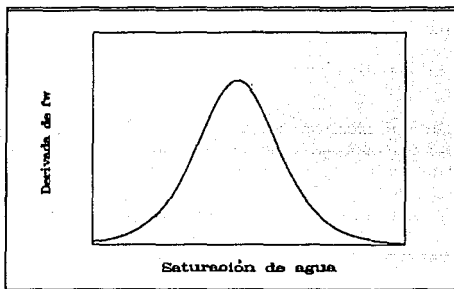
- 1).- Con la ecuación 42, calcular el valor de f_w para cada saturación de agua dato.
- 2).- Con los valores obtenidos en el paso 1, construir la curva de $S_w - f_w$. Ver gráfica 8.



GRAFICA 8.- Curva de saturación de agua - flujo fraccional de agua

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

- 3).- Obtener, gráficamente, la pendiente de la curva $S_w - f_w$ para cada saturación dato. Esta pendiente se representa mediante f' .
- 4).- Con los valores de f' obtenidos en el paso 3, construir la curva $S_w - f'$. Ver gráfica 9.

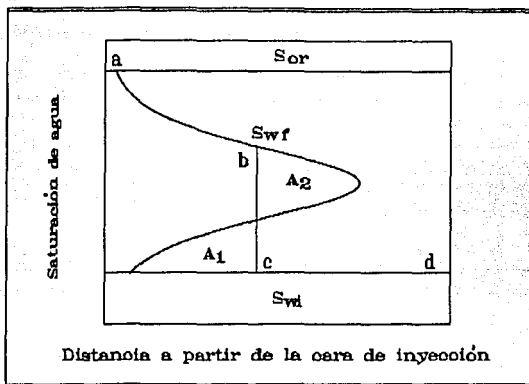


GRAFICA 9.- Curva saturación de agua - derivada del flujo fraccional de agua

- 5).- Con la ecuación 59 calcular la distancia X para cada saturación dato.
- 6).- Con los valores de X obtenidos en el paso 5, construir la curva $X - S_w$, o $X_r - S_w$; donde $X_r = X / L$. Se señalan, también, las saturaciones residual de aceite e inicial de agua. Ver gráfica 10.
- 7).- A partir de la línea de saturación inicial de agua, trazar una vertical hasta intersectar la curva del paso 6 en el mayor valor de saturación, de tal manera que las áreas A_1 y A_2 sean aproximadamente iguales.

La distribución de saturaciones queda representada por la curva abcd. Al punto b, donde se presenta un cambio abrupto en la saturación, se le denomina frente del desplazamiento y a la zona invadida por el agua se le llama banco de agua. Como se observa, adelante de este punto la saturación de aceite es mayor a la residual y la de agua es la irreductible. A la zona que está sobre el banco de agua se le denomina zona de arrastre debido a que el agua solamente desplaza una pequeña cantidad de aceite.

La explicación al paso 7 es que para un punto a una distancia X , se obtienen tres valores de saturación, lo que es físicamente imposible. La interpretación correcta es que una porción de la curva $X - S_w$ es imaginaria y que la distribución de saturaciones es discontinua.

GRAFICA 10.- Balance de áreas para determinar S_w

III.5. Etapas del desplazamiento

A medida que comienzan a fluir el aceite y el agua se presenta un rápido incremento en la saturación de agua; este periodo se denomina etapa inicial del desplazamiento. Durante esta etapa el desplazamiento es altamente efectivo, ya que la mayor parte del agua permanece en los poros desplazando aceite. Después de esta etapa, el incremento en la saturación de agua es más moderado.

Al periodo de gradual incremento en la saturación de agua se le denomina etapa subordinada del desplazamiento. Durante ésta, el agua fluye con mayor facilidad que el aceite, por lo tanto, grandes volúmenes de agua remueven pequeñas cantidades de aceite.

A medida que el cociente K_o / K_w tiende a cero, debido a que disminuye la saturación de aceite, el flujo de aceite también disminuye hasta el momento en que cesa, dando lugar a que el aceite que no fluyó no pueda ser recuperado.

III.6. Factores que afectan las etapas inicial y subordinada del desplazamiento

a).- Viscosidad

El ritmo de avance de un plano de una saturación dada es directamente proporcional a $f' : f_w$ a su vez, es función de la relación de movilidades, por lo que se deduce que la viscosidad afecta el comportamiento de la curva $X - S_w$. A mayor viscosidad del aceite, menor facilidad al flujo para un gradiente de presión dado.

El incremento de la viscosidad da como resultado una baja saturación de agua durante la etapa inicial del desplazamiento, que se incrementa hasta dejar únicamente la saturación residual de aceite durante la etapa subordinada.

b).- Saturación inicial agua

Si antes de la invasión, la saturación del agua es mayor que la que puede obtenerse durante la etapa inicial del desplazamiento, entonces, esta etapa no se presentará y solamente tendrá lugar la etapa subordinada del desplazamiento.

c).- Efectos capilares y gravitacionales

Las fuerzas capilares tienden a oponerse a la formación de zonas con discontinuidad en la saturación, mientras que las fuerzas gravitacionales tienden a generar una completa segregación del agua y aceite. Por lo tanto, en un yacimiento en que el agua avanza hacia arriba, o el gas hacia abajo, para desplazar aceite, los efectos capilares y gravitacionales tienden a anularse.

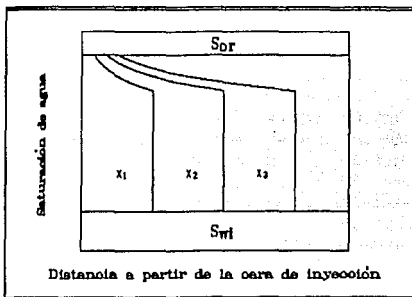
III.7. Características del desplazamiento inmisible

En la gráfica 11 se presenta la distribución de saturaciones para 3 tiempos, en los que $t_2 - t_1 = t_3 - t_2 = \dots = t_n - t_{n-1}$.

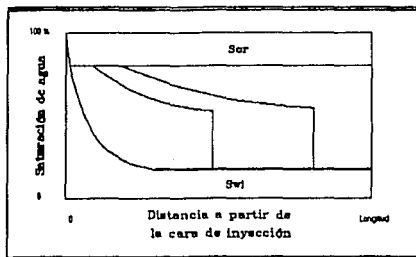
Con base en la gráfica 11 se hacen las siguientes observaciones :

- Solamente se presenta una discontinuidad en la distribución de saturaciones, que es donde se localiza el frente de desplazamiento.
- El frente no desplaza todo el aceite a medida que avanza en el yacimiento.
- Cada saturación viaja a una velocidad constante a través del yacimiento, debido a que el gasto de inyección es constante.

- Cuando la distribución inicial de agua no es uniforme, gráfica 12, las saturaciones en el frente y media atrás del frente, varían con respecto al tiempo.
- Si la distribución inicial de agua es uniforme, entonces las saturaciones en el frente y media atrás del frente permanecen constantes hasta el momento de la surgencia.



GRAFICA 11.- El frente avanza distancias constantes para incrementos de tiempo iguales



GRAFICA 12.- Distribución de saturaciones cuando la saturación inicial de agua no es uniforme

METODO DE WELGE

En 1951, Henry Welge propuso un método analítico para determinar la saturación media atrás del frente y, por lo tanto, la recuperación de aceite. Este método simplifica los cálculos, ya que hace innecesarias la integración numérica y las gráficas de distribución de saturaciones. Además, solamente se requiere conocer las permeabilidades relativas para un cierto rango de saturaciones.

IV.1. Introducción al método

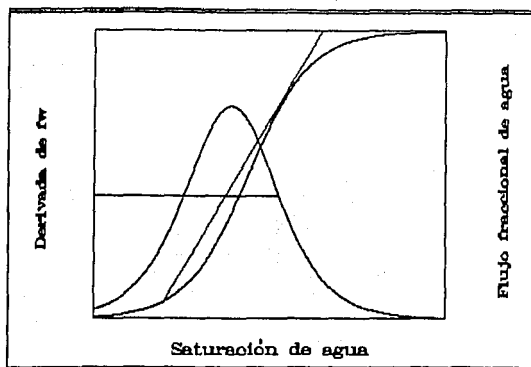
Al igual que en el método de Buckley y Leverett, se supone que se trata con una sección lineal, por lo que el área de la sección transversal expuesta al flujo es constante. En otras palabras, las suposiciones que se hacen son las mismas que en el método de Buckley Y Leverett. La ecuación a la que se llega es similar a la propuesta por Buckley y Leverett, esto es :

$$\frac{dX}{dt} = v \frac{df_w}{dS_w} = v f' \quad (60)$$

La ecuación 60 indica la distancia recorrida por una saturación de agua a un tiempo dado. La distancia recorrida dX es proporcional a f' ; la constante de proporcionalidad es $v dt$. Por lo tanto, a partir de una gráfica $S_w - f$ también se puede obtener la saturación de agua como función de la distancia. Para esto es necesario multiplicar el valor de f' por $v dt$.

Para explicar el método considere la gráfica 13, en la que se balancean las áreas de la curva $S_w - f$. Este procedimiento es válido debido a que, como ya se indicó, la curva $X - S_w$ solamente difiere de la curva $S_w - f$ por una constante. El valor medio requerido de f' es la pendiente de una línea trazada desde la saturación de agua presente al inicio del desplazamiento, tangente a la curva f_w . Esto es cierto debido a que la pendiente de una línea que intersecta a la curva en dos puntos, es la pendiente media de la curva. La pendiente de la tangente, con respecto al eje de la saturación de agua, representa el máximo valor de f' . Esta máxima pendiente corresponde a la velocidad más alta con la

que el frente se mueve, y por lo tanto, puede utilizarse para obtener el tiempo de surgencia.



GRAFICA 13.- Balance de áreas de la curva saturación de agua - derivada del flujo fraccional de agua

En general, para obtener la saturación media de agua a partir de la gráfica $X - S_w$, debe integrarse el área bajo la curva, lo que es un proceso tedioso que consume cierto tiempo.

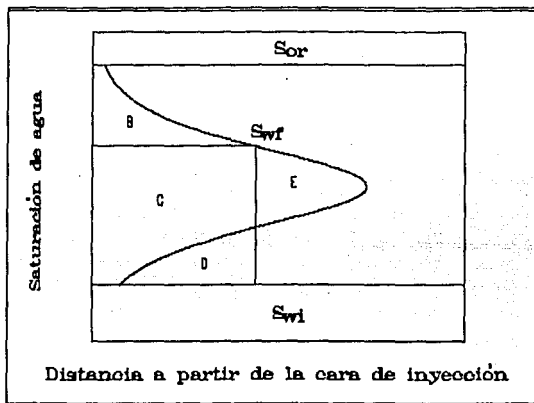
El método de Welge para determinar la saturación de agua media puede resumirse de la siguiente forma :

La saturación del fluido desplazante es determinada trazando una tangente a la curva $S_d - f_d$ que parte de las condiciones al inicio del desplazamiento. El punto de tangencia indica el valor de saturación del fluido desplazante en el frente, S_{df} . La prolongación de dicha tangente hasta intersectar el valor de $f_d = 1$, indica el valor de la saturación media del fluido desplazante, S_{da} , al momento de la surgencia. Para valores de saturación mayores a S_{df} , la saturación media se determina trazando una tangente que pase por el valor de interés y prolongándola hasta intersectar el valor de $f_d = 1$.

El trazo de la tangente a la curva de f_w indica el límite inferior de saturación de agua dato, por lo que valores menores a éste no son necesarios. De igual forma los valores de permeabilidades relativas correspondientes a saturaciones menores no se requieren.

IV.2. Derivación del método

La primera parte del desarrollo consiste en la determinación de la saturación de agua en el frente. Para esto, considere la gráfica 14 .



GRAFICA 14.- Determinación de la saturación de agua en el frente

Puede observarse que el volumen inyectado al tiempo t puede expresarse como :

$$q_t t = \phi A \int_{S_{wi}}^{(1-S_{or})} X dS_w \quad (61)$$

La integral de la ecuación 61 es igual a la suma de las áreas B , C y E de la gráfica 14.

También se observa, de acuerdo al método de Buckley y Leverett, que :

$$Area_{(B+C+E)} = Area_{(B+C+D)}$$

y por lo tanto :

$$Area_{(E)} = Area_{(D)}$$

Lo anterior quiere decir que la suma de las áreas C y E es igual a la suma de las áreas C y D, es decir :

$$Area_{(C + E)} = Area_{(C + D)} \quad (62)$$

Estableciendo una ecuación para determinar dichas áreas, se tiene :

$$\int_{S_{wi}}^{S_{wf}} X dS_w = X (S_{wf} - S_{wi}) \quad (63)$$

Sustituyendo la ecuación 59 en la ecuación 63 :

$$\int_{f'_{S_{wi}}}^{f'_{S_{wf}}} f' dS_w = f'_{S_{wf}} (S_{wf} - S_{wi}) \quad (64)$$

que se reduce a la siguiente ecuación :

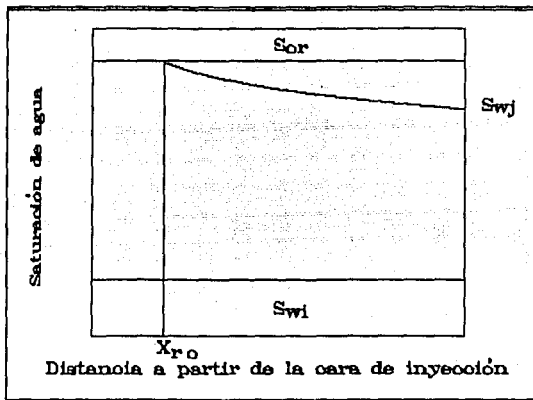
$$f_{w_{S_{wf}}} - f_{w_{S_{wi}}} = f'_{S_{wf}} (S_{wf} - S_{wi}) \quad (65)$$

La ecuación 65 es la ecuación de una línea recta con pendiente $f'_{S_{wf}}$, que pasa por el punto $(S_{wi}, f_{w_{S_{wi}}})$ y que interseca a la curva de flujo fraccional en el punto $(S_{wf}, f_{w_{S_{wf}}})$. Con esto se demuestra que la tangente debe trazarse partiendo de las condiciones iniciales.

La última parte del método es la determinación de la saturación media de agua. Con base en la gráfica 15, la saturación media de agua, S_{wa} , para una distribución de saturaciones posterior a la surgencia se puede determinar de la siguiente manera :

$$S_{wa} = \frac{\int_0^L S_w dX}{L} = \frac{(1 - S_{or}) X_{ro} + \int_{X_{ro}}^L S_w dX}{L} \quad (66)$$

En la ecuación 66 el área se dividió en dos secciones para facilitar el desarrollo.



GRAFICA 15.- Determinación de la saturación media de agua atrás del frente

Nuevamente, sustituyendo la ecuación 59 en 66 :

$$S_{wa} = \frac{(1 - S_{or}) f'_{ro} + \int_{ro}^j S_w df'}{f'_j} \quad (67)$$

Ahora, dejando la integral en función de dS_w y no de df' e integrando por partes :

$$S_{wa} = \frac{(1 - S_{or}) f'_{ro} + S_{wj} f'_{j} - S_{wro} f'_{ro} - \int_{ro}^j f' dS_w}{f'_{j}} \quad (68)$$

De la gráfica 15 se observa que $S_{wro} = 1 - S_{or}$. Además, el resultado de la integral es $f_j - f_{wro}$ y el valor de f_{wro} es 1 ya que el aceite residual no puede fluir. Finalmente la ecuación 68 se puede escribir como :

$$S_{wa} = \frac{S_{wj} f'_{j} - f_{wj} + 1}{f'_{j}} \quad (69)$$

o simplificando :

$$S_{wa} = S_{wj} + \frac{(1 - f_{wj})}{f'_{j}} \quad (70)$$

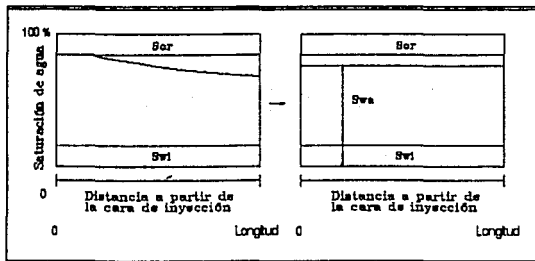
Esta ecuación es el equivalente a prolongar la tangente trazada a la curva de flujo fraccional hasta intersectar el valor de $f_w = 1$. Es aplicable para valores de $S_{wj} \geq S_{wf}$.

EVALUACION DEL DESPLAZAMIENTO

Al simular el comportamiento de un desplazamiento, se tiene interés en determinar el volumen de aceite desplazado a cualquier tiempo, el gasto de aceite producido y el volumen de agua que debe manejarse, por unidad de volumen de aceite, una vez que se inicia la inyección. En este capítulo se exponen las ecuaciones que permiten obtener dichos volúmenes, de una forma general; es decir sin la utilización de factores de conversión los cuales no afectan la forma en que se calcula un volumen.

V.1. Simplificación del gradiente de saturación de agua

Hasta el momento en que el agua llega al extremo productor del medio poroso, el aceite



GRAFICA 18.- Transformación del gradiente de saturación de agua en la saturación media de agua

se produce al mismo gasto al que es inyectada el agua, considerando que los fluidos son incompresibles. Al momento de la surgencia, existe un gradiente de saturación desde la cara de inyección hasta la cara productora. Para determinar la cantidad de aceite desplazado se utiliza un valor medio de saturación de agua atrás del frente. Al tomar un

valor medio se considera que el agua se comporta como un pistón, pero dejando una saturación de aceite atrás del frente mayor a S_{or} . En la gráfica 16 se presenta la transformación del gradiente de saturación en un valor equivalente, S_{wa} .

V.2. Producción acumulativa de aceite

Con base en la gráfica 16, el volumen acumulativo de aceite desplazado se puede calcular mediante el incremento en la saturación de agua, es decir :

$$N_p = \frac{V_p A S_w}{B_o} = \frac{V_p A (S_{wa} - S_{wi})}{B_o} \quad (71)$$

V.3. Volumen acumulativo de agua

Otro concepto de gran utilidad es el de volumen acumulativo de agua, Q_i , que se define como la relación entre el volumen de agua inyectado al tiempo t y el volumen poroso, es decir :

$$Q_i = \frac{q_i t}{\phi A L} \quad (72)$$

y de la ecuación de avance frontal se puede ver que :

$$Q_i = \frac{1}{f'} \quad (73)$$

La ecuación 73 puede sustituirse en la ecuación 70, obteniendo la siguiente ecuación :

$$S_{wa} = S_{wj} + Q_i (1 - f_{wj}) \quad (74)$$

y despejando Q_i :

$$Q_i = \frac{(S_{wa} - S_{wi})}{(1 - f_{wj})} ; \quad S_{wj} \leq S_{wj} \leq 1 - S_{or} \quad (75)$$

V.4. Tiempo al que se tiene una saturación S_{wj} en el extremo productor

Para establecer el tiempo en el que se tiene una saturación S_{wj} en el extremo productor, se puede despejar el valor de t de la ecuación 72 :

$$t = \frac{Q_i \phi A L}{q_i} ; \quad Q_i \geq Q_{if} \quad (76)$$

y si el gasto de inyección es constante, entonces :

$$t = C Q_i ; \quad \therefore C = \frac{\phi A L}{q_i} \quad (77)$$

V.5. Gastos de agua y aceite

Para calcular los gastos de agua y aceite producidos, se utilizan las siguientes ecuaciones, que son función de f_w :

$$q_w = \frac{f_w q_t}{B_w} ; \quad f_w \geq f_{wf} \quad (78)$$

$$q_o = \frac{(1 - f_w) q_t}{B_o} ; \quad f_w \geq f_{wf} \quad (79)$$

V.6. Relación agua - aceite

Mediante los valores de q_w y q_o es posible calcular el valor de la relación agua - aceite, WOR , que es una medida de la eficiencia del desplazamiento a un cierto tiempo durante el desplazamiento. Representa el volumen de agua que debe manejarse para producir una unidad de volumen de aceite, esto es :

$$WOR = \frac{q_w}{q_o} \quad (80)$$

sustituyendo las ecuaciones 78 y 79 en 80, se tiene :

$$WOR = \frac{f_w B_o}{(1 - f_w) B_w} \quad (81)$$



PROGRAMA DE COMPUTO

En la literatura referente a Recuperación Secundaria pueden encontrarse programas basados en el método de Welge, pero tienen la enorme desventaja de haber sido desarrollados para una máquina en particular, calculadora programable, o bien, están escritos en lenguajes poco utilizados en México. Es ésta la razón principal por la cual se pensó en crear un programa que pueda ser utilizado en cualquier computadora personal compatible y que además proporcione resultados gráficos. Este capítulo comprende la explicación de las funciones más importantes que utiliza el programa, los algoritmos y diagramas de flujo de los métodos de Buckley y Leverett y de Welge, y finalmente el código fuente completo aplicando la nomenclatura que aparece en éste.

