UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

APLICACIONES DE LA ECUACION DE BALANCE DE MATERIA EN EL COMPORTAMIENTO DE YACIMIENTOS

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A :

CARLOS OROPEZA VAZQUEZ

MEXICO, D. F. DIC. 1989

INDICE

INTRODUCCION

La ingeniería de yacimientos, como una parte de la ingeniería petrolera, se responsabiliza del análisis de los yacimientos de hidrocarburos con el fin de establecer su mejor alternativa de explotación, buscando recuperar la mayor cantidad posible de ellos de acuerdo con las políticas económicas contemporáneas.

Para poder realizar ese análisis se requiere de modelos matemáticos que puedan reproducir y predecir el comportamiento de un yacimiento en explotación.

Con la existencia de poderosos procesadores de datos se han creado simuladores matemáticos muy complejos que aportan resultados con buena precisión considerando al yacimiento como un conjunto de bloques diferenciables unos de otros; sin embargo, por su misma complejidad requieren de una gran cantidad de información para su aplicación.

Este trabajo trata sobre el modelo matemático elemental conocido como "Ecuación de Balance de Materia", el cual a pesar de su simplicidad por considerar al yacimiento como una entidad única proporciona una aproximación aceptable, por lo que aún hoy continúa siendo una herramienta de gran utilidad en los estudios de Ingeniería de Yacimientos.

El nombre de "balance de materia" es un tanto impreciso, ya que en realidad no se hace un balance de masa, sino un balance entre los volúmenes de los fluidos contenidos en el yacimiento y los volúmenes obtenidos en superficie.

Aun cuando es un modelo sencillo, es necesario que el ingeniero petrolero comprenda perfectamente qué representa cada una de las variables y términos que intervienen en la ecuación de balance de materia y sobre todo su correcta aplicación en los diversos tipos de yacimientos que se presentan.

Este trabajo tiene como finalidad principal ofrecer un apoyo didáctico para los alumnos de ingeniería petrolera que cursan la materia de Comportamiento de Yacimientos y consiste en una serie de problemas resueltos con los que se ilustra el uso de la ecuación de balance de materia; también se presentan algunas aplicaciones del método de Havlena y Odhe, quienes prepararon la ecuación de balance de materia como la ecuación de una línea recta, convirtiéndola así en un método gráfico de solución. En general, el material se distribuyó de la manera siguiente:

El capítulo I es una introducción para la aplicación de la ecuación de balance de materia; en él se tratan los temas de la clasificación de yacimientos, la teoría del análisis presión-volumen-temperatura (PVT) y la compresibilidad tanto del aceite, como del agua congénita y la roca.

El capítulo II muestra algunas aplicaciones de la ecuación de balance de materia para yacimientos de aceite bajosaturado. Es importante aclarar que las aplicaciones para yacimientos de gas seco se incluyeron en este capítulo por presentar un comportamiento similar a los yacimientos de aceite bajosaturado.

El capítulo III trata acerca de los yacimientos de aceite saturado y en él se presentan los diferentes casos posibles. es decir: con y sin entrada de agua. con y sin casquete original de gas y con ambos.

El capítulo IV se refiere a aquellos yacimientos actualmente saturados, que originalmente fueron bajosaturados; es decir, aquellos en los que de pronto aparece un empuje que originalmente no existía: el de la expansión del gas disuelto que se ha liberado al reducirse la presión hasta un valor menor al de la presión de burbujeo .

En el capítulo V se ejemplifican algunos métodos de predicción del comportamiento de varios tipos de yacimientos.

En el capitulo VI se trata el tema de los yacimientos que presentan condiciones favorables para el fenómeno de la segregación gravitacional.

En el apéndice A se presentan las correlaciones gráficas de Dodson y Standing para estimar la compresibilidad promedio del agua congénita y la correlación gráfica de Hall para la estimación de la compresibilidad efectiva de la roca del yacimiento.

En cada uno de los capítulos se incluyeron aquellas deducciones de ecuaciones que se consideraron convenientes para el desarrollo de los temas subsecuentes. Finalmente se presentan conclusiones y recomendaciones y la nomenclatura usada.

CAPITULO I CARACTERIZACION DE YACIMIENTOS

I.1 Introducción.

Un yacimiento de hidrocarburos se define como un volumen de roca impregnada de hidrocarburos los cuales presentan continuidad hidráulica, es decir, que un disturbio de presión en un punto cualquiera del yacimiento repercute necesariamente en todos los demás puntos del mismo.

Las propiedades petrofísicas del yacimiento se obtienen del análisis en laboratorio de núcleos de la formación cortados durante la etapa de perforación de los pozos, con los cuales se determina la porosidad y la saturación de agua, lo que sirve para ajustar los registros geofísicos de pozos perforados posteriormente y que servirán para obtener una porosidad promedio y una saturación de agua promedio representativas de todo el yacimiento. En esos mismos núcleos se determinan otras propiedades muy importantes como lo son la mojabilidad y la permeabilidad.

Para poder determinar como se comportará el yacimiento, es necesario además conocer qué comportamiento tendrán los hidrocarburos que se encuentran en él al declinar la presion debido a la producción . Para ésto se toma una muestra de los fluidos y se envía al laboratorio para efectuar un análisis presión-volumen-temperatura (PVT). Ahí la muestra se lleva hasta las condiciones iniciales de presión y temperatura del yacimiento y manteniendo la temperatura constante se reduce la presión por etapas midiendo los volúmenes de los fluidos a cada nivel de presión.

En este capítulo se presentan los diversos criterios que se utilizan para clasificar yacimientos de hidrocarburos y se ejercita el manejo de los sistemas de unidades de medición. También se presentan algunos ejemplos de análisis PVT haciendo énfasis en el comportamiento del factor de volumen del aceite, el factor de volumen del gas y la relación gas disuelto-aceite. Por otro lado, se presentan ejemplos acerca de la compresibilidad y el uso de la correlaciones gráficas del Apéndice A para la estimación de la compresibilidad de la roca y la del agua congénita.

I.2 Deducciones.

I.2.1 A partir de la ecuación general de los gases, determine el valor de R para unidades:

a) del sistema inglés.

b) del sistema internacional.

Solución:

a) Para determinar R se aplica la ecuación general de los gases para las condiciones estándar ($p = 14.7$ psia ; $T = 60^{\circ}F$).

Se sabe que el volumen de 1 mole-lb de cualquier gas @ c.s. es de 379.4 pies cúbicos. Además, a estas condiciones el factor de supercompresibilidad (Z) es prácticamente unitario. Entonces:

$$pV = ZnRT$$

De donde: $R = pV/ZnT$

Sustituyendo valores:

$$R = \frac{(14.7)\text{psia} * (379.4)\text{pie}^3}{(1.0) * (1.0)\text{mole-lb} * (60+460)^{\circ}R}$$

$$R = 10.73\ (\text{psia}*\text{pie}^3)/(\text{mole-lb}*{}^{\circ}R)$$

b) En unidades del S.I. el volumen de 1 mole-g de cualquier gas @ c.s. ($p = 1$atm ; $T = 16^{\circ}C$) es de 22.4 l o sea de 22400 cm^3.

Entonces en este sistema:

$$R = \frac{(1.0)\text{atm} * (22400)\text{cm}^3}{(1.0) * (1.0)\text{mole-g} * (16+273)^{\circ}K}$$

$$R = 77.5\ (\text{atm}*\text{cm}^3)/(\text{mole-g}*{}^{\circ}K)$$

I.2.2 A partir de la ecuación general de los gases, obtenga una expresión para calcular el factor de volumen del gas (B_g) en función de Z. Use:

a) T ($^{\circ}R$) y p (psia)

b) T ($^{\circ}K$) y p (kg/cm^2)abs.

Solución:

a) El factor de volumen para un gas se define como:

$$B_g = \frac{V_{g\ @\ p.T}}{V_{g\ @\ c.s.}} \qquad (A)$$

Aplicando la ecuacion general de los gases reales (donde se usan presiones y temperaturas absolutas):

$$V_{g\ @\ p.T} = \frac{ZnRT}{p} \qquad (B)$$

A las condiciones estandar (p = 14.7 psia ; T = 60°F : Z ≅ 1.0):

$$V_{g\ @\ c.s.} = \frac{1.0 * n * R * (60+459.7)}{14.7}$$

$$V_{g\ @\ c.s.} = 35.353 * n * R \qquad (C)$$

Sustituyendo B y C en A:

$$B_g = \frac{\frac{Z * n * R * T}{p}}{35.353 * n * R}$$

Reduciendo términos:

$$B_g = 0.02829 * \frac{Z * T}{p} \qquad T(°R),\ y\ p(psia)$$

b) A condiciones estándar:

$$V_{g\ @\ c.s.} = \frac{1.0 * n * R * (16 + 273)}{1.033}$$

$$V_{g\ @\ c.s.} = 279.77 * n * R \qquad (D)$$

Sustituyendo D y B en A:

$$B_g = \frac{\frac{Z * n * R * T}{p}}{279.77 * n * R}$$

Reduciendo términos:

$$B_g = 0.003574 * \frac{Z * T}{p} \qquad T(^oK) \text{ y } p(Kg/cm^2)abs$$

I.2.3 Deduzca la ecuación de compresibilidad para un aceite bajosaturado a partir de la definición de compresibilidad, en términos del factor de volumen del aceite.

Solución:

La compresibilidad es por definición:

$$c = -\frac{1}{V} * \frac{\Delta V}{\Delta p}$$

Lo que se puede escribir como:

$$c = -\frac{1}{V} * \frac{V_2 - V_1}{p_2 - p_1}$$

Donde V es un promedio entre V_1 y V_2.

Aplicando esta expresión al aceite a las condiciones medias entre la presión inicial y la presión de burbujeo:

$$c_o = -\frac{2}{V_{ob} + V_{oi}} * \frac{V_{ob} - V_{oi}}{p_b - p_i} \qquad (A)$$

Por otro lado, el factor de volumen del aceite se define como:

$$B_o = \frac{V_o @ p,T}{V_o @ c.s.}$$

A la presión de burbujeo:

$$B_{ob} = \frac{V_{ob}}{V_o @ c.s.} \qquad (B)$$

A la presión inicial:

$$B_{oi} = \frac{Voi}{Vo @ c.s.} \qquad (C)$$

De B y C:

$$Vob = Bob * Vo @ c.s.$$

$$Voi = Boi * Vo @ c.s.$$

Sustituyendo en A:

$$c_o = - \frac{2}{(Bob + Boi) * Vo @ c.s.} * \left[\frac{(Bob - Boi) * Vo @ c.s.}{p_b - p_i} \right]$$

Eliminando términos y multiplicando por -1:

$$C_o = \frac{2}{Bob + Boi} * \left[\frac{Bob - Boi}{p_i - p_b} \right]$$

I.2.4 Deduzca la ecuación de compresibilidad para un gas real.

Solución:

La definición de compresibilidad es:

$$c = - \frac{1}{V} * \frac{d\ V}{d\ p} \qquad (1)$$

La ecuación de estado de los gases reales es:

$$V = \frac{Z * n * R * T}{p}$$

Sustituyendo en la ecuación 1:

$$c_g = - \frac{p}{Z * n * R * T} * \frac{d}{dp} \left[\frac{Z * n * R * T}{p} \right]$$

Los términos n y R son constantes del gas y como dentro del yacimiento ocurre un proceso isotérmico, T también se puede tomar como constante y por ello pueden salir de la derivada.

$$c_g = -\frac{p * n * R * T}{Z * n * R * T} * \frac{d}{dp}\left[\frac{Z}{p}\right]$$

Eliminando términos:

$$c_g = -\frac{p}{Z} * \frac{d}{dp}\left[\frac{Z}{p}\right]$$

Resolviendo la derivada:

$$c_g = -\frac{p}{Z}\left[\frac{dZ}{pdp} - \frac{Z}{p^2}\right]$$

Efectuando operaciones y multiplicando por -1:

$$c_g = \frac{1}{p} - \frac{1}{Z} * \frac{dZ}{dp}$$

I.2.5 A partir de la definición de la compresibilidad obtenga la ecuación de la variación del volumen poroso:

$$V_{pf} = V_{pi} * (1 - c_f * \Delta' p)$$

Solución:

La compresibilidad se define como:

$$c = \frac{1}{V} * \frac{\Delta V}{\Delta p}$$

Como el volumen poroso decrece al disminuir la presión, en este caso no se debe usar el signo (-) que es convencional.

Aplicando la ecuación anterior al volumen poroso de la formación:

$$c_f = \frac{1}{V_p} * \frac{V_{pi} - V_{pf}}{p_i - p_f}$$

El volumen de referencia V_p puede tomarse como el volumen de poros inicial, como el volúmen de poros final, o como un promedio entre ambos; en este caso se tomará como el inicial.

$$c_f = \frac{1}{V_{pi}} * \frac{V_{pi} - V_{pf}}{p_i - p_f}$$

Despejando el volumen de poros final:

$$V_{pi} - V_{pf} = c_f * V_{pi} * (p_i - p_f)$$

$$V_{pf} = V_{pi} - c_f * V_{pi} * (p_i - p_f)$$

Por definición: $p_i - p_f = \Delta'p$

$$V_{pf} = V_{pi} * (1 - c_f * \Delta'p)$$

Que es la ecuación de la variación del volumen de poros.

I.3 Clasificación de yacimientos.

I.3.1 Escriba los criterios de clasificación de yacimientos petroleros.

Solución:

a) De acuerdo con el tipo de roca almacenadora:

- Arenas.
- Calizas.
- Areniscas.

b) De acuerdo con el tipo de trampa:

- Estructurales.
- Por fallas o penetración de domos.
- Estratigráficas.

c) De acuerdo con el tipo de fluidos contenidos:

- De aceite. ($\rho_{ro} > 0.8$; $R < 200$)
- De aceite volátil ($0.74 \leq \rho_{ro} \leq 0.8$; $200 \leq R \leq 1500$)
- De gas y condensado ($0.74 \leq \rho_{ro} \leq 0.78$; $1500 \leq R \leq 10000$)
- De gas húmedo ($\rho_{ro} < 0.74$; $10\,000 \leq R \leq 20\,000$)
- De gas seco.($R > 20\,000$)

d) De acuerdo con la presión inicial. (Sólo los de aceite)

- De aceite bajosaturado ($p_i > p_b$)
- De aceite saturado ($p_i < p_b$)

e) De acuerdo con el tipo de empuje predominante:

- Por la expansión de los fluidos y la roca.
- Por expansión del gas disuelto liberado.
- Por expansión del gas libre.
- Por segregación gravitacional.
- Por empuje hidráulico.
- Por empujes combinados.
- Por empujes artificiales.

f) De acuerdo con el diagrama de fases (P-T):

+ Fuera de la región bifásica:
  - De gas, si $T_y >$ Cricondenterma.
  - De gas y condensado, si $T_c < T_y <$ Cricondenterma.
  - De aceite bajosaturado, si $T_y < T_c$
+ Dentro de la región de dos fases:
  - De aceite saturado.
  - De aceite saturado con casquete de gas.

I.3.2 Clasifique los yacimientos siguientes de acuerdo con el tipo de los fluidos contenidos:

a) El yacimiento X produce un gasto de 3774 BPD de líquido medido a condiciones de tanque con una densidad de 1873 lb/m^3, y un gasto de gas de 3.1783 MMPCSD.

b) El yacimiento Y produce un gasto de 6 m^3/d de líquido medido a condiciones de tanque con una densidad de 5.8392 lb/gal, yun gasto de gas de 3.17826 MMPCSD.

c) El yacimiento Z produce un líquido con densidad de 120.78 Kg/Bl a razón de 1104.17 l/min y un gasto de gas de 1.59 * 10^6 m^3/d @ c.s.

Solución:

En cada caso se obtendrán la densidad relativa y la relación gas disuelto-aceite adimensional: $R = q_g/q_o$; $\rho_{ro} = \rho_o/\rho_w$

a) Yacimiento X:

$$\rho_{ro} = \frac{1873}{62.4} * \frac{lb}{m^3} \frac{ft^3}{lb} \frac{m^3}{35.314\ ft^3} = 0.85$$

$$R = \frac{3.1783 * 10^6}{3774} * \frac{ft^3}{d} \frac{d}{Bl} \frac{Bl}{5.6146\ ft^3} = 150$$

b) Yacimiento Y:

$$\rho_{ro} = \frac{5.8392}{62.4} \frac{lb}{gal} \frac{ft^3}{lb} \frac{7.48\ gal}{ft^3} = 0.7$$

$$R = \frac{3.17826 * 10^6}{6} \frac{ft^3}{d} \frac{d}{m^3} \frac{m^3}{35.314\ ft^3} = 15\ 000$$

c) Yacimiento Z:

$$\rho_{ro} = \frac{120.78}{62.4} \frac{Kg}{Bl} \frac{ft^3}{lb} \frac{Bl}{5.6146\ ft^3} \frac{lb}{0.454\ Kg} = 0.76$$

$$R = \frac{1.59 * 10^6}{1104.17} \frac{m^3}{d} \frac{min}{\ell} \frac{1000\ \ell}{m^3} \frac{d}{1440\ min} = 1\ 000$$

Concluyendo:

De acuerdo a los fluidos contenidos :

- El yacimiento X es de aceite pesado.
- El yacimiento Y es de gas húmedo.
- El yacimiento Z es de aceite volátil.

I.3.3 Explique la condensación retrógrada y la diferencia entre un yacimiento de gas seco, uno de gas húmedo y uno de gas y condensado.

Solución:

El fenómeno de condensación retrógrada consiste en la aparición de líquidos en una mezcla gaseosa durante un proceso de depresionamiento. El término "retrógrada" indica que es una desviación del comportamiento normal que corresponde a que se presente evaporación durante un depresionamiento.

Un yacimiento de gas seco es aquél en el cual se presenta solamente gas durante toda la vida productiva del yacimiento y en superficie se recibe gas únicamente (o cantidades despreciables de líquido)

En un yacimiento de gas húmedo se tiene gas en el mismo durante toda su vida, pero en superficie se recupera cierta cantidad de líquido.

En un yacimiento de gas y condensado, inicialmente se presenta unicamente gas, pero a cierta presión aparecen líquidos debido a la condensación retrógrada. En la superficie siempre se recibe líquido con alta relación gas-aceite.

I.3.4 Se tiene un yacimiento de hidrocarburos a una profundidad de 18 000 pies. De un análisis PVT se sabe que la presión de burbujeo es de 300 Kg/cm^2. Considerando que la presión inicial del yacimiento es un 10% mayor que la presión normal de formación (agua dulce), y sabiendo que la temperatura crítica es de 465°K y la cricondenterma es de 480°K; ¿Cómo clasificaría usted

al yacimiento según su diagrama de fases?
Suponga que la temperatura varía de acuerdo con la profundidad según: $T = 0.03 * Prof + 20$ con Prof en metros y T(°C)

Solución:

Es necesario calcular la presión inicial del yacimiento y su temperatura:

$$P_i = P_f + 0.10 * P_f = 1.10 * P_f$$

Donde P_f es la presión normal de formación

$$P_i = 1.10 * (0.433 * 18\ 000) \frac{lb}{pg^2 * ft} * ft$$

$$P_i = 8573.4\ lb/pg^2 = 603\ Kg/cm^2$$

$$T_y = 0.03 * (18000/3.28) + 20$$

$$T_y = 184.6°C = 457.6°K$$

Comparando:

$$T_y < T_c \quad ; \quad P_i > P_b$$

Por lo tanto, el yacimiento se clasifica según el diagrama de fases como:

Yacimiento de aceite bajosaturado, volátil por ser Ty muy cercana a Tc.

I.3.5 Se tiene la siguiente información del aceite de un yacimiento nuevo:

$$R = 1\ 400\ m^3/m^3 \quad ; \quad \rho_{ro} = 0.77\ (agua = 1)$$

¿Cómo se clasificaría el yacimiento de acuerdo con las características de los fluidos?

Solución:

De acuerdo a los valores de densidad relativa y relación gas-aceite producido, se puede decir que es un yacimiento de aceite volátil, pero por estar en el límite también podría ser un yacimiento de gas y condensado. Lo recomendable es tomar una muestra de fluido, recombinar hasta la R medida y llevar a las condiciones de presión y temperatura del yacimiento; si la mezcla a esas condiciones es un líquido, será de aceite volátil y si a esas condiciones es gas, se tratará de un yacimiento de gas y condensado.

I.4 Análisis Presión-Volúmen-Temperatura (PVT).

I.4.1 Calcule B_t a 1.033 Kg/cm^2 si la temperatura del yacimiento es de $60°F$ y la relación gas disuelto inicial fué de 50 m^3/m^3.

Solución:

La definición del B_t es:

$$B_t = B_o + B_g * (R_{si} - R_s)$$

Donde:

$$B_o = V_{o+gd} @ p,T \ / \ V_o @ c.s.$$

$$B_g = V_g @ p,T \ / \ V_g @ c.s.$$

$$R_s = V_{gd} @ c.s. \ / \ V_o @ c.s.$$

Como en este caso p y T corresponden a las condiciones estándar y a esas condiciones no existe gas disuelto en el aceite:

$$B_o = 1.0$$

$$B_g = 1.0$$

$$R_s = 0.0$$

Sustituyendo en la definición de B_t:

$$B_t = 1.0 + 1.0 * (50 - 0.0)$$

$$B_t = 51.0$$

I.4.2 Una celda PVT contiene 296 cm^3 de aceite a p_i = 350 Kg/cm^2 y T_y = $200°F$. Al reducir la presión a 250 Kg/cm^2 se observó el desprendimiento de una burbuja de gas, siendo entonces el volumen de hidrocarburos igual a 300 cm^3; el gas libre se extrajo y ocupó un volumen de 4.1 litros a condiciones estándar; el volumen de aceite remanente fué de 283 cm^3. La presión se redujo a 1.033 Kg/cm^2 abs. y la temperatura a 60°F, mientras se liberaban 16.5 litros de gas @ c.s. quedando en la celda 205 cm^3.

a) Calcule B_{ob}, R_{sb} y $c_{obajosaturado}$

b) Calcule R_s, B_g, B_t y Z a 200 Kg/cm^2

Solución:

Para aclarar la información, a continuacion se tabula:

p (Kg/cm^2)	T (°F)	V_o (cm^3)	V_g acum (cm^3@ c.s.)	V_{o+g} (cm^3@ p,T)
350.000	200	296	0	
250.000	200	300	0	
200.000	200	283	4 100	315
1.033	60	205	20 600	

a) La presión de burbujeo (p_b) es de 250 Kg/cm^2 por haberse liberado la primera burbuja de gas:

$$B_o = \frac{V_o \text{ @ } p,T}{V_o \text{ @ } c.s.}$$

$$B_{ob} = \frac{300}{205} = 1.46$$

$$R_s = \frac{V_{gd} \text{ a } p,T \text{ @ } c.s.}{V_o \text{ @ } c.s.}$$

$$R_s = \frac{20\ 600}{205} = 100.5$$

$$c_o = -\frac{2}{V_{oi} + V_{ob}} * \frac{V_{oi} - V_{ob}}{p_i - p_b}$$

$$c_o = \frac{-2\ (296 - 300)}{(296 + 300)(350 - 250)}$$

$$c_o = 1.342 \times 10^{-4}\ (Kg/cm^2)^{-1}$$

b) A 200 Kg/cm^2:

$$R_s = \frac{20\ 600 - 4\ 100}{205} = 80.5$$

$$B_g = \frac{315 - 283}{4\ 100} = 0.0078$$

$$B_o = \frac{283}{205} = 1.38$$

$$B_t = 1.38 + 0.0078 * (100.5 - 80.5)$$

$$B_t = 1.536$$

Por definición:

$$Z = \frac{V_{g\ real}}{V_{g\ ideal}}$$

El volumen real a 200 Kg/cm^2 lo podemos calcular como la diferencia entre el volumen total de hidrocarburos menos el volumen de aceite:

$$V_{gr} = 315 - 283 = 32\ cm^3$$

Para obtener el volumen ideal podemos usar la ecuación:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

De donde:

$$V_2 = \frac{p_1 V_1 T_2}{T_1 p_2}$$

Aplicándola entre las c.s. y 200 Kg/cm^2, 200°F:

$$p_1 = 1.033\ Kg/cm^2$$

$$T_1 = (60 + 460) = 520°R$$

$$V_1 = 4100\ cm^3$$

$$p_2 = 200\ Kg/cm^2$$

$$T_2 = (200 + 460) = 660°R$$

Sustituyendo:

$$V_2 = \frac{1.033 * 4\ 100 * 660}{520 * 200} = 26.88\ cm^3$$

finalmente:

$$Z = \frac{32}{26.88} = 1.19$$

O bien, Z se puede obtener de la ecuación:

$$B_g = 0.02829 * Z * T / p \qquad p(psia), T°R$$

De donde:

$$Z = \frac{B_g * p}{0.02829 * T}$$

$$Z = \frac{0.0078 * (200 * 14.22)}{0.02829 * (200 + 460)}$$

$$Z = 1.188 \cong 1.19$$

I.4.3 Los resultados de un análisis PVT se muestran en la siguiente tabla:

(1) p (psia)	(2) T (°C)	(3) Vo (cm³)	(4) Vgl acum (cm³@ c.s.)
3000	120	107.790	0
2500	120	108.180	0
2000	120	104.535	8056
1500	120	100.711	12772
1000	120	97.213	19361
500	120	92.983	25625
14.7	120	83.977	39048
14.7	20	81.350	39048

p_b = 2500 psia

p_i = 3000 psia

Obtenga:

a) El factor de volumen del aceite (B_o) a cada presión.

b) La relación gas disuelto-aceite (R_s) a cada presión.

c) Las gráficas de B_o Vs p y R_s Vs p.

d) Explique el comportamiento de las curvas obtenidas.

Solución:

Por definición el factor de volumen del aceite es:

$$B_{o\ p,T} = \frac{V_{o+gd} @ p,T}{V_o @ c.s.}$$

Si se observa la tabla, el último volumen de aceite de la columna 3 está medido a condiciones estándar, es decir:

$$V_o @ c.s. = 81.35\ cm^3$$

Para 3 000 psia:

$$B_o = 107.79 / 81.35 = 1.325$$

Para 2 500 psia:

$$B_o = 108.18 / 81.35 = 1.330$$

Continuando de la misma forma se obtiene la columna 5.

b) Por definición, la relación gas disuelto-aceite es:

$$R_s = \frac{V_{lgd\ a\ p,T} @\ c.s.}{V_o\ @\ c.s.}$$

Para conocer el volumen de gas que se encuentra disuelto a una presión p, es necesario conocer el gas total de la muestra, éste corresponde al último valor de la columna 4. La diferencia entre este gas total y el gas que se ha liberado a p y T, corresponde al gas que permanece disuelto en el aceite a esas condiciones.

Para 3 000 psia:

$$V_{g\ dis\ a\ 3000} = 39\ 048 - 0 = 39\ 048\ cm^3$$

Para 2 500 psia:

$$V_{g\ dis\ a\ 2500} = 39\ 048 - 0 = 39\ 048\ cm^3$$

Para 2 000 psia:

$$V_{g\ dis\ a\ 2000} = 39\ 048 - 16\ 508 = 32\ 540\ cm^3$$

Continuando de la misma forma se obtiene la columna 6.

Ahora ya se puede obtener R_s dividiendo el volumen de gas disuelto (columna 6) entre el valor del volumen de aceite medido a condiciones estándar. Los resultados se muestran en la columna 7.

(5) B_o	(6) V_g dis	(7) R_s
1.325	39 048	480
1.330	39 048	480
1.285	32 540	400
1.238	26 276	323
1.195	19 687	242
1.143	13 423	165
1.020	0	0
1.000	0	0

c) Las gráficas se presentan en las figuras I.1. y I.2.

FIGURA I.1

FACTOR DE VOLUMEN DEL ACEITE

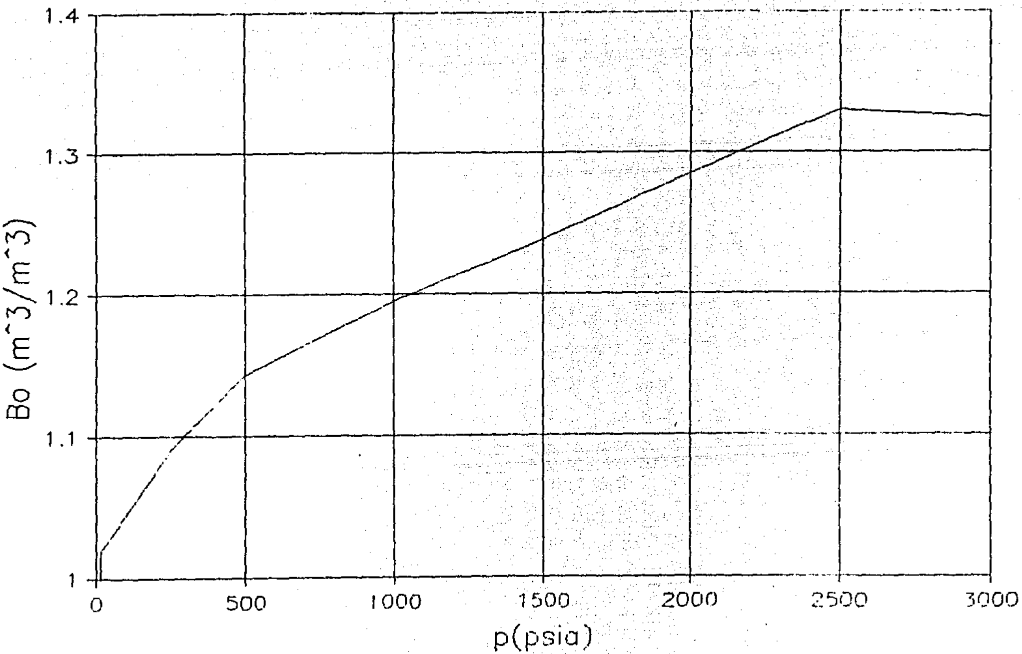
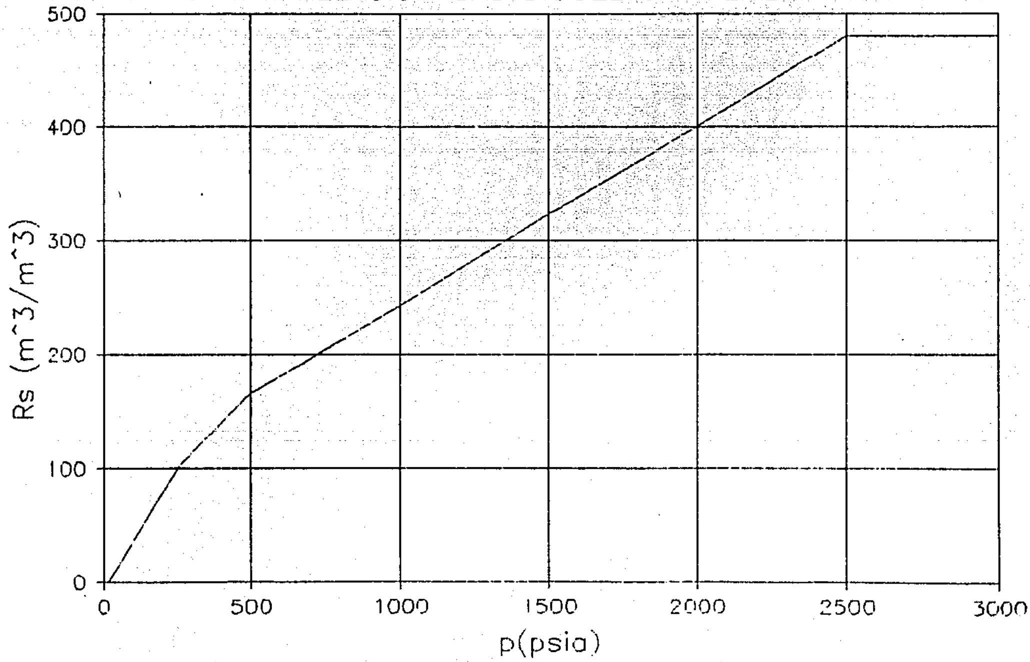


FIGURA I.2

RELACION GAS DISUELTO-ACEITE



d) Comportamiento de la curva de Rs:

De p_i = 3 000 psia hasta p_b = 2 500 se tiene un comportamiento horizontal de la curva, lo cual indica que Rs permanece constante en este rango de presión. Esto se explica de la manera siguiente: En este rango de presión el aceite se encuentra bajosaturado, es decir aún podría aceptar más gas disuelto, por ello no existirá liberación de gas. Al disminuir la presión a partir de p_i se da un incremento en el volumen de la muestra, pero el gas que contiene seguirá disuelto en ella.