VI.1. Elección del lenguaje

El primer problema que se presenta cuando se va a desarrollar un programa es decidir el lenguaje que se utilizará. Después de comparar y analizar las posibles opciones, se optó por utilizar el lenguaje C y específicamente el compilador Turbo C versión 2.0. Las razones son principalmente desde el punto de vista gráfico porque permite:

- Impresión de gráficas seleccionando una opción para tal efecto dentro del programa y tener control, limitado, del tamaño de la gráfica impresa. El comando Graphics de DOS permite, solamente en monitores a color y presionando las teclas Shift - PrtSc, la impresión de gráficas en diferentes tamaños, pero éstas no guardan gran proporción entre lo que se ve en pantalla y lo que se obtiene en la impresión.
- Determinar las resoluciones horizontal y vertical del monitor utilizado y referir todas las acciones gráficas a éstas. Se puede utilizar cualquier monitor que soporte modo gráfico. Como comparación Turbo BASIC no permite utilizar monitor Hércules.
- Salvar y recuperar, en y de disco, una gráfica.
- La utilización de 4 tipos, como mínimo, de letras (Fonts) y ajustar el tamaño de las mismas de acuerdo a las necesidades y al monitor lo que hace que un programa sea más agradable a la vista.

En modo texto la cantidad de funciones que posee el compilador es de gran ayuda para un fácil escritura de un programa; Contiene funciones que controlan el sistema básico de entrada / salida, BIOS, que permiten modificar y conocer el estado del sistema y periféricos.

VI.2. Estructura

Una vez seleccionado el lenguaje que se va a emplear, el siguiente paso es determinar la forma de interacción entre el programa y el usuario. El programa utiliza el sistema de menús con estructura de árbol, que es el más ampliamente utilizado, porque no se requiere la memorización de complejas secuencias de comandos, ni entrenamiento previo. En esta forma de interacción aparece un menú, del cual el usuario escoge la opción que más se aproxime a lo que desea hacer presionando una o dos teclas; la posibilidad de que cometa errores se reducen considerablemente y si lo comete puede corregirlo fácilmente.

La estructura de los menús de que se compone BLW se presentan en la figura 11. BLW está dividido en dos secciones, una de datos y otra de resultados, que a su vez se componen de varias opciones.

VI.2.1. Datos

La sección de datos consta de 7 posibles opciones, que son :

- 1.- **Entrada.** Permite "alimentar" a la computadora con la información que se desea procesar. Se permite un máximo de ternas $S_w-K_w-K_o$ de 15 por cuestiones de manejo de espacio en pantalla y porque un mayor número no aumentará de manera significativa la precisión de los resultados.
- 2.- **Editar.** Una vez que la computadora tiene la información en memoria, se puede modificar con el fin de observar de que manera afecta a los resultados.
- 3.- **Procesar.** Genera resultados de la información en memoria.
- 4.- **Salvar.** Cuando se analizan datos específicos es más fácil almacenarlos en un archivo de disco, y recuperarlos cuando se desee sin necesidad de volver a darlos.
- 5.- **Recuperar.** Recupera la información contenida en un archivo de disco.
- 6.- **Imprimir.** Imprime los datos residentes en memoria.

VI.2.2. Resultados

- 1.- **Numéricos.** Opción creada para impresoras que no tiene la capacidad para imprimir caracteres gráficos.
a.- Visualizar

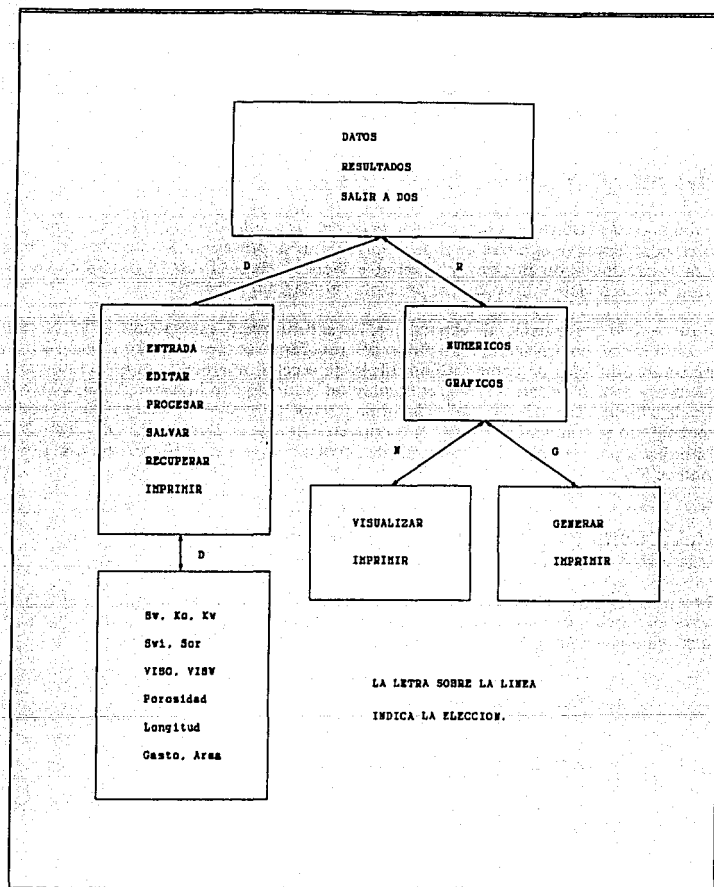


FIGURA 11.- Estructura de BLW

b.- Imprimir

- 2.- Gráficos. Genera y también imprime, si se desea, las gráficas que genera a partir de los resultados obtenidos. Para la impresión se requiere una impresora de matriz de puntos con capacidades gráficas. La forma detallada para utilizar el programa se explica en el apéndice.

VI.3. Algoritmos y diagramas de flujo

Ahora, se describirán las funciones necesarias para aplicar los algoritmos, éstos y sus correspondientes diagramas de flujo. Únicamente se presentan los diagramas de flujo para los métodos de Buckley y Leverett y Welge, debido a que el programa es muy extenso y no reviste mayor interés presentar el diagrama completo.

Durante todo el desarrollo de ecuaciones, las saturaciones, porosidad y flujo fraccional se expresaron en fracción. Para fines del programa se multiplicarán por 100 y se utilizarán unidades de campo. Como título de sección aparece la propiedad o valor a calcular y debajo de éste aparece el nombre de la función en la forma como aparece en el código fuente. Después se explica la forma y ecuaciones para obtener el valor requerido y por último se transcribe la función escrita en lenguaje C. Dentro de la función no hay subíndices, por ejemplo en el desarrollo de ecuaciones se escribe S_w pero en una función aparece SW .

VI.3.1. Cálculo de la relación de permeabilidades

Función relaper

Para el cálculo de la relación de permeabilidades, efectivas o relativas, se ajusta una curva en función de los datos de saturación de agua y permeabilidades al agua y aceite. La curva que se ajusta es de la forma :

$$\frac{K_o}{K_w} = rel = B e^{S_w^E} \quad (82)$$

donde rel = Relación de permeabilidades, [adimensional].

B = Base.

E = Exponente, cuyo valor es negativo y menor a uno si se expresa la saturación en porcentaje.

S_w = Saturación de agua a la que se desea conocer rel , [%].

e = Base de los logaritmos neperianos e igual a 2.71 .

Los valores B y E son obtenidos a partir de los datos de saturación de agua y permeabilidades.

```
float relaper(float SW,float Base,float Exponente)
{
float rel=Base*exp((double)SW*Exponente);
return rel;
}
```

VI.3.2. Cálculo del flujo fraccional de agua

Función flujo_fraccional

La ecuación 42 es la ecuación que se utiliza para calcular el flujo fraccional de agua en su forma completa. Dicha ecuación incluye el término de gradiente de presión capilar que no es fácilmente calculable. Por esta razón el flujo fraccional de agua, expresado en porcentaje, se determina con la siguiente ecuación :

$$f_w = 100 \left(\frac{1}{1 + \frac{K_o \mu_w}{K_w \mu_o}} \right) \quad (83)$$

Bajo esta consideración, la función flujo_fraccional queda de la siguiente manera:

```
float flujo_fraccional(float rel,float VISO, float VISW)
{
float fw = 100 * ( 1/(1 + (rel*(VISW/VISO)))));
return fw;
}
```

VI.3.3. Cálculo de la derivada del flujo fraccional de agua con respecto a la saturación de agua

Función derivada

-Para obtener la derivada del flujo fraccional de agua con respecto a la saturación de agua, es necesario derivar la ecuación 83 obteniéndose la siguiente ecuación :

$$\frac{\partial f_w}{\partial S_w} = df_w = 100 \left(\frac{\frac{\mu_w}{\mu_o} rel}{[1 + rel]^2} \right) \quad (84)$$

Note que la tercera letra w de la ecuación 84 no es subíndice.

```
float derivada(float SW, float Base, float Exponente, float VISO, float VISW)
{
    float fact,num,den,dfw;

    fact= (VISW/VISO)*Base*exp((double)SW*Exponente);
    num = - Exponente * fact;
    den = ( 1 + fact ) * ( 1 + fact );
    dfw = 100 * ((float)num/(float)den);
    return dfw;
}
```

VI.3.4. Cálculo de la distancia a la que se encuentra determinada saturación de agua

Función distancia

La ecuación 59 permite determinar la distancia que ha recorrido, a partir de la cara de inyección, la saturación S_w . Para simplificar los cálculos se divide la ecuación 59 entre la longitud del medio poroso con lo que se obtiene una distancia relativa; dicho valor está en el rango de 0 a 1 y no en el rango de 0 a *Longitud*. De acuerdo a las unidades que utiliza BLW, la ecuación 59 se convierte en :

$$X = \frac{5.61 q_i t f'}{\phi A L} = \frac{5.61 W_i dfw}{A_p L} \quad (85)$$

```
float distancia(float dfw,float Ap,float Wi,float Longitud)
{
    float x=(5.61*(float)dfw*Wi/(float)Ap*Longitud);
    return x;
}
```

VI.3.5. Cálculo del volumen de agua inyectado

Función volumen

La ecuación para calcular el volumen de un fluido dentro de un medio poroso es :

$$V = \phi A X S \quad (86)$$

Cuando se quiere saber cual es la cantidad de agua que se ha inyectado en un medio poroso con saturación inicial de agua la ecuación 86 cambia a :

$$V = \phi A X (S_w - S_{wi}) \quad (87)$$

Aplicando la ecuación 87 sucesivamente para pequeños cambios, decrementos, en el valor de S_w se tiene :

$$V = A_p (X_n - X_{n-1}) (S_w - S_{wi}) \quad (88)$$

En la ecuación 88, V está expresado en pie^2 y no en pie^3 debido a que los valores de x_n son adimensionales.

```
float volumen(float Ap,float Xact,float SW,float Xant,float Swi)
{
float vol=Ap*(SW-Swi)*(Xact-Xant)*0.01;
return vol;
}
```

VI.3.6. Cálculo de la saturación media de agua atrás del frente

Función sat_media

Refiriendo los valores de saturación y flujo fraccional al 100 % la ecuación 73 se convierte en :

$$S_{wa} = S_w + Q_i (100 - f_w) \quad (89)$$

```
float sat_media(float SW,float Qi,float fw)
{
float Swa=SW+(Qi*(100-fw));
return Swa;
}
```

VI.3.7. Cálculo del tiempo en el que se tiene determinada saturación de agua, en el extremo productor, después de la surgencia

Función tiempo

Después de que ocurre la surgencia puede aplicarse la siguiente ecuación, obtenida a partir de la ecuación 76, para calcular el tiempo en el que se tiene determinada saturación el extremo productor :

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

$$t = \frac{\phi A L Q_i}{q_i} = \frac{0.01 A_p L Q_i}{5.61 q_i} \quad (90)$$

```
float tiempo(float Qi,float Area,float Porosidad,float Longitud,float Gasto)
{
float t=Qi*Area*Porosidad*0.01*Longitud/(Gasto*5.61);
return t;
}
```

VI.3.8. Cálculo del volumen de aceite producido

Función producción (producción sin acento)

Adecuando la ecuación 87 para determinar la cantidad de aceite desplazado se tiene la siguiente ecuación :

$$V = N_p = \frac{0.01 \phi A L (S_{wa} - S_{wi})}{5.61} \quad (91)$$

donde N_p = Volumen recuperado de aceite , [barriles].

```
float produccion(float Area,float Porosidad,float Longitud,float Swa,float Swi)
{
float pro=(Area*Porosidad*0.01*Longitud*(Swa-Swi)*0.01)/5.61;
return pro;
}
```

VI.3.9. Cálculo del gasto de aceite

Función gasto

Con base en la ecuación 79, la función que permite calcular el gasto de aceite para tiempos mayores al de surgencia es :

```
float gasto(float Gasto, float fw);
{
float gas=(100 - fw )*Gasto*0.01;
return gas;
}
```

VI.3.10. Cálculo de la relación agua - aceite

Función agua_aceite

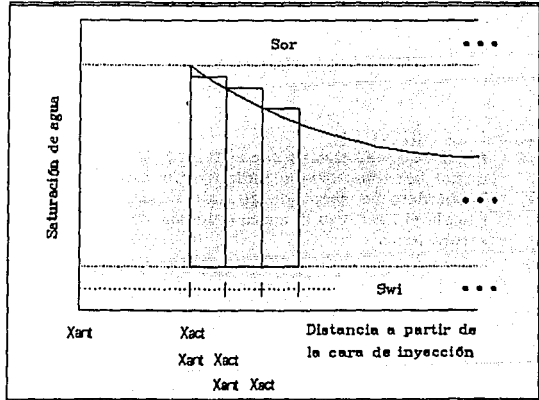
Utilizando la ecuación 81 se tiene :

```
float agua_aceite(float fw)
{
  float WOR=(float)fw/(float)(100-fw);
  return WOR;
}
```

VI.4. Algoritmo para el método de Buckley y Leverett

La determinación de la saturación de agua en el frente se logra haciendo un balance de materia. Se sabe que para cualquier tiempo en particular el volumen inyectado de agua es igual al gasto de inyección multiplicado por el tiempo. Observe la gráfica 17. Inicialmente se sabe que el volumen de agua que existe dentro del yacimiento en una distancia dx es igual a $\phi A S_{wi} dx$. Entonces,

el incremento en el volumen de agua en la distancia dx es igual a $\phi A (S_w - S_{wi}) dx$. Si se suma el incremento en todos los segmentos, a partir de la cara de inyección hacia el frente, se debe obtener el volumen total de agua inyectado durante el tiempo t :



GRAFICA 17.- Cálculo del área bajo la curva de distribución de saturaciones (Vista parcial)

$$\frac{5.61 q_t t}{L} = \frac{\phi A \int_0^{X_f} (S_w - S_{wi}) dx}{L} \quad (92)$$

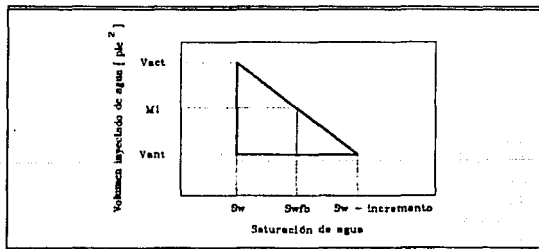
$$\frac{5.61 q_t t}{L} = \frac{\phi A \int_0^{X_f} (S_w - S_{wi}) (X_{act} - X_{ant})}{L} \quad (93)$$

En las ecuaciones 92 y 93 la unidad resultante es el pie^2 . Se observa en la gráfica 17 que para $S_w = 100 - S_{or}$, $X_{ant} = 0$ debido a que es la primera iteración. La ecuación 93 se aplica hasta que se cumpla la igualdad. Generalmente para una iteración el valor del miembro derecho es menor al del miembro izquierdo y en la siguiente iteración la situación se invierte; para obtener el valor de la saturación en el frente, y dado que se conoce el valor de $q_t t$, se aplica la interpolación lineal, gráfica 18, :

$$S_{wfb} = S_w - \text{incremento} + \frac{\text{incremento} (V_{act} - M1)}{(V_{act} - V_{ant})} \quad (94)$$

donde $M1 = 5.61 q_t t / L$.

Incremento = Es el valor que se resta a S_{wi} para obtener su nuevo valor. Entre menor sea, más tiempo tardará para encontrar S_{wfb} , pero se gana precisión. Recuérdese el concepto de integral definida. En realidad el procedimiento utilizado calcula el área bajo la curva entre los límites S_{wi} y la curva de distribución de saturaciones.



GRAFICA 18.- Interpolación para el cálculo de S_{wfb}

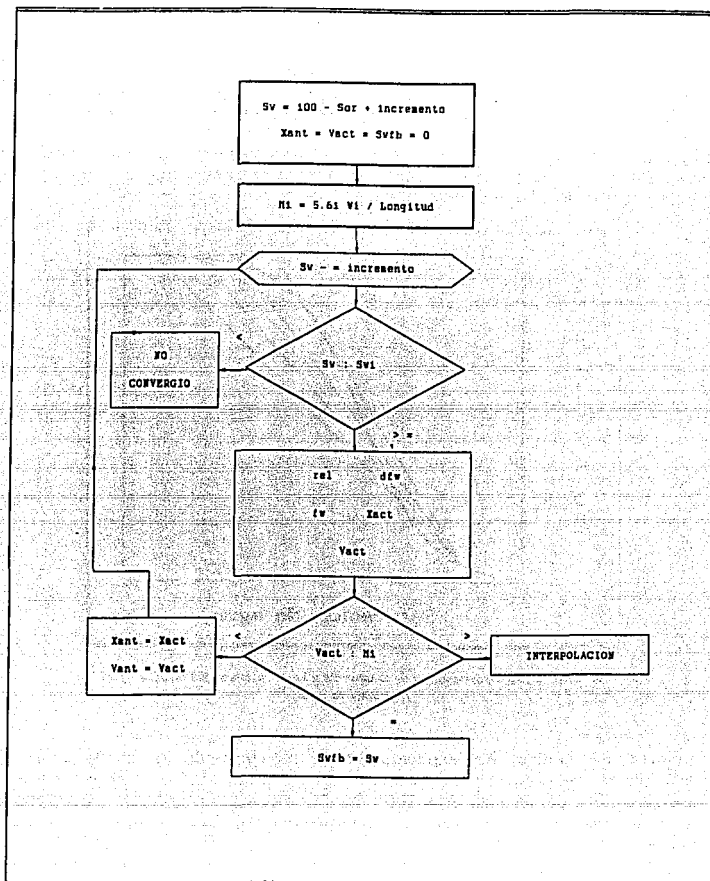
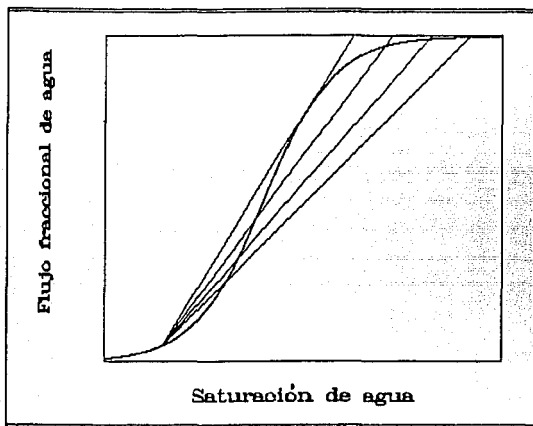


FIGURA 12.- Diagrama de flujo aplicable al método de Buckley y Leverett

VI.5. Algoritmo para el método de Welge

El método de Welge consiste en trazar una tangente, que parte de las condiciones iniciales, a la curva saturación de agua - flujo fraccional de agua. Para trazar dicha línea es necesario conocer su pendiente. La forma de conocerla es la siguiente :

Al igual que el método de Buckley y Leverett, éste también es un proceso iterativo, sólo que en este caso no es posible interpolar porque no se trabaja con volúmenes y no se tiene un valor límite al que se deba llegar.