Desde p_b = 2500 hasta la presión atmosférica, el valor de Rs se reduce hasta hacerse cero. Esto se debe a que abajo de la presión de burbujeo, disminuye la capacidad del aceite para contener gas y éste se libera, hasta que al llegar a la presión atmosférica ya no existe gas disuelto en la muestra.

Comportamiento de la curva de Bo:

De 3 000 psia hasta 2 500 se observa un ligero incremento en el factor de volumen del aceite; ésto es debido a que durante la etapa de bajosaturación no se tiene pérdida de masa en el aceite y debido a su compresibilidad, el volumen de la muestra se incrementa al disminuir la presión a la que está sometida. A partir de 2 500 psia y hasta la presión atmosférica, el Bo disminuye hasta llegar a la unidad. Esto se debe a que abajo de la presión de burbujeo se va liberando gas y por ello el aceite sufre una pérdida de masa y por lo tanto de volumen. Debe hacerse notar que el Bo no puede ser menor que la unidad.

I.4.4 Para la siguiente tabla de datos, calcule el factor de volumen del gas. Considere que los valores corresponden a 5.2 mole-lb y la temperatura es de 180°F. Grafique Bg Vs p.

(1) P(psia)	(2) Z
300	0.961

750	0.916
1 500	0.861
2 500	0.839
4 000	0.912
5 000	0.992
6 000	1.081

Solución:

Por definición:

$$B_g = \frac{V_g @ c.y.}{V_g @ c.s.}$$

El denominador es único; usando la ecuación de los gases reales:

$$V_{g @ c.s.} = \frac{Z\ n\ R\ T}{p}$$

$$V_{g @ c.s.} = \frac{1.0 * 5.2 * 10.732 * (60 + 460)}{14.7}$$

$$V_{g @ c.s.} = 1974.104\ ft^3$$

Para cada valor de presión:

$$V_{g\ 300} = \frac{0.961 * 5.2 * 10.732 * (180 + 460)}{300}$$

$$V_{g\ 300} = 114.389\ ft^3$$

$$V_{g\ 750} = \frac{0.916 * 5.2 * 10.732 * (180 + 460)}{750}$$

$$V_{g\ 750} = 43.612\ ft^3$$

Calculando los volúmenes restantes de la misma forma se obtiene la columna 3. El Bg se obtiene dividiendo la columna 3 entre el valor del volumen de gas a condiciones estándar. Los resultados se muestran en la columna 4.

Otra manera de resolver el problema es mediante la ecuación:

$$B_g = 0.02829 * \frac{Z * T}{p}$$

con la cual se obtuvo la columa 5.

(3) V_g	(4) B_g	(5) B_g
114.389	0.05794	0.05799
43.612	0.02209	0.02211
20.497	0.01038	0.01039
11.983	0.00607	0.00607
8.141	0.00412	0.00412
7.085	0.00359	0.00359
6.433	0.00326	0.00326

La gráfica de B_g se presenta en la figura I.3.

I.4.5 Obtenga la presión de burbujeo a partir de los siguientes datos medidos durante un análisis de laboratorio realizado a 80°C y explique el comportamiento observado.

p(Kg/cm^2)	V(cm^3)
220	93.33
200	95.75
150	101.82
120	105.45
100	107.88
90	109.09
78	144.66
70	227.32
40	537.33

En la figura I.4 se muestran estos valores graficados y se obtiene una presión de burbujeo de 80 Kg/cm^2.

Explicación de la gráfica:

La recta obtenida de 220 a 80 Kg/cm^2 muestra que a pequeñas variaciones en el volumen corresponden grandes cambios en la presión. Esto indica que durante esta etapa del experimento se maneja un fluido poco compresible, es decir que tenemos un líquido.

FIGURA I.3

FACTOR DE VOLUMEN DEL GAS

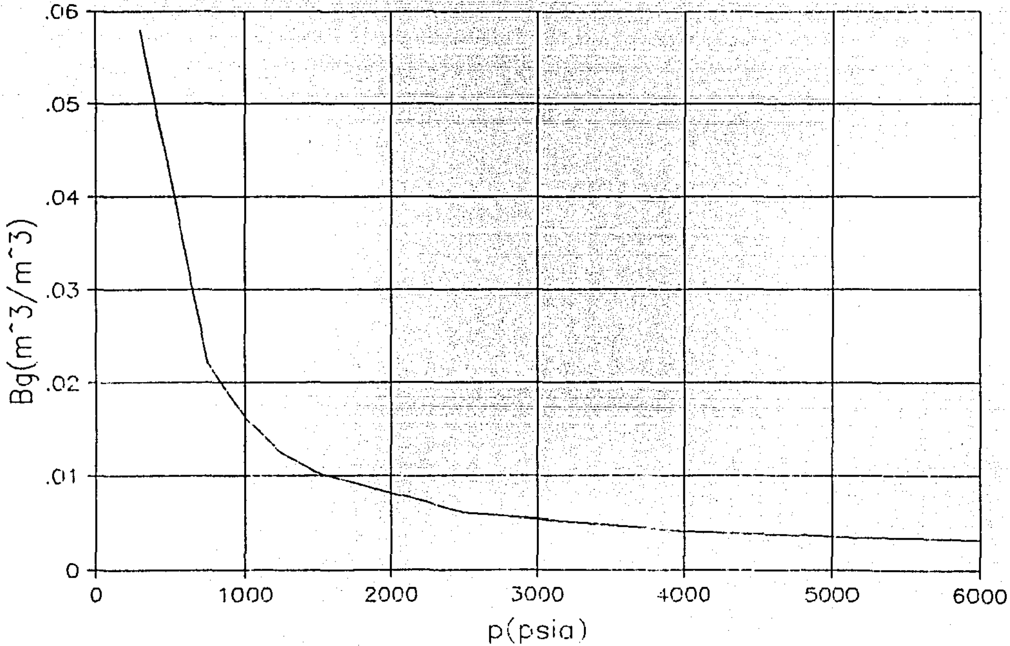
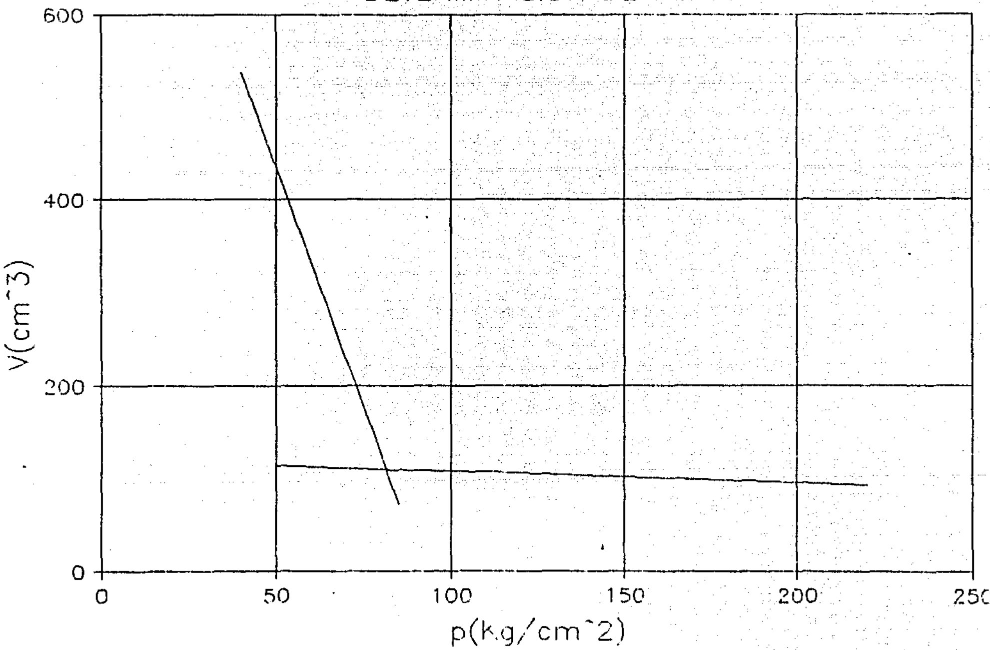


FIGURA 1.4

DETERMINACION DE Pb



La recta obtenida de 80 a 40 Kg/cm^2 muestra que a grandes cambios en el volumen les corresponden pequeñas variaciones de presión. En este rango de presiones se maneja por lo tanto un fluido muy compresible, ésto es debido a que se ha liberado gas del líquido que se tenía originalmente.

La intersección de ambas rectas proporciona el punto donde ocurre la liberación de la primera burbuja de gas; y la presión correspondiente a ese punto es denominada "presión de burbujeo". Es importante que durante la prueba, la temperatura se mantenga constante ya que la presión de burbujeo varía con ella.

I.4.6 En una celda PVT ciega se introduce una muestra de hidrocarburos y se observa la siguiente variación de su volumen contra la presión a Ty:

V (cm^3)	p (Kg/cm^2 abs)
100.0	290
100.5	220
100.8	180
102.0	140
104.0	120
106.0	100
108.0	80

Obtenga la presión de burbujeo (p_b) y la compresibilidad del aceite bajosaturado (c_o).

Solución:

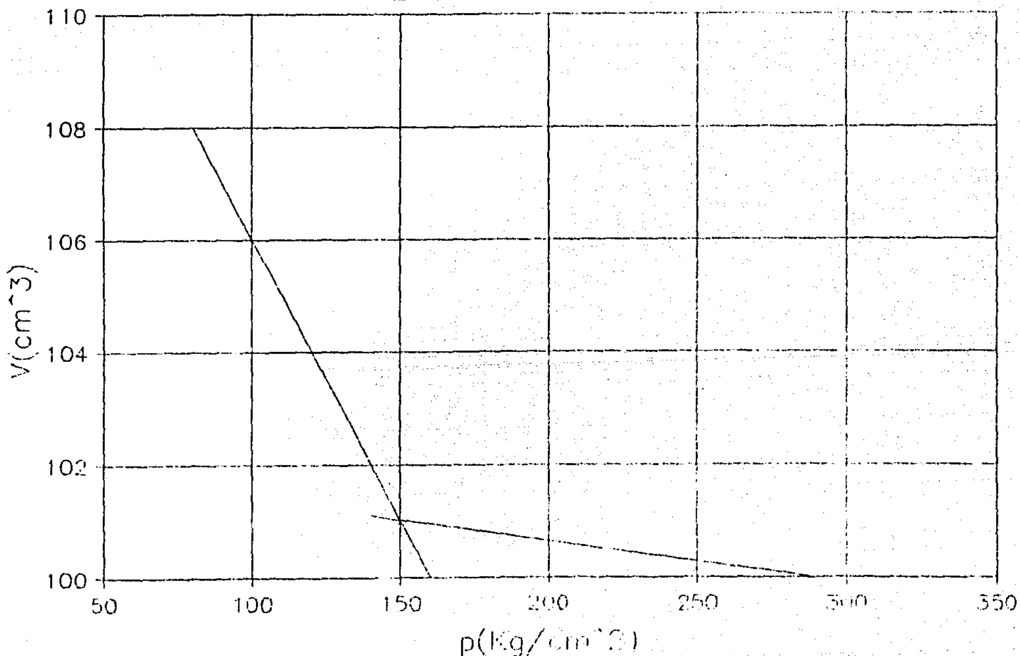
Al graficar V contra p se observará un cambio en la pendiente de las líneas que unen los valores observados. El punto de inflexión indica la p_b. La presencia de gas liberado, a presiones menores que la p_b, se manifiesta por el mayor valor de $\Delta V/\Delta p$ (mayor compresibilidad).

La gráfica de los valores observados se muestra en la figura I.5 de donde se obtiene en el punto de inflexión p_b = 150 Kg/cm^2.

Por lo tanto la compresibilidad del aceite bajosaturado se debe obtener arriba de 150 kg/cm^2.

FIGURA I.5

DETERMINACION DE Pb



$$\bar{c}_o = \frac{-2}{V_1 + V_2} \frac{(V_1 - V_2)}{(p_1 - p_2)}$$

tomando 290 y 180 Kg/cm^2:

$$\bar{c}_o = \frac{-2}{(100.0 + 100.8)} * \frac{(100.0 - 100.8)}{(290 - 180)}$$

$$\bar{c}_o = 7.244 * 10^{-4} \ (Kg/cm^2)^{-1}$$

I.5 Compresibilidad.

I.5.1 Se tienen los siguientes datos de un yacimiento:
Salinidad del agua congénita: 100 000 ppm

$Ty = 100°C$ $\qquad$ $p_i = 300 \ Kg/cm^2$

$\phi = 18 \ \%$ $\qquad$ $p = 200 \ Kg/cm^2$

Encuentre:

a) La compresibilidad promedio del agua congénita usando las correlaciones de Dodson y Standing.

b) La compresibilidad de la roca utilizando la correlación de Hall.

Solución:

a) Las correlaciones de Dodson y Standing se encuentran en el Apéndice A.

La estimación de la compresibilidad del agua se hará en el punto medio del intervalo de presión:

$$\bar{p} = \frac{p_i + p}{2} = \frac{300 + 200}{2} = 250 \ Kg/cm^2$$

Entrando a la gráfica A.1 con $p = 250 \ Kg/cm^2$ y $T = 100°C$ se encuentra:

$$R_{swp} = 3.0 \ m^3/m^3 \qquad (A)$$

De la gráfica A.2 entrando con la salinidad y la temperatura:

$$\frac{R_{sw}}{R_{swp}} = 0.6$$

De donde:

$$Rav = 0.6 * Ravp \qquad (B)$$

Sustituyendo A en B:

$$Rav = 0.6 * 3.0 = 1.8\ m^2/m^3 \qquad (C)$$

Ahora, Entrando con T y $\bar{p}$ a la gráfica A.3:

$$c_{vp} = 45 \times 10^{-6}\ (Kg/cm^2)^{-1} \qquad (D)$$

De la gráfica A.4 entrando con el valor de Rav = 1.8:

$$\frac{c_v}{c_{vp}} = 1.09$$

De donde:

$$c_v = 1.09 * c_{vp} \qquad (E)$$

Finalmente, sustituyendo D en E:

$$\bar{c}_v = 1.09 * 45 * 10^{-6}$$

$$\bar{c}_v = 49 * 10^{-6}\ (Kg/cm^2)^{-1}$$

b) Para encontrar la compresibilidad de la formación, se usa la correlación de Hall que se encuentra en el Apéndice A.

Entrando a la figura A.5 con el valor de la porosidad en porcentaje, se encuentra directamente c_f:

$$c_f = 52 * 10^{-6}\ (Kg/cm^2)^{-1}$$

I.5.2 Calcule la compresibilidad de un gas a la presión de 2000 psia y a 180°F, si se sabe que:

A 2 100 psia Z = 0.7217

A 2 000 psia Z = 0.7232

A 1 900 psia Z = 0.7266

Solución:

Como:

$$c_g = \frac{1}{p} - \frac{1}{Z} * \frac{dZ}{dp}$$

La derivada se puede obtener como:

$$\frac{dZ}{dp} \cong \frac{\Delta Z}{\Delta p} = \frac{Z_{2100} - Z_{1900}}{2\ 100 - 1\ 900}$$

$$c_g = \frac{1}{2\ 000} - \frac{1}{0.7232} * \frac{(0.7217 - 0.7266)}{(2\ 100 - 1\ 900)}$$

$$c_g = 0.000534\ (lb/pg^2)^{-1}$$

I.5.3 Se tiene un yacimiento con p_i = 500 Kg/cm^2, ϕ = 0.15 y $c_f = 50 * 10^{-6}$ (Kg/cm^2)$^{-1}$; se explota hasta una presión de abandono de 80 Kg/cm^2. Determine la porosidad a la presión de abandono.

Solución:

La ecuación que representa la variación del volumen poroso es:

$$V_p = V_{pi} * (1 - c_f * \Delta' p) \qquad (A)$$

La porosidad se define como:

$$\phi = \frac{V_p}{V_R}$$

De donde:

$$V_p = \phi * V_R$$
$$V_{pi} = \phi_i * V_R$$

Sustituyendo en A:

$$\phi * V_R = \phi_i * V_R * (1 - c_f * \Delta' p)$$

Dividiendo entre V_R (V_R = constante)

$$\phi = \phi_i * (1 - c_f * \Delta' p)$$

Sustituyendo valores:

$$\phi_{80} = 0.15 * (1 - 50*10^{-6} * (500 - 80))$$
$$\phi_{80} = 0.14685$$

I.5.4 Se ha planeado iniciar un proyecto de inyección de agua en un yacimiento cuyas propiedades se presentan en la siguiente tabla:

p(psi)	Bo	Bg	Rs	Rp
p_b = 3300	1.2511	0.00488	90.83	90.83
2700	1.2022	0.00601	71.41	220.00

La intención es mantener la presión del yacimiento en 2700 psi.

a) ¿Cuál será el gasto de inyección requerido para producir en la superficie 10 000 barriles por día de aceite?

b) ¿Cuánto de ese volumen se utilizará para desplazar solamente aceite?

Solución:

En este caso, al mantenerse la presión constante, no se presentará expansión del sistema roca-fluidos. Entonces el volumen producido será igual al volumen inyectado.

a) El agua inyectada desplazará aceite con su gas disuelto y gas libre (existe gas libre porque $p < p_b$). El gasto de inyección se considerará a la profundidad del yacimiento.

$$q_{iny} = q_{o\ @\ c.y.} + q_{gl\ @\ c.y.}$$

Esto se puede escribir como:

$$q_{iny} = q_{o\ @\ c.s.} * Bo + q_{o\ @\ c.s.} * (Rp - Rs) * Bg$$

Factorizando:

$$q_{iny} = q_{o\ @\ c.s.} * (Bo + Bg * (Rp - Rs))$$

Sustituyendo valores:

$$q_{iny} = 10\ 000 * (1.2022 + 0.00601 * (220 - 71.41))$$

$$q_{iny} = 20\ 952\ Bl/d \quad \text{Es el gasto requerido a c.y.}$$

b) El agua que desplazará solamente aceite será:

$$q'_{iny} = q_{o\ @\ c.s.} * Bo$$

$$q'_{iny} = 10\ 000 * 1.2022$$

$$q'_{iny} = 12\ 022\ Bl/d$$

I.5.5 Se tienen los siguientes datos de un yacimiento de aceite saturado:

$p = 150\ Kg/cm^2$	$Bginy = 0.005$
$Bo = 1.3$	$Bg = 0.007$
$Rs = 130$	$R = 200$

q_o = 50 000 m^3/d q_w = 20 000 m^3/d

B_w = 1.03

Se desea conocer el gasto de inyección de gas necesario para mantener la presión del yacimiento en 150 Kg/cm^2.

Solución:

En este caso no existe expansión de ninguno de los elementos del yacimiento porque la presión será constante; El desplazamiento de la producción será debido únicamente a la inyección de gas:

$$q_{giny} @ c.y. = q_{o\,@\,c.y.} + q_{gl\,@\,c.y.} + q_{w\,@\,c.y.}$$

$$q_{giny}\, B_g = q_o B_o + q_o (R_p - R_s) B_g + q_w B_w$$

$$q_{giny} = \left[q_o (Bo + (Rp - Rs) Bg) + qwBw \right] \frac{1}{Bg}$$

$$q_{giny} = \frac{50\ 000\ (1.3 + 0.007(200-130)) + 20\ 000(1.03)}{0.005}$$

$$q_{giny} = 22.02*10^{6}\ m^3/d\ @\ c.s.$$

CAPITULO II YACIMIENTOS DE ACEITE BAJOSATURADO

II.1 Introducción.

En todos los yacimientos se encuentra presente cierta cantidad de agua debido a su propia génesis: La roca del yacimiento originalmente se encontraba saturada totalmente por agua y cuando se presentó la migración de hidrocarburos hacia esta roca almacenadora, ellos desplazaron el agua existente, pero no toda debido a fuerzas retentivas que no permiten su remoción total. Es por eso que en todos los yacimientos se tiene una saturación de agua congénita que por lo general es una saturación irreductible, es decir que no se puede disminuir.

En los yacimientos de aceite bajosaturado, no se tiene presente una fase gaseosa, ésto significa que los poros de la roca se encuentran ocupados únicamente por dos fuidos que son el aceite y el agua congénita. En estos yacimientos el mecanismo de empuje que desplaza los hidrocarburos hacia los pozos es la expansión de los elementos que los forman, y que son: el aceite, el agua congénita y la matriz sólida de la roca. (Esto sin considerar los casos donde además existe un barrido por la invasión del agua de un acuífero asociado).

En la ecuación de balance de materia, inicialmente sólo se consideró la expansión del aceite, sin tomar en cuenta las expansiones de la roca y del agua congénita. De hecho, ésto puede ser válido si las dos últimas presentan valores demasiado pequeños comparados con la expansión del aceite. Un yacimiento considerado de esta manera recibe el nombre de yacimiento volumétrico.

Con el desarrollo de técnicas de laboratorio más precisas para la medición de la compresibilidad de la roca y el agua congénita, fue posible introducir éstas en la ecuación de balance de materia haciéndola un poco más real. En este caso el yacimiento se considera no volumétrico.

Como se ha señalado, en estos yacimientos es muy importante la expansión del sistema roca-fluidos, por eso cuando se analiza un yacimiento de este tipo se debe tener especial atención en la obtención adecuada de los factores de compresibilidad isotérmica. Desafortunadamente, es uso común que las compresibilidades del agua congénita y de la matriz rocosa no se midan, pero existen correlaciones que se pueden usar para su obtención y que aportan resultados aceptables; para el agua congénita se tiene la correlación de Dodson y Standing y para la roca se cuenta con la correlación de Hall. Estas correlaciones gráficas se presentan en el Apéndice A.

En este capítulo se presentan aplicaciones de la ecuación de balance de materia para yacimientos bajosaturados, primero se tratan los yacimientos volumétricos y después los no volumétricos con y sin entrada de agua. El tema de yacimientos de gas seco se incluyó en este capítulo por presentar un comportamiento similar, y se presentan al final para que previamente se hayan analizado los yacimientos de aceite bajosaturado y mejorar así su comprensión.

Se debe aclarar que en este capítulo se considera que la entrada de agua al yacimiento es conocida porque su evaluación se trata en un capítulo posterior.

II.2 Deducciones.

II.2.1 Deduzca la expresión para el cálculo de la compresibilidad efectiva de un yacimiento de aceite bajosaturado.

Solución:

Las expansiones que se presentan en el yacimiento y que originan el desplazamiento de fluidos son:

$$E = E_o + E_w + E_s \qquad (A)$$

Donde E representa la expansión total del sistema roca-fluidos

Cada una de las expansiones se puede escribir como:

$$E_o = V_o\ c_o\ \Delta'p = V_{pi}\ (1 - S_{wi})\ c_o \Delta'p$$

$$E_w = V_w\ c_w\ \Delta'p = V_{pi}\ S_{wi}\ c_w \Delta'p$$

$$E_s = V_s\ c_s\ \Delta'p = V_{pi}\ c_f\ \Delta'p$$

El volumen poroso inicial se puede calcular como:

$$V_{pi} = \frac{V_{oi}}{S_{oi}} = \frac{N\ B_{oi}}{1 - S_{wi}}$$

Entonces:

$$E_o = \left[\frac{N\ B_{oi}}{1 - S_{wi}}\right] * (1 - S_{wi})\ c_o\ \Delta'p$$

$$E_w = \left[\frac{N\ B_{oi}}{1 - S_{wi}}\right] * S_w\ c_w\ \Delta'p$$

$$E_s = \left[\frac{N\ B_{oi}}{1 - S_{wi}}\right] * c_f\ \Delta'p$$

Sustituyendo en A:

$$E = \left[\frac{N\ B_{oi}}{1 - S_{wi}}\right] * \left[(1 - S_w)c_o + S_w\ c_w + c_f\right] * \Delta'p$$

Que se puede escribir como:

$$E = N\,B_{oi} * \left[\frac{(1-S_{wi})\,c_o + S_w\,c_w + c_f}{1 - S_{wi}}\right] * \Delta' p$$

Como se puede observar, esta ecuación tiene la forma:

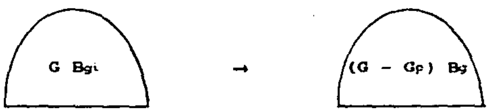
$$E = N\,B_{oi}\,c_e\,\Delta' p$$

Donde el término c_e nos representa :

$$c_e = \frac{(1 - S_{wi})\,c_o + S_w\,c_w + c_f}{1-S_{wi}}$$

Este término se conoce como "compresibilidad efectiva del sistema roca-fluidos" e incluye los efectos del aceite, del agua congénita y de la formación.

II.2.2 Desarrolle la ecuación de balance de materia para determinar el volumen original de un yacimiento de gas sin entrada de agua, considerando la expansión de la roca y la del agua congénita.



Solución:

La ecuación de balance de materia para un yacimiento volumétrico de gas es:

$$G_p\,B_g + G\,(B_g - B_{gi}) \qquad \textbf{(A)}$$

Por otro lado, las expansiónes del agua congénita y de la roca son:

$$E_w = V_w\,c_w\,\Delta' p = V_{pi}\,S_w\,c_w\,\Delta' p$$

$$E_f = V_{pi}\,c_f\,\Delta' p$$

Donde:

$$V_{pi} = G\ B_{gi}\ /\ (1-S_w)$$

Sumando estas expresiones en A:

$$G_p\ B_g = G\ (B_g - B_{gi}) + G\ B_{gi}\ \Delta' p \left[\frac{S_w\ c_w + c_f}{1 - S_w} \right]$$

Factorizando:

$$G_p\ B_g = G \left[B_g - B_{gi} + B_{gi}\ \Delta' p \frac{(s_w\ c_w + c_f)}{(1 - S_w)} \right]$$

Finalmente:

$$G = \frac{G_p\ B_g}{B_g - B_{gi} + \dfrac{B_{gi}\ \Delta' p\ (S_w\ c_w + c_f)}{1 - S_w}}$$

II.2.3 A partir de la ecuación de balance de materia, deduzca una ecuación para calcular la recuperación de aceite en un yacimiento bajosaturado:

a) Volumétrico.

b) No volumétrico sin entrada ni producción de agua.

c) No volumétrico con entrada y producción de agua.

Solución:

a) La ecuación de balance de materia para un yacimiento volumétrico es:

$$N_p\ B_o = N\ (B_o - B_{oi})$$

Y la recuperación de aceite se define como:

$$Rec = \frac{N_p}{N}$$

Entonces, acomodando términos en la ecuación de balance de materia:

$$\frac{N_p}{N} = \frac{B_o - B_{oi}}{B_o}$$

Lo cual se puede escribir como:

$$Rec = \frac{Bo - Boi}{Bo} = 1 - \frac{Boi}{Bo}$$

b) La ecuación de balance de materia en este caso es:

$$Np\ Bo = N\ Boi\ c_e\ \Delta' p$$

De donde:

$$\frac{Np}{N} = \frac{Boi\ ce\ \Delta' p}{Bo}$$

Por lo cual:

$$Rec = \frac{Boi\ ce\ \Delta' p}{Bo}$$

c) La ecuación de balance de materia para estos yacimientos es:

$$Np\ Bo = N\ Boi\ ce\ \Delta' p + We - Wp\ Bw$$

Dividiendo entre N Bo:

$$\frac{Np}{N} = \frac{N\ Boi\ ce\ \Delta' p + We - Wp\ Bw}{N\ Bo}$$

Donde el miembro izquierdo es la recuperación buscada:

$$Rec = \frac{N\ Boi\ ce\ \Delta' p + We - Wp\ Bw}{N\ Bo}$$

II.2.4 Deduzca la ecuación de balance de materia haciendo las consideraciones siguientes:

- Yacimiento bajosaturado.
- No hay producción de agua.
- Sí hay entrada de agua al yacimiento.
- Saturación de agua igual a cero.

Solución:

Como no hay producción de agua, el unico fluido desplazado será el aceite:

$$V_{fd} = N_p B_o \qquad (A)$$

Este desplazamiento será debido a la entrada de agua al yacimiento, y a la expansión de la roca y del aceite:

$$V_{fd} = E_o + E_s + W_e \qquad (B)$$

Las expansiones serán:

$$E_o = V_o c_o \Delta'p = V_{pi} (1 - S_w) c_o \Delta'p$$

Como $S_w = 0$:

$$E_o = V_{pi} c_o \Delta'p$$

$$E_s = V_{pi} c_f \Delta'p$$

Donde:

$$V_{pi} = \frac{N B_{oi}}{1 - S_w}$$

Como $S_w = 0$:

$$V_{pi} = N B_{oi}$$

Entonces B nos queda:

$$V_{fp} = N B_{oi} c_o \Delta'p + N B_{oi} c_f \Delta'p + W_e \qquad (C)$$

Igualando A y C:

$$N_p B_o = N B_{oi} (c_o + c_f) \Delta'p + W_e$$

Esta sería la ecuación para las condiciones establecidas.

II.2.5 Suponga que se tiene un yacimiento bajosaturado con un acuífero asociado de gran tamaño, de tal manera que la presión del yacimiento nunca declina.

a) Obtenga la ecuación de balance de materia para este yacimiento.

b) ¿Cómo sería esa expresión si el mantenimiento de presión se lograra con inyección de agua en vez de la entrada natural de agua al yacimiento?

Solución:

a) Partiendo de la ecuación de balance de materia para yacimientos bajosaturados:

$$N_p B_o + W_p B_w = N B_{oi} c_e \Delta'p + W_e$$

Como la presión no varía, $\Delta'p = 0$ y entonces:

$$N_p B_o + W_p B_w = W_e$$

De donde:

$$N_p\ B_o = W_e - W_p\ B_w$$

Es decir, que la producción del aceite será debida única y exclusivamente a la entrada neta de agua al yacimiento.

b) En este caso el volumen inyectado de agua (VIW) actúa como un mecanismo adicional de desplazamiento:

$$N_p\ B_o + W_p\ B_w = N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta'p + W_e + VIW$$

Al no existir cambio en la presión $\Delta'p = 0$

$$N_p\ B_o + W_p\ B_w = W_e + VIW$$

Sin embargo, al no existir entrada de agua, $W_e = 0$ y seguramente $W_p = 0$, quedando:

$$N_p\ B_o = VIW$$

Es decir, el aceite será desplazado solamente por el agua inyectada al yacimiento.

II.3 Yacimientos volumétricos.

II.3.1 Un yacimiento de aceite volumétrico o cerrado, tiene el siguiente comportamiento:

p (Kg/cm^2)	Bo	Rs	Np (Bl)	
220	1.40		0	ϕ = 20 %
160	1.55	120	629 000	S_{wi} = 30 %

Determine:

a) El volumen de gas producido a 160 Kg/cm^2

b) El volumen original de aceite @ c.s.

c) La relación gas-aceite instantánea.

d) El volumen de poros a la p_i.

e) El volumen de poros a la p_b.

f) La recuperación a 160 Kg/cm^2 expresada en porcentaje.

Solución:

a) En la bajosaturación $R_p = R_s$:

$$G_p = R_p\ N_p = R_s\ N_p$$

$$G_p = 120 * 629\ 000 * (0.159\ m^3/Bl)$$

$$G_p = 12*10^6\ m^3 \text{ @ c.s.}$$

b) La ecuación de balance de materia para este yacimiento es:

$$N\ (B_o - B_{oi}) = N_p\ B_o$$

De donde:

$$N = \frac{N_p\ B_o}{B_o - B_{oi}}$$

Sustituyendo valores:

$$N = \frac{629\ 000 * 1.55}{1.55 - 1.40}$$

$$N = 6.5*10^6\ Bl\ @\ c.s.$$

c) Durante la etapa de bajosaturación $R = R_s = R_{si}$

$$R = 120$$

d) De la definición de saturación:

$$V_{pi} = \frac{V_{oi}}{S_o} = \frac{N\ B_{oi}}{1 - S_{wi}}$$

Sustituyendo valores:

$$V_{pi} = \frac{6.5*10^6 * 1.40 * (0.159\ m^3/Bl)}{1 - 0.30}$$

$$V_{pi} = 2.067*10^6\ m^3$$

e) Por tratarse de un yacimiento volumétrico (V_p = cte):

$$V_p = V_{pi}$$

$$V_p = 2.067*10^6\ m^3$$

f) Para un yacimiento volumétrico:

$$Rec = \frac{B_o - B_{oi}}{B_o}$$

$$Rec = \frac{1.55 - 1.40}{1.55}$$

$$Rec = 0.09677$$

Expresada en porcentaje:

$$Rec = 0.09677 * 100$$

$$Rec = 9.677\ \%$$

II.3.2 De un yacimiento bajosaturado cuyo volumen original es de $7*10^6$ m^3 @ c.y. se tiene la siguiente información:

p_i = 220 Kg/cm^2 | p = 180 Kg/cm^2

B_{oi} = 1.3 | B_o = 1.43

$c_v = 7.3*10^{-5} (Kg/cm^2)^{-1}$ | G_p = 63 636 364 m^3

$c_f = 4.2*10^{-5} (Kg/cm^2)^{-1}$ | W_p = 0

R_{si} = 130 | S_{wi} = 20 %

Determine si se comporta o no como un yacimiento volumétrico.