GRAFICA 19.- Determinación de la tangente a la curva saturación de agua - flujo fraccional de agua

Con ayuda de la gráfica 19 se explicará el algoritmo empleado. Se calcula el valor del flujo fraccional de agua para la saturación de agua inicial, f_{wi} . El proceso iterativo comienza a partir del valor de $S_w = 100 - S_{or}$. Se calcula el valor del flujo fraccional de agua para la saturación S_w , f_w . Se calcula la pendiente de la recta imaginaria que une a los dos puntos :

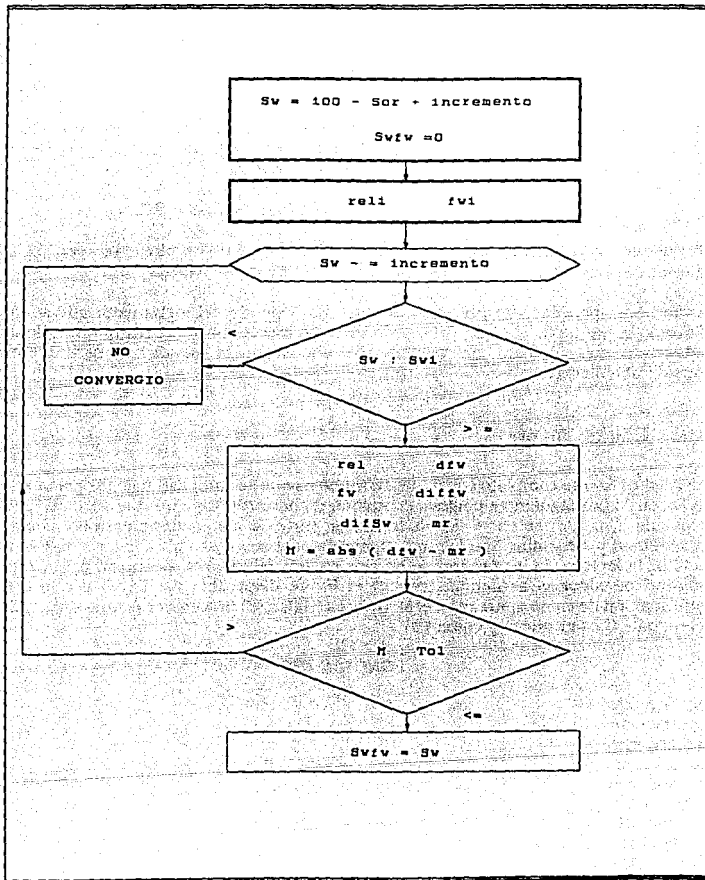


FIGURA 13.- Diagrama de flujo aplicable al método de Weigle

$$mr = \frac{f_w - f_{wi}}{S_w - S_{wi}} \quad (95)$$

Se calcula la pendiente de la curva en el punto (S_w, f_w) , dfw , utilizando la función derivada. Finalmente se compara el valor absoluto de la diferencia contra 0.1 que es el valor de tolerancia. Si se cumple que dicha diferencia es menor o igual a la tolerancia, entonces la saturación en el frente es igual a S_w , es decir :

$$\text{Si } \text{abs}(dfw - mr) \leq 0.1 \Rightarrow S_{wfw} = S_w.$$

En caso contrario, al valor de S_w se le resta el *incremento* y se repite el proceso. El límite inferior de S_w es el de la saturación inicial.

Como podrá pensarse, la precisión del método depende del incremento que se dé. El utilizado es de 0.09; aunque utilizando un incremento mayor el tiempo de cálculo se reduce, la probabilidad de que no se encuentre la pendiente se incrementa considerablemente.

VI.6. Código fuente

El código fuente completo consta de 16 archivos que se compilan bajo la opción Project de Turbo C. Las siguientes páginas contienen dichos archivos. Aunque Turbo C permite el uso de comentarios en el código, la mayor parte no los contiene para no afectar su continuidad y "facilitar" su lectura. Generalmente se acostumbra dejar sangrías para facilitar la lectura de un programa; en este caso y debido a la extensión del mismo, la longitud de algunas sentencias rebasa el límite disponible del papel por lo que la continuación de éstas aparece en el siguiente renglón. El finalizador de una sentencia en el lenguaje C es el punto y coma (;) .

FONDTES.TES

```
#include <fcntl.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <alloc.h>
#include <float.h>
#include <math.h>
#include <process.h>
#include <ctype.h>
#include <io.h>
#include <dos.h>
#include <string.h>
```

```

#include <stdlib.h>
#include <graphics.h>
#include <dir.h>
#include <bios.h>
#define ESC 27
#define BS 8
#define MAXNUM 15
#define MINNUM 5
#define LIMINFSW 1
#define LIMSUPSW 100
#define LIMINFPORO 1
#define LIMSUPPORO 50
#define LIMINFGASTO 1
#define LIMSUPGASTO 100000
#define LIMINFAREA 1
#define LIMSUPAREA 100000
#define LIMINFLONGITUD 1
#define LIMSUPLONGITUD 100000
#define LIMINFVISO 0.01
#define LIMSUPVISO 100
#define LIMINFVISW 0.01
#define LIMSUPVISW 100
#define LIMINFSWI 1
#define LIMSUPSWI 100
#define LIMINFSOR 1
#define LIMSUPSOR 100
#define LIMINFKW 0.00001
#define LIMSUPKW 100
#define LIMINFKO 0.00001
#define LIMSUPKO 100
int PROCESDAT=0,SALVADAT=0,EDITDAT=0,IMPRIDAT=0,RESULTADOS=0,RECU=0;
int resultados(float Base,float Exponente,float VISO,float VISW,float Area,float Porosidad,float Longitud,float Gasto,float
Swi,float Sor,float tmax,float Qimax,float WORmax,float qomax,float Swfb,float Swfw,float N,float fwfw,float mw);
int imprime_datos(float num,float *Sw,float *Kw,float *Ko,float Porosidad,float Area,float Longitud,float Gasto,float
Swi,float VISW,float Sor,float VISO);
int salvar_datos(float num,float *Sw,float *Kw,float *Ko,float Porosidad,float Area,float Longitud,float Gasto,float Swi,float
VISW,float Sor,float VISO,int unidad);
int salir (int PROCESDAT,int SALVADAT,int RECU,int EDITDAT,float *Sw,float *Kw,float *Ko,float *RELP,float *LR,float
*Sw_LR,float *hol);
int Inicializa(int n);
int veri_imp(void);

float relatper(float SW,float Base,float Exponente);
float fltujo_fraccional(float rel,float VISO, float VISW);
float derivada(float SW,float Base,float Exponente,float VISO,float VISW);
float distancia(float dh,float Ap,float W,float Longitud);
float volumen(float Ap,float Xact,float SW,float Xant,float Swi);
float sat_media(float SW,float Qi,float fw);

```


Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

```
float tiempo(float Qi,float Area,float Porosidad,float Longitud,float Gasto);
float produccion(float Area,float Porosidad,float Longitud,float Swa,float Swi);
float gasto(float Gasto,float fw);
float agua_aceite(float fw);
float valor(void);
float *entra_pun(int cod, int num, float *v,float liminf,float limsup,char var);
float entra_ot(float liminf,float limsup, char var);
float edita_ot(float value, float liminf, float limsup,char var);
float *edita_p(int num,float *v,float liminf,float limsup,char var);

char *nom_recupera(int unidad);
char *nombre_de_archivo(void);
void pantalla(void);
void fondo(void);
void no_datos(void);
void no_modifico(void);
void enter(void);
void ve_etiedit(void);
void windclr(void);
void nomem(void);
void fr(void);
void estado(char *Mensaje);
void esig(char *men);
void Landscape_Graph(void);
void Portrait_Graph(void);
void escsw(float gx,float i,float MaxY);
void nombre_ejes(char *ejex,char *ejej);
void soni_err(int frec);
void soni_ter(void);
void Portada(void);
void fuera_rango(void);
void setcursor(unsigned int forma);
void libera_memoria(float *Sw,float *Kw,float *Ko,float *RELp,float *LR,float *Sw_LR,float *hol);

main()
{
FILE *f1;
char el1,eldam1,c1,c2,formato,impd,edit,sav,*arch,ch1,esch;
float Porosidad,Area,Longitud,Sor,Swi,Gasto,Tiempo=100.0,Ap,i,VISO,VISW;
float fw,dhw,Swfb=0.0,Swfw=0.0,fwfw=0.0,mw=0.0, valedit;
float Swa=0,Qi,1,WOR,N,lmax,Qimax,WORmax,qomax,Suma_Sw=0, Suma_LR=0, Suma_Sw_LR=0;
float Suma_Sw2=0.0,rel,Base,Exponente,incremento=0.09,rel1,fwi;
float difw,difSw,miem2,Wi,M1,Xant,Xact,Vant,Vact,SW,B1,B2,C1,C2,Delta,DeltaA,DeltaB;
float *Sw,*Kw,*Ko,*RELp,*LR,*Sw_LR,*hol,num,val;
int poscx,cod;
int unidad;
double argumento;
```

```
char *MENUPRINCIPAL="\n\nr      D      Datos\n\n\n\n\nr      R      Resultados\n\n\n\n\nr      ESC      Salir a
DOS";
char *Mensaje="Por favor presione la tecla deseada ";
setvbuf(1);
clrscr();
unidad=getdisk();
Inicializa(1);
Portada();
getch();
closegraph();
et:
pantalla();
e1:
fondo();
    window(22,9,54,16);
    textcolor(BLACK);
    textbackground(CYAN);
    cputs(MENUPRINCIPAL);
estado(Mensaje);
for(;;)
{
    e1=toupper(getch());
    switch(e1)
    {
        case 'D':
            {
                et2:
                window(1,1,80,25);
                fondo();
                window(22,9,54,17);
                textcolor(0);
                textbackground(3);
                clrscr();
                cputs("      E      Entrada\n\n");
                cputs("      D      Editar \n\n");
                cputs("      P      Processar \n\n");
                cputs("      S      Salvar \n\n");
                cputs("      R      Recuperar \n\n");
                cputs("      I      Imprimir \n\n");
                cputs("      L      Eliminar \n\n\n");
                cputs("      ESC      Menú anterior ");
                for(;;)
                {
                    estado(Mensaje);
                    e1dam1=toupper(getch());
                    switch(e1dam1)
                    {
                        case 'E':
```

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

```
{
windclr();
if(PROCESDAT)
{
soni_err(1000);
estado("La información se perderá. ¿ Desea continuar ? (S / N) ");
for(;;)
{
switch(toupper(getch()))
{
case 'S':libera_memoria(Sw,Kw,Ko,RELPLR,Sw_LR,hol);
break;
case 'N':windclr();
goto et2;
default:soni_err(1000);
continue;
}
break;
}
}
Porosidad=Swi=Sor=Longitud=Area=Gasto=VISO=VISW=0.0;
RESULTADOS=PROCESDAT=SalvADAT=EDITDAT=IMPRIDAT=0;
estado("");
for(;;){
estado("Número de ternas Sw-Kw-Ko. Mínimo 5 y máximo 15 ... ESC para regresar ");
windclr();
_fpresel();
cod=15;
gotoxy(cod,10);
textcolor(5);
cputs("Número de datos : ");
if((num = valor())!=-1){
windclr();
goto et2;
}
if(!((num<=MAXNUM & num>=MINNUM))
{
fuera_rango();
windclr();
continue;
}
else break;
}
clrscr();
if((Sw=malloc(sizeof(float)*num))!=NULL)
{nomem();
goto et2;
}
}
```

```

if((Kw=malloc(sizeof(float)*num))==NULL)
{
    nomem();goto eti2;
}
if((Ko=malloc(sizeof(float)*num))==NULL)
{
    nomem();goto eti2;
}
if((RELP=malloc(sizeof(float)*num))==NULL)
{
    nomem();goto eti2;
}
if((LR=malloc(sizeof(float)*num))==NULL)
{
    nomem();goto eti2;
}
if((Sw_LR=malloc(sizeof(float)*num))==NULL)
{
    nomem();goto eti2;
}
if((hol=malloc(sizeof(float)*num))==NULL)
{
    nomem();goto eti2;
}
hol=entra_pun(cod, num,Sw,LIMINFSW,LIMSUPSW,'S');
if(hol==NULL){windclr();goto eti2;}
else Sw=hol;
hol=entra_pun(cod, num,Kw,LIMINFKW,LIMSUPKW,'W');
if(hol==NULL){windclr();goto eti2;}
else Kw=hol;
hol=entra_pun(cod, num,Ko,LIMINFKO,LIMSUPKO,'O');
if(hol==NULL){windclr();goto eti2;}
else Ko=hol;
Porosidad=entra_ot(LIMINFPORO,LIMSUPPORO,'P');
if(Porosidad==1){windclr();goto eti2;}
Area=entra_ot(LIMINFAREA,LIMSUPAREA,'A');
if(Area==1){windclr();goto eti2;}
Longitud=entra_ot(LIMINFLONGITUD,LIMSUPLONGITUD,'L');
if(Longitud==1){windclr();goto eti2;}
Gasto=entra_ot(LIMINFGASTO,LIMSUPGASTO,'G');
if(Gasto==1){windclr();goto eti2;}
Swl=entra_ot(LIMINFSWL,LIMSUPSWL,'r');
if(Swl==1){windclr();goto eti2;}
VISW=entra_ot(LIMINFVISW,LIMSUPVISW,'V');
if(VISW==1){windclr();goto eti2;}
Sor=entra_ot(LIMINFSOR,LIMSUPSOR,'R');
if(Sor==1){windclr();goto eti2;}
VISO=entra_ot(LIMINFVISO,LIMSUPVISO,'C');

```

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

```
if(VISO==-1){windclr();goto eti2;}
PROCESDAT=SALVADAT=EDITDAT=IMPRIDAT=1;
RESULTADOS=0;
windclr();
goto eti2;
}
case 'D':
{
if(EDITDAT){
no_datos();
goto eti2;
}
}
etiedit:
window(1,1,80,25);
fondo();
window(22,9,55,17);
textcolor(0);
textbackground(3);
clrscr();
cputs(" S Saturación de agua\n");
cputs(" W Permeabilidad al agua\n");
cputs(" O Permeabilidad al aceite\n");
cputs(" P Porosidad A Area \n");
cputs(" L Longitud G Gasto \n");
cputs(" I Swi R Sor \n");
cputs(" V  $\mu_w$  C  $\mu_o$  \n");
cputs(" ESC Menú anterior");
estado(Mensaje);
for(;;)
{
edit=loupper(getch());
switch(edit)
{
case 'S': hol=edita_p(num,Sw,LIMINFSW,LIMSUPSW,edit);
if(!(hol==NULL)){
RECU=RESULTADOS=0;
SALVADAT=1;
Sw=hol;
}
goto etiedit;
case 'W': hol=edita_p(num,Kw,LIMINFKW,LIMSUPKW,edit);
if(!(hol==NULL)){
RECU=RESULTADOS=0;
SALVADAT=1;
Kw=hol;
}
goto etiedit;
case 'O': hol=edita_p(num,Ko,LIMINFKO,LIMSUPKO,edit);
```

```
        if(!((hol==NULL)){
            RECU=RESULTADOS=0;
            SALVADAT=1;
            Ko=hol;
        }
        goto etiedit;

case 'P': val=edita_ot(Porosidad,LIMINFPORO,LIMSUPPORO,edit);
        if(val){
            RECU=RESULTADOS=0;
            SALVADAT=1;
            Porosidad=val;
        }
        goto etiedit;

case 'A': val=edita_ot(Area,LIMINFAREA,LIMSUPAREA,edit);
        if(val)
        {
            RECU=RESULTADOS=0;
            SALVADAT=1;
            Area=val;
        }
        goto etiedit;

case 'L': val=edita_ot(Longitud,LIMINFLONGITUD,LIMSUPLONGITUD,edit);
        if(val){
            RECU=RESULTADOS=0;
            SALVADAT=1;
            Longitud=val;
        }
        goto etiedit;

case 'G': val=edita_ot(Gasto,LIMINFGASTO,LIMSUPGASTO,edit);
        if(val){
            RECU=RESULTADOS=0;
            SALVADAT=1;
            Gasto=val;
        }
        goto etiedit;

case 'I': val=edita_ot(Swi,LIMINFSWI,LIMSUPSWI,edit);
        if(val){
            RECU=RESULTADOS=0;
            SALVADAT=1;
            Swi=val;
        }
        goto etiedit;

case 'R': val=edita_ot(Sor,LIMINFSOR,LIMSUPSOR,edit);
        if(val){
            RECU=RESULTADOS=0;
            SALVADAT=1;
            Sor=val;
        }
```

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

```
    }
    goto etiedit;
case 'V': val=edita_ot(VISW,LIMINFVISW,LIMSUPVISW,edit);
    if(val) {
        RECU=RESULTADOS=0;
        SALVADAT=1;
        VISW=val;
    }
    goto etiedit;
case 'C': val=edita_ot(VISO,LIMINFVISO,LIMSUPVISO,edit);
    if(val) {
        RECU=RESULTADOS=0;
        SALVADAT=1;
        VISO=val;
    }
    goto etiedit;
case ESC:goto eti2;
case 0x00:{
    edit=tolower(getch());
    switch(edit)
    {
    default:{
        soni_err(1000);
        continue;
    }
    }
}
default :soni_err(1000);continue;
}
}

case 'P':windctr();
if(!PROCESDAT){
    no_datos();
    goto eti2; -
}

estado("La información se está procesando... por favor espere ");
N=(Area*Longitud*(Porosidad/100)*((100-Swi-Sor)/100))/5.61;
for(i=0;i<num;i++)
{
    RELP[i]=Ko[i]*Kw[i];
}
Suma_Sw=Suma_LR=Suma_Sw_LR=Suma_Sw2=0.0;
for(i=0;i<num;i++)
{
    Suma_Sw+=Sw[i];
    argumento=(double)(RELP[i]);
```

```

LR[i]=10+(log10(argumento));
Suma_LR+=LR[i];
Sw_LR[i]=Sw[i]*LR[i];
Suma_Sw_LR+=Sw_LR[i];
Suma_Sw2+=pow((double)Sw[i],(double)2);
}
B1= Suma_LR-(num*10);
B2=Suma_Sw_LR-(Suma_Sw*10);
C1=0.4343*Suma_Sw;
C2=0.4343*Suma_Sw2;
Delta=(num*C2)-(Suma_Sw*C1);
DeltaA=(B1*C2)-(B2*C1);
DeltaB=(num*B2)-(B1*Suma_Sw);
Base=pow((double)10,((double)DeltaA/(double)Delta));
Exponente=(float)DeltaB/(float)Delta;
Ap=Area*Porosidad*0.01;
Wi=Gasto*Tiempo;
buck:
SW=100.0 - Sor +incremento;
M1=5.61*Wi/Longitud;
Xant=0.0;
Vact=0.0;
Swfb=0.0;
estado("Aplicando el método de Buckley y Leverett, espere...ESC regresar");
while(!kbhit())
{
eti3:
SW-=incremento;
if(SW<Swi)
{
soni_ter();
estado("No convergió por Buckley y Leverett. Presione cualquier tecla por favor ?");
getch();
goto eti2;
}
else
{
rel=relatper(SW,Base,Exponente);
fw=flujo_fraccional(rel,VISO,VISW);
dfw=derivada(SW,Base,Exponente,VISO,VISW);
Xact=distancia(dfw,Ap,Wi,Longitud);
Vact+=volumen(Ap,Xact,SW,Xant,Swi);
if(Vact<M1)
{
Xant=Xact;
Vant=Vact;
continue;
}
}
}

```


Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

```
        if(fabs(Vact-M1)<0.000001)
        {
            Swfb=SW;
            goto welge;
        }
        if(Vact>M1)
        {
            Swfb=(float)SW-incremento+(float)((incremento)*(Vact-M1)/(float)(Vact-Vant));
            goto welge;
        }
    }
    c1=getch();
    switch(c1){
        case ESC : goto eti2;
        default : goto eti3;
    }

welge:
estado("Aplicando el método de Welge, espere...ESC regresar");
Swfw=0.0;
reli=relatper(Swi,Base,Exponente);
fwi=flujo_fraccional(reli,VISO,VISW);
SW=100.0-Sor+incremento;
while(!kbhit())
{
    eti4:
    SW-=incremento;
    if(SW<Swi)
    {
        soni_ter();
        estado("No convergió por el método de Welge. Presione cualquier tecla por favor ");
        getch();
        goto eti2;
    }
    rel=relatper(SW,Base,Exponente);
    fw=flujo_fraccional(rel,VISO,VISW);
    dfw=derivada(SW,Base,Exponente,VISO,VISW);
    difw=fw-fwi;
    difSw=SW-Swi;
    miem2=difw/difSw;
    if(fabs(dfw-miem2)<=0.1)
    {
        Swfw=SW;
        fwfw=fw;
        mw=(float)(fwfw-fwi)/(float)(Swfw-Swi);
        goto eti5;
    }
    else continue;
}
```

```
}
c2=getch();
switch(c2){
case ESC:goto eti2;
default: goto eti4;
}
eti5:
SW=Swfw;
Swa=0.0;
fw=0.0;
for(;;)
{
etiq3:
SW+=1.;
if((Swa>100-Sor || SW>100-Sor || fw>99)goto eti6;
rel=relatper(SW,Base,Exponente);
fw=flujo_fraccional(rel,VISO,VISW);
dfw=derivada(SW,Base,Exponente,VISO,VISW);
Qi=(float)1/dfw;
Swa= sat_media(SW, Qi, fw);
t= tiempo(Qi,Area,Porosidad, Longitud, Gasto);
}
eti6:
rel=relatper(Swfw,Base,Exponente);
fw=flujo_fraccional(rel,VISO,VISW);
qomax=gasto(Gasto,fw);
lmax=t;
Qimax=Qi;
rel=relatper(SW,Base,Exponente);
fw=flujo_fraccional(rel,VISO,VISW);
WORmax=agua_aceite(fw);
RESULTADOS=1;
estado("La información se ha procesado. Presione cualquier tecla para continuar ");
soni_ter();
getch();
windclr();
goto eti2;
case 'S':
windclr();
if(ISALVADAT){
no_datos();
goto eti2;
}
if(Isahvar_datos(num,Sw,Kw,Ko,Porosidad,Area,Longitud,Gasto,Swi,VISW,Sor,VISO,unidad))goto eti2;
SALVADAT=2;
goto eti2;
case 'R':
if((arch=nom_recupera(unidad))!=(char *)'0')goto eti2;
```