Solución:

La ecuación de balance de materia para un yacimiento volumétrico es:

$$N_p\ B_o = N\ (B_o - B_{oi}) \qquad \text{(A)}$$

Calculando el valor del miembro izquierdo: $R_p = R_s$

$$N_p = G_p/R_s$$

$$N_p = 63\ 636\ 364\ /\ 130$$

$$N_p = 489\ 510\ m^3$$

Multiplicando por B_o:

$$N_p\ B_o = 489\ 510 * 1.43$$

$$N_p\ B_o = 700\ 000\ m^3$$

Calculando el valor del miembro derecho:

Necesitamos N:

$$N = \frac{V_{oi}}{B_{oi}} = \frac{7*10^6}{1.3}$$

$$N = 5\ 384\ 615\ m^3 \text{ @ c.s.}$$

entonces nos queda:

$$N\ (B_o - B_{oi}) = 5\ 384\ 615\ (1.43-1.3)$$

$$N\ (B_o - B_{oi}) = 700\ 000$$

De donde nos resulta:

$$N_p\ B_o = N\ (B_o - B_{oi})$$

Por lo cual se puede asegurar que se trata de un yacimiento de tipo volumétrico.

II.3.3 De un yacimiento volumétrico de aceite, sólo se sabe que su presión inicial ha disminuído 50 Kg/cm^2 y que en este momento B_o/B_{oi} = 1.046.

Encuentre:

a) El valor de la recuperación de aceite.

b) El valor de la compresibilidad del aceite.

Solución:

a) La recuperación de un yacimiento volumétrico se obtiene con la expresión:

$$Rec = \frac{B_o - B_{oi}}{B_o}$$

Multiplicando y dividiendo por $1/B_{oi}$:

$$Rec = \frac{B_o/B_{oi} - B_{oi}/B_{oi}}{B_o/B_{oi}}$$

$$Rec = \frac{B_o/B_{oi} - 1}{B_o/B_{oi}}$$

Sustituyendo:

$$Rec = \frac{1.046 - 1}{1.046}$$

$$Rec = 0.044$$

Expresando en porcentaje:

$$Rec = 4.4\ \%$$

b) La ecuación de balance de materia para un yacimiento volumétrico es:

$$N_p\ B_o = N\ (B_o - B_{oi})$$

Por otro lado, como en estos yacimientos el desplazamiento de fluidos se debe sólo a la expansión del aceite, se puede establecer:

$$N_p\ B_o = N\ B_{oi}\ c_o\ \Delta'p$$

Igualando las dos expresiones anteriores:

$$N\ (B_o - B_{oi}) = N\ B_{oi}\ c_o\ \Delta'p$$

Dividiendo entre $N\ B_{oi}$:

$$\frac{B_o - B_{oi}}{B_{oi}} = c_o\ \Delta'p$$

Despejando:

$$Co = \frac{Bo/Boi - 1}{\Delta' p}$$

Sustituyendo valores:

$$Co = \frac{1.046 - 1}{50}$$

$$Co = 9.2 * 10^{-4} \ (Kg/cm^2)^{-1}$$

II.4 Yacimientos sin entrada de agua.

II.4.1 Un yacimiento de aceite bajosaturado produce desde p_i = 400 Kg/cm^2 hasta p_b = 200 Kg/cm^2, 1 000 000 m^3 a c.s. Determine el volumen de roca inicial del yacimiento si Boi = 1.250, Bob = 1.380, ϕ = 0.20, Swi = 0.25, $\overline{ce}$= 7.1*10^{-6} (lb/pg^2)$^{-1}$ y We = Wp = 0.

Solución:

$$Vpi = \frac{N \ Boi}{1 - Swi} \ ; \quad \phi = \frac{Vpi}{Vri}$$

De donde:

$$Vri = \frac{Vpi}{\phi} = \frac{N \ Boi}{\phi \ (1 - Swi)} \qquad \text{(A)}$$

De la ecuación de balance de materia:

$$N = \frac{Np \ Bo}{Boi \ ce \ \Delta' p}$$

Sustituyendo valores:

$$N = \frac{1\ 000\ 000 * 1.38}{1.25 * (\ 7.1 * 10^{-6} * 14.22) * (400 - 200)}$$

$$N = 54.7*10^6\ m^3\ @\ c.s.$$

Finalmente, sustituyendo en la ecuación A:

$$V_{Ri} = \frac{54.7*10^6 * 1.25}{0.20 * (1 - 0.25)}$$

$$V_{Ri} = 4.55*10^8\ m^3 \text{ de roca.}$$

II.4.2 De un yacimiento de aceite bajosaturado, cuyo volumen original fue de $45*10^6 m^3$ @ c.s. se ha recuperado el 3.768% a la p_1. Se cuenta con la siguiente información:

$p_i = 250\ Kg/cm^2$ $\quad$ $p_1 = 210\ Kg/cm^2$

$R_{si} = 130$ $\quad$ $B_{o1} = 1.40$

$S_{wi} = 25\ \%$ $\quad$ $c_w = 7.5*10^{-6}\ (Kg/cm^2)^{-1}$

$c_f = 3.2*10^{-5}\ (Kg/cm^2)^{-1}$

Determine el volumen de poros a las condiciones iniciales.

Solución:

La ecuación de la variación del volumen poroso es:

$$V_{pf} = V_{pi}\ (1 - c_f\ \Delta' p)$$

De donde:

$$V_{pi} = \frac{V_{pf}}{1 - c_f\ \Delta' p}$$

El volumen de poros final se puede calcular como:

$$V_{pf} = \frac{N - N_p}{1 - S_w}$$

En la etapa de bajosaturación se puede considerar $S_w = S_{wi}$

$$V_{pf} = \frac{45*10^6 - 0.03768 * 45*10^6}{1 - 0.25}$$

$$V_{pf} = 78.63*10^6\ m^3$$

Finalmente:

$$V_{pi} = \frac{78.63*10^6}{1 - 3.2*10^{-5}\ (250 - 210)}$$

$$V_{pi} = 78.73*10^6\ m^3 \text{ de espacio.}$$

II.4.3 Un yacimiento de aceite cuyo volumen original es de $100*10^6\ m^3$ @ c.s. tiene la siguiente información:

$p\ (Kg/cm^2)$	B_o	R_s	$N_p\ (m^3)$	
250	1.30	130	0	$S_w = 25\%$
190	1.45		$15.602*10^6$	

Determine el valor de la compresibilidad de la formación.

Solución:

Como B_o aumenta al disminuirse la presión, se trata de un yacimiento de aceite bajosaturado. En un yacimiento de este tipo la compresibilidad efectiva es:

$$c_e = \frac{S_o\ c_o + S_w\ c_w + c_f}{S_o} \qquad (A)$$

De donde:

$$c_f = S_o\ c_e - S_o\ c_o - S_w\ c_w \qquad (B)$$

Considerando $S_w = S_{wi}$

$$S_o = 1 - S_{wi}$$

$$S_o = 1 - 0.25 = 0.75$$

La compresibilidad efectiva (c_e) se puede calcular con la ecuación de balance de materia:

$$N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta'p = N_p\ B_o$$

De donde:

$$c_e = \frac{N_p\ B_o}{N\ B_{oi}\ \Delta'p}$$

Sustituyendo valores:

$$c_e = \frac{15.602*10^6 * 1.45}{100*10^6 * 1.30 * (250 - 190)}$$

$$c_e = 2.9*10^{-3}\ (Kg/cm^2)^{-1}$$

Para calcular la compresibilidad del aceite:

$$C_o = \frac{2\,(B_o - B_{oi})}{(p_i - P)(B_o + B_{oi})}$$

$$C_o = \frac{2 * (1.45 - 1.30)}{(250 - 190)(1.45 + 1.30)}$$

$$C_o = 1.818*10^{-3}\ (Kg/cm^2)^{-1}$$

Sustituyendo valores en la ecuación B:

$$c_f = 0.75 * 2.9*10^{-3} - 0.75 * 1.818*10^{-3} - 0.25\ c_w$$

$$c_f = 8.115*10^{-4} - 0.25\ c_w \qquad \text{(C)}$$

En este caso no tenemos información para calcular c_w, por lo cual el valor de c_f nos queda como una función de ella.

A continuación se resolverá para un caso particular usando la correlación de Standing y haciendo las siguientes suposiciones:

- T_y = 95°C
- Salinidad = 60 000 ppm

Entrando con estos datos a la correlación de Dodson y Standing, se obtiene:

$$c_w = 51.5*10^{-6}\ (Kg/cm^2)^{-1}$$

Sustituyendo entonces en la ecuación C obtenemos:

$$c_f = 8.115*10^{-4} - 0.25 * 51.5*10^{-6}$$

$$c_f = 7.986*10^{-4}\ (Kg/cm^2)^{-1}$$

II.4.4 Se tienen los siguientes datos de un yacimiento:

$V_{pi} = 15*10^6\ m^3$	$p_i = 400\ Kg/cm^2$	$N_p = 1.2*10^6\ m^3$
$B_{oi} = 1.48$	$p_b = 250\ Kg/cm^2$	$B_{o300} = 1.50$
$B_{ob} = 1.51$	$p = 300\ Kg/cm^2$	$S_{wi} = 0.10$
$B_w = 1.0$	$W_p = 0$	$W_e = 0$
$c_w = 4*10^{-6}(Kg/cm^2)^{-1}$		

Encuentre el volumen de poros existente al bajar la presión a 300 Kg/cm^2.

Solución:

Para obtener el volumen de poros se usa la ecuación;

$$V_{pf} = V_{pi}\ (1 - c_f\ \Delta' p) \qquad \text{(A)}$$

De la ecuación de saturación de aceite:

$$S_o = V_{oi}/V_{pi} \quad ; \; V_{pi} = V_{oi}/S_o = V_{oi}/(1 - S_w)$$

Entonces:

$$V_{pi} = 15*10^{6} \;/\; (1 - 0.10)$$

$$V_{pi} = 16.66*10^{6}\ m^{3}$$

La c_f se puede obtener de la ecuación:

$$c_e = \frac{(1 - S_w)\ c_o + S_w\ c_w + c_f}{1 - S_w}$$

Despejando:

$$c_f = (c_e - c_o)(1-S_w) - S_w\ c_w \qquad \text{(B)}$$

Calculando c_o:

$$c_o = \frac{2}{(B_{oi} + B_{ob})} \; \frac{(B_{ob} - B_{oi})}{(p_i - p_b)}$$

$$c_o = \frac{2}{1.48 + 1.51} \; \frac{1.51 - 1.48}{400 - 250}$$

$$c_o = 1.34*10^{-4}\ (Kg/cm^{2})^{-1}$$

La c_e se obtiene de la ecuación de balance de materia:

$$N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta' p = N_p\ B_o + W_p\ B_w - W_e$$

Como $W_p = W_e = 0$:

$$N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta' p = N_p\ B_o$$

Despejando:

$$c_e = \frac{N_p\ B_o}{N\ B_{oi}\ \Delta' p}$$

$$c_e = \frac{1.2*10^{6} * 1.5}{15*10^{6} * 1.48 * 150}$$

$$c_e = 5.4*10^{-4}\ (Kg/cm^{2})^{-1}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación B:

$$c_f = (5.4*10^{-4} - 1.34*10^{-4})0.90 - 0.10(4*10^{-5})$$

$$c_f = 3.6*10^{-4}\ (Kg/cm^{2})^{-1}$$

Finalmente resolviendo la ecuación A:

$$V_{pf} = 16.66*10^{6}\ (1 - 3.6*10^{-4} * 150)$$

$$V_{pf} = 15.76*10^{6}\ m^{3}$$

II.4.5 Un yacimiento con p_i = 400 Kg/cm^2 y B_{oi} = 1.305 produjo $14*10^6$ m^3 de aceite medidos a condiciones estándar y su presión declinó hasta 300 Kg/cm^2, a la que corresponde un B_o de 1.33. Considere que no existe entrada de agua y que la compresibilidad efectiva a 350 Kg/cm^2 fué de $1.94*10^{-6}$ $(Kg/cm^2)^{-1}$. Calcule N.

Solución:

Como se observa que $B_{o300} > B_{oi}$, entonces se trata de un yacimiento bajosaturado.

La ecuación de balance de materia para yacimientos bajosaturados es:

$$N_p\ B_o + W_p\ B_w = N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta' p + W_e$$

De los datos: $W_p = 0$; $W_e = 0$

$$N_p\ B_o = N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta' p$$

Despejando N:

$$N = \frac{N_p\ B_o}{B_{oi}\ c_e\ \Delta' p}$$

Sustituyendo valores:

$$N = \frac{14*10^6 * 1.33}{1.305 * 1.94*10^{-6} * (400 - 300)}$$

$$N = 7.3547*10^{10}\ m^3\ @\ c.s.$$

II.4.6 Calcule la recuperación hasta la presión de burbujeo de un yacimiento con los siguientes datos:

$p_i = 500\ Kg/cm^2$	$p_b = 200\ Kg/cm^2$
$B_{oi} = 1.5$	$B_{ob} = 1.6$
$c_w = 2.25*10^{-5}(Kg/cm^2)^{-1}$	$W_e = 0$
$S_{wi} = 0.20$	$W_p = 0$
$c_f = 5.2*10^{-5}(Kg/cm^2)^{-1}$	

Solución:

Como $p_i > p_b$ se trata de un yacimiento bajosaturado. La ecuación de balance de materia para un yacimiento de este tipo es:

$$W_p\ B_w + N_p\ B_o = N\ B_{oi}\ C_e\ \Delta'p + W_e \qquad (1)$$

Como $W_e = W_p = 0$

$$N_p\ B_o = N\ B_{oi}\ C_e\ \Delta'p \qquad (2)$$

La recuperación se define como:

$$Rec = \frac{N_p}{N} \qquad (3)$$

Despejando de 2:

$$\frac{N_p}{N} = \frac{B_{oi}\ c_e\ \Delta'p}{B_o} = Rec \qquad (4)$$

Como no se conoce c_e :

$$c_e = \frac{S_o\ c_o + S_w\ c_w + c_f}{S_o} \qquad (5)$$

Donde : $S_o = 1 - S_w = 1 - 0.20 = 0.80$

$$C_o = \frac{2\ (B_{ob} - B_{oi})}{(B_{ob} + B_{oi})(p_i - p_b)} \qquad (6)$$

$$C_o = \frac{2\ (1.6 - 1.5)}{(1.6 + 1.5)(500 - 200)}$$

$$C_o = 2.15*10^{-4}\ (Kg/cm^2)^{-1} \qquad (7)$$

Sustituyendo en 5:

$$c_e = \frac{0.8 * 2.15*10^{-4} + 0.2 * 2.25*10^{-5} + 5.2*10^{-5}}{0.8}$$

$$c_e = 2.85*10^{-4}$$

Sustituyendo en 4:

$$Rec = \frac{1.5 * 2.85*10^{-4} * (500 - 200)}{1.6}$$

$$Rec = 0.0801$$

Expresado en porcentaje: $Rec = 8.01\ \%$

II.4.7 Se tiene un núcleo con aceite bajosaturado dentro de un recipiente a presión . La presión de burbujeo del aceite es de 180 Kg/cm^2, se encuentra a 250 Kg/cm^2 y se hace declinar la presión hasta 200 Kg/cm^2. Además se cuenta con la siguiente información:

$V_{nucleo} = 200\ cm^3$ $\qquad$ $B_o = 1.50$

$\phi = 0.20$ $\qquad$ $B_o = 1.45$

$S_w = 0.15$ $\qquad$ $c_f = 6*10^{-5}\ (Kg/cm^2)^{-1}$

$c_w = 5*10^{-5}(Kg/cm^2)^{-1}$

a) Calcule la cantidad de aceite que salió del núcleo al abatirse la presión.

b) Calcule el volumen de poros inicial y el volumen final de poros.

Solución:

A) Sea V_{oe} el volumen extraído:

$$V_{oe} = E_o + E_w + E_s$$

Esto se puede escribir como:

$$V_{oe} = V_{oi}\ c_o\ \Delta'p + V_{wi}\ c_w\ \Delta'p + V_{pi}\ c_f\ \Delta'p \qquad (1)$$

El volumen inicial de aceite es:

$$V_{oi} = V_{nucleo}\ \phi\ (1-S_w)$$

$$V_{oi} = 200 * 0.20 * (1 - 0.15)$$

$$V_{oi} = 34\ cm^3 \qquad (2)$$

El volumen inicial de agua es:

$$V_{wi} = V_{nucleo}\ \phi\ S_w$$

$$V_{wi} = 200 * 0.20 * 0.15$$

$$V_{wi} = 6\ cm^3 \qquad (3)$$

El volumen poroso inicial es:

$$V_{pi} = V_{nucleo}\ \phi$$

$$V_{pi} = 200 * 0.20$$

$$V_{pi} = 40\ cm^3 \qquad (4)$$

La diferencia de presión es:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 250 - 200$$

$$\Delta p = 50\ Kg/cm^2 \qquad (5)$$

La compresibilidad del aceite es:

$$c_o = \frac{2}{B_{oi} + B_{ob}}\left[\frac{B_{ob} - B_{oi}}{p_i - p_b}\right]$$

$$c_o = \frac{2}{1.45 + 1.50}\ \frac{1.50 - 1.45}{(250 - 180)}$$

$$c_c = 4.84*10^{-4}\ (Kg/cm^2)^{-1} \qquad (6)$$

Sustituyendo valores en la ecuación 1:

$$V_{oc} = 34(4.84*10^{-4})(50) + 6(5*10^{-5})(50) + 40(6*10^{-5})(50)$$

$V_{oe} = 0.9578\ cm^3$ es el aceite que sale del núcleo.

b) El volumen inicial de poros ya se calculó en el inciso anterior y es:

$$V_{pi} = 40\ cm^3$$

El volumen final de poros será:

$$V_{pf} = V_{pi} * (1 - c_f\ \Delta p)$$
$$V_{pf} = 40 * (1 - 6*10^{-5} * 50)$$
$$V_{pf} = 39.88\ cm^3$$

II.4.8 Se tiene un yacimiento bajosaturado en $200*10^6 m^3$ de roca con porosidad del 16%. la saturación inicial de agua es del 18%, la presión de burbujeo es de 180 Kg/cm^2, la presión inicial del yacimiento es de 400 Kg/cm^2. El factor de volumen inicial del aceite es de 1.38 y el factor de volumen a la presión de burbujeo es de 1.41; la compresibilidad de la formación es de $4*10^{-5}$ $(Kg/cm^2)^{-1}$ y la del agua es de $3*10^{-5}(Kg/cm^2)^{-1}$. La relación gas disuelto-aceite inicial es de 500 m^3/m^3.

a) Calcule el volumen original de aceite @ c.s.

b) Calcule la producción acumulativa de gas hasta la presión de burbujeo.

c) ¿Cuál es la máxima cantidad de gas que podría obtenerse de este yacimiento?

Solución:

El volumen de aceite en el yacimiento es:

$$N = \frac{V_{oi}}{B_{oi}}$$

V_{oi} se puede calcular como:

$$V_{oi} = V_R\ \phi\ (1 - S_{wi})$$
$$V_{oi} = 200*10^6 * 0.16 * (1 - 0.18)$$
$$V_{oi} = 26.24*10^6\ m^3 \text{ @ c.y.}$$

Entonces:

$$N = \frac{26.24 * 10^6}{1.38}$$

$$N = 19.01*10^6 \ m^3 \ @ \ c.s.$$

b) Por definición:

$$R_p = \frac{G_p}{N_p}$$

Despejando G_p y aplicándola a la p_b:

$$G_{pb} = R_{pb} * N_{pb}$$

En las condiciones de bajosaturación:

$$R_{pb} = R_s = R_{si}$$

La N_{pb} se puede calcular con la ecuación de balance de materia:

$$N_{pb} \ B_{ob} = N \ B_{oi} \ c_e \ \Delta' p$$

Despejando:

$$N_{pb} = \frac{N \ B_{oi} \ c_e \ \Delta' p}{B_{ob}}$$

Calculando la compresibilidad efectiva:

$$c_o = \frac{2}{B_{ob} + B_{oi}} \ \frac{B_{ob} - B_{oi}}{p_i - p_b}$$

$$c_o = \frac{2}{1.41 + 1.38} \ \frac{1.41 - 1.38}{400 - 180}$$

$$c_o = 9.78*10^{-5} \ (Kg/cm^2)^{-1}$$

$$c_e = \frac{S_o \ c_o + S_w \ c_w + c_f}{S_o}$$

$$c_e = \frac{0.84 * 9.78*10^{-5} + 0.16 * 3*10^{-5} + 4*10^{-5}}{0.82}$$

$$c_e = 14.63*10^{-5} (Kg/cm^2)^{-1}$$

Entonces:

$$N_{pb} = \frac{19.01*10^{6} * 1.38 * 14.63*10^{-5} * (400 - 180)}{1.41}$$

$$N_{pb} = 0.335*10^{6}\ m^3\ @\ c.s.$$

Finalmente:

$$G_{pb} = 500 * 0.335*10^{6}$$
$$G_{pb} = 167.5*10^{6}\ m^3g\ @\ c.s.$$

c) El volumen máximo de gas que se podría recuperar sería aquel que se obtendría cuando la presión del yacimiento fuera nula y corresponde a la cantidad original de gas que existe en el yacimiento.

$$G_{pmax} = N\ R_{si}$$
$$G_{pmax} = 19.01*10^{6} * 500$$
$$G_{pmax} = 9.505*10^{9}\ m^3g\ @\ c.s.$$

II.4.9 Un yacimiento de aceite tiene un volúmen original de $6*10^{6}\ m^3$ @ c.s. y presenta el siguiente comportamiento:

$P(Kg/cm^2)$	B_o	R_s	
P_i = 250	1.3	115	$\phi = 23\%$
220	1.4		$S_{wi} = 20\%$
180	1.5		$c_f = 3.7*10^{-5}(Kg/cm^2)^{-1}$
			$c_w = 2.96*10^{-6}(lb/pg^2)^{-1}$
			$W_e = 0$

Determine:

a) El volumen de aceite y el volumen de gas producidos acumulados a las presiones de 220 y 180 Kg/cm^2.

b) La recuperación de aceite a las mismas presiones.

c) El volumen de poros existente a la presión de 180 Kg/cm^2.

d) La saturación de aceite a 180 Kg/cm^2.

Solución:

Como B_o aumenta con la presión, el yacimiento se encuentra en la etapa de bajosaturación.

a) Aplicando la ecuación de balance de materia:

$$N_p\ B_o = N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta' p$$

Despejando:

$$N_p = \frac{N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta' p}{B_o}$$

Para calcular la compresibilidad efectiva:

$$c_o = \frac{2(B_{ob} - B_{oi})}{(B_{ob} + B_{oi})(p_i - p_b)}$$

$$c_o = \frac{2(1.5 - 1.3)}{(1.5 + 1.3)(250 - 180)}$$

$$c_o = 2.04 * 10^{-3}\ (Kg/cm^2)^{-1}$$

$$c_e = \frac{S_o\ c_o + S_w\ c_w + c_f}{S_o}$$

$$c_e = \frac{0.8(2.04 * 10^{-3}) + 0.2(2.96 * 10^{-6})14.22 + 3.7 * 10^{-5}}{0.8}$$

$$c_e = 2.097 * 10^{-3}\ (Kg/cm^2)^{-1}$$

A 220 Kg/cm^2:

$$N_p = 6 * 10^6 * 1.3 * 2.097 * 10^{-3} * (250 - 220) / 1.4$$

$$N_p = 350\ 498\ m^3$$

G_p se puede obtener de:

$$R_p = G_p / N_p \quad ; \quad R_p = R_{si}$$

$$G_p = R_{si}\ N_p = 115 * 350\ 498$$

$$G_p = 40.3 * 10^6\ m^3$$

A 180 Kg/cm^2:

$$N_p = 6 * 10^6 * 1.3 * 2.097 * 10^{-3} * (250 - 180) / 1.5$$

$$N_p = 763\ 308\ m^3$$

$$G_p = 763\ 308 * 115$$

$$G_p = 87.78 * 10^6\ m^3$$

Resumiendo:

p (Kg/cm^2)	N_p (m^3)	G_p (m^3)
250	0	0
220	350 498	$40.30*10^6$
180	763 308	$87.78*10^6$

b) la recuperación es:

$$Rec = N_p / N$$

A 220 Kg/cm^2:

$$Rec = 350\ 498 / (6*10^6)$$

$$Rec = 0.0584$$

A 180 Kg/cm^2:

$$Rec = 763\ 308 / (6*10^6)$$

$$Rec = 0.1272$$

c) El volumen poroso se calcula como:

$$V_p = V_{pi} * (1 - c_f \Delta p)$$

$$V_{pi} = V_{oi} / S_{oi} = (N\ B_{oi}) / (1 - S_{wi})$$

$$V_{pi} = 6*10^6 * 1.3 / (1 - 0.20)$$

$$V_{pi} = 9.75*10^6\ m^3$$

$$V_p = 9.75*10^6 * \left[1 - 3.7*10^{-5} * (250 - 180)\right]$$

$$V_p = 9\ 746\ 480\ m^3 \text{ a } 180\ Kg/cm^2$$

d) La saturación de aceite es:

$$S_o = V_o / V_p$$

$$S_o = \frac{(N - N_p)\ B_o}{V_p}$$

$$S_o = \frac{(6*10^6 - 763\ 308) * 1.5}{9\ 746\ 480}$$

$$S_o = 0.806$$

II.4.10 Un yacimiento hipotético de aceite tiene un volúmen original de $10*10^7$@ c.s. y se cuenta con la siguiente información:

p (Kg/cm^2)	B_o	R_s
250	1.3	120
220	1.4	

$\phi = 24\%$

$S_{wi} = 25\%$

$c_f = 3.7*10^{-5} (Kg/cm^2)^{-1}$

180	1.5	$c_w = 42*10^{-6} (Kg/cm^2)^{-1}$
140	1.6	$W_e = 0$

Suponga que la roca sólo se expande de p_i hasta 220 Kg/cm^2 y que el agua congénita sólo se expande de p_i hasta 180 Kg/cm^2.

Determine:

a) los volúmenes de aceite y de gas producidos acumulados a cada presión.

b) La recuperación de aceite a cada presión.

c) El volumen de poros y de agua congénita a 140 Kg/cm^2

Solución:

Como B_o aumenta durante el período de producción considerado, se trata de un yacimiento de aceite bajosaturado (R_s = cte).

a) La compresibilidad efectiva c_e se calcula como:

$$c_e = \frac{S_o\ c_o + S_w\ c_w + c_f}{S_o}$$

Se puede calcular una $\overline{c_o}$:

$$\overline{c_o} = \frac{2\ (B_o - B_{oi})}{(B_o + B_{oi})(p_i - p_b)}$$

$$\overline{c_o} = \frac{2\ (1.4 - 1.3)}{(1.4 + 1.3)(250 - 140)}$$

$$\overline{c_o} = 6.73*10^{-4} (Kg/cm^2)^{-1}$$

La saturación de aceite es: $S_o = 1 - S_w = 1 - 0.25 = 0.75$

La ecuación de balance de materia es:

$$N_p\ B_o = N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta' p$$

De donde:

$$N_p = \frac{N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta' p}{B_o}$$

De 250 a 220 Kg/cm^2 tenemos:

$c_o = 6.73*10^{-4}$ $\quad c_w = 42*10^{-6}$ $\quad c_f = 3.7*10^{-5}$

Entonces la compresibilidad efectiva es:

$$Ce = \frac{0.75\ (6.73*10^{-4}) + 0.25\ (42*10^{-6}) + 3.7*10^{-5}}{0.75}$$

$$Ce = 7.36*10^{-4}\ (Kg/cm^2)^{-1}$$

Con la ecuación de balance de amteria:

$$Np = \frac{10*10^6 * 1.3 * 7.36*10^{-4} * (250 - 220)}{1.4}$$

$$Np_{220} = 0.205*10^6\ m^3$$

Para calcular G_p:

$$G_p = N_p\ R_p \quad ; \quad R_p = R_s$$

$$G_p = N_p\ R_s$$

$$G_{p220} = 0.205*10^6 * 120 = 24.6*10^6\ m^3$$

De 250 a 180 Kg/cm^2:

Ya se tiene la producción hasta 220, entonces se debe calcular la producción de 220 a 180 Kg/cm^2; en esta etapa:

$co = 6.73*10^{-4}$ $cv = 42*10^{-6}$ $cf = 0.0$

La c_e para este intervalo es:

$$Ce = \frac{0.75\ (6.73*10^{-4}) + 0.25\ (42*10^{-6}) + 0.0}{0.75}$$

$$Ce = 6.87*10^{-4}\ (Kg/cm^2)^{-1}$$

Como esta c_e solamente es válida de 220 a 180 Kg/cm^2 el volumen original se debe considerar como el volumen remanente a 220 Kg/cm^2

$$N_{220} = N - Np_{220}$$

$$N_{220} = 10*10^6 - 0.205*10^6$$

$$N_{220} = 9.795*10^6\ m^3$$

Aplicando la ecuación de balance de materia:

$$\Delta Np_{220-180} = \frac{9.795*10^6 * 1.4 * 6.87*10^{-4} * (220 - 180)}{1.5}$$

$$\Delta Np_{220-180} = 0.2512*10^6\ m^3$$

Entonces:

$$Np_{180} = Np_{220} + \Delta Np_{220-180}$$

$$Np_{180} = 0.205*10^{6} + 0.251*10^{6}$$

$$Np_{180} = 0.455*10^{6}\ m^{3}$$

El gas producido de 250 a 180 Kg/cm^2 es:

$$Gp = 0.4558*10^{6} * 120$$

$$Gp = 54.696*10^{6}\ m^{3}$$

De 180 a 140 Kg/cm^2:

$$co = 6.73*10^{-4} \qquad cw = 0 \qquad cf = 0$$

$$ce = \frac{0.75\ (6.73*10^{-4}) + 0.25 * 0 + 0}{0.75}$$

$$ce = 6.73*10^{-4}\ (Kg/cm^{2})^{-1}$$

$$N_{180} = N - Np_{180}$$

$$N_{180} = 10*10^{6} - 0.4558*10^{6}$$

$$N_{180} = 9.5442*10^{6}$$

$$\Delta Np_{180-140} = \frac{9.5442*10^{6} * 1.5 * 6.73*10^{-4} * (180 - 140)}{1.6}$$

$$\Delta Np_{180-140} = 0.24*10^{6}\ m^{3}$$

$$Np_{140} = Np_{180} + \Delta Np_{180-140}$$

$$Np_{140} = 0.4558*10^{6} + 0.24*10^{6}$$

$$Np_{140} = 0.6958*10^{6}\ m^{3}$$

El gas producido hasta 140 es:

$$Gp = 0.6958*10^{6} * 120$$

$$Gp = 83.49*10^{6}\ m^{3}$$

b) La recuperación se define como:

$$Rec = \frac{N_p}{N}$$

Hasta 220 Kg/cm^2:

$$Rec = \frac{0.205*10^6}{10*10^6} = 0.0205$$

Hasta 180 Kg/cm^2:

$$Rec = \frac{0.4558*10^6}{10*10^6} = 0.0455$$

Hasta 140 Kg/cm^2:

$$Rec = \frac{0.6958*10^6}{10*10^6} = 0.06958$$

c) El volumen de poros:

$$V_p = V_{pi}\ (1 - c_f\ \Delta'p)$$

$$V_{pi} = \frac{N\ B_{oi}}{S_{oi}} = \frac{10*10^6 * 1.3}{0.75}$$

$$V_{pi} = 17.33*10^6$$

Como la roca sólo se expande hasta 220 Kg/cm^2

$$V_p = 17.33*10^6\ (1 - 3.7*10^{-5}(250 - 220))$$

$$V_{p_{140}} = V_{p_{220}} = 17.311*10^6\ m^3$$

El volumen de agua:

$$V_w = V_{wi}(1 + c_w\ \Delta'p)$$

$$V_{wi} = S_{wi}\ V_{pi} = 0.25 * 17.33*10^6$$

$$V_{wi} = 4.3325*10^6\ m^3$$

Como el agua sólo se expande hasta 180 Kg/cm^2:

$$V_{w_{140}} = V_{w_{180}}$$

$$V_{w_{140}} = 4.3325*10^6\ (1 + 42*10^{-6} * (250 - 180))$$

$$V_{w_{140}} = 4.3453*10^6\ m^3$$

Resumiendo los resultados obtenidos:

p (Kg/cm^2)	N_p (10^6 m^3)	G_p (10^6 m^3)	Rec (%)	V_p (10^6 m^3)	V_w (10^6 m^3)
250	0.000	0.00	0.0000	17.33	4.332
220	0.205	24.60	0.0205	17.31	
180	0.455	54.69	0.0455	17.31	4.345
140	0.696	83.49	0.0696	17.31	4.345

II.4.11 Se tiene un yacimiento bajosaturado con los siguientes datos:

$A = 500 * 10^2 \ m^2$ $\quad R_{si} = 120$ $\quad p_b = 190 \ Kg/cm^2$

$H = 10 \ m$ $\quad B_{oi} = 1.4$ $\quad W_e = 0$

$\phi = 18\%$ $\quad B_{ob} = 1.44$ $\quad c_f = 5.2 * 10^{-5} (Kg/cm^2)^{-1}$

$S_w = 0.20$ $\quad p_i = 410 \ Kg/cm^2$ $\quad c_w = 2.25 * 10^{-5} (Kg/cm^2)^{-1}$

Determine:

a) N

b) N_p y G_p

Solución:

a) El volumen original de aceite:

$$N = V_{oi} \ / \ B_{oi}$$

$$V_{oi} = A \ H \ \phi \ (1 - S_w)$$

$$V_{oi} = 500 * 10^2 * 10 * 0.18 * (1 - 0.20)$$

$$V_{oi} = 72\ 000 \ m^3$$

$$N = 72\ 000 \ / \ 1.4$$

$$N = 51\ 428 \ m^3 \ @ \ c.s.$$

b) De la ecuación de balance de materia:

$$N_p = \frac{N \ B_{oi} \ c_e \ \Delta' p}{B_o}$$

Calculando la c_o:

$$c_e = \frac{S_o\ c_o + S_w\ c_w + c_f}{S_o}$$

$$c_o = \frac{2\ (B_{ob} - B_{oi})}{(B_{ob} + B_{oi})(p_i - p_b)}$$

$$c_o = \frac{2\ (1.44 - 1.40)}{(1.44 + 1.40)(410 - 190)}$$

$$c_o = 1.28*10^{-4}\ (Kg/cm^2)^{-1}$$

$$S_o = 1 - S_w = 1 - 0.20 = 0.80$$

En la ecuación de c_e:

$$c_e = \frac{0.8(1.28*10^{-4} + 0.2(2.25*10^{-5}) + 5.2*10^{-5}}{0.8}$$

$$c_e = 1.936*10^{-4}(Kg/cm^2)^{-1}$$

Sustituyendo valores:

$$N_p = \frac{51\ 428 * 1.4 * 1.936*10^{-4} * (410 - 190)}{1.44}$$

$$N_p = 2\ 130\ m^3$$

$$G_p = N_p\ R_s = 2\ 130 * 120$$

$$G_p = 255\ 600\ m^3$$

II.5 Yacimientos con entrada de agua.