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

```
if((f1=fopen(arch,"rb")==NULL)
{
windclr();
soni_err(300);
estado("No pudo abrirse el archivo. Presione cualquier tecla por favor ");
getch();
windclr();
goto eti2;
}
rewind(f1);
fscanf(f1,"%c",&formato);
if(formato=='f')
{
fclose(f1);
soni_err(300);
estado("El archivo no está en formato BLW. Presione cualquier tecla ");
getch();
windclr();
goto eti2;
}
fscanf(f1,"%n%f",&num);
if((Sw=malloc(sizeof(float)*num))==NULL)
{
nomem();goto eti2;
}
if((Kw=malloc(sizeof(float)*num))==NULL)
{
nomem();goto eti2;
}
if((Ko=malloc(sizeof(float)*num))==NULL)
{
nomem();goto eti2;
}
if((RELP=malloc(sizeof(float)*num))==NULL)
{
nomem();goto eti2;
}
if((LR=malloc(sizeof(float)*num))==NULL)
{
nomem();goto eti2;
}
if((Sw_LR=malloc(sizeof(float)*num))==NULL)
{
nomem();goto eti2;
}
if((hol=malloc(sizeof(float)*num))==NULL)
{
nomem();goto eti2;
}
```

```

    }
    estado("Recuperando la información... espere ");
    sleep(2);
    for(i=0;i<num;i++)
    {
        Sw[i]=0;
        Kw[i]=0;
        Ko[i]=0;
    }
    for(i=0;i<num;i++)
    {
        fscanf(f1,"%f\n",&Sw[i]);
        if(Sw[i]==0)goto deserror;
    }
    for(i=0;i<num;i++)
    {
        fscanf(f1,"%f\n",&Kw[i]);
    }
    for(i=0;i<num;i++)
    {
        fscanf(f1,"%f\n",&Ko[i]);
    }
    fscanf(f1,"%f\n",&Porosidad);
    fscanf(f1,"%f\n",&Sw);
    fscanf(f1,"%f\n",&Sor);
    fscanf(f1,"%f\n",&Longitud);
    fscanf(f1,"%f\n",&Area);
    fscanf(f1,"%f\n",&Gasto);
    fscanf(f1,"%f\n",&VISO);
    fscanf(f1,"%f\n",&VISW);
    goto cierra;
deserror:
    soni_err(300);
fclose(f1);
    estado("Algunos datos están fuera de rango. Presione cualquier tecla ");
    getch();
    windch();
    goto eti2;
cierra:
    fclose(f1);
    RECU=EDITDAT=PROCESDAT=SALVADAT=IMPRIDAT=1;RESULTADOS=0;
    windch();
    estado("La información reside en memoria. Presione cualquier tecla por favor ");
    getch();goto eti2;
case 'T':
    windch();
    if(!IMPRIDAT){
        no_datos();
    }

```

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

```
        goto et2;
    }
if(!limprime_datos(num,Sw,Kw,Ko,Porosidad,Area,Longitud,Gasto,Swi,VISW,Sor,VISO))goto et2;
    goto et2;
case 'L': windclr();
        if(!EDITDAT){
            no_datos();
            goto et2;
        }
        sonl_err(1000);
        estado("¿ Desea eliminar los datos ? (S / N) ");
        for(;;)
        {
            chl=toupper(getch());
            switch(chl)
            {
                case 'S':break;
                case 'N':windclr();
                        goto et2;
                default:continue;
            }
            break;
        }
        libera_memoria(Sw,Kw,Ko,RELP,LR,Sw_LR,hol);
        Porosidad=Gasto=Area=Longitud=VISO=VISW=Swi=Sor=0;
        RESULTADOS=PROCESDAT=SALVADAT=EDITDAT=IMPRIDAT=0;
        estado("Los datos se han eliminado de la memoria. Presione cualquier tecla ");
        getch();
        goto et2;
    case ESC: goto et1;
case 0x00:{
    eldam1=toupper(getch());
    switch(eldam1)
    {
        default:{
            sonl_err(1000);
            continue;}
    }
    default: sonl_err(1000);continue;
}
}
}
case 'R':
{
    if(!RESULTADOS)
    {
        windclr();sonl_err(300);estado("No se han generado resultados. Presione cualquier tecla por favor ");
    }
}
```

```

    getch();goto et1;
}
if(!resultados(Base,Exponente,VISO,VISW,Area,Porosidad,Longitud,Gasto,Swi,Sor,tmax,Qimax,WORmax,qomax,Swfb,S
wfw,N,fwfw,mw)) goto et1;
}
case ESC:
{
    if(salir(PROCEDAT,SALVADAT,RECU,EDITDAT,Sw,Kw,Ko,RELP_LR,Sw_LR,hol))goto et1;
}
case 0x00:{
    e1=toupper(getch());
    switch(e1)
    {
        default:{
            soni_err(1000);
            continue;
        }
    }
}
default : soni_err(1000);
        continue;
}
}
}
}

```

BIOS.TES

```

#include <bios.h>
#include <conio.h>
#include <ctype.h>

```

```

int disco(char *na, int unidad)
{
    char *men;
    int drive,res;
    char buff[512];

    drive=unidad;
    if(na[1]!=':')
    {
        switch(toupper(na[0]))
        {
            case 'A' : drive=0;
                    break;
            case 'B' : drive=1;

```

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

```
        break;
    case 'C' : drive=2;
        break;
    }
}

switch(drive)
{
    case 0 : men="La unidad A: no está lista. Presione cualquier tecla ";
        break;
    case 1 : men="La unidad B: no está lista. Presione cualquier tecla ";
        break;
    case 2 : men="La unidad C: no está lista. Presione cualquier tecla ";
        break;
}

switch(drive)
{
    case 0 :
    case 1 : res=biosdisk(4,drive,0,0,0,1,buf);
        if(res==128)
        {
            soni_err(300);
            estado(men);
            getch();
            windclr();
            return -1;
        }
        return 1;
    case 2 : return 1;
}

}

int veri_imp(void)
{
    if((biosprint(2,sizeof(float),0)==144))return 1;
    else return -1;
}
}
```

EDITA-A.TES

```
#include <conio.h>
#include <stdlib.h>

float valor(void);

float edita_of(float value, float liminf, float limsup, char var)
{
char *formato,"men,"edv;
float valo=0;

switch(var)
{
case 'P': formato="Valor anterior : %5.2f [ 1% ]";
           men="Se modificó el valor de Porosidad. Presione cualquier tecla por favor ";
           edv="Editando : Porosidad ";
           break;
case 'A': formato="Valor anterior : %7.0f [ pie 2 ]";
           men="Se modificó el valor del Area. Presione cualquier tecla por favor ";
           edv="Editando : Area ";
           break;
case 'L': formato="Valor anterior : %7.0f [ pie ]";
           men="Se modificó el valor de Longitud. Presione cualquier tecla por favor ";
           edv="Editando : Longitud ";
           break;
case 'G': formato="Valor anterior : %7.0f [ BPD ]";
           men="Se modificó el valor de Gasto. Presione cualquier tecla por favor ";
           edv="Editando : Gasto ";
           break;
case 'I': formato="Valor anterior : %5.2f [ 1% ]";
           men="Se modificó el valor de Swi. Presione cualquier tecla por favor ";
           edv="Editando : Swi ";
           break;
case 'R': formato="Valor anterior : %5.2f [ 1% ]";
           men="Se modificó el valor de Sor. Presione cualquier tecla por favor ";
           edv="Editando : Sor ";
           break;
case 'V': formato="Valor anterior : %6.2f [ UV ]";
           men="Se modificó el valor de  $\mu w$ . Presione cualquier tecla por favor ";
           edv="Editando :  $\mu w$  ";
           break;
case 'C': formato="Valor anterior : %6.2f [ UV ]";
           men="Se modificó el valor de  $\mu o$ . Presione cualquier tecla por favor ";
```

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

```
    edv="Editando :  $\mu$  ";
    break;
}
for(;;){
    enter();
    textcolor(WHITE);
    highvideo();
    gotoxy(22,7);
    cputs(edv);
    normvideo();
    textcolor(5);
    textbackground(GREEN);
    gotoxy(22,9);
    cprintf(formato,value);
    gotoxy(22,11);
    cprintf("Nuevo valor : ");
    valo=valor();
    if(valo== -1)
    {
        no_modifico();
        return 0;
    }
    if(valo>=liminf & valo<=limsup )break;
    else {
        fr();
        continue;
    }
}

    valo=valo;
    clrscr();
    estado(men);
    ve_etiedit();
    return valo;
}
```

```
float *edita_p(int num,float *v,float liminf,float limsup,char var)
{
    char *formato,"men,"ant;
    float valedit,val,i;

    switch(var)
    {
        case 'S':
            formato="          Sw [%2.0f] = %5.2f \n\r";
            ant="Valor anterior : %5.2f [ %1% ]";
```

```

men="Se modificó un valor de Sw. Presione cualquier tecla por favor ";
break;

case 'W':
    formato="          Kw [%2.0f] = %8.4f \nv\r";
    ant="Valor anterior : %8.4f { UP }";
    men="Se modificó un valor de Kw. Presione cualquier tecla por favor ";
    break;

case 'O':
    formato="          Ko [%2.0f] = %8.4f \nv\r";
    ant="Valor anterior : %8.4f { UP }";
    men="Se modificó un valor de Ko. Presione cualquier tecla por favor ";
    break;

for(;;){
    enter();
    textcolor(5);
    gotoxy(5);
    for(i=0;i<num;i++) cprintf(formato,i+1,v[i]);
    gotoxy(5,17);
    cprintf("Valor a editar (subíndice) : ");
    valedit=valor();
    if(veledit==-1)
    {
        clrscr();
        return NULL;
    }
    if(veledit>num | !veledit)
    {
        sonl_om(300);
        estado("No existe ese subíndice. Presione cualquier tecla por favor ");
        getch();
        windclr();
        continue;
    }
    else break;
}

for(;;){
    enter();
    textcolor(5);
    gotoxy(20,6);
    cprintf(ant,v[veledit-1]);
    gotoxy(20,8);
    cprintf("Nuevo valor : ");
    val=valor();
    if(val===-1)
    {
        no_modifico();
        return NULL;
    }
}

```

```
    }  
    clrscr();  
    if(val>=liminf & val<=limsup )break;  
    else {  
        fr();  
        continue;  
    }  
}   
v[valedit-1]=val;  
estado(men);  
ve_eliedit();  
return v;  
}
```

ENTRA-A.TES

```
#include <conio.h>  
  
float valor();  
  
float entra_ot(float liminf,float limsup, char var)  
{  
  
char *men1,*men2;  
float numero;  
  
switch(var)  
{  
case 'P': men1="Porosidad en porcentaje... ESC Menú anterior ";  
          men2="Porosidad [ % ] : *";  
          break;  
case 'A': men1="Area de flujo en pie cuadrado... ESC Menú anterior ";  
          men2="Area del medio poroso [ pie2 ] : *";  
          break;  
case 'L': men1="Longitud del medio poroso en pie... ESC Menú anterior ";  
          men2="Longitud del medio poroso [ pie ] : *";  
          break;  
case 'G': men1="Gasto de inyección en barriles por día... ESC Menú anterior ";  
          men2="Gasto de Inyección [ BPD ] : *";  
          break;  
case 'I': men1="Saturación inicial de agua en porcentaje... ESC Menú anterior ";  
          men2="Saturación inicial de AGUA [ % ] : *";  
          break;  
case 'V': men1="Viscosidad del agua en UV ... ESC Menú anterior ";  
          men2="Viscosidad del AGUA [ UV ] : *";  
}
```

```

        break;
    case 'R' : men1="Saturación residual de aceite en porcentaje...ESC Menú anterior ";
              men2="Saturación residual de ACEITE [ % ] : ";
              break;
    case 'C' : men1="Viscosidad del aceite en UV ... ESC Menú anterior ";
              men2="Viscosidad del ACEITE [ UV ] : ";
              break;
}

for(;;){
    estado(men1);
    windclr();
    textcolor(5);
    gotoxy((80-1.3*strlen(men2))*0.5,10);
    cprintf(men2);
    numero=valor();
    if(numero===-1){
        windclr();
        return -1;
    }
    if(numero>=liminf & numero<=limsup)return numero;
    else {
        fuera_rango();
        windclr();
        continue;
    }
}
}

```

ENTRAPUN.TES

```

#include <conio.h>
#include <stdlib.h>
float valor(void);

float *entra_pun(int cod, int num, float *v,float liminf,float limsup,char var)
{
    char *men1,*men2,*formato;
    float i;

    windclr();
    switch(var)
    {
        case 'S': men1="Saturación en porcentaje y orden ascendente... ESC Menú anterior ";

```

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

```
men2="El valor debe ser mayor que el anterior. Presione cualquier tecla ";
formato= "Sw [%2.0f] : ";
break;
case 'W': men1="Kw en UP compatibles con Ko y orden ascendente...ESC Menú anterior ";
men2="El valor debe ser mayor que el anterior. Presione cualquier tecla ";
formato= "Kw [%2.0f] : ";
break;
case 'O':men1="Ko en UP compatibles con Kw y orden descendente...ESC Menú anterior ";
men2="El valor debe ser menor que el anterior. Presione cualquier tecla ";
formato= "Ko [%2.0f] : ";
break;
}

estado(men1);
window(4,4,76,21);
textcolor(5);
gotoxy(cod,2);
for(i=0;i<num;i++)
{
entsatw:
gotoxy(cod,2+i);
clear();
gotoxy(cod,2+i);
cprintf(formato,i+1);
v[i]=valor();
if(v[i]==-1) return NULL;
if((v[i]>=liminf) & (v[i]<=limsup ))
{
switch(var)
{
case 'S':
case 'W':
if((i>=1) & (v[i]<=v[i-1]))
{
soni_err(300);
estado(men2);
getch();
estado(men1);
window(4,4,76,21);
textcolor(5);
i=i-1;
continue;
}
else {gotoxy(cod,wherey()+1);continue;}
case 'O':
if((i>=1) & (v[i]>=v[i-1]))
{
soni_err(300);
```

```

estado(men2);
getch();
estado(men1);
window(4,4,76,21);
textcolor(5);
i=i-1;
continue;
}
else {gotoxy(cod,wherey()+1);continue;}
}
}
else {
fuera_rango();
estado(men1);
window(4,4,76,21);
textcolor(5);
i=i-1;
continue;
}
}
windclr();
return v;
}

```

FUNCIONES

```

#include <conio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <dos.h>
#include <graphics.h>
#include <string.h>
#define ESC 27
#define BS 8
#define NODATM "No hay datos en memoria. Presione cualquier tecla "
#define NOMODF "No se modificó ningún valor. Presione cualquier tecla "
#define PENOMO "Presione ESC si no desea alterar ningún valor "
#define VFRA "Valor fuera de rango. Presione cualquier tecla "

void soni_err(int frec);
void setcursor(unsigned int forma);
void pantalla(void)
{
char "blancos,"horizs,"horizi,"verti;
char "NOMPROG=" B^L^W =";

```

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

```
char *buf1[80];
char *buf2[80];
register int i;
setcursor(8192);
clrscr();
blancos=""
```

```
horiz=""
";
verti="" |                               |nv";
```

```
horiz=""
;
;
```

```
textcolor(GREEN);
textbackground(GREEN);
gotoxy(1,1);
cputs(blancos);
gettext(1,1,80,1,buf1);
for(i=2;i<=25;i++)
{
    gotoxy(1,i);
    puttext(1,i,strlen(blancos),i,buf1);
}
textcolor(RED);
textbackground(WHITE);
gotoxy(1+(80-strlen(NOMPROG))*5,2);
cputs(NOMPROG);
gotoxy(3,3);
textcolor(WHITE);
textbackground(GREEN);
cputs(horiz);
gotoxy(1,4);
cputs(verti);
gettext(1,4,80,4,buf2);
for(i=5;i<=23;i++)
{
    gotoxy(1,i);
    puttext(1,i,strlen(verti),i,buf2);
}
gotoxy(3,24);
cputs(horiz);
setcursor(1543);
return;
}

void fondo(void)
{
```

```

char *fon,"fons","foni";
int y,y1,y2,x1;
y1=7;
y2=16;
x1=16;
setcursor(8192);
textcolor(WHITE);
textbackground(CYAN);

```

```

fons="
fon =
foni="
gotoxy(x1,y1);
cputs("
gotoxy(x1,y1+1);
cputs(fons);
for(y=y1+2;y<y2+2;y++){
gotoxy(x1,y);
cputs(fon);
}
gotoxy(x1,y2+2);
cputs(foni);
gotoxy(x1,y2+3);
cputs("
gotoxy(x1+2,y2+4);
textcolor(BLACK);
textbackground(BLACK);
cputs("
for(y=y1+1;y<y2+4;y++){
gotoxy(x1+strlen(fon),y);
printf("%c%c",0,0);
}
setcursor(1543);
)

```

```

void estado(char *Mensaje)
{

```

```

setcursor(8192);
window(1,1,80,25);
gotoxy(1,23);
textcolor(WHITE);
textbackground(2);
cputs("
window(1,1,80,24);
gotoxy(1+(80-strlen(Mensaje))*0.5,23);
textcolor(YELLOW);
cputs(Mensaje);
setcursor(1543);

```


Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

```
return;
}
float relatper(float SW,float Base,float Exponente)
{
    float rel=Base*exp((double) SW*Exponente);
    return rel;
}
float flujo_fraccional(float rel,float VISO,float VISW)
{
    float fw=100.0*(1.0/(1.0+ (rel*(VISW/VISO))));
    return fw;
}
float derivada(float SW,float Base,float Exponente,float VISO, float VISW)
{
    float facc,num,den,dfw;

    facc=(VISW/VISO)*Base*exp((double) SW*Exponente);
    num= - Exponente*facc;
    den=(1+facc)*(1+facc);
    dfw=100*((float)num/(float)den);
    return dfw;
}
float distancia(float dfw,float Ap,float Wi,float Longitud)
{
    float x=(5.61*(float)Wi*dfw)/((float)Ap*Longitud);
    return x;
}
float volumen(float Ap,float Xact,float SW,float Xant,float Swi)
{
    float vol=(float)Ap*(SW-Swi)*(Xact-Xant)*(0.01);
    return vol;
}
float sat_media(float SW,float Qi,float fw)
{
    float Swa=SW+(Qi*(100.0-fw));
    return Swa;
}
float tiempo(float Qi,float Area,float Porosidad,float Longitud,float Gasto)
{
    float t=Qi*Area*Porosidad*0.01*Longitud/(Gasto*5.61);
    return t;
}
float produccion(float Area,float Porosidad,float Longitud,float Swa,float Swi)
{
    float pro=(Area*Porosidad*0.01*Longitud*(Swa-Swi)*0.01)/5.61;
    return pro;
}
```

```
    }  
float gasto(float Gasto,float fw)  
{  
    float gas=(100.0-fw)*Gasto*0.01;  
    return gas;  
}  
float agua_aceite(float fw)  
{  
    float WOR=(float)fw/(float)(100-fw);  
    return WOR;  
}
```

```
void no_datos(void)  
{  
    soni_err(300);  
    window(4,4,76,21);  
    clrscr();  
    estado(NODATM);  
    getch();  
}
```

```
void no_modifico(void)  
{  
    clrscr();  
    estado(NOMODF);  
    getch();  
    window(4,4,76,21);  
    clrscr();  
}
```

```
void enter(void)  
{  
    estado(PENOMO);  
    window(4,4,76,21);  
    clrscr();  
}
```

```
void va_atiedi!(void)  
{  
    getch();  
    window(4,4,76,21);  
    clrscr();  
}
```

```
void windclr(void)  
{  
    window(4,4,76,21);  
    clrscr();  
}
```

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

```
void escsw(float gx,float i,float MaxY)
{
    outtextxy(gx*1,0.75*MaxY,gcv(i,4,""));
}

void fuera_rango(void)
{
    soni_err(300);
    estado(VFRA);
    getch();
}

void setcursor(unsigned int forma)
{
    union REGS reg;

    reg.h.ah = 1;
    reg.x.cx = forma;
    int86(0x10, &reg, &reg);
}

float valor(void)
{
    float numfinal;
    int i,punt,columoriginal, rengoriginal;
    char *nume,ch[80];

    textcolor(7);
    textbackground(2);
    columoriginal=wherex();
    rengoriginal=wherey();
    p1:
    i=0;
    punt=0;
    for(i=0;i<10;i++)
    {
        inic:
        ch[i]=getch();
        switch(ch[i])
        {
            case ESC: return -1;
            case BS:if(i==0){soni_err(200);goto inic;}
                else{
                    gotoxy(wherex()-1,rengoriginal);
                }
        }
    }
}
```

```
        cprintf(" ");
        gotoxy(wherex()-1, rengoriginal);
        i=i-1;
        goto inic;
    }
    case '0':
    case '1':
    case '2':
    case '3':
    case '4':
    case '5':
    case '6':
    case '7':
    case '8':
    case '9':
        cprintf("%c",ch[i]);
        continue;

    case '.':
        punt++;
        if(punt>1)
        {
            gotoxy(columnoriginal, rengoriginal);
            circle();
            goto p1;
        }
        cprintf("%c",ch[i]);
        continue;

    case '\r':
        if(i>0){
            goto valor;
        }
        else {
            cprintf("%d",0);
            textcolor(5);
            return (float)0;
        }
    default:
        soni_err(300);
        goto inic;
}

}

valor:
    nume=ch;
```

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

```
    numfinal=atof(ume);
    textcolor(5);
    return numfinal;
}

void nomem(void)
{

estado("No se pudo asignar memoria. Presione cualquier tecla ");
getch();
windclr();
}
void fr(void)
{
    fuera_rango();
    window(4,4,76,21);
    textcolor(5);
}

void soni_err(int frec)
{
    int i;
    for(i=0;i<1000;i++)sound(frec);
    nosound();
}

void soni_ter(void)
{
    int i;
    for(i=0;i<5000;i++)sound(2000);
    nosound();
}
```

IMPRDATO.TES

```
#include <conio.h>
#include <stdio.h>
#include <dos.h>
#define ESC 27
#define EIMP "Encienda la impresora y presione cualquier tecla...ESC cancelar "
#define IMPNL "La impresora no está encendida. Presione cualquier tecla "
#define IMPDAT "Imprimiendo datos ... espere "
#define IMPTER "Los datos se han impreso. Presione cualquier tecla "
```

```
int imprime_datos(float num,float *Sw,float *Kw,float *Ko,float Porosidad,float Area,float Longitud,float Gasto,float
Swi,float VISW,float Sor,float VISO)
```

```
{
char impd;
int i;
inicio;
windclr();
estado(EIMP);
impd=getch();
switch(impd)
{
case ESC: return 0;
default:
{
if(veri_imp()==1)
{
soni_err(400);
estado(IMPNL);
getch();
goto inicio;
}
estado(IMPDAT);
if(veri_imp()==1) return 0;
fprintf(stdprn, "\x0D");
fprintf(stdprn, "Datos a procesar : \n\n");
fprintf(stdprn, "      S");
fprintf(stdprn, "\x1B%c%c", 83, 1);
fprintf(stdprn, "w");
fprintf(stdprn, "\x1B%c", 84);

fprintf(stdprn, "      K");
fprintf(stdprn, "\x1B%c%c", 83, 1);
fprintf(stdprn, "w");
fprintf(stdprn, "\x1B%c", 84);

fprintf(stdprn, "      K");
fprintf(stdprn, "\x1B%c%c", 83, 1);
fprintf(stdprn, "o\n\n");
fprintf(stdprn, "");
fprintf(stdprn, "\x1B%c", 84);

fprintf(stdprn, "      [%]      [UP]      [UP]      \n\n");

for(i=0; i<num; i++)
{
fprintf(stdprn, "      %5.2f      %8.4f      %8.4f      \n", Sw[i], Kw[i], Ko[i]);
}
}
}
```

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

```
fprintf(stdprn, "\n");
fprintf(stdprn, " Area :           %9.2f pie*,Area);
fprintf(stdprn, "\x1B%c%c",83,0);
fprintf(stdprn, "2\n");
fprintf(stdprn, "\x1B%c",84);

fprintf(stdprn, " Longitud :       %9.2f pie \n",Longitud);
fprintf(stdprn, " Porosidad :         %5.2f % \n",Porosidad);
fprintf(stdprn, " Gasto :             %9.2f BPD \n",Gasto);
fprintf(stdprn, " Viscosidad del agua : %6.2f UV \n",VISW);
fprintf(stdprn, " Viscosidad del aceite : %6.2f UV \n",VISO);
fprintf(stdprn, " Saturación inicial de agua : %5.2f % \n",Swi);
fprintf(stdprn, " Saturación residual de aceite : %5.2f % \n",Sor);
fprintf(stdprn, "\n\n\n");
fprintf(stdprn, "UP = Unidades de permeabilidad, [ darcy, md, etc. ]. \n");
fprintf(stdprn, "UV = Unidades de viscosidad, [ cp, mp, etc. ]. \n");
fprintf(stdprn, "\x0D");
fprintf(stdprn, "\r"); .
}
}
estado(IMPTER);
getch();
windclr();
return 1;
}
```

INICIAL.TES

```
#include <graphics.h>
#include <conio.h>
#include <process.h>
#include <stdlib.h>

int Inicializa(int n)
{

int Monitor,Modo,Error;

Monitor=DETECT;
if(registerfarbgdriver(CGA_driver_far)<0)exit(1);
if(registerfarbgdriver(EGAVGA_driver_far)<0)exit(1);
if(registerfarbgdriver(Herc_driver_far)<0)exit(1);
if(registerfarbgdriver(ATT_driver_far)<0)exit(1);
if(registerfarbgdriver(PC3270_driver_far)<0)exit(1);
if(registerfarbgdriver(IBM8514_driver_far)<0)exit(1);
if(registerfarbgifont(small_font_far)<0)exit(1);
```

```

if(registerfargfont(triplex_font_far<0)exit(1);
if(registerfargfont(sansserif_font_far<0)exit(1);

initgraph(&Monitor,&Modo,"");
Error=graphresult();
if(Error!=grOk)
{
if(n==1)
{
textcolor(0);
textbackground(1);
clrscr();
soni_err(400);
cprintf("Memoria insuficiente para ejecutar BLW.EXE\nr");
exit(0);
}
if(n==2)
{
fondo();
pantalla();
soni_err(400);
estado("Memoria insuficiente. Presione cualquier tecla ");
getch();
return -1;
}
}
return 1;
}

```

LANDS.TES

```

#include <graphics.h>
#include <ctype.h>
#include <stdio.h>
#include <dos.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#define ESC 27

void Landscape_Graph(void)
{
char m,c1,C2;
int i,j,k,v,Msb,Lsb,MaxX=getmaxx()+1,MaxY=getmaxy()+1;
int xizq=0.03*MaxX,xder=0.97*MaxX;

setviewport(xizq,0,xder,MaxY,0);
estig("PRESIONE I PARA INICIAR IMPRESION, ESC MENU ANTERIOR O ESC PARA DETENERLA");

```


Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

```
for(;;){
C2=tolower(getch());
switch(C2)
{
case ESC:return;
case '!': break;
default:{soni_err(300);
continue;
}
}
break;
}
Lsb=MaxY & 0x00FF;
Msb=MaxY >>8;
j=0;

while(!kbhit())
{
if((j<floor(xizq))[j]++;continue;
if(j)>=xder){
soni_err();
fprintf(stderr,"%f");
return;
}

eti1:
fprintf(stderr,"%c",24);
for(v=0;v<1;v++){
fprintf(stderr," ");
fprintf(stderr,"%x1B%c%c",65,8);
fprintf(stderr,"%x1B%c",50);
fprintf(stderr,"%x1B*%c%c%c",0,Lsb,Msb);
for(i=MaxY;i>=0;i--)
{
m=0;
for(k=0;k<8;k++)
{
m<<=1;
if(getpixel(j+k,i)) m++;
}

fprintf(stderr,"%c",m);
}
}
fprintf(stderr,"\x0D");
}
fprintf(stderr,"\x0A");
eti2:
j+=8;
```

```
}
c1=getch();
switch(c1)
{
case ESC:
    printf(stdprn, "\n");
    estg("SE INTERRUMPIO LA IMPRESION. PRESIONE CUALQUIER TECLA");
    getch();
    return;
}
default:goto eti1;
}

}

void Portrait_Graph(void)
{
    char m,c1,C2;
    int i,j,k,Msb,LSb,MaxX=getmaxx()+1,MaxY=getmaxy()+1;

    setviewport(0,0,MaxX,MaxY,0);
    estg("PRESIONE I PARA INICIAR IMPRESION, ESC MENU ANTERIOR O ESC PARA DETENERLA");
    for(;;){
        C2=toupper(getch());
        switch(C2)
        {
        case ESC:return;
        case 'I':{estg("");
            break;
        }
        default:{soni_err(300);
            continue;
        }
        }
        break;
    }
    printf(stdprn, "%x1B%c%c", 65, 8);
    printf(stdprn, "%x1B%c", 50);
    Lsb=(MaxX) & 0x00FF;
    Msb=(MaxX) >>8;
j=0;

while(!kbhit())
{
    if(j>=(MaxY)/8){
        soni_ter();
        printf(stdprn, "\n");
    }
}
```

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

```
return;
}

eti1:
fprintf(stdprn, "\x1B%c%c%c", 6, Lsb, Msb);
for(i=0; i<MaxX; i++)
{
    m=0;
    for(k=0; k<8; k++)
    {
        m<<=1;
        if(getpixel(i, j*8+k)) m++;
    }
    fprintf(stdprn, "%c", m);
}
fprintf(stdprn, "\x0D");
fprintf(stdprn, "\x0A");
et2:
j++;
}
c1=getch();
switch(c1)
{
case ESC: { fprintf(stdprn, "\n");
            etg("SE INTERRUMPIO LA IMPRESION. PRESIONE CUALQUIER TECLA");
            getch();
            return;
        }
default: goto eti1;
}
}
```

LIBERMEM.TES

```
#include <alloc.h>
```

```
void libera_memoria(float *Sw, float *Kw, float *Ko, float *RELP, float *LR, float *Sw_LR, float *hol)
{
    free(Sw);
    free(Kw);
    free(Ko);
    free(RELP);
    free(LR);
    free(Sw_LR);
    free(hol);
}
```

NOMBREAR.TES

```
#include <conio.h>
#include <ctype.h>
#define ESC 27
#define BS 8

char *nombre_de_archivo(void)
{

char *nombre ,ch1[80]="";
int i,origy;

textcolor(7);
textbackground(2);
origy=wherey();
i=0;
for(i=0;j<55;j++)
{
  inicia:
  ch1[j]=toupper(getch());
  switch(ch1[j])
  {
    case ESC : nombre="";return nombre;
    case BS :if(i==0){soni_err(250);goto inicia;}
              else{
                gotoxy(wherex()-1,origy);
                cprintf(" ");
                gotoxy(wherex()-1,origy);
                i=i-1;
                goto inicia;
              }

    case 'A':
    case 'B':
    case 'C':
    case 'D':
    case 'E':
    case 'F':
    case 'G':
    case 'H':
    case 'I':
    case 'J':
    case 'K':
    case 'L':
    case 'M':
    case 'N':
```

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

```
case 'O':
case 'P':
case 'Q':
case 'R':
case 'S':
case 'T':
case 'U':
case 'V':
case 'W':
case 'X':
case 'Y':
case 'Z':
case '0':
case '1':
case '2':
case '3':
case '4':
case '5':
case '6':
case '7':
case '8':
case '9':
case '!':
case '\\':printf("%c",ch1[j]);continue;
case '.': printf(".");continue;
case '\\r':ch1[j]='\0';goto nom;
default :i=i;goto inicia;
}

}
nom:
nombre=ch1;
return nombre;

}
```

RECU1DAT.TES

```
#include <conio.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <io.h>
#include <bios.h>
#define NOMREC "Introduzca el nombre del archivo a recuperar. ESC para regresar "
#define NOEXIST "El archivo no existe. Presione cualquier tecla "
```

```
char *nombre_de_archivo(void);
int disco(char *na, int unidad);

char *nom_recupera(int unidad)
{
    char *arch;
    windclr();
    estado(NOMREC);
    window(4,4,76,21);
    textcolor(5);
    gotoxy(5,17);
    cprint("Nombre : ");
    gotoxy(18,17);
    arch=nombre_de_archivo();
    if(!strcmp(arch,""))
    {
        clrscr();
        return (char *) '0';
    }
    if((disco(arch,unidad))!=-1)return (char *) '0';

    if(access(arch,0))
    {
        windclr();
        soni_err(300);
        estado(NOEXIST);
        getch();
        windclr();
        return (char *) '0';
    }
    return arch;
}
```

RECUGRAF.TES

```
#include <graphics.h>
#include <stdlib.h>
#include <process.h>
#include <conio.h>
#include <stdio.h>
#include <alloc.h>
#include <io.h>
#define T1 "B"
#define T2 "L"
```

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

```
#define T3 "W"

void *Recupera_Grafica(char *nombregraf);

void Portada(void)
{
void *flash2;
char *PCTPS=" PRESIONE CUALQUIER TECLA PARA SALIR ";
char *VER=" VERSION 3 . . . PRESIONE CUALQUIER TECLA PARA INICIAR ";
char *ES=" POR FAVOR ESPERE ";
int i;
int MaxX=getmaxx();
int MaxY=getmaxy();

cleardevice();
bar(0,0,MaxX,MaxY);
setcolor(0);
if(MaxX<=640 & MaxY<=200)
{
setusercharsize(1,2,7,12);
settextstyle(1,0,USER_CHAR_SIZE);
settextjustify(CENTER_TEXT,CENTER_TEXT);
outtextxy(0.5*MaxX,0.5*MaxY,ES);
if(access("CGA.BLW",0))
{
soni_err(300);
bar(0,0,MaxX,MaxY);
outtextxy(0.5*MaxX,0.5*MaxY," NO SE ENCONTRO EL ARCHIVO CGA . BLW EN EL DIRECTORIO ACTUAL ");
outtextxy(0.5*MaxX,0.7*MaxY,PCTPS);
getch();
closegraph();
exit(0);
}
flash2=Recupera_Grafica("CGA.BLW");
putimage(0,0,flash2,COPY_PUT);
settextstyle(1,0,4);
outtextxy(.80*MaxX,0.1*MaxY,T1);
outtextxy(.85*MaxX,0.3*MaxY,T2);
outtextxy(.90*MaxX,0.5*MaxY,T3);
settextjustify(CENTER_TEXT,CENTER_TEXT);
setusercharsize(1,2,7,12);
settextstyle(1,0,USER_CHAR_SIZE);
outtextxy(0.5*MaxX,0.95*MaxY,VER);
return;
}

setusercharsize(1,2,7,12);
settextstyle(1,0,USER_CHAR_SIZE);
```

```
settextjustify(CENTER_TEXT,CENTER_TEXT);
outtextxy(0.5*MaxX,0.5*MaxY,ES);
if(access("HERC.BLW",0))
{
soni_err(300);
bar(0,0,MaxX,MaxY);
outtextxy(0.5*MaxX,0.5*MaxY," NO SE ENCONTRO EL ARCHIVO HERC . BLW EN EL DIRECTORIO ACTUAL ");
outtextxy(0.5*MaxX,0.7*MaxY,PCTPS);
getch();
closegraph();
exit(0);
}
flash2=Recupera_Grafica("herc.blw");
putimage(0,0,flash2,COPY_PUT);
settextstyle(1,0,5);
outtextxy(.80*MaxX,0.1*MaxY,T1);
outtextxy(.85*MaxX,0.3*MaxY,T2);
outtextxy(.90*MaxX,0.5*MaxY,T3);
settextjustify(CENTER_TEXT,CENTER_TEXT);
setusercharsize(1,2,7,12);
settextstyle(1,0,USER_CHAR_SIZE);
outtextxy(0.5*MaxX,0.95*MaxY, VER);
return;
}

void *Recupera_Grafica(char *nombregraf)
{
unsigned xsize,ysize,size;
FILE *f1;
void *tempimage;
if(!((f1=fopen(nombregraf,"r"))==NULL))
{
fclose(f1);
closegraph();
soni_err(300);
textcolor(1);
cprintf("No pudo abrirse el archivo %s ",nombregraf);
exit(0);
}
xsize=fgetc(f1)/(fgetc(f1)<<8);
ysize=fgetc(f1)/(fgetc(f1)<<8);
size=imagesize(0,0,xsize,ysize);
if((tempimage=malloc(size))==NULL)
{
fclose(f1);
```


Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

```
closegraph();
soni_err(300);
textcolor(1);
cprintf("Memoria insuficiente para ejecutar BLW.EXE");
exit(0);
}
rewind(f1);
fread(tempimage,size,1,f1);
fclose(f1);
return tempimage;
}
void eslg( char *men)
{
int xmult=1,ymult=1,xdiv=1,ydiv=1;
setviewport(0,13*getmaxx(),0,0.015*getmaxy(),0,0.87*getmaxx(),0,0.08*getmaxy(),1);
clearviewport();
setviewport(0,0,getmaxx(),getmaxy(),1);
settextjustify(CENTER_TEXT,CENTER_TEXT);
setusercharsize(xmult,xdiv,ymult,ydiv);
settextstyle(2,0,USER_CHAR_SIZE);
outtextxy(getmaxx()/2,0.04*getmaxy(),men);
}
void nombre_ejes(char *ejex,char *ejey)
{
int MaxX,MaxY;
float ex=0.2;
MaxX=getmaxx();
MaxY=getmaxy();
setviewport(0,0,MaxX,MaxY,1);
if(MaxY<=199)
{
settextjustify(1,1);
setusercharsize(1,1,16,7);
settextstyle(2,1,USER_CHAR_SIZE);
outtextxy(0.5*ex*MaxX,MaxY*.5,ejey);
settextstyle(2,0,5);
outtextxy(0.5*MaxX,0.93*MaxY,ejex);
settextstyle(2,0,4);
return;
}
settextstyle(2,1,4);
outtextxy(0.5*ex*MaxX,MaxY*.5,ejey);
settextstyle(2,0,4);
outtextxy(0.5*MaxX,0.93*MaxY,ejex);
settextstyle(2,0,4);
}
```

```
settextjustify(CENTER_TEXT,CENTER_TEXT);
outtextxy(0.5*MaxX,0.5*MaxY,ES);
if(access("HERC.BLW",0))
{
soni_err(300);
bar(0,0,MaxX,MaxY);
outtextxy(0.5*MaxX,0.5*MaxY," NO SE ENCONTRO EL ARCHIVO HERC . BLW EN EL DIRECTORIO ACTUAL ");
outtextxy(0.5*MaxX,0.7*MaxY,PCTPS);
getch();
closegraph();
exit(0);
}
flash2=Recupera_Grafica("herc.blw");
putimage(0,0,flash2,COPY_PUT);
settextstyle(1,0,5);
outtextxy(.80*MaxX,0.1*MaxY,T1);
outtextxy(.85*MaxX,0.3*MaxY,T2);
outtextxy(.90*MaxX,0.5*MaxY,T3);
settextjustify(CENTER_TEXT,CENTER_TEXT);
setusercharsize(1,2,7,12);
settextstyle(1,0,USER_CHAR_SIZE);
outtextxy(0.5*MaxX,0.95*MaxY, VER);
return;

}

void *Recupera_Grafica(char *nombregraf)
{
unsigned xsize,ysize,size;
FILE *f1;
void *tempimage;
if(!f1=fopen(nombregraf,"r"))==NULL
{
fclose(f1);
closegraph();
soni_err(300);
textcolor(1);
printf("No pudo abrirse el archivo %s ",nombregraf);
exit(0);
}
xsize=getc(f1){fgetc(f1)<<8};
ysize=getc(f1){fgetc(f1)<<8};
size=imagesize(0,0,xsize,ysize);
if(!tempimage=malloc(size))=NULL
{
fclose(f1);
```

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

```
closegraph();
soni_err(300);
textcolor(1);
cprintf("Memoria insuficiente para ejecutar BLW.EXE");
exit(0);
}
rewind(f1);
fread(tempimage,size,1,f1);
fclose(f1);
return tempimage;
}
void estg( char *men)
{
int xmult=1,ymult=1,xdiv=1,ydiv=1;
setviewport(0.13*getmaxx(),0.015*getmaxy(),0.87*getmaxx(),0.08*getmaxy(),1);
clearviewport();
setviewport(0,0,getmaxx(),getmaxy(),1);
settextjustify(CENTER_TEXT,CENTER_TEXT);
setusercharsize(xmult,xdiv,ymult,ydiv);
settextstyle(2,0,USER_CHAR_SIZE);
outtextxy(getmaxx()/2,0.04*getmaxy(),men);
}
void nombre_ejes(char *ejex,char *eje)
{
int MaxX,MaxY;
float ex=0.2;
MaxX=getmaxx();
MaxY=getmaxy();
setviewport(0,0,MaxX,MaxY,1);
if(MaxY<=199)
{
settextjustify(1,1);
setusercharsize(1,1,16,7);
settextstyle(2,1,USER_CHAR_SIZE);
outtextxy(0.5*ex*MaxX,MaxY*.5,eje);
settextstyle(2,0,5);
outtextxy(0.5*MaxX,0.93*MaxY,ejex);
settextstyle(2,0,4);
return;
}
settextstyle(2,1,4);
outtextxy(0.5*ex*MaxX,MaxY*.5,eje);
settextstyle(2,0,4);
outtextxy(0.5*MaxX,0.93*MaxY,ejex);
settextstyle(2,0,4);
}
}
```