II.5.1 Se tiene un yacimiento bajosaturado con un volumen original de aceite de $20*10^6 m^3$@ c.s. Determine la entrada neta de agua al yacimiento si se cuenta con los siguientes datos:

$p_i = 250\ Kg/cm^2$ $p_b = 200\ Kg/cm^2$

$c_f = 5*10^{-5}(Kg/cm^2)^{-1}$ $B_{oi} = 1.35$

$c_w = 8 * 10^{-6} (Kg/cm^2)^{-1}$ $\qquad$ $B_{ob} = 1.38$

$R_{si} = 130$ $\qquad$ $Rec_b = 10\%$

$S_{wi} = 20\%$

Solución:

La entrada neta de agua se define como:

$$ENW = W_e - W_p\ B_w$$

La ecuación de balance de materia para yacimientos bajosaturados es:

$$N_p\ B_o + W_p\ B_w = N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta' p + W_e$$

De donde:

$$ENW = N_p\ B_o - N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta' p$$

Ademas:

$$Rec = \frac{N_p}{N}$$

De donde: $\quad N_p = N\ Rec$

$$N_p = 20 * 10^6 * 0.10 = 2 * 10^6$$

Para calcular c_e:

$$c_o = \frac{2\ (B_{ob} - b_{oi})}{(B_{oi} + b_{ob})(p_i - p_b)}$$

$$c_o = \frac{2\ (1.38 - 1.35)}{(1.35 + 1.38)(250 - 200)}$$

$$c_o = 4.39 * 10^{-4}\ (Kg/cm^2)^{-1}$$

$$c_e = \frac{S_o\ c_o + S_w\ c_w + c_f}{S_o}$$

$$S_o = 1 - S_w = 1 - 0.20 = 0.80$$

$$C_e = \frac{0.8(4.39 * 10^{-4}) + 0.2(8 * 10^{-5}) + 5 * 10^{-6}}{0.8}$$

$$c_e = 5.2 * 10^{-4}\ (Kg/cm^2)^{-1}$$

Finalmente:

$$ENW = 2 * 10^6 * 1.38 - 20 * 10^6 * 1.35 * 5.2 * 10^{-4} * 50$$

$$ENW = 2.058 * 10^6\ m^3 \text{ agua @ c.s.}$$

II.5.2 Considere un yacimiento bajosaturado que ocupa $1.8*10^8$ m^3 de una roca con porosidad media del 25%. Se cuenta con la siguiente información:

$p_i = 300$ Kg/cm^2 $\quad$ $p_b = 150$ Kg/cm^2

$B_{oi} = 1.33$ $\quad$ $B_{ob} = 1.38$

$S_{wi} = 18\%$ $\quad$ $W_e = 1.2*10^6$ m^3

$c_w = 6*10^{-5}(Kg/cm^2)^{-1}$ $\quad$ $W_p = 300\ 000$ m^3

$c_f = 4*10^{-5}(Kg/cm^2)^{-1}$ $\quad$ $B_w = 1.0$ constante

$c_o = 2.46*10^{-4}(Kg/cm^2)^{-1}$

En una prueba de producción se midieron 8 000 BPD y 228 960 m^3/d de gas @ c.s.

a) Calcule el volumen original de aceite @ c.s. (N)

b) ¿Cuánto gas se habrá producido a la presión de burbujeo?

Solución:

a)

$$N = V_{oi} / B_{oi}$$

$$V_{oi} = V_R\ \phi\ (1 - S_{wi})$$

$$N = V_R\ \phi\ (1 - S_{wi})\ /\ B_{oi}$$

$$N = 1.8*10^8 * 0.25 * (1 - 0.18)$$

$$N = 27.77*10^6\ m^3\ @\ c.s.$$

b) La relación gas-aceite acumulativa es:

$$R_p = G_p / N_p$$

Durante la etapa de bajosaturación: $R_p = R = R_{si}$

Entonces:

$$R = \frac{q_g}{q_o} = \frac{G_p}{N_p}$$

De donde:

$$G_p = N_p \frac{q_g}{q_o}$$

De la ecuación de balance de materia:

$$N_p = \frac{N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta' p + W_e - W_p\ B_w}{B_o}$$

$$c_e = \frac{S_o\ c_o + S_w\ c_w + c_f}{S_o}$$

$$S_o = 1 - S_w = 1 - 0.18 = 0.82$$

$$c_e = \frac{0.82(2.46*10^{-4}) + 0.18(6*10^{-5}) + 4*10^{-5}}{0.82}$$

$$c_e = 3.08*10^{-4}\ (Kg/cm^2)^{-1}$$

Entonces:

$$N_p = \frac{27.77*10^6*1.33*3.08*10^{-4}*(300-150) + 1.2*10^6 - 0.3*10^6*1.04}{1.38}$$

$$N_p = 1.88*10^6\ m^3\ @\ c.s.$$

Finalmente:

$$G_p = 1.88*10^6\ \frac{228\ 960}{8\ 000\ *\ 0.159}$$

$$G_p = 338.4*10^6\ m^3\ g\ @\ c.s.$$

II.5.3 De un yacimiento hipotético se tienen los siguientes datos de producción y PVT:

p (Kg/cm^2)	B_o	R_s
320	1.30	140
300	1.33	
280	1.37	
260	1.43	

$c_w = 15.4*10^{-5}(Kg/cm^2)^{-1}$

$c_f = 8*10^{-5}(Kg/cm^2)^{-1}$

$S_{wi} = 0.25$

t (días)	p (Kg/cm^2)	N_p (m^3)
0	320	0
100	300	200 000
180	300	390 000
250	300	570 000

Se deduce que existe una fuerte entrada de agua al

yacimiento. Suponga que la entrada de agua comienza en forma instantánea a partir de $p = 300\ Kg/cm^2$.

Determine:

a) El volumen de agua que ha entrado al yacimiento para cada intervalo de tiempo.

b) La recuperación total de aceite cuando t = 250 días.

c) El volumen de gas remanente en el yacimiento @ c.s.

d) Los índices de empuje totales.

e) El volumen de poros en el yacimiento cuando t = 250 días.

Solución:

Del comportamiento de B_o se deduce que se trata de un yacimiento de aceite bajosaturado (no hay datos de producción de agua). La ecuación de balance de materia en este caso es:

$$N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta'p + W_e = N_p\ B_o$$

a) Despejando la entrada de agua:

$$W_e = N_p\ B_o - N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta'p$$

De 0 a 100 días:

$$W_e = 0 \quad \text{(Comienza hasta p = 300)}$$

De 100 a 180 días: $p = cte.;\ \Delta'p = 0.0$

$$W_e = \Delta N_p\ B_o$$

$$W_e = (390\ 000 - 200\ 000) * 1.33$$

$$W_e = 0.2527*10^6\ m^3$$

De 180 a 250 días: $(\Delta'p = 0)$

$$\Delta W_e = \Delta N_p\ B_o$$

$$\Delta W_e = (570\ 000 - 390\ 000) * 1.33$$

$$\Delta W_e = 0.2394*10^6$$

$$W_{e_{250}} = W_{e_{180}} + \Delta W_e = (0.2527 + 0.2394)*10^6$$

$$W_{e_{250}} = 492\ 100\ m^3$$

Resumiendo:

t (días)	W_e (m^3)
0	0
100	0
180	252 700
250	492 100

b) La recuperación es:

$$Rec = \frac{Np}{N}$$

N lo podemos obtener con la ecuación de balance de materia de 0 a 100 días, donde existe una $\Delta' p$ y no hay entrada de agua.

$$N = \frac{Np\ Bo}{Bo_i\ c_e\ \Delta' p}$$

Calculando la compresibilidad efectiva:

$$c_e = \frac{So\ co + Sw\ cw + cf}{So}$$

$$co = \frac{2(Bo - Bo_i)}{(Bo_i + Bob)(p_i - pb)}$$

$$co = \frac{2(1.33 - 1.3)}{(1.33 + 1.3)(320 - 300)}$$

$$co = 1.14*10^{-3}\ (Kg/cm^2)^{-1}$$

$$c_e = \frac{0.7(1.14*10^{-3}) + 0.25(15.4*10^{-5}) + 8*10^{-5}}{0.75}$$

$$c_e = 1.249*10^{-3} (Kg/cm^2)^{-1}$$

Resolviendo para N:

$$N = \frac{200\ 000 * 1.33}{1.3 * 1.249*10^{-3} * (320 - 300)}$$

Por último:

$$Rec = \frac{5.7*10^5}{8.19*10^6}$$

$$Rec = 0.0696$$

c) El volumen de gas remanente es:

$$V_{gr} = (N - Np)\ R_s$$
$$V_{gr} = (8.19*10^6 - 5.7*10^5) * 140$$

$$V_{gr} = 1.0668*10^{9}\ m^{3}\ @\ c.s.$$

El índice de empuje por expansión del sitema roca-fluidos es:

$$A = \frac{N\ B_{oi}\ c_{e}\ \Delta' p}{N_p\ B_o}$$

$$\Delta' p = p_i - p = 320 - 300 = 20$$

$$A = \frac{8.19*10^{6} * 1.3 * 1.249*10^{-3} * 20}{5.7*10^{5} * 1.33}$$

$$A = 0.35$$

Entonces el 35% de la producción se debe a la expansión del sistema roca-fluidos.

El índice de empuje por entrada de agua es:

$$B = \frac{W_e - W_p\ B_w}{N_p\ B_o}$$

$$B = \frac{492\ 100 - 0}{5.7*10^{5} * 1.33}$$

$$B = 0.65$$

Entonces el 65% de la producción se debe a la entrada de agua al yacimiento.

e) Para calcular el volumen poroso, se considerará solamente el volumen en la zona de aceite y que W_e satura completamente los poros invadidos de agua:

$$V_{pf} = V_{pi}\ (1 - c_f\ \Delta' p) - W_e$$

$$V_{pi} = \frac{N\ B_{oi}}{1 - S_{wi}}$$

$$V_{pi} = \frac{8.19*10^{6} * 1.3}{0.75} = 1.4196*10^{7}\ m^{3}$$

$$V_{pf} = 1.36812*10^{7} * (1 - 8*10^{-5} * 20) - 492\ 100$$

$$V_{pf} = 1.36812 * 10^{7}\ m^{3}$$

II.5.4 ¿Qué recuperación se obtiene en la zona invadida de un yacimiento de aceite bajosaturado en el que se mantiene su presión por entrada de agua (p = cte = p_i), si después de producir 500 000 m^3 de aceite @ c.s., el volumen de roca invadida por agua resultó $V_R = 10.74 * 10^{6}\ m^{3}$ de roca ? B_{oi} = 1.2, ϕ = 0.2, S_{wc} = 0.3, B_o = 1.1, W_p = 0

Solución:

La ecuación de balance de materia es:

$$N_p\ B_o + W_p\ B_w = N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta' p + W_e$$

Como $W_p = 0$ y $\Delta' p = 0$

$$N_p\ B_o = W_e$$

Además, como la presión no cambia, B_{oi} permanece constante.

$$N_p\ B_{oi} = W_e$$

Por otro lado:

$$\phi = \frac{\text{Vol. de poros}}{\text{Vol. de roca}}$$

Entonces:

$$V_{p_{invadido}} = \phi\ V_R$$

$$= 0.20 * 10.74 * 10^{6}$$

$$V_{p_{invadido}} = 2\ 148\ 000\ m^{3}$$

El volumen de aceite en la zona invadida (V_{oziv}) es:

$$V_{oziv} = V_{p_{invadido}} * (1 - S_{wc})$$

$$V_{oziv} = 2\ 148\ 000 * (1 - 0.30)$$

$$V_{oziv} = 1.5036 * 10^{6}\ m^{3}\ @\ c.y.$$

Para tenerlo a condiciones estándar:

$$N_{ziv} = \frac{V_{oziv}}{B_{oi}} = \frac{1.5036*10^{6}}{1.2}$$

$$N_{ziv} = 1.253*10^{6} \; m^{3} \; @ \; c.s.$$

Entonces la recuperación en la zona invadida es:

$$Rec_{ziv} = \frac{N_p}{N_{ziv}} = \frac{5*10^{5}}{1.253*10^{6}}$$

$$Rec_{ziv} = 0.399$$

$$Rec_{ziv} = 39.9 \; \%$$

II.5.5 Se desea calcular la eficiencia volumétrica del agua (EVW) en un yacimiento que contiene aceite bajosaturado. Durante el primer año de explotación se determinó a partir de la medición del contacto agua-aceite, que el volumen de roca invadido por agua era de $6.25*10^{6}$ m^{3}. La porosidad promedio es de 25%, la saturación crítica de agua es de 30%. Además se sabe que la entrada neta de agua al yacimiento fué de 500 000 m^{3} y simulando en laboratorio las condiciones de desplazamiento se determinó que la saturación de aceite residual en la zona lavada por agua (S_{orzl}) es de 30%.

Solución:

Por definición:

$$EVW = \frac{\text{Vol. de roca en la zona lavada}}{\text{Vol. de roca en la zona invadida}}$$

$$EVW = \frac{V_{Rzl}}{V_{Rzi}}.$$

La saturación de agua de invasión en la zona lavada es:

$$S_{wizl} = 1 - S_{wc} - S_{orzl}$$

$$S_{wizl} = 1 - 0.30 - 0.30 = 0.40$$

Esta saturación también se puede escribir como:

$$S_{wizl} = \frac{\text{Vol. de agua de invasión}}{V_{P_{invadido}}}$$

De donde:

$$V_{P_{invadido}} = \frac{W_e - W_pB_w}{S_{wizl}}$$

$$V_{P_{invadido}} = \frac{500\ 000}{0.40} = 1\ 250\ 000\ m^3$$

La porosidad en la zona lavada se define por:

$$\phi = \frac{V_{P_{invadido}}}{V_{Rzl}}$$

De donde:

$$V_{Rzl} = \frac{V_{P_{invadido}}}{\phi}$$

$$V_{Rzl} = \frac{1\ 250\ 000}{0.25} = 5\ 000\ 000\ m^3$$

Finalmente:

$$EVW = \frac{5\ 000\ 000}{6\ 250\ 000}$$

$EVW = 0.8$ Es la eficiencia volumétrica.

II.6 Balance de materia en forma de recta.

II.6.1 Se desea calcular N y W_e en un yacimiento bajosaturado del cual se tiene la siguiente información:

p (Kg/cm²)	N_p (m³)	B_o
p_i = 350	0	1.295
345	11 500	1.296
340	30 500	1.298
335	75 000	1.300

$W_p = 0.0 \qquad c_e = 30*10^{-6}(Kg/cm^2)^{-1}$

Solución:

La ecuación de balance de materia para yacimientos bajosaturados es:

$$N_p\ B_o + W_p\ B_w = N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta'p + W_e$$

De donde: $(W_p = 0)$

$$N = \frac{N_p\ B_o}{B_{oi}\ c_e\ \Delta'p} + \frac{W_e}{B_{oi}\ c_e\ \Delta'p}$$

Haciendo:

$$\frac{N_p\ B_o}{B_{oi}\ c_e\ \Delta'p} = N'$$

$$N = N' + \frac{W_e}{B_{oi}\ c_e\ \Delta'p} \qquad \text{(A)}$$

Así, graficando N' contra N_p, se obtiene N como la ordenada al origen y W_e se calcula con la expresión anterior.

Calculando:

A 350 Kg/cm^2 $\qquad N' = 0$

A 345 Kg/cm^2: $\qquad B_{oi}\ c_e = 1.295 * 30*10^{-6} = 38.85*10^{-6}$

$$N' = \frac{11\ 500 * 1.296}{38.85*10^{-6} * (350 - 345)}$$

$$N' = 0.7672*10^8$$

A 340 Kg/cm^2:

$$N' = \frac{30\ 500 * 1.298}{38.85*10^{-6} * (350 - 340)}$$

$$N' = 1.019*10^8$$

A 335 Kg/cm^2:

$$N' = \frac{75\ 000 * 1.3}{38.85*10^{-6} * (350 - 335)}$$

$$N' = 1.673*10^9$$

Resumiendo:

p	$N'*10^9$
350	0.000
345	0.767
340	1.019
335	1.673

Estos valores se presentan graficados en la figura II.1 de donde se obtiene:

$$N = 58*10^6 \ m^3 \ @ \ c.s.$$

Calculando W_e:

De la ecuación A:

$$W_e = (N' - N) \ B_{oi} \ c_e \ \Delta' p$$

A 350 Kg/cm^2:

$$W_e = 0$$

A 345 Kg/cm^2:

$$W_e = (0.767*10^8 - 58*10^6) * 38.85*10^{-6} * (350 - 345)$$

$$W_e = 3\ 632 \ m^3$$

A 340 Kg/cm^2:

$$W_e = (1.019*10^8 - 58*10^6) * 38.85*10^{-6} * (350 - 340)$$

$$W_e = 17\ 055 \ m^3$$

A 335 Kg/cm^2:

$$W_e = (1.673*10^8 - 58*10^6) * 38.85*10^{-6} * (350 - 335)$$

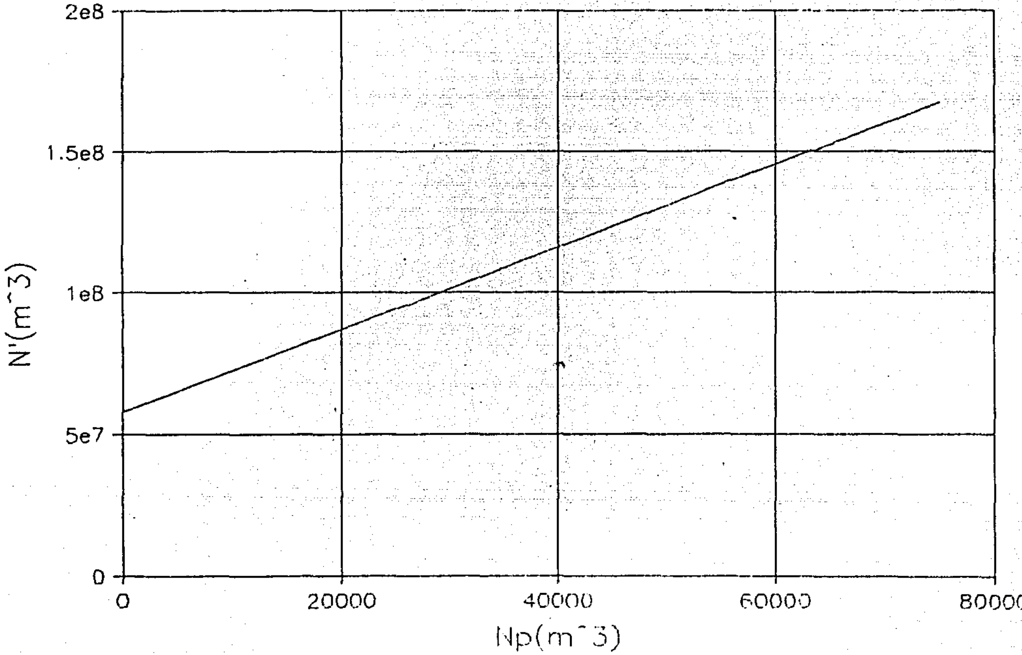
$$W_e = 63\ 694 \ m^3$$

II.6.2 Se tiene la siguiente información de un yacimiento bajosaturado en el que la entrada de agua es despreciable:

$$B_o = 1.3192 - 0.000217 \ p$$

FIGURA II.1

DETERMINACION DE N



p (Kg/cm^2)	N_p (m^3)	W_p (m^3)
460	0	0
451	23 200	597
402	572 319	23 238
330	1 711 146	55 384

$B_w = 1.048$; $\phi = 15\%$; $S_{wi} = 41\%$; sal = 100 000 ppm ; Ty = 119°F.

Usando el método de la línea recta obtenga el volumen original de aceite en el yacimiento.

Solución:

Como no existe entrada de agua, la ecuación de balance de materia es:

$$N_p\ B_o + W_p\ B_w = N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta' p$$

Que se puede escribir como:

$$y = N\ x$$

con:

$$y = N_p\ B_o + W_p\ B_w \quad ; \quad x = B_{oi}\ c_e\ \Delta' p$$

Que es la ecuación de una recta que pasa por el origen y con pendiente N.

Para resolver, se requiere de una compresibilidad efectiva, se calculará un promedio para todo el periodo de explotación considerado:

Calculando el B_o:

p	B_o
460	1.219
451	1.221
402	1.232
330	1.247

Para calcular la compresibilidad efectiva:

$$c_o = \frac{2(B_o - B_{oi})}{(B_o + B_{oi})(p_i - p)}$$

$$co = \frac{2(1.247 - 1.219)}{(1.247 + 1.219)(460 - 330)}$$

$$co = 1.747*10^{-4} \ (Kg/cm^2)^{-1}$$

Del apéndice A:

De la correlación de Dodson y Standing:

Con $\bar{p}$ = 395 Kg/cm^2 y T_y = 120°F y salinidad = 100 000 ppm.

De la figura A.1:

$$R_{swp} = 3.9$$

De la figura A.2:

$$R_{sw}/R_{swp} = 0.65$$

De donde:

$$R_{sw} = 0.65 * R_{swp} = 0.65 * 3.9$$

$$R_{sw} = 2.535$$

De la figura A3:

$$c_{wp} = 46.5*10^{-6} \ (Kg/cm^2)^{-1}$$

De la figura A.4:

$$c_w/c_{wp} = 1.13$$

Con lo cual:

$$c_w = 1.13 * c_{wp} = 1.13 \ 8 \ 46.5*10^{-6}$$

$$c_w = 52.54*10^{-6} \ (Kg/cm^2)^{-1}$$

De la figura A.5: con ϕ = 15%

$$c_f = 56*10^{-6} \ (Kg/cm^2)^{-1}$$

Finalmente la c_e:

$$c_e = \frac{S_o \ c_o + S_w \ c_w + c_f}{S_o}$$

Sustituyendo valores:

$$Co = \frac{0.59(1.747*10^{-4}) + 0.41(52.54*10^{-6}) + 56*10^{-6}}{0.59}$$

$$Co = 3.061*10^{-4}\ (Kg/cm^2)^{-1}$$

Resumiendo los resultados en una tabla:

p	$Np\ Bo + Wp\ Bw$	$Boi\ ce\ \Delta'p$
460	0.0	0.0
451	$0.289*10^5$	$3.36*10^{-3}$
402	$8.415*10^5$	$21.64*10^{-3}$
330	$21.918*10^5$	$48.51*10^{-3}$

En la figura II.2 se presenta la gráfica de las dos últimas columnas y ajustando una recta a los puntos graficados, se calculó su pendiente de la siguiente manera:

$$N = \frac{22*10^5 - 0.0}{50*10^{-3} - 0.0}$$

$$N = 44*10^6\ m^3\ @\ c.s.$$

II.7 Indices de empuje.

II.7.1 Un yacimiento de aceite bajosaturado tiene un volumen original de $65*10^6\ m^3 @$ c.y. Se dispone de la siguiente información:

p_i = 200 Kg/cm^2	S_{wi} = 20%
R_{si} = 150 Kg/cm^2	ϕ_i = 15%
c_w = $2.5*10^{-5}$ (Kg/cm^2)$^{-1}$	p_b = 160 Kg/cm^2

FIGURA II.2

EBM EN FORMA DE RECTA

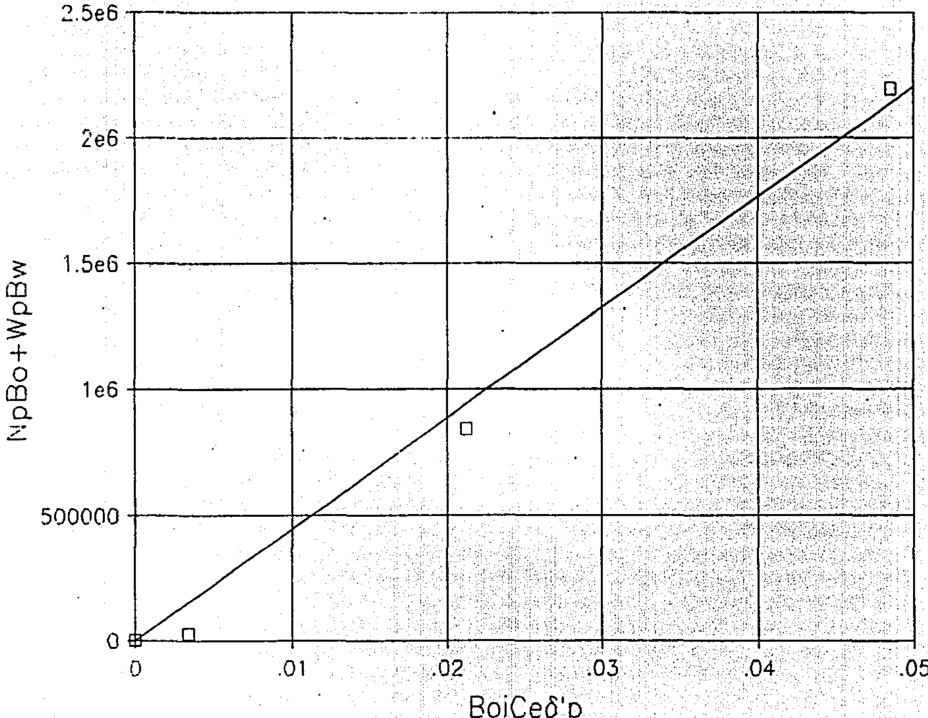
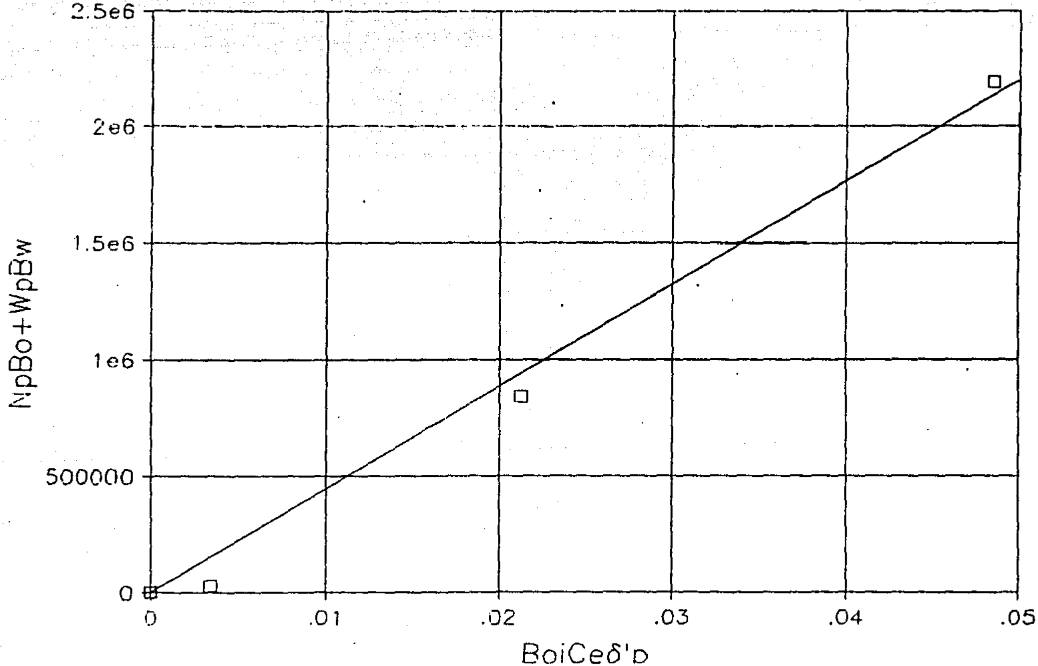


FIGURA II.2

EBM EN FORMA DE RECTA



$c_f = 2.8 * 10^{-6}\ (lb/pg^2)^{-1}$ $\qquad$ $B_{ob} = 1.35$

$c_o = 9.9965 * 10^{-4}\ (Kg/cm^2)^{-1}$

Determine:

a) El porcentaje de la producción debido a la expansión de:

- la roca
- el agua congénita
- el aceite con gas disuelto

b) El volumen de poros a la p_b.

c) La porosidad a p_b.