RESULT.TES

```

#include <conio.h>
#include <graphics.h>
#include <ctype.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <dos.h>
#include <math.h>
#include <float.h>
#include <alloc.h>
#define ESC 27
#define BS 8
#define MSG "Por favor presione la tecla deseada "
#define PCTPC "Presione cualquier tecla para continuar "
#define PCTMA "Presione cualquier tecla para regresar al menú anterior "
#define PCTSP "Presione cualquier tecla para desplegar la siguiente pantalla "
#define EIMP "Encienda la impresora y presione cualquier tecla...ESC cancelar "
#define IMPNL "La impresora no está encendida. Presione cualquier tecla "
#define IMPRES "Imprimiendo resultados... ESC si desea detener la impresión "
#define IMPTERE "Impresión concluida... Espere "

```

```

float relatper(float SW,float Base,float Exponente);
float flujo_fraccional(float rel,float VISO, float VISW);
float derivada(float SW,float Base,float Exponente,float VISO,float VISW);
float distancia(float dhw,float Ap,float Wi,float Longitud);
float volumen(float Ap,float Xact,float SW,float Xant,float Swi);
float sat_media(float SW,float Qi,float fw);
float tiempo(float Qi,float Area,float Porosidad,float Longitud,float Gasto);
float produccion(float Area,float Porosidad,float Longitud,float Swa,float Swi);
float gasto(float Gasto,float fw);
float agua_aceite(float fw);
void pantalla(void);
void fondo(void);
void ve_etiedit(void);
void windcrlr(void);
void estado(char *Mensaje);
float valor(void);
void soni_err(int frec);
void soni_ter(void);
void setcursor(unsigned int forma);
int veri_imp(void);
void estg(char *men);
void Landscape_Graph(void);
void Portrait_Graph(void);
void escsw(float gx,float i,float MaxY);
void nombre_ejes(char *ejex,char *ejeY);

```

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

```
int resultados(float Base,float Exponente,float VISO,float VISW,float Area,float Porosidad,float Longitud,float Gasto,float  
Swi,float Sor,float tmax,float Qimax,float WORmax,float qomax,float Swfb,float Swfw,float N,float ffw,float mw)  
{
```

```
char res1,res2,chg1,chr2,chr3,chg2,chw,chgsp,chimp,chr4;  
float SW,Swa,tw,rel,dfw,Qi,t,Np,qo,WOR,rel,fwi;  
int Monitor,Modo,MaxX,MaxY,banda,pixdispx,pixdispy,niter=0;  
float ex,ey,abscisa,ordenada,espacy,gx,gy,i,ii,valorpre;  
float limin,limsup;  
int T;  
char *TIEMPO="TIEMPO [ DIAS ] *";  
char *VAC="V. A. DE AGUA [ AD. ]";  
char *RECUPERACION="RECUPERACION [ % ]";  
char *GASTO="GASTO DE ACEITE [ BPD ]";  
char *WR="WOR [ ADIMENSIONAL ] *";  
char *PESC=" PRESIONE ESC SI DESEA REGRESAR AL MENU ANTERIOR *";  
static char *MENURESULTADOS="\n\n N Numéricos\n\n G Gráficos\n\n ESC Menú  
anterior\n";  
static char *IMPESC=" I IMPRIMIR GRAFICA ESC REGRESAR AL MENU ANTERIOR *";  
static char *IMPNO="LA IMPRESORA NO ESTA LISTA. PRESIONE CUALQUIER TECLA";
```

```
etres1:  
_fpreset();  
window(1,1,80,25);  
fondo();  
window(22,9,54,16);  
textcolor(0);  
textbackground(3);  
clrscr();  
cputs(MENURESULTADOS);  
estado(MSG);  
for(;;){  
res1=toupper(getch());  
switch(res1)  
{  
case 'N':  
{  
etir2:  
window(1,1,80,25);  
fondo();  
window(22,9,54,16);  
textcolor(0);  
textbackground(3);  
clrscr();  
cputs("\n\n");  
cputs(" V Visualizar\n\n");  
cputs(" I Imprimir\n\n");  
cputs(" ESC Menú anterior\n\n");
```

```

estado(MSG);
for(;;)
{
res2=toupper(getch());
switch(res2)
{
case 'V':
{
setcursor(8192);
niter=0;
textcolor(7);
textbackground(2);
windclr();
cprintf("\nLa saturación en el frente por el método de Buckley y Leverett es ");
textcolor(0);
cprintf("%5.2f %%",Swfb);
textcolor(7);
cprintf("\n La saturación en el frente por el método de Welge es ");
textcolor(0);
cprintf("%5.2f %%\n",Swfw);
estado(PCTPC);
getch();
estado("");
windclr();
textcolor(WHITE);
setcursor(8192);
cputs("\n Sw Swa fw2 t Qi Np qo WOR \n");
cputs(" _____ \n");
cputs(" [ % ] [ días ] [ ad. ] [ bl ] [ BPD ] [ ad. ]\n");
window(4,10,76,21);
clrscr();
SW=ceil(Swfw)-1;
Swa=0.0;
fw=0.0;
while(!kbhit())
{
etir3;
SW+=1.;
if(Swa>100-Sor || SW>100-Sor || fw>99)
{
soni_ter();
textcolor(7);
if(Swa>100-Sor)cputs("\n La saturación media alcanzó el valor de 100 - Sor
%");
if(SW>100-Sor )cputs("\n La saturación de agua alcanzó el valor de 100 - Sor
%");
if(fw>99) cputs("\n El flujo fraccional de agua alcanzó el valor de 100 % ");
estado(PCTMA);
}
}
}
}
}

```

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

```
        getch();
windclr();
        goto etir2;
    }

    rel=relatper(SW,Base,Exponente);
    fw=flujo_fraccional(rel,VISO,VISW);
    dfw=derivada(SW,Base,Exponente,VISO,VISW);
    Qi=(float)1/dfw;
    Swa= sat_media(SW, Qi, fw);
    t= tiempo(Qi,Area,Porosidad, Longitud, Gasto);
    Np= produccion( Area, Porosidad,Longitud,Swa, Swi);
    qo= gasto(Gasto, fw);
    WOR= agua_aceite(fw);
    textcolor(0);
    setcursor(8192);
    fprintf("%5.2f\n",SW,Swa,fw,t,Qi,Np,qo,WOR);
    niter++;
    if(niter==10 | niter==20 | niter==30 | niter==40)
    {
        estado(PCTSP);
        getch();
        estado("");
        window(4,10,76,21);
        textcolor(0);
        clrscr();
    }

    chr2=getch();
    setcursor(1543);
    switch(chr2){
        case ESC:windclr(); goto etir2;
        default: goto etir3;
    }

}
case 'I':
{
    textcolor(0);
    textbackground(2);
    inicimp;
    windclr();
    estado(EIMP);
    chimp=getch();
    switch(chimp)
    {
```

```

case ESC:goto etir2;
default:break;
}
if(veri_imp()==-1)
{
soni_err(400);
estado(IMPNL);
getch();
goto inicimp;
}
fprintf(stdprn, "\x0D");
fprintf(stdprn, " Resultados generados por BLW\n\n");
fprintf(stdprn, "\n La saturación en el frente por el método de Buckley y Leverett es
%5.2f (%%,Swfb);
\n\n",Swfw);

estado(IMPRES);
fprintf(stdprn, " S S f t Q N q WOR ");
fprintf(stdprn, "\x1B%c%c",83,1);
fprintf(stdprn, "\x0D");
fprintf(stdprn, " w wa w2 i p o \n");
fprintf(stdprn, "\x1B%c",84);
fprintf(stdprn, " _____ \n");
fprintf(stdprn, " [%] [ días ] [ ad. ] [ bl ] [ BPD ] [ ad. ]\n\n");
SW=call(Swfw)-1;
Swa=0.0;
fw=0.0;
while(kbhit())
{
etir4;
SW+=1.;
if(Swa>100 -Sor || SW>100-Sor || fw>99)
{
soni_err();
window(4,4,76,21);
if(Swa>100-Sor)fprintf(stdprn, "\n La saturación media alcanzó el valor de 100 -
Sor % \n");
if(SW>100-Sor )fprintf(stdprn, "\n La saturación de agua alcanzó el valor de
100 - Sor %\n");
if(fw>99) fprintf(stdprn, "\n El flujo fraccional de agua alcanzó el valor de
100 % \n");

estado(IMPTERE);
sleep(4);
estado(PCTMA);
getch();
}
windclr();
goto etir2;
}

```


Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

```
rel=relatper(SW,Base,Exponente);
fw=flujo_fraccional(rel,VISO,VISW);
dfw=derivada(SW,Base,Exponente,VISO,VISW);
Qi=(float)1/dfw;
Swa= sat_media(SW, Qi, fw);
t= tiempo(Qi,Area,Porosidad, Longitud, Gasto);
Np= produccion( Area, Porosidad,Longitud,Swa, Swi);
qo= gasto(Gasto, fw);
WOR= agua_aceite(fw);
fprintf(stdprn," %5.2f %5.2f %5.2f %7.0f %6.2f %10.0f %7.1f %5.2f
\n",SW,Swa,fw,t,Qi,Np,qo,WOR);

    }
    chr3=getch();
    switch(chr3)
    {
        case ESC: goto etir2;
        default: goto etir4;
    }
}

case ESC: goto etres1;
case 0x00:{
    res2=loupper(getch());
    switch(res2)
    {
        default:{
            soni_err(1000);
            continue;
        }
    }
    default:soni_err(1000);continue;
}

}
}

case 'G':
{
    clrscr();
    if(Inicializa(2)==-1)goto etres1;
    MaxX=getmaxx();
    MaxY=getmaxy();
    ex=0.2;
    ey=0.2;
    if(tmax<1)
```

```

    {
        tmax=1;
        limin=0.1;
    }
    else
    {
        for(T=0;T<20;T++)
        {
            limin=pow(10,T);
            limsup=pow(10,(T+1));
            if((tmax>limin & tmax<=limsup)
            {
                tmax=(ceil(tmax/limin))*limin;
                break;
            }
            else continue;
        }
    }

    etg1:
    setlinestyle(SOLID_LINE,1,NORM_WIDTH);
    settextstyle(0,0,1);
    setviewport(0,0,MaxX,MaxY,1);
    rectangle(MaxX*ex,MaxY*ey,MaxX*(1-ex),MaxY*(1-ey));
    setviewport(MaxX*ex,MaxY*ey,MaxX*(1-ex),MaxY*(1-ey),1);
    espacdy=MaxY*2*ey;
    banda=(int)espacdy/6;
    outtextxy(0.08*MaxX,0.1*MaxY+0.5*banda," G GENERAR GRAFICAS");
    outtextxy(0.08*MaxX,0.1*MaxY+1.5*banda," ESC SALIR MODO GRAFICO");
    for(;;){
        chg1=loupper(getch());
        switch(chg1)
        {
            case 'G':
                {
                    etg2:
                    clearviewport();
                    setviewport(0,0,MaxX,MaxY,1);
                    rectangle(MaxX*ex,MaxY*ey,MaxX*(1-ex),MaxY*(1-ey));
                    setviewport(MaxX*ex,MaxY*ey,MaxX*(1-ex),MaxY*(1-ey),1);
                    pixdispX=MaxX*.8-MaxX*ex;
                    pixdispY=MaxY*(1-ey)-MaxY*.1;
                    settextstyle(2,0,4);
                    settextjustify(LEFT_TEXT,TOP_TEXT);
                    outtextxy(0.08*MaxX,0.06*MaxY,"1.- SATURACION - FLUJO FRACCIONAL (Sw - fw)");
                    outtextxy(0.08*MaxX,0.06*MaxY+0.5*banda,"2.- TIEMPO - VOLUMEN ACUMULATIVO (t - Qi)");
                    outtextxy(0.08*MaxX,0.06*MaxY+banda,"3.- TIEMPO - RECUPERACION (t - Np/N)");
                    outtextxy(0.08*MaxX,0.06*MaxY+1.5*banda,"4.- TIEMPO - GASTO DE ACEITE (t - qo)");
                    outtextxy(0.08*MaxX,0.06*MaxY+2*banda,"5.- TIEMPO - RELACION AGUA / ACEITE (t - WOR)");
                }
            }
        }
    }

```

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

```
outtextxy(0.08*MaxX,0.06*MaxY+2.5*banda,"ESC MENU ANTERIOR");

for(;;){
    chg2=getch();
    valrepre=0.0;
    ii=0.0;
    switch(chg2)

    {
        case '1':{
            clearviewport();
            setviewport(0,0,MaxX,MaxY,1);
            rectangle(0.03*MaxX,1,0.97*MaxX,MaxY);
            estg(PESC);
            setviewport(0,0,MaxX,MaxY,1);
            rectangle(MaxX*ex,MaxY*.1,MaxX*.8,MaxY*(1-ey));
            setviewport(MaxX*ex,MaxY*.1,MaxX*.8,MaxY*(1-ey),0);
            SW=0.0;
            gx=(float)pixdispx/100;
            gy=(float)pixdispy/100;
            _fpreset();
            for(i=0;i<=100;i+=10)
            {
                settxtjustify(CENTER_TEXT,CENTER_TEXT);
                line(gx*i,(MaxY*(1-ey*0.98)-MaxY*.1),gx*i,(MaxY*(1-ey)-MaxY*.1)*1.03);
                escsw(gx,i,MaxY);
            }
            nombre_ejes["SATURACION DE AGUA [%]","FLUJO FRACCIONAL DE AGUA [%]"];
            setviewport(0,0,MaxX,MaxY,1);
            for(i=0;i<=100;i+=10) line(0.95*ex*MaxX,MaxY*0.1+gy*i,MaxX*ex,MaxY*0.1+gy*i);
            for(i=0;i<=100;i+=10)outtextxy(0.8*MaxX*ex,MaxY*0.1+gy*i,gcvt((100-i),4,""));
            setviewport(MaxX*ex,MaxY*.1,MaxX*.8,MaxY*(1-ey),1);
            settxtjustify(LEFT_TEXT,TOP_TEXT);

            while(!kbhit())
            {
                etfw;
                SW+=0.015;
                if(SW>100){
                    fwi=mw*Swi+(fwhw-mw*Swfw);
                    moveto(gx*Swi,pixdispy-gy*fwi);
                    lineto(gx*((100-(fwhw-mw*Swfw))/mw),0);
                    goto etfg7;
                }
                else{
                    rel=relatper(SW,Base,Exponente);
                    fw=flujo_fraccional(rel,VISO,VISW);
                    abscisa=(gx*SW);
```

```

ordenada=pixdispy-gy*fw;
putpixel(ceil(abcisca),ceil(ordenada),7);
continue;
}

}
chfw=getch();
switch(chfw)
{
case ESC:cleardevice();
        goto eig2;
default:goto etfw;
}

case '2':
case '3':
case '4':
case '5':
{
    gx=(float)pixdisp/txmax;
    _fpreset();
    clearviewport();
    setviewport(0,0,MaxX,MaxY,1);
rectangle(0.03*MaxX,1,0.97*MaxX,MaxY);
estig(PESC);
setviewport(0,0,MaxX,MaxY,1);
rectangle(MaxX*ex,MaxY*.1,MaxX*.8,MaxY*(1-ey));

setviewport(0,0,MaxX,MaxY,1);
for(i=0;j<=lmax;j+=limin)
{
line(MaxX*ex+gx*i,MaxY*(1-ey),MaxX*ex+gx*i,MaxY*(1-ey)*1.03);
outtextxy(MaxX*ex+gx*i,MaxY*(1-ey)*1.06,gcv(ceil(i),7,""));
}
switch(chg2)
{
case '2':nombre_ejes(TIEMPO , VAC);
        gy=(float)pixdispy/Qimax;
        _fpreset();
        valrepre=0.0;
        ii=0.0;
        valrepre=(float)Qimax/10;
        for(i=0;i<11;i++)
        {
            ii=(float)i*valrepre;
            line(0.95*ex*MaxX,MaxY*0.1+gy*ii,MaxX*ex,MaxY*0.1+gy*ii);
            if((Qimax-ii)<=0.0001){
                outtextxy(0.8*MaxX*ex,MaxY*0.1+gy*ii,gcv(0,1,(char ")));
            }
        }
    }
}

```

```
break;
}
else outtextxy(0.8*MaxX*ex,MaxY*0.1+gy*ii,gcvt((Qimax-ii),4,(char *)"));
}
break;
case '3': nombre_ejes(TIEMPO,RECUPERACION);
gy=(float)pixdispy/100;
_fpresel();
valrepre=0.0;
ii=0.0;
for(i=0;i<=100;i+=10)
{
line(0.95*ex*MaxX,MaxY*0.1+gy*i,MaxX*ex,MaxY*0.1+gy*i);
outtextxy(0.8*MaxX*ex,MaxY*0.1+gy*i,gcvt((100-i),4,(char *)"));
}
break;
case '4': nombre_ejes(TIEMPO,GASTO);
gy=(float)pixdispy/qomax;
_fpresel();
valrepre=0.0;
ii=0.0;
valrepre=(float)qomax/10;
for(i=0;i<11;i++)
{
ii=(float)i*valrepre;
line(0.95*ex*MaxX,MaxY*0.1+gy*ii,MaxX*ex,MaxY*0.1+gy*ii);
if((qomax-ii)<=0.00001)
{
outtextxy(0.8*MaxX*ex,MaxY*0.1+gy*ii,gcvt(0,1,(char *)"));
break;
}
}
if((qomax-ii)>=10.0)outtextxy(0.8*MaxX*ex,MaxY*0.1+gy*ii,gcvt(ceil((qomax-ii)),4,(char *)"));
else outtextxy(0.8*MaxX*ex,MaxY*0.1+gy*ii,gcvt((qomax-ii),4,(char *)"));
}
break;
case '5': nombre_ejes(TIEMPO ,WR );
gy=(float)pixdispy/WORmax;
_fpresel();
valrepre=0.0;
ii=0.0;
valrepre=(float)WORmax/10;
for(i=0;i<11;i++)
{
ii=(float)i*valrepre;
line(0.95*ex*MaxX,MaxY*0.1+gy*ii,MaxX*ex,MaxY*0.1+gy*ii);
if((WORmax-ii)<=0.00001){
outtextxy(0.8*MaxX*ex,MaxY*0.1+gy*ii,gcvt(0,1,(char *)"));
break; }
}
```

```

        if((WORmax-ii)>=10.0)outtextxy(0.8*MaxX*ex,MaxY*0.1+gy*ii,gcvt(ceil((WORmax-ii),5,(char *)""));
        else outtextxy(0.8*MaxX*ex,MaxY*0.1+gy*ii,gcvt((WORmax-ii),5,(char *)""));
    }
    break;
}
setviewport(MaxX*ex,MaxY*.1,MaxX*.8,MaxY*(1-ey),1);
SW=Swfw;
Swa=0.0;
fw=0.0;
niter=0;
while(!kbhit())
{
    etg3;
    SW+=.1;
    if(Swa>100-Sor || SW>100-Sor || fw>99) goto etg7;
    rel=relatper(SW,Base,Exponente);
    fw=flujo_fraccional(rel,VISO,VISW);
    dfw=derivada(SW,Base,Exponente,VISO,VISW);
    Qi=(float)1/dfw;
    Swa= sat_media(SW, Qi, fw);
    t= tiempo(Qi,Area,Porosidad, Longitud, Gasto);
    Np= produccion( Area, Porosidad,Longitud,Swa, Swi);
    qo= gasto(Gasto, fw);
    WOR= agua_aceite(fw);
    niter++;
    switch(chg2)
    {
        case '2':
            abscisa=(gx*1);
            ordenada=pixdispy-gy*Qi;
            if(niter==1)
            {
                moveto(0,pixdispy);
                lineto(ceil(abscisa),ceil(ordenada));
            }
            lineto(ceil(abscisa),ceil(ordenada));
            putpixel(ceil(abscisa),ceil(ordenada),7);
            continue;

        case '3' :
            abscisa=(gx*1);
            ordenada=pixdispy-gy*(Np/N)*100;
            if((Np/N)>99)goto etg7;
            if(niter==1)
            {
                moveto(0,pixdispy);
                lineto(ceil(abscisa),ceil(ordenada));
            }
    }
}

```

```
    }
    lineto(ceil(abcscisa),ceil(ordenada));
    putpixel(ceil(abcscisa),ceil(ordenada),7);
    continue;

case '4' :
    abcscisa=(gx*1);
    ordenada=pixdispy-gy*qq;
    if(niter==1)
    {
        moveto(abcscisa,0);
        lineto(ceil(abcscisa),ceil(ordenada));
    }
    lineto(ceil(abcscisa),ceil(ordenada));
    putpixel(ceil(abcscisa),ceil(ordenada),7);
    continue;

case '5':
    abcscisa=(gx*1);
    ordenada=pixdispy-gy*WOR;
    if(niter==1)
    {
        moveto(0,pixdispy);
        lineto(ceil(abcscisa),ceil(ordenada));
    }
    lineto(ceil(abcscisa),ceil(ordenada));
    putpixel(ceil(abcscisa),ceil(ordenada),7);
    continue;
}
}
chr4=getch();
switch(chr4)
{
case ESC:cleardevice();goto etg2;
default: goto etg3;
}

etg7:
soni_ler();
eslg(IIMPESC);
for(;;){
chgsp=toupper(getch());
switch(chgsp)
{
case '!':if(veri_imp()==1)
{
soni_err(400);
eslg(IIMPNO);
getch();

```

```
        estg(IMPESC);
        break;
    }
    if(MaxX<=640 & MaxY<=200)Portrait_Graph();
    else Landscape_Graph();
    estg(IMPESC);
    continue;
case ESC:goto etg2;
default:soni_err(1000);continue;
}
}

case ESC:clearviewport();goto etg1;
case 0x00:{
    chg2=loupper(getch());
    switch(chg2)
    {
        default:{
            soni_err(1000);
            continue;
        }
    }
}
default:soni_err(1000);continue;
}
}

case ESC: closegraph();
        pantalla();
        goto etres1;
case 0x00:{
    chg1=loupper(getch());
    switch(chg1)
    {
        default:{
            soni_err(1000);
            continue;
        }
    }
}
default:soni_err(1000);continue;
}
}

case ESC :return 0;
```


Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

```
    case 0x00:{
        res1=tolower(getch());
        switch(res1)
        {
            default:{
                soni_err(1000);
                continue;
            }
        }
        default:soni_err(1000);continue;
    }
}
}
```

SALIR.TES

```
#include <conio.h>
#include <process.h>
#include <ctype.h>
#define NOHSAL "La información no se ha salvado. ¿ Desea salir ? (S / N) "

int salir (int PROCESDAT,int SALVADAT,int RECU,int EDITDAT,float *Sw,float *Kw,float *Ko,float *RELP,float *LR,float
*Sw_LR,float *hol)
{
char esch;

if(!PROCESDAT)
{
window(1,1,80,25);
clrscr();
textmode(LASTMODE);
clrscr();
exit(0);
}
if(SALVADAT==2 | RECU==1)goto termina;
if(SALVADAT==1 & RECU ==0)goto sal;
if(SALVADAT==1 & PROCESDAT==1)goto sal;
if(SALVADAT==1 & EDITDAT==1)goto sal;
sal:
soni_err(1000);
windclr();
estado(NOHSAL);
for(;;)
```

```

    {
    esch=toupper(getch());
    if (esch=='S')break;
    if (esch=='N')return 1;
    else{ soni_err(300);
        continue;}
    }

termina:
window(1,1,80,25);
clrscr();
textmode(LASTMODE);
clrscr();
libera_memoria(Sw,Kw,Ko,RELP,LR,Sw_LR,hol);
exit(0);
}

```

SALVADAT.TES

```

#include <conio.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <io.h>
#include <ctype.h>
#include <dos.h>
#include <stdlib.h>
#define NOMSAL "Introduzca el nombre del archivo a salvar. ESC si desea regresar "
#define YAEXIST "El archivo ya existe. ¿ Salvar ? ( S / N ) "
#define NOCREA "No pudo crearse el archivo. Presione cualquier tecla "
#define SALVA "Salvando información... Espere "
#define ALMAC "La información se ha salvado. Presione cualquier tecla "
static char *arc2;
char *nombre_de_archivo(void);
void estado(char *Mensaje);

int salvar_datos(float num,float *Sw,float *Kw,float *Ko,float Porosidad,float Area,float Longitud,float Gasto,float Swi,float
VISW,float Sor,float VISO,int unidad)
{
int i;
char *arc1;
char sav;
FILE *ft;
clrscr();
estado(NOMSAL);
window(4,4,76,21);
textcolor(5);

```

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de ...

```
gotoxy(5,17);
cprint("Nombre : ");
gotoxy(18,17);

arc1=nombre_de_archivo();
if(!strcmp(arc1,""))
{
clrscr();
return 0;
}
arc2=arc1;
if((disco(arc1.unidad)==-1)return 0;
if(!access(arc1,0))
{
windclr();
soni_err(300);
window(1,1,80,25);
gotoxy(1,23);
textcolor(WHITE);
textbackground(2);
cputs(" |nv");
window(1,1,80,24);
gotoxy(1+(80-strlen(YAEXIST))*0.5,23);
textcolor(YELLOW);
cputs(YAEXIST);
for(;;){
sav=loupper(getch());
switch(sav)
{
case 'N':return 0;
case 'S':break;
default:soni_err(1000);continue;
}
break;
}
}

if(!((f1=fopen(arc1,"wb"))==NULL)
{
windclr();
soni_err(300);
estado(NOCREA);
getch();
return 0;
}
estado(SALVA);
sleep(2);
fprintf(f1,"%f");
```

```
fprintf(f1, "\n");

fprintf(f1, "%d\n", (int)num);
for(i=0; i<num; i++)
{
    fprintf(f1, "%f\n", Sw[i]);
}
for(i=0; i<num; i++)
{
    fprintf(f1, "%f\n", Kw[i]);
}
for(i=0; i<num; i++)
{
    fprintf(f1, "%f\n", Ko[i]);
}
fprintf(f1, "%f\n", Porosidad);
fprintf(f1, "%f\n", Swi);
fprintf(f1, "%f\n", Sor);
fprintf(f1, "%f\n", Longitud);
fprintf(f1, "%f\n", Area);
fprintf(f1, "%f\n", Gasto);
fprintf(f1, "%f\n", VIS0);
fprintf(f1, "%f\n", VISW);
fflush(f1);
fclose(f1);
windclr();
estado(ALMAC);
getch();
windclr();
return 1;
}
```

APLICACION DEL PROGRAMA

Para aplicar el programa se seleccionaron dos ejemplos que tienen diferente tendencia en la forma de la curva saturación de agua - flujo fraccional de agua. En el segundo ejemplo, como podrá verse en los resultados, la saturación crítica de agua es muy alta y es básicamente lo que proporciona dicha diferencia.

Los datos de los ejemplos pueden encontrarse en las siguientes referencias :

- 1.- Craig, Forrest F. " *The reservoir engineering aspects of waterflooding* " SPE - AIME . © 1971.
- 2.- Willhite, G. Paul. " *Waterflooding* " Society of Petroleum Engineers. © 1986.

Ejemplo 1

Los datos proporcionados son los siguientes :

Subíndice	S_{iw} [%]	K_{rw} [%]	K_{ro} [%]
1	10	0.0	100.0
2	30	7.0	37.3
3	40	16.9	21.0
4	45	22.6	14.8
5	50	30.0	10.0
6	55	37.6	6.1
7	60	47.6	3.3
8	65	60.0	1.2
9	70	74.0	0.0

Porosidad = 20 %

Saturación inicial de agua = 10 %

Viscosidad del agua = 0.5 cp

Viscosidad del aceite = 1.0 cp

Puede verse que para la primera y última saturaciones, alguno de los valores de permeabilidad relativa es igual a cero; como la división entre cero no está definida, solamente se consideran los valores mayores a cero. Los valores que no se consideran aparecen sombreados. Lo mismo sucede con los datos del siguiente ejemplo.

En este ejemplo no se proporcionan todos los datos que requiere BLW, sin embargo pueden suponerse ya que, como se verá posteriormente, éstos no son esenciales. Los datos supuestos son :

Area = 1000 pie²

Longitud 6000 pie

Gasto = 300 BPD

Saturación residual de aceite = 20 %

Resultados numéricos

Se presenta el valor de la saturación de agua en el frente obtenido por ambos métodos y una tabla que contiene una estimación del comportamiento del desplazamiento después de la surgencia. Dicha estimación termina cuando alguno de los valores de las tres primeras columnas sea mayor o igual a su límite máximo ($100 - S_{or}$) para las saturaciones y 100 % para el flujo fraccional) .

Saturación de agua en el frente por el método de Buckley y Leverett : 47.31 %

Saturación de agua en el frente por el método de Welge : 48.05 %

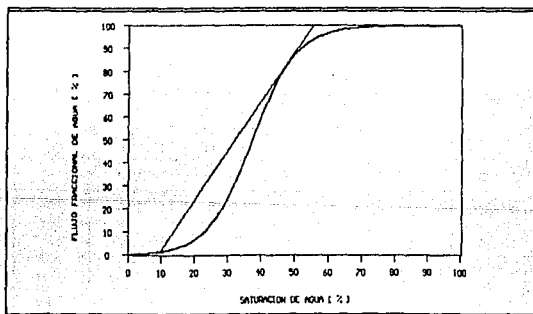
S_w [%]	S_{wa} [%]	f_{w2} [%]	t [días]	Q_i [ad.]	N_p [bl]	q_o [BPD]	WOR [ad.]
49.00	56.60	85.77	382	0.53	99675	42.7	6.03
50.00	57.44	87.54	426	0.60	101485	37.4	7.03
51.00	58.31	89.12	479	0.67	103342	32.6	8.19
52.00	59.20	90.52	542	0.76	105239	28.4	9.55
53.00	60.10	91.76	615	0.86	107170	24.7	11.14
54.00	61.02	92.85	700	0.98	109131	21.5	12.98
55.00	61.95	93.80	799	1.12	111118	18.6	15.14
56.00	62.89	94.64	916	1.28	113126	16.1	17.65

57.00	63.83	95.37	1051	1.47	115152	13.9	20.58
58.00	64.79	96.00	1210	1.70	117195	12.0	23.99
59.00	65.75	96.55	1394	1.96	119251	10.4	27.97
60.00	66.72	97.02	1609	2.26	121320	8.9	32.60
61.00	67.69	97.44	1860	2.61	123398	7.7	38.01
62.00	68.66	97.79	2153	3.02	125485	6.6	44.31
63.00	69.64	98.10	2495	3.50	127579	5.7	51.66
64.00	70.63	98.37	2893	4.06	129680	4.9	60.23
65.00	71.61	98.60	3357	4.71	131786	4.2	70.22
66.00	72.60	98.79	3898	5.47	133897	3.6	81.87
67.00	73.59	98.96	4528	6.35	136011	3.1	95.44
68.00	74.58	99.11	5264	7.38	138130	2.7	11.27

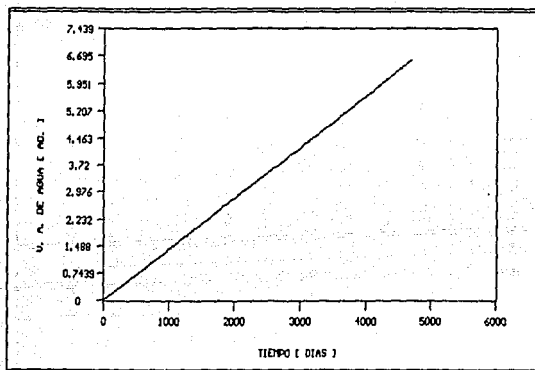
En este caso es el flujo fraccional de agua el que primero llega a su límite.

Resultados gráficos

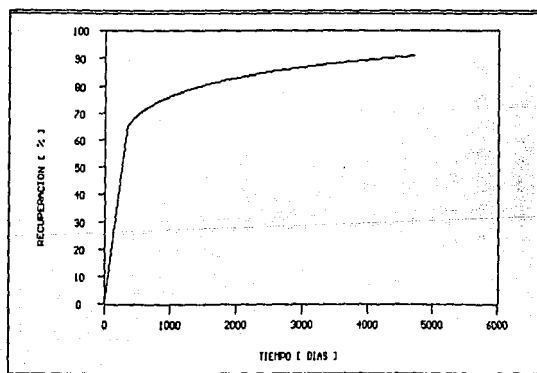
Una mejor forma para presentar los resultados son las gráficas que proporciona BLW. Se presentan las cinco gráficas disponibles.



GRAFICA 20.- Curva saturación de agua - flujo fraccional de agua. Ejemplo 1

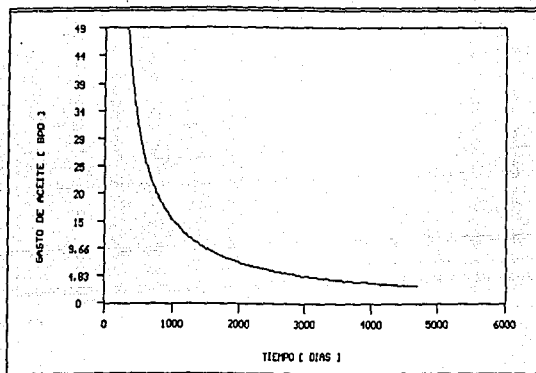


GRAFICA 21.- Curva tiempo - volumen acumulado de agua. Ejemplo 1

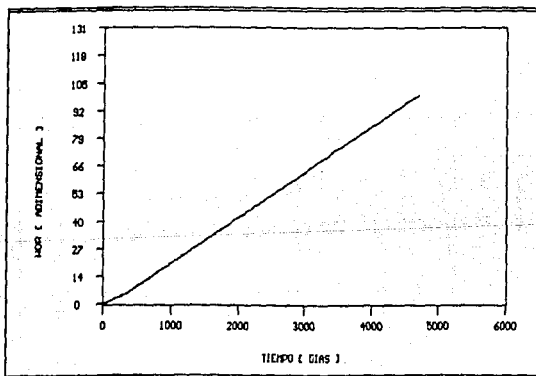


GRAFICA 22.- Curva tiempo - recuperación. Ejemplo 1

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .



GRAFICA 23.- Curva tiempo - gasto de aceite. Ejemplo 1



GRAFICA 24.- Curva tiempo - WOR. Ejemplo 1

Ejemplo 2

Datos:

Subíndice	S_w [%]	K_{rw} [%]	K_{ro} [%]
1	36.3	0.0	100.0
2	38.0	0.0	90.2
3	40.0	0.0	79.5
4	42.0	0.0	69.6
5	44.0	0.1	60.5
6	46.0	0.3	52.2
7	48.0	0.6	44.5
8	50.0	1.1	37.7
9	52.0	1.8	31.5
10	54.0	2.8	26.0
11	56.0	4.2	21.0
12	58.0	6.0	16.8
13	60.0	8.4	13.1
14	62.0	11.3	9.9
15	64.0	14.9	7.3
16	66.0	19.4	5.1
17	68.0	24.7	3.4
18	70.0	31.0	2.1
19	72.0	38.4	1.1
20	74.0	47.0	0.5
21	76.0	57.0	0.2
22	79.5	78.0	0.0

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

Para este ejemplo, y dado que BLW puede aceptar como máximo 15 valores de la tabla, se descartan los subíndices 20 y 21 aun cuando no contienen ningún valor igual a cero.

Ancho = 300 pie
Espesor = 20 pie
Largo = 1000 pie
Porosidad = 15 %
Saturación inicial de agua = 36.3 %
Gasto de agua = 338 BPD
Viscosidad del agua = 1.0 cp
Viscosidad del aceite = 2.0 cp
Saturación de aceite residual = 20.5 %

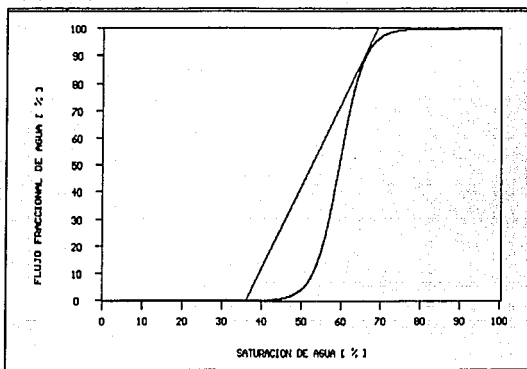
Resultados numéricos

Saturación de agua en el frente por el método de Buckley y Leverett : 65.87 %

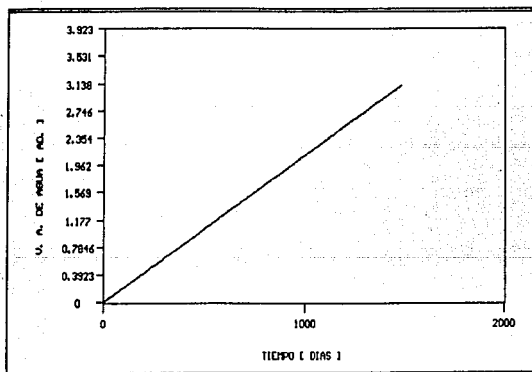
Saturación de agua en el frente por el método de Welge : 66.09 %

S_w [%]	S_{wa} [%]	f_{w2} [%]	t [días]	Q_i [ad.]	N_p [bl]	q_w [BPD]	WOR [ad.]
67.00	70.28	92.49	208	0.44	54520	25.4	12.32
68.00	71.22	94.48	277	0.58	56014	18.7	17.12
69.00	72.17	95.97	373	0.78	57538	13.6	23.79
70.00	73.13	97.06	506	1.07	59085	9.9	33.07
71.00	74.10	97.87	692	1.46	60648	7.2	45.96
72.00	75.09	98.46	950	2.00	62222	5.2	63.88
73.00	76.07	98.89	1309	2.76	63805	3.8	88.79
74.00	77.06	99.20	1808	3.81	65394	2.7	123.41

Resultados gráficos

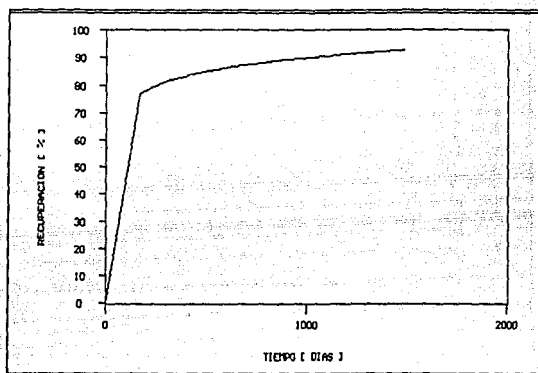


GRAFICA 25.- Curva saturación de agua - flujo fraccional de agua. Ejemplo 2

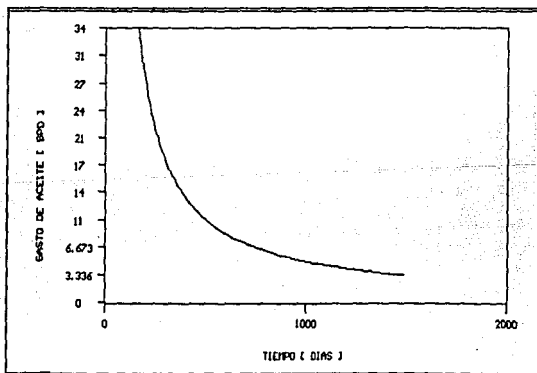


GRAFICA 26.- Curva tiempo - volumen acumulativo de agua. Ejemplo 2

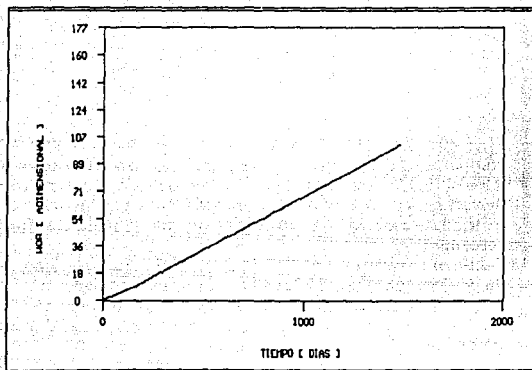
Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de ...



GRAFICA 27.- Curva tiempo - recuperación. Ejemplo 2



GRAFICA 28.- Curva tiempo - gasto de aceite. Ejemplo 2



GRAFICA 29.- Curva tiempo - WOR. Ejemplo 2

CAPITULO VIII

ANALISIS DE RESULTADOS

Una vez que se han obtenido los resultados, se presenta una tabla comparativa de los valores presentados en las referencias bibliográficas y los obtenidos mediante la aplicación de BLW. Se comparan los valores de saturación en el frente por ambos métodos, y los valores del volumen acumulativo de agua y saturación media de agua con los valores más cercanos.

También se hace un análisis de sensibilidad para el ejemplo 1, con el fin de determinar, y tener bases para apoyar la suposición de datos no disponibles, las variables que afectan a los valores de saturación en el frente y que son las indispensables para utilizar BLW, y en general las ecuaciones que se presentan en los capítulos III, IV y V. Se aplicará un incremento de $\pm 50\%$ del valor de cada variable afectada, excepto para las saturaciones de agua y sus respectivos valores de permeabilidades porque, como se indicó en el capítulo I, éstos sí afectan el comportamiento del desplazamiento.