Solución:

a) Aplicando la ecuación de balance de materia:

$$N_p\ B_o = N\ B_{oi}\ c_o\ \Delta' p$$

De los datos:

$$N\ B_{oi} = 65 * 10^{6}$$

$$\Delta' p = 200 - 160 = 40$$

Entonces:

$$N_p\ B_o = 65 * 10^{6} * 9.9965 * 10^{-4} * 40$$

$$N_p\ B_o = 2.6 * 10^{6} \quad \text{es la producción total}$$

Producción por expansión de la roca (en porcentaje):

$$\frac{E_R}{N_p\ B_o} = \frac{V_{pi}\ c_f\ \Delta' p}{N_p\ B_o} * 100$$

$$V_{pi} = V_{oi} / S_o = 65 * 10^{6} / (1 - 0.20)$$

$$V_{pi} = 81.25 * 10^{6}$$

$$\frac{E_R}{N_p\ B_o} = \frac{81.25 * 10^{6} * 2.8 * 10^{-6} * 14.22 * 40}{2.6 * 10^{6}} * 100$$

$$\frac{E_R}{N_p\ B_o} = 4.99\ \%$$

El porcentaje de producción debido a la expansión del agua congénita es:

$$\frac{E_w}{N_p\ B_o} = \frac{V_{pi}\ S_w\ c_w\ \Delta' p}{N_p\ B_o} * 100$$

$$\frac{E_w}{N_p\ B_o} = \frac{81.25*10^{6} * 0.20 * 2.5*10^{-5} * 40}{2.6*10^{6}} * 100$$

$$\frac{E_w}{N_p\ B_o} = 0.63\ \%$$

El porcentaje de producción debido a la expansión del aceite con gas disuelto es:

$$\frac{E_o}{N_p\ B_o} = \frac{V_{pi}\ (1 - S_w)\ c_o\ \Delta' p}{N_p\ B_o} * 100$$

c_o se puede obtener de c_e:

$$c_o = \frac{S_o\ c_e - S_w\ c_w - c_f}{S_o}$$

$$c_o = \frac{0.80(9.9965*10^{-4}) - 0.20(2.5*10^{-5}) - 2.8*10^{-6} * 14.22}{0.80}$$

$$c_o = 9.4363*10^{-4}\ (Kg/cm^2)^{-1}$$

$$\frac{E_o}{N_p\ B_o} = \frac{81.25*10^{6}*(1 - 0.20)*(9.4363*10^{-4})* 40}{2.6*10^{6}} * 100$$

$$\frac{Eo}{Np\ Bo} = 94.37\ \%$$

b) El volumen poroso a p_b:

$$V_p = V_{pi}\ (1 - c_f\ \Delta' p)$$

$$V_p = 81.25*10^{6}\ (1 - 2.8*10^{-6} * 14.22 * 40)$$

$$V_p = 81.12*10^{6}\ m^{3}\ a\ p_b$$

c) La porosidad a p_b:

$$\phi = \phi_i\ (1 - c_f\ \Delta' p)$$

$$\phi = 0.15\ (\ 1 - 2.8*10^{-6} * 14.22 * 40)$$

$$\phi = 0.1498$$

$$\phi = 14.98\ \%\ a\ p_b$$

II.7.2 Se cuenta con la siguiente información de un yacimiento:

p (Kg/cm^2)	Bo	Rs
200	1.21	110
160	1.30	

$S_{wi} = 0.15$

$N = 125.8*10^{6}$ Bl

$c_w = 7.3*10^{-6}(lb/pg^2)^{-1}$

$c_o = 18.38*10^{-4}(Kg/cm^2)^{-1}$

Determine:

a) La variación del volumen poroso de 200 a 160 Kg/cm^2

b) El porcentaje de la producción debido a esa variación del volumen poroso.

Solución:

a) La ecuación de la variación del volumen poroso es:

$$V_p = V_{pi}\ (1 - c_f\ \Delta' p)$$

De donde:

$$\Delta V_p = V_{pi} - V_p = V_{pi}\ c_f\ \Delta' p \qquad \text{(A)}$$

La c_f la podemos obtener de la c_e:

$$c_e = \frac{S_o\ c_o + S_w\ c_w + c_f}{S_o}$$

De donde:

$$c_f = S_o\ (c_e - c_o) - S_w\ c_w$$

Calculando la c_o:

$$c_o = \frac{2(B_o - B_{oi})}{(B_o + B_{oi})(p_i - p)}$$

$$c_o = \frac{2(1.30 - 1.21)}{(1.30 + 1.21)(200 - 160)}$$

$$c_o = 1.793*10^{-3}(Kg/cm^2)^{-1}$$

$$S_o = 1 - S_w = 1 - 0.15 = 0.85$$

entonces:

$$c_f = 0.85(18.38*10^{-4} - 1.793*10^{-3}) - 0.15\ (7.3*10^{-6}*\ 14.22)$$

$$c_f = 2.268*10^{-5}(Kg/cm^2)^{-1}$$

Por otro lado:

$$V_{pi} = \frac{N\ B_{oi}}{1 - S_{wi}}$$

$$V_{pi} = \frac{125.8*10^{6} * 0.159 * 1.21}{0.85}$$

$$V_{pi} = 28.47*10^{6}\ m^3$$

Sustituyendo en A:

$$\Delta V_p = 28.47*10^{6} * 2.268*10^{-5} * (200 - 160)$$

$\Delta V_p = 25\ 828\ m^3$ es la variación del volumen poroso.

b) El porcentaje de producción debido a ΔV_p es:

$$x = \frac{\Delta V_p}{N_p\ B_o} * 100$$

De la ecuación de balance de materia:

$$N_p\ B_o = N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta' p$$

$$N_p\ B_o = 125.8*10^6 * 0.159 * 1.21 * 18.38*10^{-4} * (200 - 160)$$

$$N_p\ B_o = 1\ 779\ 184\ m^3$$

Entonces:

$$x = \frac{25\ 828}{1\ 779\ 184} * 100$$

$x = 1.45\ \%$ es el porcentaje de producción debido a la variación del volumen poroso.

II.7.3 Se tiene un yacimiento de aceite bajosaturado con los siguientes datos:

$B_{oi} = 1.5$	$B_{ob} = 1.6$
$c_w = 2.25*10^{-5} (Kg/cm^2)^{-1}$	$c_f = 5.2*10^{-5} (Kg/cm^2)^{-1}$
$c_o = 2.15*10^{-4} (Kg/cm^2)^{-1}$	$p_i = 500\ Kg/cm^2$
$p_b = 200\ Kg/cm^2$	$S_w = 0.20$
$S_o = 0.80$	$Rec = 0.0803$

Encuentre qué recuperación corresponde a la expansión del aceite (E_o), a la expansión del agua (E_w) y a la expansión de la formación (E_s).

Recuerde que: $Rec = Rec_w + Rec_o + Rec_s$

Solución:

De la ecuación de balance de materia para yacimientos bajosaturados sin entrada de agua:

$$N_p\ B_o = E_o + E_s + E_w$$

Donde:

$$E_o = \frac{N\ B_{oi}}{1 - S_{wi}}\ S_o\ c_o\ \Delta'p$$

$$E_w = \frac{N\ B_{oi}}{1 - S_{wi}}\ S_w\ c_w\ \Delta'p$$

$$E_f = \frac{N\ B_{oi}}{1 - S_{wi}}\ c_f\ \Delta'p$$

Sustituyendo los términos de las expansiones y factorizando:

$$\frac{B_{oi}\ S_o\ c_o\ \Delta'p}{S_o\ B_o} + \frac{B_{oi}\ S_w\ c_w\ \Delta'p}{S_o\ B_o} + \frac{B_{oi}\ C_f\ \Delta'p}{S_o\ B_o} = \frac{N_p}{N} = 0.0803$$

Entonces:

$$Rec_o = \frac{B_{oi}\ S_o\ c_o\ \Delta'p}{S_o\ B_o}$$

$$Rec_o = \frac{1.5 * 0.8 * 2.15*10^{-4} * 300}{0.8 * 1.6}$$

$$Rec_o = 0.060468$$

$$Rec_w = \frac{B_{oi}\ S_w\ c_w\ \Delta'p}{S_o\ B_o}$$

$$Rec_w = \frac{1.5 * 0.2 * 2.15*10^{-5} * 300}{0.8 * 1.6}$$

$$Rec_w = 0.001582$$

$$Rec_f = \frac{B_{oi}\ c_f\ \Delta'p}{S_o\ B_o}$$

$$Rec_a = \frac{1.5 * 5.2*10^{-5} * 300}{0.8 * 1.6}$$

$$Rec_2 = 0.0182812$$

Para comprobar que son correctas, se pueden sumar:

$$Rec_c + Rec_v + Rec_2 = 0.060468 + 0.001582 + 0.0182812$$

$$= 0.0803$$

Con lo que se cumple con:

$$Rec_c + Rec_v + Rec_2 = Rec$$

11.7.4 Se tienen los siguientes datos de un yacimiento bajosaturado:

$N_p = 10^6\ m^3$ @ c.s. $\qquad p_i = 240\ Kg/cm^2$

$B_{o170} = 1.3 \qquad p = 170\ Kg/cm^2$

$\overline{c_e} = 4.2*10^{-4}(Kg/cm^2)^{-1}$

Encuentre el volumen original de aceite a condiciones de yacimiento y la entrada neta de agua si se sabe que el índice de empuje por expansión del sistema roca-fluidos (A) tiene un valor de 0.80.

Solución:

Por definición A es el empuje total debido a la expansión del sistema roca-fluidos y B es el empuje por entrada de agua al yacimiento, de tal manera que:

$$A + B = 1 \qquad (A)$$

$$A = \frac{N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta'p}{N_p\ B_o} \qquad (B)$$

$$B = \frac{W_e - W_p\ B_w}{N_p\ B_o} \qquad (C)$$

De (B):

$$N\ B_{oi} = \frac{A\ N_p\ B_o}{c_e\ \Delta'p}$$

$$N\,B_{oi} = \frac{0.80 * 10^{6} * 1.3}{4.2 * 10^{-4}\ (240 - 170)}$$

$$N\,B_{oi} = 3.537 * 10^{7}\ m^{3}\ o\ @\ c.y.$$

De (A):

$$B = 1 - A = 1 - 0.80 = 0.20$$

De (C):

$$W_e - W_p\,B_w = B\,N_p\,B_o$$

$$W_e - W_p\,B_w = 0.20 * 10^{6} * 1.3$$

$W_e - W_p\,B_w = 2.6 * 10^{5}\ m^{3}$ agua @ c.y es la entrada neta de agua al yacimiento.

II.7.5 De un yacimiento de aceite bajosaturado sólo se tiene la siguiente información:

Volumen original $= 500 * 10^{6}\ m^{3}$ @ c.y.

$p_i = 250\ Kg/cm^2$

$p_b = 200\ Kg/cm^2$

$B_{oi} = 1.40$

$B_{ob} = 1.50$

$N_{p_{e\ pb}} = 26 * 10^{6}\ m^{3}$

Determine el volumen de aceite producido debido exclusivamente a la expansión del agua congénita.

Solución:

La producción durante la etapa de bajosaturación se debe a:

- Expansión del aceite
- Expansión de la roca y el agua congénita

Se puede calcular la primera y restando, encontrar la segunda.

$$N_p\,B_o = N\,B_{oi}\,c_o\,\Delta' p$$

$$Np = N\ Boi\ co\ \Delta^{*}p\ /\ Bo$$

$$Co = \frac{2(Bo - Boi)}{(Boi + Bo)(pi - p)}$$

$$Co = \frac{2(1.5 - 1.4)}{(1.4 + 1.5)(250 - 200)}$$

$$Co = 1.3793{*}10^{-3}(Kg/cm^2)^{-1}$$

$$Np = 500{*}10^6 * 1.3793{*}10^{-3} * (250 - 200)/1.5$$

$Np = 23{*}10^6\ m^3$ debida a expansión de aceite

Entonces:

$$Np_{Es + Ev} = Np_{total} - Np_{Eo}$$

$$= 26{*}10^6 - 23{*}10^6$$

$Np_{Es+Ev} = 3{*}10^6 m^3$ Es la producción por expansión de roca y agua.

II.7.6 Se tiene un yacimiento con los siguientes datos:

$pi = 460\ Kg/cm^2$ $\quad$ $pb = 200\ Kg/cm^2$

$Boi = 1.219$ $\quad$ $N = 25{*}10^6\ m^3$

$co = 28.7{*}10^{-5}(Kg/cm^2)^{-1}$

Su historia de producción es la siguiente:

período	p (Kg/cm^2)	Np ($10^6 m^3$)	Bo	We ($10^6 m^3$)
1	290	2.85	1.257	2.095
2	271	3.72	1.261	3.020
3	269	4.16	1.259	3.558

Calcule:

a) Los índices de empuje totales.

b) los índices de empuje por período.

Solución:

Como $p > p_b$ se trata de un yacimiento en la etapa de bajosaturación.

a) Para el primer periodo:

$$A = \frac{N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta' p}{N_p\ B_o}$$

$$A = \frac{25*10^6 * 1.219 * 28.7*10^{-5} * (460 - 290)}{2.85*10^6 * 1.257}$$

$$A = 0.415$$

$$B = \frac{W_e - W_p\ B_w}{N_p\ B_o} = \frac{2.095*10^6 - 0}{2.85*10^6 * 1.257}$$

$$B = 0.585$$

Para el segundo periodo:

$$A = \frac{25*10^6 * 1.219 * 28.7*10^{-5} * (460 - 271)}{3.72*10^6 * 1.261}$$

$$A = 0.356$$

$$B = \frac{3.02*10^6}{3.72*10^6 * 1.261}$$

$$B = 0.644$$

Para el tercer periodo:

$$A = \frac{25*10^6 * 1.219 * 28.7*10^{-5} * (460 - 269)}{4.16*10^6 * 1.259}$$

$$A = 0.316$$

$$B = \frac{3.58*10^6}{4.16*10^6 * 1.259}$$

$$B = 0.684$$

b) Para el primer período corresponde a los índices de empuje totales ya calculados.

Para el segundo período:

$$A = \frac{(N - N_p)\ B_{oi}\ c_o\ (p_1 - p_2)}{(N_{p2} - N_{p1})\ B_{o2}}$$

$$A = \frac{(25 - 2.8)*10^6 * 1.257 * 28.7*10^{-5} * (290 - 271)}{(3.72 - 2.85)*10^6 * 1.261}$$

$$A = 0.153$$

$$B = \frac{(W_{e2} - W_{e1}) - (W_{p2} - W_{p1})\ B_w}{(N_{p2} - N_{p1})\ B_{o2}}$$

$$B = \frac{(3.02 - 2.095)*10^6}{(3.72 - 2.85)*10^6 * 1.261}$$

$$B = 0.847$$

Para el tercer período:

$$A = \frac{(25 - 3.72)*10^6 * 1.261 * 28.7*10^{-5} * (271 - 269)}{(4.16 - 3.72)*10^6 * 1.259}$$

$$A = 0.0278$$

$$B = \frac{(3.558 - 3.02)*10^6}{(4.16 - 3.72)*10^6 * 1.259}$$

$$B = 0.9712$$

II.8 Yacimientos de gas seco.

II.8.1 Un yacim[illegible] de gas tiene una presión inicial de

300 Kg/cm^2 y una presión de abandono de 30 Kg/cm^2; a estas presiones B_{gi} = 0.02 y B_{gab} = 0.047 respectivamente. Calcule la recuperación considerando despreciable la expansión de la roca y el agua congénita.

Solución:

El volumen original de gas @ c.y. será igual al volumen de gas residual a las condiciones de abandono. Entonces:

$$G\, B_{gi} = (G - G_p)\, B_{gab}$$

Despejando G_p/G = Rec :

$$Rec = 1 - \frac{B_{gi}}{B_{gab}} = 1 - \frac{0.02}{0.047}$$

$$Rec = 0.5745$$

Que expresada en porcentaje es:

$$Rec = 57.45\ \%$$

II.8.2 Considere un yacimiento de gas con una presión inicial de 3 200 psia y 220°F. Su historia de producción es la siguiente:

P (psia)	G_p (10^6 pie^3)	B_g
3 200	0	0.00526
2 925	79	0.00570
2 525	221	0.00653
2 125	452	0.00773
1 825	554	0.00865

a) Calcule el volumen original de gas @ c.s. usando los datos de producción al final de cada intervalo de presión. (comportamiento volumétrico)

b) Si existen diferencias entre los volúmenes calculados explique la causa.

Solución:

a) La ecuación de balance de materia para yacimientos volumétricos de gas es:

$$G_p \, B_g = G \, (B_g - B_{gi})$$

de donde:

$$G = \frac{G_p \, B_g}{B_g - B_{gi}}$$

A 2 925 psia:

$$G = \frac{79 \cdot 10^6 \cdot 0.00570}{0.00570 - 0.00526}$$

$$G = 1023.4 \cdot 10^6 \text{ pie}^3$$

A 2 525 psia:

$$G = \frac{221 \cdot 10^6 \cdot 0.00653}{0.00653 - 0.00526}$$

$$G = 1\,136.3 \cdot 10^6 \text{ pie}^3$$

A 2 125 psia;

$$G = \frac{452 \cdot 10^6 \cdot 0.00773}{0.00773 - 0.00526}$$

$$G = 1\,414.5 \cdot 10^6 \text{ pie}^3$$

A 1 825 psia:

$$G = \frac{554 \cdot 10^6 \cdot 0.00865}{0.00865 - 0.00526}$$

$$G = 1\ 413.6 \cdot 10^6 \text{ pie}^3$$

Resumiendo:

p (psia)	Gcalc (10^6pie^3)
3 200	------
2 925	1 023.4
2 525	1 136.3
2 125	1 414.5
2 825	1 413.6

b) Sí hay diferencias entre los valores obtenidos y ésto se debe a que la ecuación de balance de materia no aporta resultados confiables al inicio de la explotación.

II.8.3 Un yacimiento de gas produjo $150 \cdot 10^6$ m^3 de gas @ c.s. de la presión inicial (220 Kg/cm^2) hasta la presión de 180 Kg/cm^2. El B_{gi} fue de 0.006 y el B_g a 180 Kg/cm^2 fue de 0.0081.

a) Calcule el volumen original de gas en el yacimiento medido a condiciones estándar y a condiciones de yacimiento.

b) Calcule la recuperación de gas expresada en porcentaje del volúmen original.

c) Calcule el volumen de gas remanente @ c.s.

Solución:

La ecuación de balance de materia para yacimientos de gas es:

$$G_p\ B_g = G\ (B_g - B_{gi})$$

De donde:

$$G = \frac{G_p\ B_g}{B_g - B_{gi}}$$

Sustituyendo valores:

$$G = \frac{150 * 10^6 * 0.0081}{0.0081 - 0.0060}$$

$$G = 578.6 * 10^6 \ m^3 \text{ de gas @ c.s.}$$

Pasándolo a condiciones de yacimiento:

$$G \ B_{gi} = 578.6 * 10^6 * 0.006$$

$$G \ B_{gi} = 3.47 * 10^6 \ m^3 \text{ @ c.y.}$$

b) La recuperación expresada en porcentaje es:

$$Rec = \frac{B_g - B_{gi}}{B_g} * 100$$

$$Rec = \frac{0.0081 - 0.0060}{0.0081} * 100$$

$$Rec = 25.9 \ \%$$

O bien:

$$Rec = \frac{N_p}{N} = \frac{150 * 10^6}{578.6 * 10^6}$$

$$Rec = 25.9 \ \%$$

c) El gas que queda en el yacimiento es la diferencia entre el que había originalmente y el gas que ha sido extraído.

$$V_{gr} = G - G_p$$

$$V_{gr} = 578.6 * 10^6 - 150 * 10^6$$

$$V_{gr} = 428.6 * 10^6 \ m^3 \text{ de gas @ c.s.}$$

II.4.8 Encuentre el volumen de gas producido acumulado (G_p) de un yacimiento de g[illegible]n $G = 1\ 500 * 10^6 \ m^3$@ c.s. del cual se sabe que:

$P\ (Kg/cm^2)$	B_g
150	0.0075
130	0.0082

$S_{wi} = 0.20$

$W_e = W_p = 0$

a) Realice los cálculos considerando comportamiento volumetrico.

b) Considere $c_w = 4*10^{-6}\ (Kg/cm^2)^{-1}$ y $c_f = 9*10^{-6}(Kg/cm^2)^{-1}$

c) Compare los resultados.

Solución:

a) La ecuación de balance de materia para yacimientos volumétricos de gas es:

$$G_p\ B_g = G\ (B_g - B_{gi})$$

De donde:

$$G_p = \frac{G\ (B_g - B_{gi})}{B_g}$$

$$G_p = \frac{1\ 500*10^6 * (\ 0.0082 - 0.0075)}{0.0082}$$

$$G_p = 128.048*10^6\ m^3 \text{ de gas @ c.s.}$$

b) La ecuación de balance de materia para yacimiento no volumétrico sin W_e es:

$$G_p = \frac{G}{G_p}\left[\ B_g - B_{gi} + B_{gi}\ \Delta'p\ \frac{(S_w\ c_w + c_f)}{(1 - S_w)}\right]$$

$$G_p = \frac{1500*10^6}{0.0082}\left[0.0082 - 0.0075 + 0.0075 * 20 * \frac{(0.2*4 + 9)*10^{-6}}{1 - 0.20}\right]$$

$$G_p = 128.38*10^6\ m^3 \text{ de gas @ c.s.}$$

Comparando los resultados:

$$\text{Error} = \frac{Gpnovol - Gpvol}{Gpnovol}$$

$$\text{Error} = \frac{(128.38 - 128.048)*10^6}{128.38*10^6}$$

$$\text{Error} = 0.0025$$

$$\text{Error} = 0.25\%$$

Como se observa, el error que se comete al no tomar en cuenta la expansión de la roca y el agua congénita es mínimo. Esto se debe a que c_g es muchísimo mayor que c_w y c_f, por lo cual comúnmente no se toman en cuenta.

II.8.5 Considere un yacimiento hipotetico de gas con un volumen original de gas de $6*10^6$ m^3 @ c.y. La presión inicial fue de 235 Kg/cm^2 con un B_{gi} = 0.00456. Hasta la presión de 195 Kg/cm^2 se ha recuperado el 20% del volumen original; el B_g a esta presión es de 0.00544. Sin considerar la expansión de la roca y el agua congénita, calcule el volumen de agua que ha entrado al yacimiento (W_p =0).

Solución:

$$G_p\ B_g = G\ (B_g - B_{gi}) + W_e$$

De donde:

$$W_e = G_p\ B_g - G\ (B_g - B_{gi}) \qquad \text{(A)}$$

De la definición de recuperación:

$$Rec = G_p/G \quad \rightarrow \quad G_p = G\ Rec$$

Sustituyendo en A:

$$W_e = G\ Rec\ B_g - G\ (B_g - B_{gi})$$

$$W_e = G\ (Rec\ B_g - B_g + B_{gi}) \qquad \text{(B)}$$

De los datos:

$$G\ B_{gi} = 6*10^6$$

$$G = 6*10^6 / 0.00456$$

$$G = 1\ 315.79 * 10^{6}\ m^{3}$$

En B:

$$W_{e} = 1\ 315.79 * 10^{6} * (0.2\ 0.00544 - 0.00544 + 0.00456)$$

$$W_{e} = 0.2737 * 10^{6}\ m^{3} \text{ de agua @ c.y.}$$

III YACIMIENTOS DE ACEITE SATURADO

III.1 Introducción.

Se denomina yacimiento saturado a aquel cuya presión es menor a la presión de burbujeo del aceite y debido a ello presenta gas libre como un fluido saturante además del aceite y el agua congénita. La compresibilidad del gas es muchísimo mayor que la del aceite, la del agua y la de la roca, de tal manera que la compresibilidad del sistema se incrementa bastante, es por ello que normalmente se desprecian los efectos de la expansión de la roca y el agua congénita por presentar valores comparativamente muy pequeños. En este caso a diferencia de los yacimientos de aceite bajosaturado, no se hace uso de una compresibilidad efectiva, sino que la expansión del aceite con su gas disuelto y la del gas libre se expresan en términos de los factores de volumen.

Si la producción comienza exactamente a la presión de burbujeo, en superficie se notará que la relación gas-aceite instantánea es menor que la relación gas disuelto-aceite correspondiente a esas condiciones; ésto se debe a que al liberarse las primeras burbujas de gas no podrán fluir hasta que lleguen a formar una saturación mayor que la crítica. A partir de que se rebasa dicha saturación crítica, la relación gas-aceite instantánea se incrementara hasta alcanzar un valor máximo, debido a que el gas libre del yacimiento estará fluyendo hacia los pozos. Posteriormente la relación gas-aceite instantánea tenderá a disminuir, puesto que a presiones bajas el B_g tiende a la unidad (el gas que sale de la formación ya no se expande tanto como el que sale comprimido a altas presiones).

En yacimientos de este tipo es posible que al iniciar la producción ya exista gas libre en ellos formando un casquete en la parte superior. Si el casquete de gas es lo suficientemente grande, su expansión empujará el aceite hacia abajo de manera horizontal y la presión del yacimiento declinará lentamente. En cambio, si el casquete de gas es muy pequeño, el gas no tendrá la capacidad de barrer el aceite y al declinar la presión, la liberación de gas puede llegar a formar una fase continua que saldrá a través de los pozos.

Si existe un acuífero de grandes dimensiones asociado al yacimiento, se presentará una entrada de agua que empujara a los hidrocarburos hacia la parte superior. El desplazamiento por agua es un proceso similar al que ocurre cuando se tiene un casquete de gas; el agua va invadiendo gradualmente los poros expulsando gran parte del aceite que se encuentra en ellos. Si la entrada de agua es muy potente, la presión del yacimiento disminuirá poco, pudiendo llegar a mantenerse constante.

En este capítulo se presentan algunas aplicaciones de la ecuación de balance de materia para yacimientos de aceite saturado tomando en consideración los efectos producidos por la entrada de agua y el casquete de gas. También se presentan varios ejemplos de la aplicación del método de Havlena y Odhe, que consiste en el arreglo de la ecuación de balance de materia para diferentes yacimientos, de tal manera que al graficar los datos, se encuentra una línea recta, lo que en ocasiones facilita su análisis.

III.2 Deducciones.

III.2.1 Escriba qué significan los siguientes términos usados en la ecuación de balance de materia.

a) $N\ B_{ti}$ b) $N\ R_{si}$ c) $m\ N\ B_{ti}$

d) $N_p\ R_p$ e) $W_e - W_p\ B_w$ f) $(N - N_p)\ B_o$

g) $B_o + B_g(R_{si} - R_s)$ h) G_p j) G

Solución:

a) Volumen original de aceite @ c.y.

b) Volumen de gas disuelto en el aceite original @ c.s.

c) Volumen del casquete original de gas @ c.y

d) Volumen de gas producido acumulado, @ c.s.

e) Entrada neta de agua al yacimiento, @ c.y.

f) Volumen de aceite remanente en el yacimiento @ c.y.

g) Factor de volúmen de la fase mixta (B_t)

h) Volumen de gas producido acumulado @ c.s.

i) Volumen del casquete original de gas @ c.y.

j) Volumen del casquete original de gas @ c.s.

III.2.2 En la ecuación de balance de materia para yacimientos de aceite saturado, aparecen indistintamente los términos: $N_p \left[B_o + B_g(R_p - R_s) \right]$ y $N_p \left[B_t + B_g(R_p - R_{si}) \right]$

Confirme la validez de esta equivalencia e indique qué significan físicamente estos términos.

Solución:

Tomando el segundo término que llamaremos A trataremos de llegar al primero:

$$A = N_p \left[B_t + B_g(R_p - R_s) \right]$$

El B_t se define como:

$$B_t = B_o + B_g\ (R_{si} - R_s)$$

Entonces:

$$A = N_p \left[B_o + B_g\ (R_{si} - R_s) + B_g(R_p - R_{si}) \right]$$

Desarrollando:

$$A = N_p \left[B_o + B_g R_{si} - B_g R_s + B_g R_p - B_g R_{si} \right]$$

Reduciendo términos:

$$A = (B_o - B_g R_s + B_g R_p)$$

Factorizando:

$$A = N_p \left[B_o + B_g (R_p - R_s) \right]$$

Que como vemos es el segundo término, lo que indica que ambas expresiones son matemáticamente equivalentes.

Analizando ahora el primer término:

$$N_p \left[B_o + B_g (R_p - R_s) \right]$$

Desarrollando:

$$N_p B_o + N_p R_p B_g - N_p R_s B_g$$

Lo que equivale a decir:

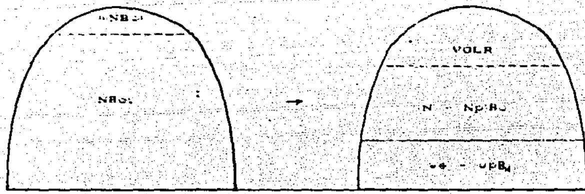
(Producción acum. de aceite + Producción acum de gas libre más gas disuelto - Producción acumulada de gas disuelto) @ c.y.

O sea:

Prod. acum. de aceite @ c.y.+ Prod. acum. de gas libre @ c.y.

Es el significado de los términos en cuestión.

III.2.3 Deduzca la ecuación de balance de materia para un yacimiento de aceite saturado con casquete inicial de gas y entrada de agua, indicando qué significa la ecuación obtenida.



$t = 0 \; ; \; p = p_i$ $\qquad\qquad$ $t = 0 \; ; \; p < p_i$

Solución:

Igualando los volúmenes de la figura:

$$m\,N\,B_{oi} + N\,B_{oi} = W_e - W_p\,B_w + (N - N_p)\,B_o + VGLR$$

De donde:

$$VGLR = m\,N\,B_{oi} + N\,B_{oi} - (W_e - W_p\,B_w) - (N - N_p)\,B_o$$

Por otro lado, se hace un balance del gas medido a c.s.

Gas libre inicial del casquete	+	gas disuelto inicial	=	gas libre residual	+	gas disuelto residual	+	gas producido

En términos de la ecuación de balance de materia:

$$\frac{m\,N\,B_{oi}}{B_{gi}} + N\,R_{si} = \frac{VGLR}{B_g} + (N - N_p)\,R_s + N_p\,R_p$$

Sustituyendo VGLR por su equivalente obtenido antes:

$$\frac{m\,N\,B_{oi}}{B_{gi}} + N\,R_{si} = \frac{m\,N\,B_{oi} + N\,B_{oi} - (W_e - W_p\,B_w) + N_p\,R_s}{B_g} + \ldots$$

$$(N - N_p)R_s + N_p\,R_p$$

Multiplicando por B_g y desarrollando terminos:

$$m\,N\,B_{oi}\,\frac{B_g}{B_{gi}} + N\,R_{si}\,B_g = m\,N\,B_{oi} + N\,b_{oi} - W_e + W_p\,B_v - N\,B_o + \ldots$$

$$N_p\,B_o + N\,R_s\,B_g - N_p\,R_s\,B_g + N_p\,R_p\,B_g$$

Agrupando los términos con N y N_p:

$$m\,N\,B_{oi}\,B_g/B_{gi} + N\,R_{si}\,B_g - m\,N\,B_{oi} - N\,B_{oi} + NB_o + N\,R_s\,B_g =$$

$$N_p\,B_o - N_p\,R_s\,B_g + N_p\,R_p\,B_g - W_e + W_p\,B_v$$

Factorizando:

$$N\left[m\,B_{oi}\,B_g . B_{gi} + R_{si}\,B_g - m\,B_{oi} - B_{oi} + B_o + R_s\,B_g\right] =$$

$$N_p\left[B_o + R_p\,B_g - R_s\,B_g\right] - W_e + W_p\,B_v$$

Ordenando:

$$N\left[B_o + B_g(R_{si} - R_s) - B_{oi} + m\,B_{oi}(B_g/B_{gi} - 1)\right] =$$

$$N_p\left[B_o + B_g(R_p - R_s)\right] - W_e + W_p\,B_v$$

Como $B_t = B_o + B_g\,(R_{si} - R_s)$ y $B_{oi} = B_{ti}$

$$N\left[B_t - B_{ti} + m\,B_{oi}(B_g/B_{gi} - 1)\right] = N_p\left[B_o + B_g(R_p - R_s)\right] - W_e + W_p\,B_v$$

Que se puede escribir como:

$$N_p\left[B_o + B_g(R_p - R_s)\right] + W_pB_v = N(b_t - B_{ti}) + mNB_{oi}(B_g/B_{gi} - 1) + W_e$$

Donde se indica que:

La producción de aceite con gas disuelto, gas libre y agua (miembro izquierdo de la ecuación), es debida a la expansión del aceite original, más la expansión del casquete de gas, más el agua que entra al yacimiento (miembro derecho).

III.2.4 La ecuación de balance de materia para yacimientos de aceite saturado es:

$$N(B_t - B_{ti}) + mB_{ti}(B_g/B_{gi} - 1) + W_e = N_p\left[B_o + B_g(R_p - R_s)\right] + W_pB_w$$

$$A \quad + \quad B \quad + C \quad = \quad D \quad + E$$

a) Indique que representa cada uno de los términos (A,B,C,D,E)

b) Escriba la misma ecuación, ahora considerando las expansiones de la formación (roca) y del agua congénita.

Solución:

a) A.- Expansión de los hidrocarburos (aceite,gas disuelto y gas libre) en la zona de aceite.

B.- Expansión del gas del casquete original.

C.- Volumen de agua que entra al yacimiento desde el acuífero asociado.

D.- Producción de hidrocarburos (aceite y gas) @ c.y.

E.- Volumen producido de agua @ c.y.

b) La expansión de la roca y del agua congénita actúan como mecanismos de desplazamiento, empujando los fluidos del yacimiento hacia los pozos.

-Expansion de la roca (se considera el volumen de poros en la zona de gas y en la zona de aceite):

$$E_f = V_p \, c_f \, \Delta' p$$

$$V_p = V_{pzg} + V_{pzo}$$

$$V_p = \frac{V_{gi}}{S_{gi}} + \frac{V_{oi}}{S_{oi}}$$

$$V_p = \frac{m \, N \, B_{ti}}{1 - S_{wizg}} + \frac{N \, B_{ti}}{1 - S_{wizo}}$$

Entonces:

$$E_f = c_f \, \Delta' p \left[\frac{m \, N \, B_{ti}}{1 - S_{wizg}} + \frac{N \, B_{ti}}{1 - S_{wizo}}\right]$$

-Expansión del agua congénita (E_w) (se considera que la S_w es diferente en la zona de aceite y en la zona de gas)

$$E_w = c_w \, \Delta' p \left[S_{wizg} \, V_{pzg} + S_{wizo} \, V_{pzo} \right]$$

$$E_w = c_w \, \Delta' p \left[S_{wizg} \, \frac{m \, N \, B_{ti}}{1 - S_{wizg}} + S_{wizo} \, \frac{N \, B_{ti}}{1 - S_{wizo}} \right]$$

Por lo tanto, al adicionarlos a la ecuación de balance de materia nos queda:

$$N(B_t - B_{ti}) + mNB_{ti}(B_g/B_{gi} - 1) + W_e + c_f \Delta' p \left[\frac{m \, N \, B_{ti}}{1 - S_{wizg}} + \frac{N \, B_{ti}}{1 - S_{wizo}} \right] +$$

$$c_w \Delta' p \left[S_{wizg} \, \frac{m \, N \, B_{ti}}{1 - S_{wizg}} + S_{wizo} \, \frac{N \, B_{ti}}{1 - S_{wizo}} \right] = N_p \left[B_t + B_g (R_p - R_{si}) \right] +$$

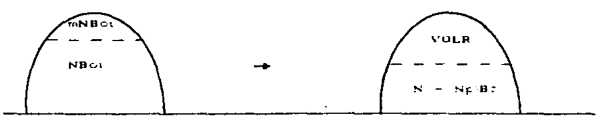
$W_p \, B_w$

Que es la ecuación de balance de materia para un yacimiento de aceite saturado con casquete de gas, entrada de agua y expansión de roca y agua congénita.

III.2.5 Deduzca la ecuación de balance de materia para un yacimiento de aceite saturado con casquete inicial de gas. Tome en cuenta las expansiones de la roca y del agua congénita únicamente en la zona de aceite.

Solución:

Haciendo un esquema del yacimiento:



$p = p_i \; ; \; t = 0$ $\qquad\qquad$ $p < p_i \; ; \; t > 0$

Por una parte se pueden igualar los volúmenes:

$$m\ N\ B_{oi} + N\ B_{oi} = (N - N_p)\ B_o + VGLR$$

De donde:

$$VGLR = m\ N\ B_{oi} + N\ B_{oi} - (N - N_p)\ B_o$$

Por otro lado, haciendo un balance de los volúmenes de gas a condiciones estándar:

gas inicial del casquete	+	gas disuelto original	=	gas libre residual	+	gas disuelto residual	+	gas producido

Que en términos de la ecuación de balance de materia es:

$$\frac{m\ N\ B_{oi}}{B_{gi}} + N\ R_{si} = \frac{VGLR}{B_g} + (N - N_p)\ R_s + G_p\ R_p$$

Sustituyendo VGLR obtenido antes:

$$\frac{m\ N\ B_{oi}}{B_{gi}} + N\ R_{si} = \frac{mNB_{oi} + NB_{oi} - (N - N_p)B_o}{B_g} + (N - N_p)R_s + G_pR_p$$

Multiplicando por B_g, desarrollando y ordenando términos:

$$m\ N\ B_{oi}\ B_g/B_{gi} + N\ R_{si}\ B_g - m\ N\ B_{oi} - N\ B_{oi} + N\ B_o - N\ R_s\ B_g =$$

$$N_p\ B_o - N_p\ R_s\ B_g + N_p\ R_p\ B_g$$

Factorizando:

$$N\left[m\ B_{oi}\ (B_g/B_{gi} - 1) + B_o + B_g(R_{si} - R_s) - B_{oi}\right] =$$

$$N_p\left[B_o + B_g(R_p - R_s)\right]$$

Como $B_t = B_o + B_g\ (R_{si} - R_s)$ y $B_{oi} = B_{ti}$

$$N\left[mB_{oi}(B_g/B_{gi} - 1) + (B_t - B_{ti})\right] = N_p\left[B_o + B_g(R_p - R_s)\right]$$

Que en el miembro izquierdo expresa los mecanismos de desplazamiento y en el miembro derecho indica los fluidos producidos.

La expansión de la formación y del agua congénita en la zona de aceite son:

$$E_f = V_{pzo}\, c_f\, \Delta' p = \left[\frac{N\, B_{ti}}{1 - S_{wizo}}\right] c_f\, \Delta' p$$

$$E_w = S_{wizo}\, V_{pzo}\, c_w\, \Delta' p = S_{wizo} \left[\frac{N\, B_{ti}}{1 - S_{wizo}}\right] c_w\, \Delta' p$$

Adicionándolas del lado izquierdo de la ecuación de balance de materia (porque actúan como elementos desplazantes)

$$mNB_{ti}(B_g/b_{gi} - 1) + N(B_t - B_{ti}) + \frac{N\, B_{ti}}{1 - S_{wizo}} (c_f + c_w\, S_{wizo})\Delta' p =$$

$$N_p \left[B_o + B_g(R_p - R_s)\right]$$

III.2.6 A partir de la ecuación de balance de materia obtenga la expresión para la recuperación de aceite en yacimientos saturados:

a) Con W_e y casquete de gas

b) Con W_e y sin casquete de gas.

c) Sin W_e y con casquete de gas.

d) Sin W_e y sin casquete de gas.

Solución:

$$Rec = \frac{N_p}{N}$$

a) La ecuación de balance de materia es:

$$N(B_t - B_{ti}) + mNB_{ti}(B_g/B_{gi} - 1) + W_e = N_p\left[B_o + B_g(R_p - R_s)\right] + W_pB_w$$

Despejando Rec = N_p/N:

$$Rec = \frac{B_t - B_{ti} + mNB_{ti}(bg/B_{gi}-1)}{B_o + B_g(R_p - R_s)} + \frac{W_e - W_pB_w}{N(B_o + B_g(R_p - R_s))}$$

b) Como m = 0.0, de la expresión obtenida en el inciso a:

$$Rec = \frac{B_t - B_{ti}}{B_o + B_g(R_p - R_s)} + \frac{W_e - W_pB_w}{N(B_o + B_g(R_p - R_s))}$$

c) En este caso $W_e - W_pB_w = 0.0$, entonces:

$$Rec = \frac{B_t - B_{ti} + mNB_{ti}(bg/B_{gi}-1)}{B_o + B_g(R_p - R_s)}$$

d) $We - W_pB_w = 0.0$; m = 0.0

$$Rec = \frac{B_t - B_{ti}}{B_o + B_g(R_p - R_s)}$$

III.3 Yacimientos con empuje de gas disuelto liberado.

III.3.1 De un yacimiento saturado se tiene la siguiente información:

p_b = 220 Kg/cm^2	p = 205 Kg/cm^2
R_{sb} = 110	R_s = 102
B_{ob} = 1.30	B_o = 1.28
m = 0	B_g = 0.006
W_e = 0	G_p = 8*10^6 m^3 @ c.s.
W_p = 0	S_g < S_{gc}

Sabiendo que el volumen original de aceite es de 5.36*10^6 m^3 @ c.y. determine la N_p.

Solución:

La ecuación de balance de materia en este caso es:

$$N(B_t - B_{ti}) = N_p\left[B_o + B_g(R_p - R_s)\right]$$

De donde:

$$N_p = \frac{N(B_t - B_{ti})}{B_o + B_g(R_p - R_s)}$$

Como $S_g < S_{gc}$ no existe flujo de gas en el yacimiento y se puede calcular:

$$R_p = \frac{R_{si} + R_s}{2} = \frac{110 + 102}{2}$$

$$R_p = 106$$

Por otro lado:

$$B_t = B_o + B_g\ (R_{si} - R_s)$$

$$B_t = 1.28 + 0.006\ (110 - 102)$$

$$B_t = 1.328$$

$$B_{ti} = B_{oi} = 1.30$$

El volumen original a c.s.:

$$N = V_{oi}/B_{oi} = 5.36*10^6\ /\ 1.30$$

$$N = 4.123*10^6\ m^3$$

Finalmente:

$$N_p = \frac{4.123*10^6(1.328 - 1.30)}{1.28 + 0.006(106 - 102)}$$

$$N_p = 88\ 530\ m^3$$

III.3.2 De un yacimiento de aceite se tiene la siguiente información:

$p\ (Kg/cm^2)$	B_o	R_s	$N_p\ (*10^6\ m^3)$
$p_i = 250$	1.25	80	0

p_b = 200		80	1
150	1.20		3

$c_f = 9*10^{-5}(Kg/cm^2)^{-1}$; $c_w = 4*10^{-5}(Kg/cm^2)^{-1}$; S_{wi} = 20 % ;
$c_o = 59.67*10^{-5}(Kg/cm^2)^{-1}$; $W_e = 0$

De p_b a 150 Kg/cm^2 el comportamiento del yacimiento es por empuje de gas disuelto liberado, no hay entrada de agua ni casquete de gas.

Determine la saturación de aceite en el yacimiento cuando la $p = 150\ Kg/cm^2$.

Solución:

En la etapa de bajosaturación podemos calcular el volumen original de aceite:

$$N = \frac{N_p\ B_o}{B_{oi}\ c_e\ \Delta' p}$$

Para calcular B_{o200}:

$$c_e = \frac{S_o\ c_o - S_w\ c_w - c_f}{S_o}$$

De donde:

$$c_e = \frac{0.8 * 59.67*10^{-5} - 0.2*4*10^{-5} - 9*10^{-5}}{0.8}$$

$$c_e = 4.74*10^{-4}(Kg/cm^2)^{-1}$$

Otra manera de obtener c_o:

$$c_o = \frac{2(B_{ob} - b_{oi})}{(B_{ob} + B_{oi})(p_i - p_b)}$$

De donde:

$$B_{ob} = \frac{(2 + c_o(p_i - p_b))B_{oi}}{2 - c_o(p_i - p_b)}$$

$$B_{ob} = \frac{(2 + 4.742*10^{-5}(250 - 200)) * 1.25}{2 - 4.742*10^{-4}(250 - 200)}$$

$$= 1.28$$

Entonces:

$$N = \frac{1*10^{6} * 1.28}{1.25 * 59.67*10^{-4} * (250 - 200)}$$

$$N = 3.432*10^{6}\ m^{3}$$

Analizando ahora la etapa de saturación:

$$N_b = N - N_p$$

$$N_b = (3.432 - 1)*10^{6} = 2.432*10^{6}\ m^{3}$$

La producción en la saturaci:n:

$$N_{ps} = (3 - 1)*10^{6} = 2*10^{6}\ m^{3}$$

Para un yacimiento con empuje de gas disuelto liberado:

$$S_o = \frac{(N_b - N_{ps})\ B_o}{\dfrac{N\ B_{ob}}{1 - S_{wi}}}$$

$$S_o = \frac{(2.432*10^{6} - 2*10^{6})1.20}{\dfrac{2.432*10^{6} * 1.28}{1 - 0.20}}$$

$$S_o = 0.1332$$

III.3.3 Se tiene un yacimiento con una presión inferior a la presión de saturación, cuyo mecanismo de desplazamiento es por gas disuelto liberado. Se tiene la siguiente información:

t(días)	p(Kg/cm^2)	B_o	B_g	R_s	$N_p(10^6\ m^3)$	$G_p(10^6\ m^3)$
520	150	1.30	0.0075	90	2.0	240
640	130	1.25	0.0082	80	2.2	352

$B_{oi} = 1.38$ $\qquad$ $R_{si} = 140$ $\qquad$ $S_{wi} = 25\ \%$

Determine:

a) El gasto o ritmo de producción de gas libre que se tiene entre las presiones de 150 y 130 Kg/cm^2 (considere gasto constante).

b) El volumen original de aceite.

c) ¿Qué porcentaje de la producción obtenida entre 150 y 130 Kg/cm^2 es debido a la expansión del gas disuelto liberado?

Solución:

a) El volumen total de gas producido en el período es:

$$V_{gt} = \Delta G_p = G_{p130} - G_{p150}$$

$$V_{gt} = 352 * 10^6 - 240 * 10^6$$

$$V_{gt} = 112 * 10^6 \ m^3 \ @ \ c.s.$$

El gas disuelto que se produjo en el período es:

$$V_{gd} = \overline{R_s} \ (N_{p130} - N_{p150})$$

$$\overline{R_s} = (90 + 80)/2 = 85$$

$$V_{gd} = 85(2.2 * 10^6 - 2 * 10^6)$$

$$V_{gd} = 17 * 10^6 \ m^3$$

Por lo tanto, el gas libre producido en el período es:

$$V_{gl} = V_{gt} - V_{gd}$$

$$V_{gl} = 112 * 10^6 - 17 * 10^6$$

$$V_{gl} = 95 * 10^6 \ m^3 \ @ \ c.s.$$

Finalmente, el gasto de gas libre:

$$q_{gl} = \frac{V_{gl}}{\Delta t} = \frac{95 * 10^6}{640 - 520}$$

$$q_{gl} = 0.7917 * 10^6 \ m^3/d$$

b) La ecuación de [illegible]nce de materia para un yacimiento saturado sin casquete de gas ni entrada de agua es:

$$N(B_t - B_{ti}) = N_p\left[B_t + B_g(R_p - R_{si})\right]$$

De donde:

$$N = \frac{N_p(B_t + B_g(R_p - R_{si}))}{B_t - B_{ti}}$$

$$B_t = B_o + B_g\ (R_{si} - R_s)$$

$$B_{t180} = 1.25 + 0.0082(140 - 80)$$

$$B_{t180} = 1.742 \quad ; \quad B_{ti} = B_{oi} = 1.38$$

$$N = \frac{2.2*10^6(1.742 + 0.0082(160 - 140))}{1.742 - 1.38}$$

$$N = 11.58*10^6\ m^3$$

c) El porcentaje buscado es:

$$X = \frac{\Delta V_{gl}\ @\ c.y.}{\Delta producción\ @\ c.y.} * 100$$

$$X = \frac{V_{gl180} - V_{gl150}}{\Delta N_p(B_o + B_g(R_p - R_s))} * 100$$

V_{gl180}:

$$V_{gl} = \left[N\ R_{si} - (N - N_p)R_s - G_p\right]\ B_g$$

$$V_{gl180} = \left[11.58*10^6*140-(11.58-2.2)*10^6*80-352*10^6\right]*0.0082$$

$$V_{gl180} = 4.254*10^6\ m^3\ @\ c.y.$$

V_{gl150}:

$$V_{g1150} = \left[11.58*10^6*140-(11.58-2)*10^6*90-240*10^6\right]*0.0075$$

$$V_{g1150} = 3.8925*10^6 \; m^3 \; g \; @ \; c.y.$$

A 130 Kg/cm²:

$$R_p = \frac{G_p}{N_p} = 160$$

$$\Delta N_p(B_o + B_g(R_p - R_s)) = (2.2 - 2)*10^6*(1.30 + 0.0082(160 - 180)$$

$$\Delta N_p(B_o + B_g(R_p - R_s)) = 0.3912*10^6 \; m^3 \; @ \; c.y.$$

Finalmente:

$$X = \frac{4.254*10^6 - 3.8925*10^6}{0.3912*10^6} * 100$$

$$X = 92.4 \; \%$$

III.3.4 Se tiene un yacimiento de aceite del cual sólo se conoce la siguiente información:

p(Kg/cm²)	B_o	B_t
150	1.30	
100		1.50

$p_b = 150$ Kg/cm²

A la presión de 100 Kg/cm² la producción neta de fluidos en el yacimiento es de $20*10^6 m^3$. Considere que a esta presión no se ha formado casquete de gas y no hay acuífero asociado al yacimiento. Determine:

a) El volumen original de aceite del yacimiento.

b) La recuperación de hidrocarburos a 100 Kg/cm².

c) El valor del factor de volumen de la fase mixta cuando se tenga una producción neta de fluido en el yacimiento de $28*10^6 \; m^3$.

Solución:

a) Aplicando la ecuación de balance de materia:

$$N(B_t - B_{ti}) = N_p\left[B_o + B_g(R_p - R_s)\right]$$

De donde:

$$N = \frac{N_p(B_o + B_g(R_p - R_s))}{B_t - B_{ti}}$$

$$B_t = B_o + B_g\,(R_{si} - R_s)$$

A p_b $R_s = R_{si}$

$$B_{ti} = B_{oi} = 1.30$$

De los datos:

$$N_p(B_o + B_g(R_p - R_s)) = 20*10^6$$

Entonces:

$$N = \frac{20*10^6}{1.50 - 1.30}$$

$$N = 100*10^6\ m^3$$

b)

$$Rec = \frac{N_p}{N}$$

$$N_p = \frac{N_p(B_o + B_g(R_p - R_s))}{B_t}$$

$$N_p = \frac{20*10^6}{1.5} = 13.33*10^6\ m^3$$

$$Rec = \frac{13.33*10^6}{100*10^6}$$

$$Rec = 0.1333$$

c) Ahora:

$$N(B_t - B_{ti}) = 28*10^6$$

De donde:

$$B_t = 28*10^6/N + B_{ti}$$

$$B_t = 28*10^6/100*10^6 + 1.30$$

$$B_t = 1.58$$

III.4 Yacimientos con entrada de agua.

III.4.1 Se tiene un yacimiento de aceite en $4.19*10^8 m^3$ de roca con $\phi = 20$ % y $S_{wi} = 13$ %. El yacimiento tiene asociado un acuífero activo. se cuenta con los siguientes datos:

$P_b = 220\ Kg/cm^2$	$p = 180\ Kg/cm^2$	$B_g = 0.0081$
$B_{ob} = 1.38$	$B_o = 1.32$	$W_e = 1.2*10^6\ m^3$
$R_{si} = 180$	$R_s = 112$	$W_p = 0$

Considerando $S_g < S_{gc}$ durante todo el tiempo de explotación considerado, determine:

a) El volumen producido acumulado de aceite.

b) El volumen producido acumulado de gas.

c) El volumen producido acumulado de gas disuelto.

d) La saturación de aceite a 180 Kg/cm^2.

e) El factor de recuperación.

Solución:

a) La ecuación de balance de materia para yacimientos saturados ($m = 0$, $W_p = 0$):

$$N(B_t - B_{ti}) + W_e = N_p\left[B_o + B_g(R_p - R_s)\right]$$

De donde:

$$N_p = \frac{N(B_t - B_{ti}) + W_e}{B_o + B_g(R_p - R_s)}$$

$$N = \frac{V_R\ \phi\ (1 - S_{wi})}{B_{oi}}$$

$$N = \frac{4.19*10^8 * 0.2 * (1 - 0.13)}{1.38}$$

$$N = 52.83 * 10^{6} \; m^{3}$$

$$B_t = B_o + B_g \; (R_{si} - R_s)$$

$$B_t = 1.32 + 0.0081(180 - 112) = 1.87$$

Como $S_g < S_{gc}$:

$$R_p = \frac{180 + 112}{2} = 146$$

Sustituyendo valores:

$$N_p = \frac{52.83 * 10^{6} \; (1.59 - 1.30) + 1.2 * 10^{6}}{1.32 + 0.0081(146 - 112)}$$

$$N_p = 7.7 * 10^{6} \; m^{3}$$

b) El gas producido acumulado:

$$G_p = R_p \; N_p$$

$$G_p = 146 * 7.7 * 10^{6}$$

$$G_p = 1124.2 * 10^{6} \; m^{3}$$

c) Como $S_g < S_{gc}$ no hay flujo de gas libre, por lo tanto:

$$G_{pd} = G_p = 1124.2 * 10^{6} \; m^{3}$$

d) La saturación de aceite a 180 Kg/cm^{2}:

$$S_o = \frac{V_{or}}{V_p} = \frac{(N - N_p) \; B_o}{V_R \; \phi}$$

$$S_o = \frac{(52.83 - 7.7) * 10^{6}}{4.19 * 10^{8} * 0.2}$$

$$S_o = 0.5385$$

e) La recuperación:

$$Rec = \frac{N_p}{N} = \frac{7.7*10^6}{52.83*10^6}$$

$$Rec = 0.1457$$

III.4.2 Calcule el volumen de roca invadido por agua, así como la recuperación total obtenida de ese volumen de roca, la recuperación por empuje de gas disuelto liberado y la recuperación del aceite residual debida exclusivamente al desplazamiento por agua.

W_e	W_p	S_o	S_g	S_{grzi}	B_o	S_{orzi}
100 000	40 000	0.60	0.10	0.08	1.220	0.28
180 000	60 000	0.58	0.12	0.10	1.210	0.30

$B_{oi} = 1.30$; $\phi = 0.20$; $S_{wc} = 0.30$; $E_{vv} = 0.80$

Solución:

$$S_{wizi} = E_{vv}\,(1 - S_{orzi} - S_{grzi} - S_{wc})$$

$$S_{wizi} = 0.8\,(1 - 0.29 - 0.09 - 0.30)$$

$$S_{wizi} = 0.256$$

El volumen de roca invadida:

$$V_{ri} = \frac{\Delta W_e - \Delta W_p\,B_w}{\phi\,S_{wizi}}$$

$$V_{ri} = \frac{80\ 000 - 20\ 000}{0.20 * 0.256}$$

$$V_{ri} = 1.1719*10^6$$

La recuperación total:

$$Rec = 1 - \frac{S_o\,B_{oi}}{S_{oi}\,B_o}$$

La saturación media de aceite residual:

$$S_{or} = E_{vv}\, S_{orzl} + (1 - E_{vv})\, S_{orznl}$$

$$S_{or} = 0.80 * 0.29 + 0.20*0.59$$

$$S_{or} = 0.35$$

$$Rec = 1 - \frac{0.35 * 1.3}{0.7 * 1.215}$$

$$Rec = 0.465$$

La recuperación por gas disuelto liberado:

$$Rec_{gd} = 1 - \frac{0.59 * 1.3}{0.70 * 1.22}$$

$$Rec_{gd} = 0.102$$

La recuperación de aceite residual por el desplazamiento por agua es:

$$Rec_{v} = 1 - \frac{0.35 * 1.215}{0.59 * 1.215}$$

$$Rec_{v} = 0.407$$

III.4.3 Se tiene un yacimiento con los siguientes datos:

$p_i = 200\ Kg/cm^2$	$p = 180\ Kg/cm^2$
$R_{si} = 100$	$R_s = 90$
$B_{oi} = 1.37$	$B_o = 1.34$
$B_{gi} = 0.0066$	$B_g = 0.0072$
$N = 6.7*10^6\ m^3$	$N_p = 2.7*10^5\ m^3$
$\phi = 0.10$	$W_p = 15\ 000\ m^3$
$S_w = 0.20$	$G_p = 37*10^6\ m^3$

Calcule la entrada de agua al yacimiento.

Solución:

Como $B_o < B_{oi}$ y $R_s < R_{si}$ se trata de un yacimiento de aceite saturado.

La ecuación de balance de materia (m = 0) es:

$$N(B_t - B_{ti}) + W_e = N_p\left[B_o + B_g(R_p - R_s)\right] + W_p\ B_w$$

De donde:

$$W_e = N_p\left[B_o + B_g(R_p - R_s)\right] + W_p\ B_w - N(B_t - B_{ti})$$

$$B_t = B_o + B_g\ (R_{si} - R_s)$$

$$B_t = 1.34 + 0.0072(100 - 90) = 1.412$$

$$B_{ti} = B_{oi} = 1.37$$

$$B_w \cong 1$$

$$R_p = G_p/N_p = 37*10^6/2.7*10^6 = 137$$

$$W_e = 2.7*10^5(1.34+0.0072(137 - 90))+15\ 000(1)-6.7*10^6(1.412-1.37)$$

$$W_e = 186\ 768\ m^3\ @\ c.y.$$

III.5 Yacimientos con casquete original de gas.

III.5.1 Un yacimiento de aceite con casquete original de gas, cuenta con la siguiente información:

$V_{oi} = 600*10^6\ m^3$ @ c.y.	$p = 160\ Kg/cm^2$
$p_i = 200\ Kg/cm^2$	$B_o = 1.28$
$B_{oi} = 1.36$	$B_g = 0.0093$
$R_{si} = 120$	$c_f = 50*10^{-6}(Kg/cm^2)^{-1}$
$G = 3.45*10^6\ m^3$	$c_w = 45*10^{-6}(Kg/cm^2)^{-1}$
$B_{gi} = 0.007$	$R_s = 100$
$R_p = 130$	$S_{wizg} = 0.13$
$S_{wizo} = 0.18$	

a) Calcule el valor de m.

b) Determine el volumen producido acumulado de aceite a 160 Kg/cm^2.

c) Determine el factor de recuperación a 160 Kg/cm^2

Solución:

Por definición:

$$m = \frac{G\ B_{gi}}{N\ B_{oi}}$$

$$m = \frac{3.45*10^{10} * 0.007}{600*10^6}$$

$$m = 0.4025$$

b) La ecuación de balance de materia considerando la expansión de la formación y del agua congénita es:(como es muy grande se escribirá por partes)

$$N_p = \frac{A + B + C}{B_o + B_g(R_p - R_s)}$$

Donde:

$$A = N\left[m\ B_{ti}(B_g - B_{gi}) + B_t - B_{ti}\right]$$

$$B = c_f\ \Delta'p\left[\frac{m\ N\ B_{ti}}{1 - S_{wizg}} + \frac{N\ B_{ti}}{1 - S_{wizo}}\right]$$

$$C = c_w\ \Delta'p\left[S_{wizg}\frac{m\ N\ B_{ti}}{1 - S_{wizg}} + S_{wizo}\frac{N\ B_{ti}}{1 - S_{wizo}}\right]$$

Calculando valores:

$$N = V_{oi}/B_{oi} = 600*10^6/1.36$$

$$N = 441.17*10^6\ m^3$$

$$B_t = B_o + B_g\ (R_{si} - R_s)$$

$$B_t = 1.28 + 0.0093(120 - 100) = 1.466$$

$$\Delta' p = p_i - p = 200 - 160 = 40 \ Kg/cm^2$$

Sustituyendo valores:

$$A = 441.17*10^{6} \left[0.4025 * 1.36 * (0.0093/0.007 - 1) + 1.466 - 1.36\right]$$

$$A = 126.11*10^{6}$$

$$B = 50*10^{-6}*40 \left[\frac{0.4025*441.17*10^{6}*1.36}{1 - 0.13} + \frac{441.17*10^{6}*1.36}{1 - 0.18} \right]$$

$$B = 2.018*10^{6}$$

$$C = 45*10^{-6}*40 \left[0.13 \ \frac{0.4025*441.17*10^{6}*1.36}{1 - 0.13} + 0.18 \ \frac{441.17*10^{6}*1.36}{1 - 0.18} \right]$$

$$C = 3.02*10^{5}$$

Finalmente:

$$N_p = \frac{126.11*10^{6} + 2.018*10^{6} + 3.02*10^{5}}{1.28 + 0.0093(130 - 100)}$$

$$N_p = 82.38*10^{6} \ m^3$$

c) La recuperación:

$$Rec = N_p / N$$

$$Rec = 82.38*10^{6} / 441.17*10^{6}$$

$$Rec = 0.1867$$

III.5.2 Un yacimiento hipotético de aceite con $m = 0.25$ y $N = 530 \times 10^6 m^3$, $S_{wi} = 0.125$ y $V_{pi} = 835 \times 10^6 m^3$ tiene el siguiente comportamiento:

$P(Kg/cm^2)$	B_o	B_g	R_s	R_p
220	1.380	0.0060	180	---
210	1.360	0.0064	154	186
200	1.342	0.0068	137	194
190	1.330	0.0074	124	210
180	1.318	0.0081	112	236

Determine:

a) el volumen de aceite producido acumulado a cada presión.

b) El volumen de gas producido acumulado a cada presión.

c) La recuperación de aceite a 180 Kg/cm^2.

d) La saturación de aceite a 180 Kg/cm^2

Solución:

a) La ecuación de balance de materia es:

$$N(B_t - B_{ti}) + m\ N\ B_{ti}\ (B_g/B_{gi} - 1) = N_p\left[B_o + B_g(R_p - R_s)\right]$$

De donde:

$$N_p = \frac{m\ N\ B_{ti}(B_g/B_{gi} - 1) ++ N(B\ \ - B\ \ )}{B_o + B_g(R_p - R_s)}$$

Donde: $B_t = B_o + B_g\ (R_{si} - R_s)$; $R_{si} = 180$; $B_{gi} = 0.006$

Para mayor claridad se resolverá de manera tabular:

p	B_t	$mNB_{ti}(B_g/B_{gi}-1)$	$N(B_t - B_{ti})$	$B_o+B_g(R_p-R_s)$
220	1.380	0	0	------
210	1.526	12.2×10^6	77.38×10^6	1.5644
200	1.634	24.2 "	134.62 "	1.7292
190	1.744	42.7 "	192.92 "	1.9650
180	1.869	64.0 "	259.17 "	2.3226

Finalmente:

$N_p(m^3)$
0.0
57.26×10^6

91.96 "

119.85 "

139.14 "

b) Para obtener el G_p se usa la expresión:

$$G_p = R_p\ N_p$$

De donde nos resulta:

p	$G_p(m^3)$
220	0.0
210	$1.065*10^{10}$
200	1.784 "
190	2.517 "
180	3.284 "

c) La recuperación:

$$Rec = N_p\ /\ N$$

$$Rec = 139.14*10^6\ /\ 530*10^6$$

$$Rec = 0.2625$$

d) La saturación de aceite:

$$S_o = \frac{V_{or}}{V_p} = \frac{(N - N_p)B_o}{V_p}$$

$$S_o = \frac{(530 - 139.14)*10^6 * 1.318}{835.7*10^6}$$

$$S_o = 0.6164$$

III.5.3 Suponga que el comportamiento de un yacimiento es el siguiente:

$p(Kg/cm^2)$	B_o	B_g	R_s	R_p
150	1.25	0.0005	200	0
110	1.24	0.0009	180	220
60	1.23	0.0016	155	280

20	1.21	0.0025	125	380

$N = 100*10^6\ m^3$; $G = 5*10^{10}\ m^3$; $We = 0.0$

Determine:

a) El volumen de aceite producido acumulado a cada nivel de presión.

b) ¿Cuáles deberán ser los volúmenes originales de aceite y gas libre para que pudiera producirse diez veces más el volumen de aceite por usted calculado y que el comportamiento del yacimiento sea el mismo?

Solución:

La ecuación de balance de materia para un yacimiento saturado con casquete de gas y sin entrada de agua es:

$$N(B_t - B_{ti}) + m\,N\,B_{ti}\,(B_g/B_{gi} - 1) = N_p\left[B_o + B_g(R_p - R_s)\right]$$

Donde:

$$m\,N\,B_{ti}\,(B_g/B_{gi} - 1)) = G\,(B_g - B_{gi})$$

Entonces:

$$N_p = \frac{N(B_t - B_{ti}) + G(B_g - B_{gi})}{B_o + B_g(R_p - R_s)}$$

$$B_t = B_o + B_g\,(R_{si} - R_s)$$

$$B_{ti} = B_{oi} = 1.25$$

$$R_{si} = 200$$

A 110 Kg/cm^2

$$B_t = 1.24 + 0.0009(200 - 180) = 1.258$$

$$N_p = \frac{100*10^6(1.258 - 1.25) + 5*10^{10}(0.0009 - 0.0005)}{1.24 + 0.0009(220 - 180)}$$

$$N_p = 16.3*10^6\ m^3$$

A 60 Kg/cm^2:

$$B_t = 1.23 + 0.0016(200 - 155) = 1.302$$

$$N_p = \frac{100*10^6(1.302 - 1.25) + 5*10^{10}(0.0016 - 0.0005)}{1.23 + 0.0016(280 - 155)}$$

$$N_p = 42.1*10^6 \ m^3$$

A 20 Kg/cm^2:

$$B_t = 1.21 + 0.0025(200 - 125) = 1.397$$

$$N_p = \frac{100*10^6(1.397 - 1.25) + 5*10^{10}(0.0025 - 0.0005)}{1.21 + 0.0025(380 - 125)}$$

$$N_p = 62.1*10^6 \ m^3$$

Resumiendo:

p(Kg/cm^2)	Np(m^3)
150	0.0
110	16.3*10^6
60	42.1 "
20	62.1 "

b) De la ecuación de balance de materia :

$$N_p = \frac{N(B_t - B_{ti}) + G(B_g - B_{gi})}{B_o + B_g(R_p - R_s)}$$

Si deseamos obtener 10 Np, debemos multiplicar por 10 ambos miembros de la ecuación:

$$10\ N_p = 10\ \frac{N(t - B_{ti}) + G(B_g - B_{gi})}{B_o + B_g(R_p - R_s)}$$

Para mantener el comportamiento del yacimiento, los factores de volumen y las relaciones gas-aceite no deben ser afectados por la multiplicación. Entonces:

$$10\ N_p = \frac{(10\ N)(B_t - B_{ti}) + (10\ G)(B_g - B_{gi})}{B_o + B_g(R_p - R_s)}$$

De donde se desprende que para obtener diez veces la producción calculada, se requiere:

$$N = 10 * 10^7 = 100*10^7\ m^3$$

$$G = 10 * 5*10^{11} = 50*10^{11}\ m^3$$

III.6 Yacimientos con entrada de agua y casquete original de gas.