VIII.1. Ejemplo 1

<i>Referencia</i>			<i>BLW</i>			
<i>S_{wfb}</i>	---		47.30			
<i>S_{wfu}</i>	46.9		48.05			
<i>S_w</i>	<i>Q_i</i>	<i>S_{wa}</i>	<i>S_w</i>	<i>Q_i</i>	<i>S_{wa}</i>	
49.5	0.572	58.2		50.0	0.60	57.44
52.0	0.711	60.0		52.0	0.76	59.20
59.7	1.540	65.2		60.0	2.26	66.72
67.4	5.130	69.4		68.0	7.38	74.58

VIII.1.1. Análisis de sensibilidad

Se aplicará un incremento de $\pm 50\%$ a la porosidad, área del medio poroso y su longitud, gasto de inyección, saturación inicial de agua, saturación residual de aceite y a la viscosidad de ambos fluidos. Se toman como base los valores $S_{wf} = 47.32\%$ y $S_{wfw} = 48.05\%$.

Variable	- 50 %		+ 50 %		¿ Afecta ?
	S_{wf}	S_{wfw}	S_{wf}	S_{wfw}	
ϕ	47.32	48.05	47.32	48.05	No
A	47.32	48.05	47.32	48.05	No
L	47.32	48.05	47.32	48.05	No
q_i	47.32	48.05	47.32	48.05	No
S_{or}	47.41	47.97	47.33	48.04	No
S_{wi}	48.51	49.13	45.76	46.70	Sí
μ_w	41.43	42.38	50.62	51.29	Sí
μ_o	52.91	53.54	44.92	44.72	Sí

Como puede verse en la tabla anterior, solamente 3 factores afectan el valor de saturación de agua en el frente y son la viscosidad del agua y aceite y la saturación inicial de agua; en el caso de la saturación residual de aceite se tiene una pequeña diferencia que es debida a la forma en que la computadora maneja la aritmética de punto flotante.

VIII.2. Ejemplo 2

Referencia			BLW		
S_{wf}	—		65.87		
S_{wfw}	66.5		66.09		
S_w	Q_i	S_{wa}	S_w	Q_i	S_{wa}
67.0	0.379	70.3	67.0	0.44	70.28

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

68.0	0.516	71.3
69.0	0.660	72.1
70.0	0.938	73.0
71.0	1.130	73.6
72.0	1.313	74.1
73.0	2.000	75.0

68.0	0.58	71.22
69.0	0.78	72.17
70.0	1.07	73.13
71.0	1.46	74.10
72.0	2.00	75.09
73.0	2.76	76.06

La comparación de los valores de las referencias con los generados por BLW, sirve para determinar si los últimos están dentro de un rango aceptable; es decir, si la variación entre unos y otros no es considerable. No puede decirse cuáles son los correctos porque no fueron obtenidos bajo las mismas circunstancias. Puede notarse que el rango es pequeño, por lo que se intuye que los valores generados por BLW son aceptables.

Del análisis de sensibilidad se estableció que solamente 3 son los factores de consideración; la pregunta que se puede plantear es ¿ cómo, o en qué, afectan los factores que no alteran el valor de saturación de agua en el frente, al comportamiento del desplazamiento ?

Todos estos factores tienen relación directa con el volumen de agua inyectado; por lo tanto, afectan de manera directa el tiempo máximo de recuperación. La porosidad, área y longitud del medio poroso son directamente proporcionales a dicho tiempo; en cambio mientras más alto sea el gasto de inyección más rápido se presentará la surgencia. Sin embargo, el gasto máximo de inyección está supeditado a la capacidad física de inyección y a la presión de fractura de la formación, lo que evita que el gasto se incremente indiscriminadamente.

CONCLUSIONES

Y

RECOMENDACIONES

BLW permite la edición de la información con el fin de variarla, para poder analizar como afecta al desplazamiento. Después de que se ha probado la aceptabilidad de resultados, y con base en el desarrollo teórico, se está en posibilidad de emitir algunas conclusiones:

- Todas la ecuaciones, y el programa mismo, están desarrollados considerando que el agua desplaza al aceite. Sin embargo, esto no es motivo para no poderlo aplicar al desplazamiento de aceite por gas. Las adecuaciones que deben hacerse son cambiar los subíndices w por g y considerar que $S_{gi} = 0$. En realidad debe ser mayor a cero para poder utilizar BLW.
- El valor de saturación de agua en el frente es función únicamente de 5 factores, que son :
 - 1.- Saturación de agua.
 - 2.- Permeabilidades, efectivas o relativas.
 - 3.- Saturación inicial de agua.
 - 4.- Viscosidad del agua.
 - 5.- Viscosidad del aceite.
- Si no se conocen los datos restantes para utilizar BLW, pueden suponerse, dentro del rango que permite éste, valores razonablemente reales.

Utilizando la información del ejemplo 1 se afectaron los valores de la viscosidad de ambos fluidos para observar el comportamiento de todas las gráficas.

- Entre mayor sea la viscosidad del agua :
 - ▶ Mayor es la saturación de agua en el frente.
 - ▶ Mayor es la saturación crítica de agua.
 - ▶ Menor tiempo máximo de recuperación.
 - ▶ La recuperación de aceite tiende a 100 %.
 - ▶ El tiempo de convergencia de BLW es menor.

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

- Entre mayor sea la viscosidad del aceite :
 - Menor es la saturación de agua en el frente.
 - Menor es la saturación crítica de agua.
 - Mayor tiempo máximo de recuperación.
 - La recuperación es menor.
 - El tiempo de convergencia de BLW es mayor.
- El empleo de gráficas permite conocer, en una sola página, la variación de un parámetro conforme avanza el desplazamiento.
- Las curvas $t - Q_i$ y $t - WOR$ se mantienen constantes, en el eje de las ordenadas, sin importar el grado de variación que se haga de los factores no básicos.
- BLW considera que la eficiencia del desplazamiento es de 100 %, por esto la curva $t - recuperación$ puede alcanzar el valor máximo, es decir, el 100 % de aceite móvil.

Se recomienda que todos los datos que se puedan expresar como porcentaje se introduzcan de esta manera a BLW para minimizar los errores de redondeo que son inherentes a la computadora. De ser posible utilice un monitor diferente a CGA para obtener mejor calidad en las gráficas, tanto en pantalla como en la impresión en papel.

Finalmente, en la gráfica $t - q_o$ los valores del gasto están redondeados para mejorar la presentación, por lo que no debe dársele demasiada importancia a la aproximación decimal sino a la tendencia general.

A P E N D I C E

Este apéndice describe, en una manera muy sencilla, la función de cada una de las opciones que posee BLW. Se indican cuales son los requerimientos para su adecuada utilización, la forma de operar, el rango de valores permitido para los valores de las variables y por último algunos de los mensajes que pueden causar confusión. Sin embargo la mejor forma de aprender a utilizarlo es usándolo y cometiendo errores, ya que BLW, hasta donde las posibilidades lo permiten, es 100 % reversible por lo que si se cometen, voluntariamente o no, es fácil corregir dicha situación.

Si se tienen conocimientos de operación de software es muy fácil usar el programa.

Requerimientos

El equipo que se requiere para la aplicación del programa es el siguiente :

- Computadora personal compatible con IBM.
- Monitor con capacidad de operar en modo gráfico.
- MS - DOS.
- Aproximadamente 200 Kb disponibles de RAM.
- Impresora de matriz de puntos, de preferencia que sea capaz de imprimir caracteres gráficos.

Contenido

El contenido completo de BLW está formado por los siguientes archivos :

BLW.EXE
CGA.BLW
HERC.BLW
AYUDA.COM

Los archivos .BLW contienen la portada del programa, y sólo se requiere uno de los dos dependiendo del tipo de monitor presente.

El archivo AYUDA.COM contiene la misma información que se presenta en este apéndice, con el fin de facilitar su consulta.

Restricciones para información numérica :

Debe presionar la tecla ENTER después de escribir el valor deseado.
Puede presionar la tecla ESC para cancelar cualquier acción, pero si había entrado información ésta se perderá.
Si comete algún error presione la tecla BACKSPACE para corregirlo.
En esta opción las teclas activas son las antes mencionadas, las de números y el punto.
Si se presiona cualquier otra se emitirá un sonido.

Restricciones para información alfabética :

El tamaño máximo del nombre de un archivo está limitado a 60 caracteres, que incluyen la especificación del archivo, estando disponibles todas la letras alfabéticas excepto la letra Ñ y las numéricas; usted especifica la extensión del archivo si así lo desea. BLW, por default, no utiliza extensión en los archivos que genera.
Presione ENTER cuando haya terminado de escribir el nombre.
Presione ESC si desea cancelar la acción.
Presione BACKSPACE para corregir cualquier error.

Operación

Importante : Es condición necesaria que los archivos .BLW se encuentren en el mismo directorio que el archivo BLW.EXE. Si el monitor disponible es CGA, entonces únicamente requiere el archivo CGA.BLW. El archivo HERC.BLW se requiere para otros monitores.
Si se utiliza un monitor EGA monocromático, algunos de los colores definidos en el programa no son visibles, sin embargo esto no afecta la información ni la operación del programa.

- El primer paso es ejecutar el programa para lo cual escriba BLW en el prompt del sistema operativo y presione ENTER.
- Espere un momento y presione cualquier tecla cuando se le indique.

Una vez hecho lo anterior aparece el menú principal con las siguientes tres opciones :

Datos
Resultados
Salir a DOS

Para hacer la selección presione la tecla que se indica a la izquierda de cada opción.

- Presione la letra **D** para acceder a la sección de datos.

Dentro de ésta se presenta otro menú :

Entrada
 Editar
 Procesar
 Salvar
 Recuperar
 Imprimir
 Menú anterior

- Presione la letra **E** para entrar los datos.
 - Se permiten como mínimo 5 ternas de valores $S_w - K_w - K_o$ y como máximo 15.
 - Indique el número de ternas de que dispone.
 - A continuación se le pedirá la información restante, indicando las unidades en que se requieren.
 En el caso de las viscosidades y permeabilidades, éstas pueden estar en cualesquiera unidades siempre y cuando sean las mismas para ambas fases.
 Si el valor entrado no está dentro del rango permitido, se indicará.
- Presione la letra **P** para procesar la información y espere.
 - En algunos casos, y debido a la información, alguno de los métodos no converge. Si esto ocurre se indicará en su momento. Generalmente, cuando el método de Buckley y Leverett no converge, los resultados que proporciona el método de Welge pueden no tener sentido físico; por ejemplo que f_w para $S_w = 0$ sea mayor a cero. Por esta razón, si el método de Buckley y Leverett no converge, no se aplica el método de Welge y no se generan Resultados.
 - Siempre debe escoger esta opción para poder acceder a los resultados.
- Presione la letra **S** si desea salvar la información.
 Se le pedirá el nombre del archivo a salvar bajo las restricciones antes mencionadas.
- Presione la letra **R** si desea salvar la información. Las restricciones son las mismas que para el caso anterior.
- Presione la tecla **D** si desea cambiar algún valor.
 - Si altera algún valor y previamente procesó la información, deberá volverla a procesar aun cuando el nuevo valor sea igual al anterior.
 - Puede presionar ESC si no desea alterar ningún valor.
- Presione la letra **I** para imprimir la información.
 - Puede ser Información Entrada o Recuperada.

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

- Encienda la impresora y presione cualquier tecla. Si requiere impresión de calidad, seleccione la opción NLQ en el selector de la impresora.

Para ver los Resultados regrese al menú principal.

- Si se ha procesado la información, la opción de Resultados estará activa. Dentro del menú de resultados se tienen las opciones Numéricos y Gráficos.
- Presione **N** para entrar a resultados Numéricos.
 - Ahora, tiene la posibilidad de ver en pantalla los resultados o bien mandarlos a la impresora.
 - Durante la Visualización o la Impresión puede Interrumpir la acción presionando ESC.

En los resultados Gráficos se presenta un menú con las cinco gráficas disponibles :

S_w - f_w.
t - Volumen acumulativo de agua.
t - Recuperación.
t - q_a.
t - WOR.

Seleccione una opción y espere a que se despliegue la gráfica.

Si desea interrumpir la acción presione ESC para regresar al menú de las cinco gráficas. Una vez terminada gráfica, se emite un sonido y puede imprimirla si su impresora tiene la capacidad para tal efecto. Si el monitor empleado es CGA, la gráfica tendrá la orientación Portrait (la misma forma en que se lee esta página). Para todos los otros tipos de monitores se tiene la orientación Landscape (la gráfica girada 90 grados en sentido contrario a las manecillas del reloj). El mejor tamaño se obtiene utilizando un monitor diferente a CGA.

Rango de valores de las variables

$1 \leq S_w \leq 100$
 $1 \leq S_{wi} \leq 100$
 $1 \leq S_{or} \leq 100$
 $1 \leq \phi \leq 50$
 $1 \leq q_t \leq 100000$
 $1 \leq A \leq 100000$
 $1 \leq L \leq 100000$
 $0.01 \leq \mu_o \leq 100$
 $0.01 \leq \mu_w \leq 100$
 $0.00001 \leq K_{rw}, K_{ro} \leq 100$

Mensajes de " error "

La información se perderá. ¿ Desea continuar ? (S / N)

Descripción : Existe información en memoria que no se ha salvado y se presionó la tecla E en el menú de Datos.

Acción : Presione S si desea entrar nueva información eliminando la anterior, N si presionó la tecla por error o si no desea entrar nueva información.

No convergió por Buckley y Leverett.

Descripción : No se obtuvieron resultados con este método.

Acción : Presione cualquier tecla para regresar al menú de Datos.

No convergió por el método de Welge.

Descripción : No se obtuvieron resultados con este método.

Acción : Presione cualquier tecla para regresar al menú de Datos.

No pudo abrirse el archivo.

Descripción : Se presentó un error de apertura o lectura en el archivo que se especificó.

Acción : Intente otra vez. Si se repite, probablemente el disco esté dañado.

El archivo no está en formato BLW.

Descripción : El archivo que se especificó no fue generado por BLW.

Acción : Ninguna.

Algunos datos están fuera de rango.

Descripción : La información que se recuperó de disco contiene algunos valores iguales a cero.

Acción : Entre nuevamente los datos.

¿ Desea eliminar los datos ? (S / N)

Descripción : Se presionó la tecla L en el menú de Datos. Se intentó eliminar la información.

Acción : Presione S si desea eliminarla, N si presionó la tecla por error o si no desea eliminar la información.

No se han generado resultados.

Descripción : Existe información que no ha sido procesada o ambos métodos no convergieron.

Acción : Edite la información hasta que se llegue a un resultado.

No existe ese subíndice.

Descripción : Cuando se edita S_w , K_w o K_o , se indicó un subíndice igual a cero o mayor al número existente.

Acción : Entre un valor dentro del rango.

Estimación de la recuperación de aceite por los métodos de . . .

El valor debe ser mayor que el anterior.

Descripción : En la entrada de los valores de S_w y K_w , se requiere que se conserve el orden ascendente. Si el valor entrado es menor al anterior, aparecerá este mensaje.

Acción : Entre un valor mayor que el del subíndice anterior.

El valor debe ser menor que el anterior.

Descripción : En la entrada de los valores de K_o , se requiere que se conserve el orden descendente. Si el valor entrado es mayor al anterior, aparecerá este mensaje.

Acción : Entre un valor menor que el del subíndice anterior.

No hay datos en memoria.

Descripción : No se ha entrado o recuperado información y se intentó acceder a alguna de las opciones del menú de Datos (excepto a la opción Recuperar).

Acción : Entre o recupere información.

Valor fuera de rango.

Descripción : El valor entrado no está dentro del rango permitido.

Acción : Entre un valor dentro del rango. Consulte los rangos presentados previamente.

No se pudo asignar memoria.

Descripción : Se presentó un error al momento de asignar el espacio para las ternas $S_w - K_w - K_o$.

Acción : Inténtelo otra vez. Si se repite, presione el botón de RESET y vuelva a ejecutar BLW.

La impresora no está encendida.

Descripción : Se intentó mandar información hacia la impresora sin que ésta estuviera encendida o en línea.

Acción : Revise que se encuentre encendida y en línea o verifique el cable de la impresora.

Memoria insuficiente para ejecutar BLW.EXE .

Descripción : La memoria disponible en el sistema operativo es insuficiente para ejecutar el programa.

Acción : Elimine programas residentes, si los hay. Utilice una máquina con más memoria.

Memoria insuficiente.

Descripción : No existe suficiente memoria para tener acceso a los resultados gráficos.

Acción : Elimine programas residentes, si los hay. Utilice una máquina con más memoria.

Se interrumpió la impresión.

Descripción : Durante la impresión de una gráfica se presionó la tecla ESC antes de que terminara.

Acción : Repita la impresión.

El archivo no existe.

Descripción : Se intentó recuperar un archivo que no existe, o se especificó mal el nombre o extensión.

Acción : Indique correctamente la unidad, directorio, nombre y extensión del archivo.

No se encontró el archivo CGA.BLW en el directorio actual.

Descripción : El archivo CGA.BLW no está en el mismo directorio que BLW.EXE.

Acción : Copie dicho archivo al mismo directorio.

No se encontró el archivo HERC.BLW en el directorio actual.

Descripción : El archivo HERC.BLW no está en el mismo directorio que BLW.EXE.

Acción : Copie dicho archivo al mismo directorio.

La información no se ha salvado. ¿ Desea salir ? (S / N) .

Descripción : Existe información que no se ha salvado, ya sea después de entrarla o bien después de recuperarla y editarla, y se presionó la tecla ESC para salir a DOS.

Acción : Presione N y sálvela o presione S para terminar.

El archivo ya existe. ¿ Salvar ? (S / N) .

Descripción : Se intentó salvar un archivo con el mismo nombre de otro que ya existe.

Acción : Presione S si desea salvar la información bajo el nombre de archivo que especificó, pero la información del archivo existente se perderá.

No pudo crearse el archivo.

Descripción : Se intentó salvar un archivo y el nombre fue incorrecto o el disco está protegido contra escritura.

Acción : Verifique que el nombre sea correcto o que el disco no esté protegido.

La unidad U: no está lista.

Descripción : Se intentó una acción de lectura o escritura en una unidad removible.

Acción : Verifique que exista disco en la unidad indicada o que es seguro esté cerrado.

BIBLIOGRAFIA

- Muskat, Morris. " *Physical principles of oil production* ".
McGraw Hill Book Company, Inc. © 1981.
- Willhite, G. Paul. " *Waterflooding* ".
Society of Petroleum Engineers. © 1986.
- Latil, Marcel. " *Enhanced oil recovery* ".
Gulf Publishing Company. © 1980.
- Sandrea, Rafael. Nielsen, Ralph. " *Dynamics of petroleum reservoirs under gas injection* ".
Gulf Publishing Company. © 1974.
- Helander, Donald P. " *Fundamentals of formation evaluation* ".
Oil & Gas Consultants International, Inc. © 1983.
- Garb, Forrest A. " *Waterflood calculations for hand-held computers* ".
Gulf Publishing Company. © 1982.
- Slider, H. C. " *Practical petroleum reservoir engineering methods* ".
Petroleum Publishing Company. © 1976.
- Nobles, M. A. " *Using the computer to solve petroleum engineering problems* ".
Gulf Publishing Company. © 1974.
- SPE Reprint series. " *Waterflooding* ".
SPE - AIME. © 1973.
- Clark, Norman J. " *Elements of petroleum reservoirs* ".
American Institute of Mining, Metallurgical & Petroleum Engineers, Inc. © 1969.
- Craig, Forrest F. " *The reservoir engineering aspects of waterflooding* ".
SPE - AIME. © 1971.
- Gatlin, Carl. " *Drilling and well completions* ".
Prentice Hall, Inc. © 1960.
- McCain, William P. " *The properties of petroleum fluids* ".
Petroleum Publishing Company. © 1973.
- Cole, Frank W. " *Reservoir engineering manual* ".
Gulf Publishing Company. © 1969.

-
- *Anderson, Gene. " Coring and core analysis handbook "*,
Penn Well Books. © 1975.
 - *Encyclopedia of science and technology.*
McGraw Hill. © 1960.
 - *Guthrie, Virgil B. " Petroleum products handbook "*,
McGraw Hill Book Company. © 1960.
 - *Donohue, David A. T. " A first course in petroleum technology "*,
International Human Resources Development Co. © 1986.
 - *Ogden, Carol Anne. " Software design for microcomputers "*,
Prentice Hall, Inc. © 1978.
 - *Stevens, Roger T. " Graphics programming in C "*,
M & T Books. © 1989.
 - *Shneiderman, Ben. " Designing the user interface "*,
Addison - Wesley Publishing Company. © 1987.
 - *Webster, Bruce F. " The neXT book "*,
Addison - Wesley Publishing Company. © 1989.
 - *Ezzell, Ben. " Graphics programming in Turbo C 2.0 "*,
Addison - Wesley Publishing Company. © 1989.