III.6.1 Se tiene un yacimiento saturado con casquete de gas, del cual se sabe que cuando la presión ha decrecido en un 20% de su valor original, el 65% de los hidrocarburos producidos es por efecto de la expansión del aceite original y el 33% a la expansión del gas del casquete. Además se cuenta con la siguiente información:

R_s	B_o	B_g	$N_p(m^3)$	$G_p(m^3)$	$W_p(m^3)$
100	1.4	0.002	0	0	0
80	1.2	0.003	500 000	$36*10^6$	0

a) Determine si hay o no entrada de agua al yacimiento y explique porqué.

b) En caso afirmativo, calcule el volumen de esa entrada de agua especificando a qué condiciones es medida.

Solución:

a) La suma de los empujes debe ser igual a la unidad:

$$A + B + C = 1.0$$

Donde:

A = Empuje por expansión del aceite

B = Empuje por expansión del casquete

C = Empuje por entrada de agua

Si no existe entrada de agua C deberá ser cero:
despejando:

$$C = 1.0 - A - B$$

$$C = 1.0 - 0.65 - 0.33$$

$$C = 0.02$$

Como C no es cero, se concluye que sí existe entrada de agua.

b) El término C está definido por:

$$C = \frac{W_e - W_p\ B_w}{N_p\ (B_o + B_g(R_p - R_s))}$$

Como $W_p = 0$:

$$W_e = C\ N_p\ (B_o + B_g(R_p - R_s))$$

$$R_p = G_p/N_p = 36*10^6\ /\ 0.3*10^6$$

$$R_p = 120$$

$$W_e = 0.02 * 0.3*10^6 * (1.2 + 0.003(120 - 80)$$

$$W_e = 7\ 290\ m^3\ @\ c.y.$$

III.6.2 Se tiene un yacimiento con un volumen original de aceite de $8.631*10^6 m^3$ @ c.y. Contiene una capa de gas con $22*10^6$ m^3 de roca, $\phi = 0.12$ y $S_w = 0.25$.

Además: $p_i = 200\ Kg/cm^2$; $R_{si} = 100$; $B_{oi} = 1.37$; $B_{gi} = 0.0066$

Después de 547 días de explotación se tiene la siguiente información:

$N_p = 1.6983*10^6$ Bl , $G_p = 37*10^6\ m^3$, $W_p = 1400\ m^3$,
$p = 180\ Kg/cm^2$, $R_s = 90$, $B_o = 1.34$, $B_g = 0.0072$

Determine:

a) La entrada de agua al yacimiento.

b) los índices de empuje en porcentaje de la recuperación.

Solución:

a) La ecuación de balance de materia es:

$$N(B_t - B_{ti}) + GB_{gi}(B_g/B_{gi} - 1) + W_e = N_p\left[B_o + B_g(R_p - R_s)\right] + W_pB_w$$

De donde:

$$W_e = N_p\left[B_o + B_g(R_p - R_s)\right] + W_pB_w - N(B_t - B_{ti}) - GB_{gi}(B_g/B_{gi}-1)$$

$$N_p = 1.6983*10^6(0.159) = 0.27*10^6\ m^3$$

$$R_p = G_p/N_p = 37*10^6/0.27*10^6 = 137$$

$$B_w \cong 1.0 \quad ; \ B_{ti} = B_{oi} = 1.37$$

$$B_t = B_o + B_g\ (R_{si} - R_s)$$

$$B_t = 1.34 + 0.0072(100 - 90) = 1.412$$

$$W_e = 0.27*10^6(1.34 + 0.0072(137 - 90)) + 1400(1) - 6.3*10^6(1.412 - 1.370) - 1.98*10^6(0.0072/0.0066 - 1)$$

$$W_e = 1.2755*10^6 + 1400 - 0.2646*10^6 - 0.18*10^6$$

$$W_e = 832\ 300\ m^3$$

b) Cálculo de los empujes:

- Empuje por gas disuelto liberado:

$$A = \frac{N(B_t - B_{ti})}{N_p(B_o + B_g(R_p - R_s))} * 100$$

$$A = \frac{0.2646*10^6}{1.2755*10^6} * 100$$

$$A = 20.74\ \%$$

-Empuje por gas del casquete:

$$B = \frac{GB_{gi}(B_g/B_{gi} - 1)}{N_p(B_o + B_g(R_p - R_s))} * 100$$

$$B = \frac{0.18*10^6}{1.2755*10^6} * 100$$

$$B = 14.12\ \%$$

Empuje por entrada neta de agua:

$$C = \frac{W_e - W_p\ B_w}{N_p(B_o + B_g(R_p - R_s))} * 100$$

$$C = \frac{832\ 300 - 1\ 400}{1.2755*10^6} * 100$$

$$C = 65.14\ \%$$

III.6.3 Aplicando la ecuación de balance de materia a un período de explotación de un día, calcule el volumen de gas @ c.s. que debe inyectarse a un yacimiento que produce 20 000 m^3/d de aceite con una R = 150 y 1000 m^3/d de agua, si se desea mantener la presión actual de 130 Kg/cm^2. A esta presión B_o = 1.25 , R_s = 130, B_g = 0.003.

El B_g del gas inyectado es 0.004 y B_w = 1.00

Solución:

La ecuación de balance de materia con W_e = 0:

$$N(B_t - B_{ti}) + m\ N\ B_{ti}\ (B_g/B_{gi} - 1) = N_p\left[B_o + B_g(R_p - R_s)\right] + W_pB_w$$

Como el período de explotación es de un día se puede considerar:

$$N_p = q_o$$

$$W_p = q_w$$

$$R_p = R$$

Como la presión se mantendrá constante, no existirán expansiones dentro del yacimiento. El efecto de esas expansiones será sustituído por el volumen de gas inyectado @ c.y.

Entonces se puede escribir:

$$q_o(B_o + B_g(R_p - R_s)) + q_w\ B_w = q_{g_{iny}} B_{g_{iny}}$$

De donde:

$$q_{g_{iny}} = \frac{q_o\ (B_o + B_g(R_p - R_s)) + q_w\ B_w}{B_{g_{iny}}}$$

$$q_{g_{iny}} = \frac{20\ 000(1.25 + 0.003(150 - 130)) + 1\ 000(1)}{0.004}$$

$$q_{g_{iny}} = 6.8*10^6\ m^3/d \quad @\ c.s.$$

III.6.4 Un yacimiento con $N = 6.3*10^6 m^3$ o @ c.s. contiene una capa de gas en $22*10^6\ m^3$ de roca con $\phi = 0.12$ y $S_w = 0.25$.

$p_i = 200\ Kg/cm^2$, $R_{si} = 100$, $B_{oi} = 1.37$, $B_{gi} = 0.0066$

Después de un año: $N_p = 2.7*10^{-5}$, $G_p = 37*10^6$, $W_p = 1400$ y $p = 180$. A esta presión: $R_s = 90$, $B_o = 1.34$ y $B_g = 0.0072$

Calcule W_e y los índices de empuje.

Solución:

Se requiere calcular el volumen de gas libre:

$$m = \frac{G\ B_{gi}}{N\ B_{ti}}$$

$$G\ B_{gi} = m\ N\ B_{ti}$$

$$G\ B_{gi} = (1 - S_w)\ \phi\ V_R = (1 - 0.25) * 0.12 * 22*10^6$$

$$G\ B_{gi} = 1.98*10^6\ m^3\ g\ @\ c.y.$$

De la ecuación de balance de materia :

$$W_e = N_p(B_o + B_g(R_p - R_s)) + W_pB_w - N(B_t - B_{ti}) - mNB_{ti}(B_g/B_{gi} - 1)$$

$$R_p = G_p/N_p = 37*10^6/2.7*10^5 = 137$$

$$N_p(B_o + B_g(R_p - R_s)) = 2.7*10^5\ (1.34 + 0.0072(1.37 - 90))$$

$$N_p(B_o + B_g(R_p - R_s)) = 4.53*10^5\ m^3$$

$$W_p\ B_w = 1\ 400 * 1.0 = 1\ 400\ m^3$$

$$B_t = B_o + B_g\ (R_{si} - R_s) = 1.34 + 0.0072 = 1.412$$

$$N(B_t - B_{ti}) = 6.3*10^6\ (1.412 - 1.37) = 264\ 600$$

$$mNB_{ti}(B_g/B_{gi} - 1) = 1.98*10^6(0.0072/0.0066 - 1) = 180\ 000$$

Sustituyendo los valores en la ecuación de balance de materia:

$$W_e = 4.53*10^5 + 1\ 400 - 264\ 600 - 180\ 000$$

$$W_e = 9\ 800\ m^3 \text{ @ c.y.}$$

Para los índices de empuje:

- Indice por expansión de aceite y gas:

$$A = \frac{N(B_t - B_{ti})}{N_p(B_o + B_g(R_p - R_s))}$$

$$A = \frac{264\ 600}{4.53*10^5}$$

$$A = 0.5841$$

- Indice por expansión del casquete:

$$B = \frac{mNB_{ti}(B_g/B_{gi} - 1)}{N_p(B_o + B_g(R_p - R_s))}$$

$$B = \frac{180\ 000}{4.53*10^5}$$

$$B = 0.3974$$

- Indice por entrada de agua:

$$C = \frac{W_e - W_p\ B_w}{N_p(B_o + B_g(R_p - R_s))}$$

$$C = \frac{9\ 800 - 1\ 800}{4.53*10^5}$$

$$C = 0.0185$$

III.7 Balance de materia en forma de recta.

III.7.1 Un yacimiento con casquete de gas tiene un volumen original de aceite de $115 \cdot 10^{6}$ Bl @ c.s. El comportamiento del yacimiento se resume en la siguiente tabla:

$p (Kg/cm^2)$	$N_p (m^3)$	R_p	B_o	R_s	B_g
235	0	0.0	1.2511	90.83	0.00489
220	524 000	186.99	1.2353	84.95	0.00517
210	938 000	188.77	1.2222	80.14	0.00539
200	1 407 000	206.58	1.2122	75.69	0.00567
190	1 829 000	219.94	1.2022	71.41	0.00601
180	2 307 000	225.28	1.1922	66.78	0.00635
170	2 819 000	231.52	1.1822	62.69	0.00674

De la información geológica se estima un tamaño del casquete de gas tal que $m = 0.4$ Utilizando la historia de presión y producción confirme esta estimación, si no ¿Cuál es el valor correcto de m?

Solución:

Este problema se puede resolver usando el método de la ecuación de balance de materia en forma de recta:

$$F = N \left(E_o + m \, E_g \, B_{ti}/B_{gi} \right)$$

Donde:

$$F = N_p \left(B_t + B_g (R_p - R_{si}) \right)$$

$$E_o = B_t - B_{ti}$$

$$E_g = B_g - B_{gi}$$

En la cual al graficar F vs $(E_o + m \, B_{ti}/B_{gi} \, E_g)$ con un valor supuesto de m, se obtendrá una recta si m es correcta.

Con las ecuaciones anteriores se construye la siguiente tabla:

p	Bt	$F*10^6$	Eo	$Eg*10^{-4}$	m = 0.4 Eo+mEgBti/Bgi
235	1.251	0.0	0.0	0.0	0.0
220	1.266	0.924	0.015	2.8	0.0436
210	1.280	1.696	0.029	5.0	0.0802
200	1.298	2.750	0.047	7.8	0.1268
190	1.319	3.832	0.068	11.2	0.1826
180	1.345	5.072	0.094	14.6	0.2434
170	1.372	6.541	0.121	18.5	0.3103

En la figura III.1 se graficó obteniendo una línea curva, por lo tanto, el valor de m = 0.4 es incorrecto.

Se prueba de nuevo con m = 0.5 (se incrementa porque la curvatura es positiva)

Eo+mEgBti/Bgi
0.0
0.0508
0.0930
0.1468
0.2113
0.2807
0.3576

Al graficar estos resultados en la misma figura, se obtiene una curva con curvatura negativa, probamos con m = 0.45

Eo+mEgBti/Bgi
0.0
0.0472
0.0866
0.1368
0.1970
0.2621
0.3340

Con lo cual se obtiene la recta buscada, por lo tanto el valor correcto de m es 0.45

FIGURA III.1

EBM EN FORMA DE RECTA

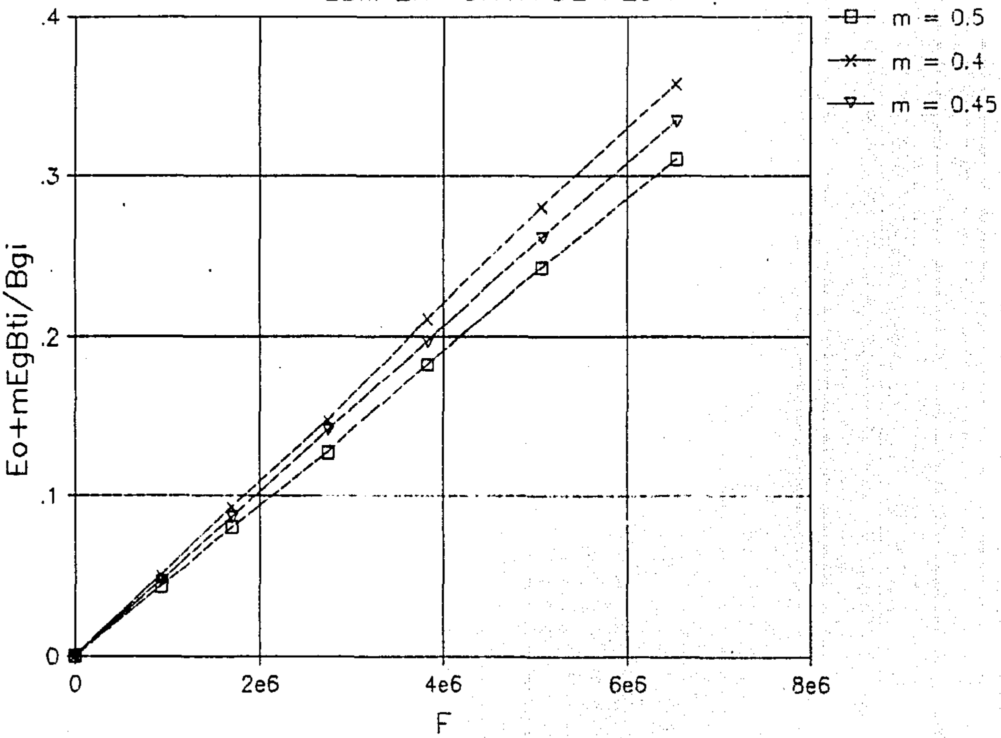
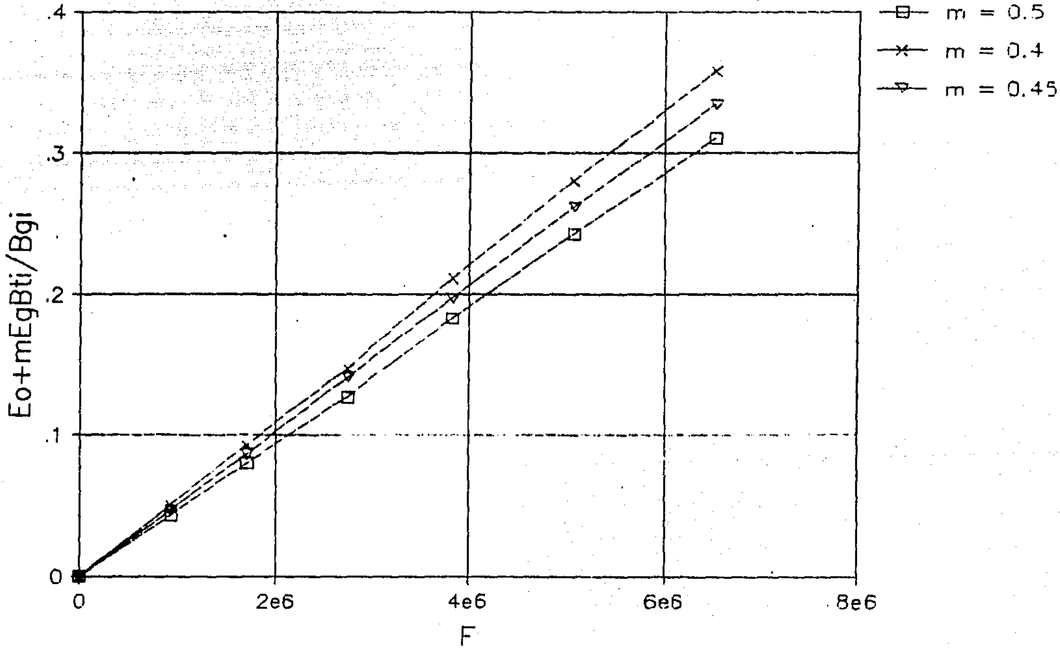


FIGURA III.1

EBM EN FORMA DE RECTA



III.7.2 De la aplicación del método de Havlena y Odeh se obtuvieron los siguientes datos:

F/Eo	Eg/Eo
600 000	0.030
520 000	0.024
440 000	0.018
360 000	0.012
280 000	0.006

a) Determine de qué tipo de yacimiento se trata.

b) Calcule el o los parámetros que se pueden obtener con los datos anteriores.

Solución:

a) Por presentar el término Eg se deduce que se trata de un yacimiento de aceite saturado con casquete de gas y sin entrada de agua.

b) Graficando los datos (figura III.2) se obtiene:

De la pendiente:

$$G = \frac{6*10^{5} - 2.8*10^{5}}{30*10^{-3} - 6*10^{-3}}$$

$$G = 13.33*10^{6}$$

De la ordenada al origen:

$$N = 2*10^{5}$$

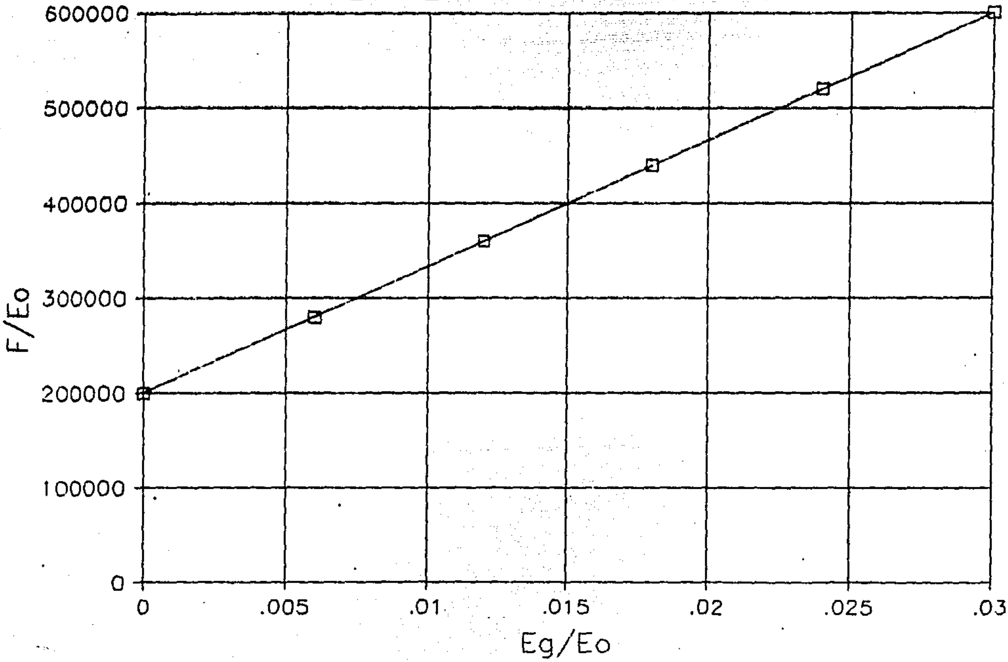
III.7.3 Se tiene la siguiente información de un yacimiento sin entrada de agua:

p(Kg/cm^2)	Bo	Bg	Rs	Rp	Np(10^{6}m^3)
150	1.25	0.0005	200	0	0.0
110	1.24	0.0009	180	220	18.35
60	1.23	0.0016	155	280	39.86
20	1.21	0.0025	125	380	59.40

Determine el volumen original de aceite usando el método de

FIGURA III.2

EBM EN FORMA DE RECTA



la línea recta.

Solución:

Como B_o disminuye al abatirse la presión se puede asegurar que se trata de un yacimiento saturado. La ecuación de balance de materia en este caso es:

$$N(B_t - B_{ti}) = N_p\left[B_o + B_g(R_p - R_s)\right]$$

$$B_t = B_o + B_g\ (R_{si} - R_s)$$

Haciendo:

$$N_p(B_o + B_g(R_p - R_s)) = F \quad y \quad B_t - B_{ti} = E_o$$

$$F = N\ E_o$$

A 110 Kg/cm^2:

$$B_t = 1.24 + 0.0009(200 - 180) = 1.258$$

$$E_o = 1.258 - 1.25 = 0.008$$

$$F = 18.35*10^6(1.24 + 0.0009(220 - 180)$$

$$F = 23.4*10^6$$

A 60 Kg/cm^2:

$$B_t = 1.23 + 0.0016(200 - 155) = 1.30$$

$$E_o = 1.30 - 1.25 = 0.05$$

$$F = 39.86*10^6(1.23 + 0.0016(280 - 155))$$

$$F = 57.0*10^6$$

A 20 Kg/cm^2

$$B_t = 1.21 + 0.0025(200 - 125) = 1.397$$

$$E_o = 1.397 - 1.25 = 0.147$$

$$F = 59.4*10^6(1.21 + 0.0025(380 - 125))$$

$$F = 109.74*10^6.$$

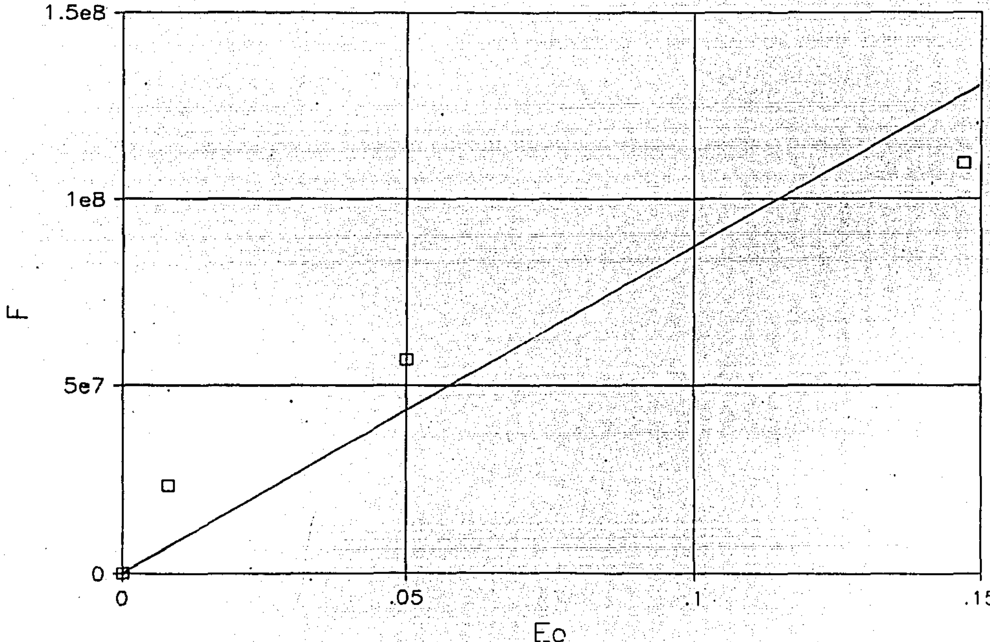
Tabulando los resultados:

p	F*10^6	Eo
150	0.0	0.000
110	23.4	0.008
60	57.0	0.050
20	109.7	0.147

En la figura III.3 se encuentran graficados estos valores, de donde se obtiene:

FIGURA III.3

EBM EN FORMA DE RECTA



$$N = 877*10^{6}\ m^{3}$$

III.7.4 Calcular N y W_e si $m = 0$. Se tiene la siguiente información:

$p(Kg/cm^2)$	B_o	B_g	R_s	$N_p(m^3)$	$G_p(10^6 m^3)$	$W_p(m^3)$
193.7	1.350	-----	89.1	0	0.000	0
147.9	1.302	0.00829	70.4	1 085 390	110.155	25 440
105.6	1.250	0.01187	54.5	2 444 760	344.056	77 900

Solución:

La ecuación de balance de materia en este caso es:

$$N(B_t - B_{ti}) + W_e = N_p(B_o + B_g(R_p - R_s)) + W_p\ B_w$$

De donde:

$$N = \frac{N_p(B_o + B_g(R_p - R_s)) + W_p\ B_w}{(B_t - B_{ti})} - \frac{W_e}{(B_t - B_{ti})}$$

Haciendo:

$$N' = \frac{N_p(B_o + B_g(R_p - R_s)) + W_p\ B_w}{(B_t - B_{ti})}$$

Nos queda:

$$N = N' - \frac{W_e}{(B_t - B_{ti})}$$

De donde:

$$W_e = (N' - N)*(B_t - B_{ti})$$

Y

$$B_t = B_o + B_g\ (R_{si} - R_s)\ ;\quad R_p = G_p/N_p$$

Efectuando cálculos: $B_{ti} = B_{oi} = 1.350$; $B_w = 1.0$

A 147.9 Kg/cm^2:

$$B_t = 1.302 + 0.00829(89.1 - 70.4) = 1.457$$

$$R_p = 110.155*10^{6}/1\ 085\ 390 = 101.489$$

$$N' = \frac{1\ 085\ 390(1.302 + 0.00829(101.489 - 70.4) + 25\ 440*1}{1.457 - 1.350}$$

$$N' = 16.06*10^{6}$$

A 105.6 Kg/cm^2:

$$B_t = 1.250 + 0.01187(89.1 - 54.5) = 1.6607$$

$$R_p = 344.056*10^6/2\ 44\ 760 = 140.732$$

$$N' = \frac{2\ 444\ 760(1.250 + 0.01187(140.732 - 54.5)) + 77\ 900*1}{1.601 - 1.350}$$

$$N' = 18.12*10^6$$

Tabulando los resultados:

$N_p(10^6 m^3)$	$N(10^6 m^3)$
0.00000	0.00
1.08539	16.06
2.44476	18.12

En la figura III.4 se presentan estos valores graficados, de donde se obtiene N cuando $N_p = 0$.

$$N = 14.5*10^6\ m^3\ @\ c.s.$$

Ahora calculando la entrada de agua:

A 105.6 Kg/cm^2:

$$W_e = (18.12 - 14.5)*10^6 * (1.661 - 1.350)$$

$$W_e = 1.13*10^6\ m^3\ v\ @\ c.y.$$

III.7.5 Obtenga N y m para un yacimiento sin entrada de agua. Las propiedades de los fluidos están dadas por las ecuaciones:

$$B_o = 1.2 + 0.0015 * p$$

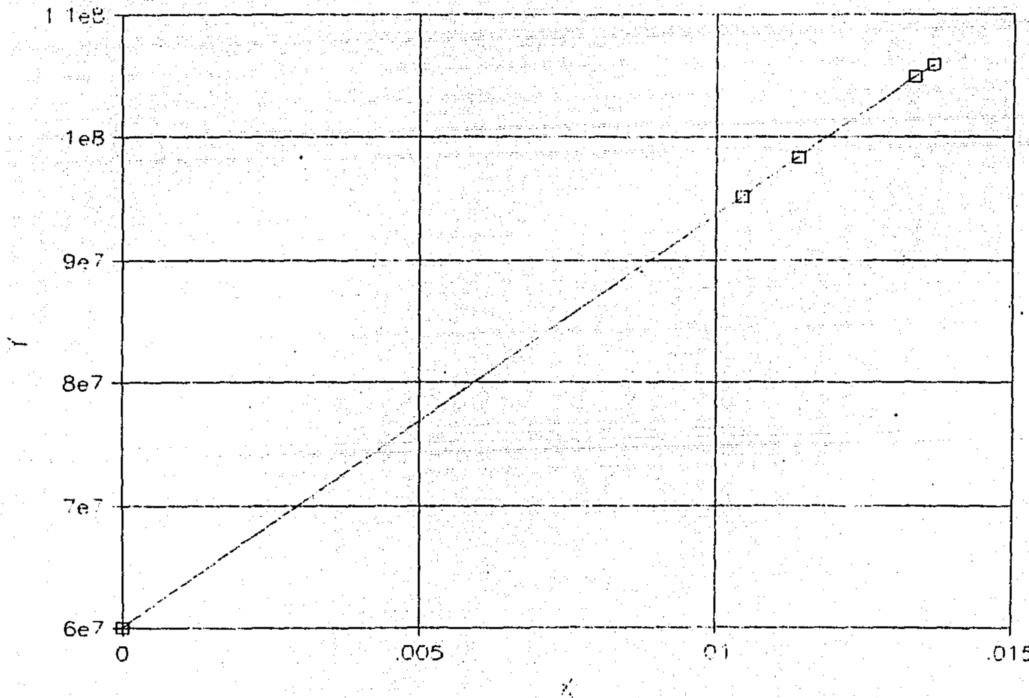
$$B_g = 0.024 - 9.23*10^{-5} * p$$

$$R_s = 0.8 * p + 20$$

Se cuenta con la siguiente información:

p (Kg/cm^2)	N_p (10^6 m^3)	R_p
150	0.0000	-
148	0.9970	140
146	1.9158	146
130	7.5784	183
120	9.7254	210

FIGURA III.5



CAPITULO IV YACIMIENTOS CON COMBINACION DE EMPUJES

IV.1 Introducción.

En este capitulo se presenta el manejo de la ecuación de balance de materia para aquellos yacimientos que originalmente fueron bajosaturados, pero que debido a la declinación de su presión han pasado a ser saturados.

La ecuación de balance de materia no puede aplicarse a periodos de producción que involucren ambas etapas, debido a que los mecanismos de empuje que actúan en cada una de ellas son diferentes. Durante la bajosaturación actúan las expansiones del aceite, de la roca y del agua congénita, mientras que en la saturación actúa además la expansión del gas que se libera del aceite.

En los capitulos anteriores se presentaron aplicaciones del balance de materia tanto para yacimientos bajosaturados, como para yacimientos saturados.

Durante la etapa de bajosaturación, la ecuación de balance de materia se aplica en la forma acostumbrada, pero al analizar la etapa de saturación debe hacerse la consideración de que el yacimiento empieza a producir a la presión de burbujeo, por lo cual todos los parámetros iniciales para la aplicación de la ecuación de balance de materia deben ser los que corresponden a dicha presión, inclusive el volumen original debe tomarse como el volumen de aceite remanente a la presión de burbujeo.

Después de realizar ambos análisis por separado, se integran los resultados para obtener las producciones acumulativas de fluidos y la recuperación a partir de la presión inicial del yacimiento.

IV.2 Deduciones.

IV.2.1 Suponga que se tiene un yacimiento de aceite saturado que originalmente fué bajosaturado. Se sabe que la recuperación durante la etapa de bajosaturación fue Recbs y que para el período de saturación se obtuvo una recuperación igual a Recs. Esta última se calculó considerando que la producción comenzó a la presión de burbujeo y no a la presión inicial.

Obtenga una expresión que sea aplicable a este caso para la determinación de la recuperación total.

Solución:

La recuperación total es:

$$Rec = \frac{Np}{N} \tag{A}$$

La recuperación durante la etapa de bajosaturación es:

$$Recbs = \frac{\Delta Npbs}{N} \tag{B}$$

La recuperación durante la saturación está referida al volumen de aceite remanente después de la bajosaturación, entonces:

$$Recs = \frac{\Delta Nps}{N - \Delta Npbs} \tag{C}$$

Por otro lado, se puede establecer que:

$$Np = \Delta Npbs + \Delta Nps \tag{D}$$

Es decir, que la producción acumulada de aceite es la suma del volumen obtenido durante la bajosaturación más el volumen obtenido en la saturación.

Dividiendo entre N se obtiene:

$$\frac{Np}{N} = \frac{\Delta Npbs}{N} + \frac{\Delta Nps}{N} \tag{E}$$

De A y B en E:

$$Rec = Recbs + \frac{\Delta N_{ps}}{N} \qquad (F)$$

Despejando de C:

$$\Delta N_{ps} = Recs\ (N - \Delta N_{pbs}) \qquad (G)$$

Sustituyendo en F:

$$Rec = Recbs + \frac{Recs(N - \Delta N_{pbs})}{N} \qquad (H)$$

Despejando de B:

$$\Delta N_{pbs} = Recbs\ N$$

Sustituyendo en H:

$$Rec = Recbs + Recs\left[\frac{N}{N} - \frac{Recbs\ N}{N}\right]$$

De donde:

$$Rec = Recbs + Rec(1 - Recbs)$$

Que es la expresión para calcular la recuperación total de un yacimiento saturado que originalmente fué bajosaturado.

IV.3 Yacimientos saturados, originalmente bajosaturados.

IV.3.1 De la historia del comportamiento de un yacimiento se tomó la siguiente información:

$p(Kg/cm^2)$	B_o	B_g	R_s
250	1.40		130
200	1.55	0.0006	
180	1.38	0.0010	110

$c_w = 3.5*10^{-4}(Kg/cm^2)^{-1}$; $c_f = 5.0*10^{-4}(Kg/cm^2)^{-1}$; $W_e = 0.0$

$\phi = 10\%$; $N = 20*10^6\ m^3$; $V_R = 3.5*10^8\ m^3$ de roca.

Determine la saturación de aceite a la $p = 180\ Kg/cm^2$, si a esta presión se ha recuperado el 20 % del volumen original del yacimiento. Considere el cambio de volumen poroso sólo en la etapa de bajosaturación.

Solución:

Analizando B_o se observa un aumento y posteriormente una disminución; por lo tanto el yacimiento es originalmente bajosaturado, llega a la presión de burbujeo y entra a la etapa de saturación.

Se considerara $p_b = 200$ Kg/cm^2 por presentar el m$ximo B_o.

A continuación se usará el subíndice "bs" para indicar la etapa de bajosaturación y "s" para la de saturación.

Para un yacimiento saturado:

$$So_{180} = \frac{(1 - Recs)\ B_{o180}\ (1 - S_{wi})}{B_{ob}} \qquad (A)$$

De los datos:

$$Rec_{180} = 0.20 = Recbs + (1 - Recbs)\ Recs \qquad (B)$$

De donde:

$$Recs = \frac{0.20 - recbs}{1 - Recbs} \qquad (C)$$

Además:

$$Recbs = \frac{N_{pbs}}{N} \qquad (D)$$

En la etapa de bajosaturación:

$$N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta'p = N_p\ B_o$$

De donde:

$$N_{pbs} = \frac{N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta'p}{B_o}$$

Donde:

$$c_e = \frac{S_o\ c_o + S_w\ c_w + c_f}{S_o}$$

$$S_{oi} = \frac{V_{oi}}{V_{pi}} = \frac{N\ B_{oi}}{V_R\ \phi}$$

$$S_{oi} = \frac{20 \cdot 10^{6} \cdot 1.40}{3.5 \cdot 10^{8} \cdot 0.10} = 0.80$$

$$S_{wi} = 1 - S_{oi} = 1 - 0.80 = 0.20$$

$$C_o = \frac{2(B_o - B_{oi})}{(p_i - p)(B_o + B_{oi})}$$

$$C_o = \frac{2(1.55 - 1.40)}{(250 - 200)(1.55 + 1.40)}$$

$$C_e = \frac{0.80(2.034 \cdot 10^{-3}) + 0.20(3.5 \cdot 10^{-4}) + 5 \cdot 10^{-4}}{0.80}$$

$$C_e = 2.7465 \cdot 10^{-3}\ (Kg/cm^{2})^{-1}$$

$$N_p = 20 \cdot 10^{6} \cdot 1.4 \cdot 2.746 \cdot 10^{-3} \cdot (250 - 200)/1.55$$

$$N_{pbs} = 2.48 \cdot 10^{6}\ m^{3}$$

Sustituyendo en D:

$$Recbs = \frac{2.48 \cdot 10^{6}}{20 \cdot 10^{6}} = 0.124$$

Sustituyendo en C:

$$Recs = \frac{0.20 - 0.124}{1 - 0.124} = 0.0867$$

Sustituyendo en A:

$$S_o = \frac{(1 - 0.0867) \cdot 1.38 \cdot (1 - 0.20)}{1.55}$$

$$S_{o180} = 0.6505 = 65.05\%$$

IV.3.2 Un yacimiento de aceite se ha explotado durante tres años teniendo el comportamiento que se muestra a continuación:

$p(Kg/cm^2)$	B_o	B_g	R_s	S_o	$N_p(10^6\ m^3)$
250	1.35	0.0000	120	0.80	0.0
160	1.44	0.0065	120	0.80	2.0
130	1.39	0.0092	104	0.73	2.7

Suponiendo que no hay segregación gravitacional y que la porosidad y la saturación de agua permanecen constantes de 250 a 130 Kg/cm^2, determine a la $p = 130\ Kg/cm^2$:

a) El volumen remanente de aceite @ c.s.

b) El volumen remanente de gas disuelto @ c.s.

c) El volumen remanente de gas libre @ c.s.

d) La recuperación total.

Solución:

Observando B_o y R_s se nota que se trata de un yacimiento originalmente bajosaturado, llega a p_b y entra a la etapa de saturación. Se tomará p_b como 160 Kg/cm^2.

a) El volumen remanente de aceite es:

$$N - N_{p130}$$

N se puede obtener durante la etapa de bajosaturación (250 - 160 Kg/cm^2).

La ecuación de balance de materia para yacimientos bajosaturados volumétricos:

$$N\ B_{oi} = (N - N_p)\ B_o$$

De donde:

$$N = \frac{N_p\ B_o}{B_o - B_{oi}}$$

$$N = \frac{2*10^6 * 1.44}{1.44 - 1.35}$$

$$N = 32*10^6\ m^3$$

Entonces:

$$N - N_{p130} = 32*10^6 - 2.7*10^6$$

$N - N_{p130} = 29.3*10^6 m^3$ es el volumen de aceite remanente a 130 Kg/cm^2

b) El gas disuelto remanente es:

$$V_{gd} = (N - N_p)\ R_{s130}$$
$$V_{gd} = 29.3*10^6 * 104$$
$$V_{gd} = 3.047*10^9\ m^3\ @\ c.s.$$

c) El gas libre remanente es:

Se requiere la saturación de gas:

$$S_g = 1 - S_o - S_w$$
$$S_g = 1 - S_o - (1 - S_{oi})$$
$$S_g = 1 - 0.73 - (1 - 0.80)$$
$$S_g = 0.07$$

El volumen poroso lo podemos calcular en la bajosaturación, puesto que permanece constante:

$$S_{oi} = \frac{V_{oi}}{V_p}$$

$$V_p = \frac{V_{oi}}{S_{oi}} = \frac{N\ B_{oi}}{S_{oi}}$$

$$V_p = \frac{32*10^6 * 1.35}{0.80} = 54*10^6\ m^3$$

Entonces:

$$V_g = 0.07\ 8\ 54*10^6$$

$$V_g = 3.78*10^6\ m^3\ @\ c.y.$$

Pasándolo a condiciones estándar:

$$V_{gl} = \frac{V_g}{B_g} = \frac{3.78*10^6}{0.0092}$$

$$V_{gl} = 410.87*10^6 m^3\ @\ c.s.$$ Es el gas libre remanente.

d) La recuperación:

$$Rec = N_p / N$$

$$Rec = 2.7*10^6 \ / \ 32*10^6$$

$$Rec = 0.084$$

IV.3.3 De un yacimiento de aceite se tiene la siguiente información:

$p_i = 250 \ Kg/cm^2$ $\quad$ $p_b = 200 \ Kg/cm^2$ $\quad$ $p = 150 \ Kg/cm^2$

$B_{oi} = 1.25$ $\quad$ $N_{pb} = 10^6 \ m^3$ $\quad$ $N_p = 3*10^6 \ m^3$

$R_{si} = 80$ $\quad$ $B_o = 1.20$

$c_f = 9*10^{-5} (Kg/cm^2)^{-1}$

$c_w = 2.8169*10^{-6} (lb/pg^2)^{-1}$

$c_e = 3.7213*10^{-4} (Kg/cm^2)^{-1}$

El comportamiento del yacimiento de p_b a $p = 150$ es por empuje de gas disuelto liberado, no hay entrada de agua ni se ha formado un casquete secundario de gas.

Determine la saturación de aceite en el yacimiento a la presión de 150 Kg/cm^2.

Solución:

$$S_o = \frac{V_o}{V_p}$$

$$V_o = (N - N_p) B_o$$

$$V_p = V_{pi} (1 - c_f \ \Delta' p)$$

$$S_o = \frac{(N - N_p) B_o}{V_{pi} (1 - c_f \Delta' p)} \qquad (A)$$

N y V_{pi} pueden calcularse durante la etapa de bajosaturación:
La ecuación de balance de materia de p_i a p_b es:

$$N \ B_{oi} \ c_e \ \Delta' p = N_{pb} \ B_{ob}$$

De donde:

$$N = \frac{N_{pb} \ B_{ob}}{B_{oi} \ c_e \ \Delta' p} \qquad (B)$$

B_{ob} se puede obtener de las compresibilidades:

$$c_e = \frac{S_o\ c_o + S_v\ c_v + c_f}{S_o}$$

$$c_o = \frac{S_o\ c_e - S_v\ c_v - c_f}{S_o}$$

$$S_o = 1 - S_v = 1 - 0.20 = 0.80$$

$$c_o = \frac{0.80(3.7213*10^{-4}) - 0.2(2.8169*10^{-6}*14.22) - 9*10^{-5}}{0.80}$$

$$c_o = 2.496*10^{-4}(Kg/cm^2)^{-1}$$

Por otro lado:

$$c_o = \frac{2(B_{ob} - B_{oi})}{(p_i - p_b)(B_{ob} + B_{oi})} * B_{oi}$$

De donde:

$$B_{ob} = \frac{2 + (p_i - p_b)\ c_o}{2 - (p_i - p_b)\ c_o} * B_{oi}$$

Sustituyendo:

$$B_{ob} = \frac{2 + (250 - 200) * 2.496*10^{-4}}{2 - (250 - 200) * 2.496*10^{-4}} * 1.25$$

$$B_{ob} = 1.266$$

Sustituyendo en 8:

$$N = \frac{1*10^{6} * 1.266}{1.25 * 3.7213*10^{-4} * (250 - 200)}$$

$$N = 54.4*10^{6}\ m^{3}$$

Además:

$$V_{pi} = \frac{N\ B_{oi}}{1 - S_{wi}}$$

$$V_{pi} = \frac{54.4*10^6 * 1.25}{1 - 0.20} = 85*10^6\ m^3$$

Sustituyendo en A:

$$S_o = \frac{(54.4 - 3)*10^6 * 1.20}{85*10^6(1 - 9*10^{-5}(250 - 150))}$$

$$S_o = 0.7322 \quad a\ 150\ Kg/cm^2$$

IV.3.4 Se tiene un yacimiento saturado que originalmente fué bajosaturado. Por alguna razón se perdió la información, contando únicamente con la siguiente:

$p(Kg/cm^2)$	B_o	B_g	R_s	$N_p(10^6\ m^3)$	$G_p(10^6\ m^3)$
p_i = 360	1.30		120		
p_b = 220	1.36				
120	1.24	0.0042	80	6.5	1.56

Por otro lado, se sabe que no hay entrada de agua y que no hay segregación gravitacional, el mecanismo de desplazamiento es por empuje de gas disuelto liberado.

Determine el volumen de aceite existente en el yacimiento a la presión de saturación.

Solución:

Aplicando la ecuación de balance de materia a la etapa de bajosaturación:

En este caso como no se cuenta con datos petrofísicos, se puede hacer la consideración de que es un yacimiento volumétrico:

$$N(B_{ob} - B_{oi}) = N_p\ B_o$$

De donde:

$$\frac{N_p}{N} = Recbs = \frac{B_{ob} - B_{oi}}{B_{ob}}$$

$$Recbs = \frac{1.36 - 1.30}{1.36} = 0.0441$$

Ahora, aplicando la ecuación de balance de materia a la etapa de saturación: (Se considera que la producción inicia a p_b)

$$N(B_t - B_{ti}) = N_p(B_o + B_g(R_p - R_s))$$

de donde:

$$\frac{N_p}{N} = Recs = \frac{(B_t - B_{ti})}{B_o + B_g(R_p - R_s)}$$

$$B_t = B_o + B_g\ (R_{si} - R_s)$$

$$B_t = 1.24 + 0.0042(120 - 80) = 1.408$$

$$B_{ti} = B_{ob} = 1.36$$

$$R_p = G_p\ /\ N_p = 1560*10^6\ /\ 6.5*10^6 = 240$$

$$Recs = \frac{1.408 - 1.36}{1.24 + 0.0042(240 - 80)}$$

$$Recs = 0.0251$$

Calculando la recuperación total:

$$Rec = Recbs + (1 - Recbs)Recs$$

$$Rec = 0.0441 + (1 - 0.0441) * 0.0251$$

$$rec = 0.06809$$

Por otro lado:

$$Rec = \frac{N_{ptotal}}{N}$$

$$N = \frac{N_{ptotal}}{Rec} = \frac{6.5*10^6}{0.06809} = 95.46*10^6\ m^3$$

Como sabemos que en la etapa de bajosaturación la recuperación fué de 0.0441:

$$N_b = N - N_{pbs} = N\ (1 - Recbs)$$

$$N_b = 95.46*10^6(1 - 0.0441)$$

$N_b = 91.25*10^6 m^3$ o @ c.s. es el volumen de aceite remanente a la presión de burbujeo.

IV.3.5 Se tiene un yacimiento volumétrico, del cual sólo se tiene la siguiente información:

$P(Kg/cm^2)$	B_o	B_g	$N_p(m^3)$	$G_p(10^6\ m^3)$
220				
150	1.7	0.001	146 000	21.9
130	1.6	0.002		

$S_{wi} = 0.20$; $c_f = 4.3*10^{-3}(Kg/cm^2)^{-1}$; $c_o = 168.067*10^{-5}$ $(Kg/cm^2)^{-1}$; $c_w = 97.304*10^{-5}$ $(Kg/cm^2)^{-1}$

A partir de p_b se explota el yacimiento con gastos constantes de 200 m^3/d de aceite y 22 500 m^3/d de gas. A 130 Kg/cm^2 $S_g < S_{gc}$.

Determine:

a) La recuperación total a 130 Kg/cm^2.

b) S_o cuando $p = 130$ Kg/cm^2.

Solución:

Se tomará $p_b = 150$ Kg/cm^2 por presentar el B_o más alto.

a) La recuperación total se puede calcular con:

$$Rec = Recbs + Recs(1 - Recbs)$$

En la etapa de bajosaturación:

$$Recbs = \frac{B_{ob} - B_{oi}}{B_{ob}}$$

El B_{oi} se puede obtener de la compresibilidad del aceite:

$$c_o = \frac{2(B_{ob} - B_{oi})}{(p_i - p_b)(B_{ob} + B_{oi})}$$

De donde:

$$B_{oi} = \frac{2 - (p_i - p_b)\ c_o}{2 + (p_i - p_b)\ c_o} B_o$$

$$B_{oi} = \frac{2 - (250 - 150)*168.067*10^{-5}}{2 + (250 - 150)*168.067*10^{-5}} * 1.7$$

$$B_{oi} = 1.51$$

Entonces:

$$Recbs = \frac{1.7 - 1.51}{1.7}$$

$$Recbs = 0.11177$$

Durante la etapa de saturación (de 150 a 130 Kg/cm^2):

$$Recs = \frac{B_t - B_{tb}}{B_o + B_g(R_p - R_s)}$$

$$B_t = B_o + B_g\ (R_{si} - R_s)$$

$$B_{tb} = B_{ob} = 1.7$$

Como en la bajosaturación R_{si} es constante:

$$R_{si} = \frac{G_{pbs}}{N_{pbs}} = \frac{21.9*10^6}{146\ 000} = 150$$

Por otro lado, por ser $S_g < S_{gc}$:

$$R_p = \frac{R_{si} + R_s}{2} = \bar{R}$$

$$\bar{R} = \frac{q_g}{q_o} = \frac{22\ 500}{200} = 112.5$$

Entonces:

$$R_s = 2\ R - R_{sb} = 2 * 112.5 - 150$$

$$R_s = 75$$

$$B_t = 1.6 + 0.002(150 - 75)$$

$$B_t = 1.75$$

Ahora:

$$Recs = \frac{1.75 - 1.7}{1.6 + 0.002(112.5 - 75)}$$

$$Recs = 0.02985$$

Finalmente:

$$Rec = 0.11177 + 0.02985(1 - 0.11177)$$

$$Rec = 0.13828$$

$$Rec = 13.828\ \%$$

b) En la etapa de saturación:

$$S_o = \frac{(N - N_p)\ B_o}{V_p}$$

$$V_p = \frac{N\ B_{oi}}{1 - S_w}$$

Sustituyendo en la ecuación anterior:

$$S_o = \frac{(1 - Recs)\ B_o\ (1 - S_{wi})}{B_{oi}}$$

$$S_o = \frac{(1 - 0.02985) * 1.6 * (1 - 0.20)}{1.7}$$

$S_o = 0.73$

$S_o = 73\ \%$ a 130 Kg/cm^2

IV.3.6 Se tiene la siguiente historia de un yacimiento:

$p(Kg/cm^2)$	B_o	B_g	R_s
280	1.30		140
200	1.40	0.0008	
180	1.39	0.0012	120
160	1.38	0.0018	95
140	1.37	0.0028	70

$S_{wi} = 20\%$; $\phi_i = 27\%$; $c_w = 9.6*10^{-5}(Kg/cm^2)^{-1}$; $c_f = 4*10^{-5}(Kg/cm^2)^{-1}$.

El volumen original de aceite es de $780*10^6 m^3$ @ c.y. y no hay entrada de agua. A $p = 140\ Kg/cm^2$ la $S_g < S_{gc}$.

Determine:

a) La N_p para cada nivel de presión.

b) La S_o para cada nivel de presión.

c) La recuperación total a 140 Kg/cm^2.

Solución:

Analizando B_o se observa que inicialmente se encuentra en la etapa de bajosaturacion y posteriormente pasa a la etapa de saturación:

$p_b = 200\ Kg/cm^2$ por presentar el B_o máximo.

a) Analizando la bajosaturación:

$$N_p = N\, B_{oi}\, c_e\, \Delta' p \;/\; B_o$$

$$c_e = \frac{S_o\, c_o + S_w\, c_w + c_f}{S_o}$$

$$c_o = \frac{2(B_o - B_{oi})}{(p_i - p)(B_o + B_{oi})}$$

$$c_o = \frac{2(1.4 - 1.3)}{(280 - 200)(1.4 + 1.3)}$$

$$c_o = 9.26 * 10^{-4} (Kg/cm^2)^{-1}$$

$$c_e = \frac{0.80(9.26 * 10^{-4}) + 0.20(9.6 * 10^{-5}) + 4 * 10^{-4}}{0.80}$$

$$c_e = 1 * 10^{-3}\ (Kg/cm^2)^{-1}$$

$$N_p = \frac{780 * 10^6 * 10^{-3} * (280 - 200)}{1.4}$$

$$N_p = 44.57 * 10^6\ m^3$$

$$Recbs = N_p \;/\; N$$

$$N = V_{oi} \;/\; B_{oi} = 780 * 10^6 / 1.3 = 600 * 10^6\ m^3$$

$$Recbs = 44.57 * 10^6 / 600 * 10^6 = 0.0743$$

De aquí en adelante se analizará la etapa de saturación como si la explotación del yacimiento comenzara a p_b = 200 Kg/cm^2.

$$N_b = N - N_p = (600 - 44.57) * 10^6$$
$$N_b = 555.43 * 10^6\ m^3$$

Como $S_g < S_{gc}$ durante toda la historia de producción:

$$R_p = \frac{R_{s1} + R_{s2}}{2}$$

De la ecuación de balance de materia para yacimientos saturados:

$$N_p = \frac{N_b(B_t - B_{ti})}{B_o + B_g(R_p - R_s)}$$

$$B_t = B_o + B_g\ (R_{si} - R_s)$$

$$B_{ti} = B_{ob} = 1.40 \quad ; \quad R_{si} = 140$$

Para 180 Kg/cm^2:

$$R_p = \frac{140 - 130}{2} = 130$$

$$B_t = 1.39 + 0.0012(140 - 120) = 1.414$$

$$N_p = \frac{555.43*10^6(1.414 - 1.40)}{1.39 + 0.0012(130 - 120)}$$

$$N_p = 65.62*10^6\ m^3$$

A 160 Kg/cm^2:

$$R_p = (120 + 95)/2 = 107.5$$

$$B_t = 1.38 + 0.0018(140 - 95) = 1.461$$

$$N_p = \frac{555.43*10^6\ (1.461 - 1.40)}{1.38 + 0.0018(107.5 - 95)}$$

$$N_p = 24.16*10^6\ m^3$$

A 140 Kg/cm^2

$$R_p = (95 + 70)/2 = 82.5$$

$$B_t = 1.37 + 0.0028(140 - 70) = 1.566$$

$$N_p = \frac{555.43*10^6\ (1.566 - 1.40)}{1.37 + 0.0028(82.5 - 70)}$$

$$N_p = 65.62*10^6\ m^3$$

Ahora, integrando las dos etapas (sumando la N_p de bajosaturación):

$p(Kg/cm^2)$	$N_p(10^6\ m^3)$
280	0.00
200	44.57
180	50.12
160	68.73
140	110.19

b) A 200 Kg/cm^2 (etapa de bajosaturación):

$$S_o = 1 - S_v$$

Se puede considerar $S_v = S_{vi}$ ya que $W_p = W_p = 0.0$

$$S_o = 1 - 0.20 = 0.80$$

En la etapa de saturación:

$$S_o = \frac{(N_b - N_p)\ B_o}{\dfrac{N_b\ B_{ob}}{1 - S_{vb}}}$$

$$\frac{N_b\ B_{ob}}{1 - S_{vb}} = \frac{555.43*10^6\ 1.4}{1 - 0.2} = 972*10^6$$

$$S_o = \frac{(N_b - N_p)B_o}{972*10^6}$$

A 180 Kg/cm^2

$$S_o = \frac{(555.43*10^6 - 5.546*10^6)1.39}{972*10^6}$$

$$S_o = 0.7863$$

A 160 Kg/cm^2:

$$S_o = \frac{(555.43*10^6 - 24.16*10^6)1.38}{972*10^6}$$

$$S_o = 0.7543$$

A 140 Kg/cm^2:

$$S_o = \frac{(555.43810^6 - 65.62*10^6)1.37}{972*10^6}$$

$$S_o = 0.6904$$

Resumiendo:

$p(Kg/cm^2)$	S_o
280	0.80
200	0.80
180	0.78
160	0.75
140	0.69

c)

$$Rec = N_p \;/\; N$$

$$Rec = 110.19 * 10^6 \;/\; 600 * 10^6$$

$$Rec = 0.1836$$

IV.3.7 Se tiene una recuperación de 0.12 de p_i a p_b ; y una recuperación de 0.20 de p_b a p_{ab} ¿Cuál es la recuperación total?

Solución:

Suponiendo $N = 1\ m^3$:

$$Rec_{pi-pb} = 0.12 = \frac{N_p}{N}$$

De donde: $$N_{p_{pi-pb}} = 0.12\ m^3$$

$$Rec_{pb-pab} = 0.20 = \frac{\Delta N_{p_{pb-pab}}}{N_b}$$

$$N_b = 1.0 - 0.12 = 0.88\ m^3$$

$$\Delta N_{p_{pb-pab}} = 0.20 * 0.88 = 0.176\ m^3$$

Entonces:

$$Rec_{pi-pab} = \frac{N_{p_{pi-pb}} + \Delta N_{p_{pb-pab}}}{N}$$

$$Rec_{pi-pab} = \frac{0.12 + 0.176}{1.0} = 0.296$$

$$Rec = 29.6\%$$

O bien:

$$Rec = Recbs + Recs(1 - Recbs)$$

$$Rec = 0.12 + 0.20(1 - 0.12)$$

$$Rec = 0.296$$

$$Rec = 29.6\%$$

IV.3.8 Se tiene un yacimiento de aceite cuya área es de $2.096*10^{6} m^{2}$ y un espesor de 20 m. La temperatura del yacimiento es de 100°C, s_{wi} = 12.5%, ϕ = 20% y la salinidad del agua congénita es de 60 000 ppm. El yacimiento tiene asociado un acuífero, pero a la fecha no se ha manifestado.

Determine:

a) El volumen producido acumulado de aceite a p_b.

b) El volumen producido acumulado de gas a p_b.

c) El volumen poroso a p_b.

d) La porosidad a p_b.

e) El volumen original de aceite a p_b.

f) El factor de recuperación a p_b.

Suponga que a 180 Kg/cm^2 $S_g < S_{gc}$ y tome decrementos de 10 Kg/cm^2 en la etapa de saturación:

g) El volumen producido acumulado de aceite a 180 Kg/cm^2.

h) El volumen producido acumulado de gas a 180 Kg/cm^2.

i) El volumen producido acumulado de gas disuelto a 180 Kg/cm^2

j) La saturación de aceite a 180 Kg/cm^2.

k) El factor de recuperación total a 180 Kg/cm^2.

Considere los datos PVT de la figura IV.1

Solución:

a) Aplicando la ecuación de balance de materia a la etapa de bajosaturación:

FIGURA IV.1.A

FACTOR DE VOLUMEN DEL ACEITE

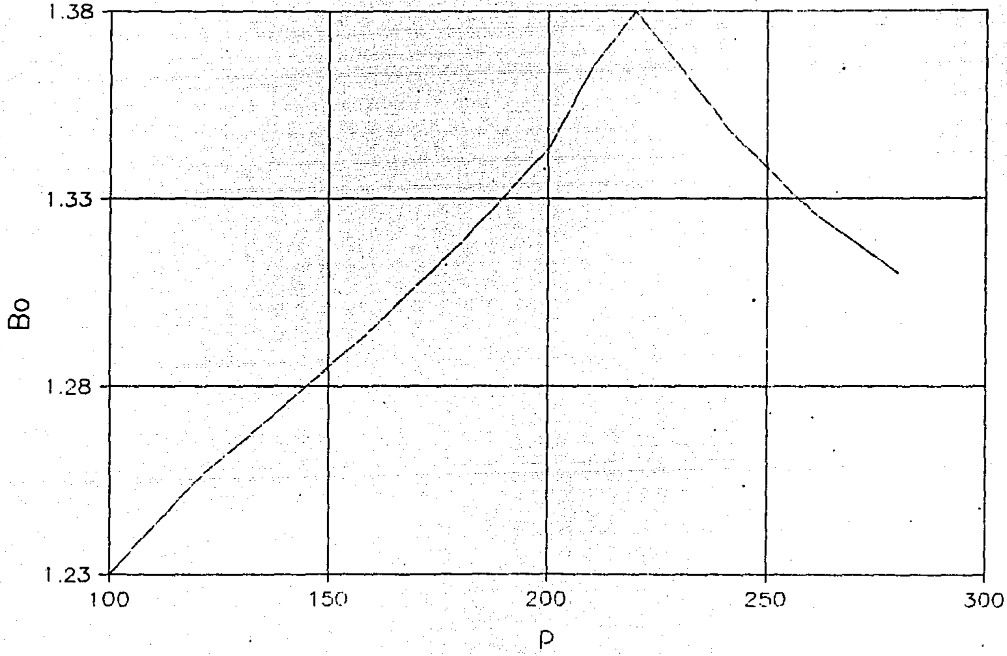


FIGURA IV.1.B

RELACION GAS DISUELTO-ACEITE

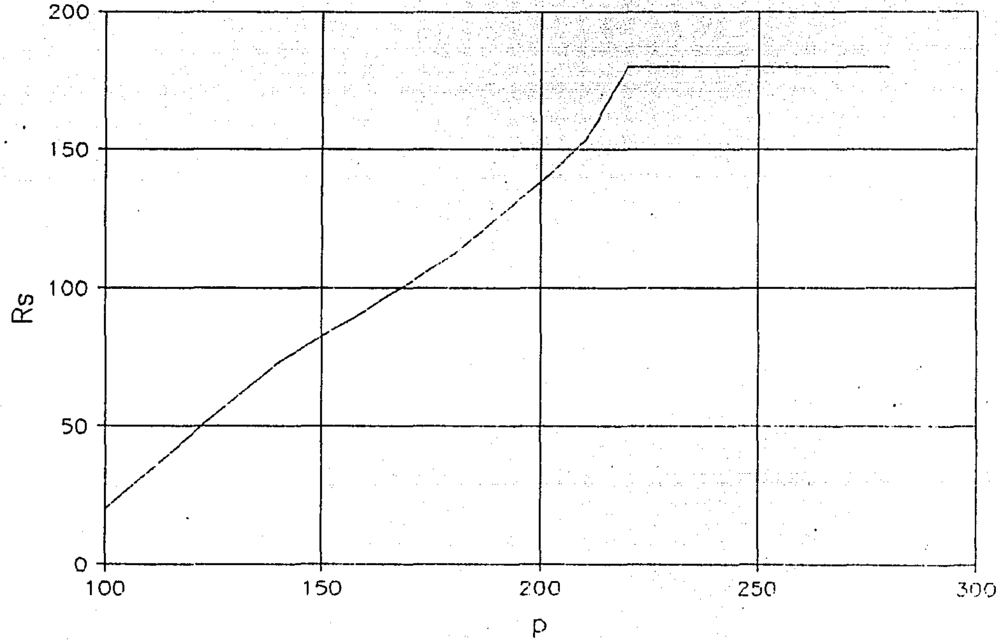
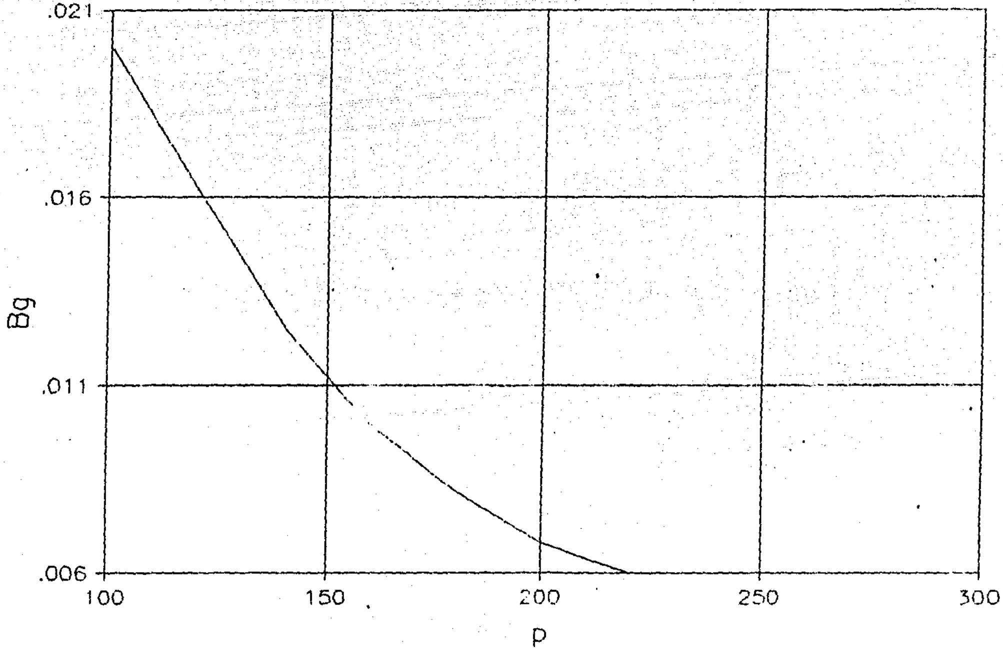


FIGURA IV.1.C

FACTOR DE VOLUMEN DEL GAS



$$N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta' p = N_p\ B_o$$

$$N_p = N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta' p\ /\ B_o$$

$$N\ B_{oi} = V_{oi} = A\ H\ \phi\ (1 - S_{wi})$$

$$N\ B_{oi} = 2.096 * 10^{8} * 20 * 0.20 * (1 - 0.125)$$

$$N\ B_{oi} = 733.6 * 10^{6}\ m^{3}\ @\ c.y.$$

Por otro lado:

$$c_e = \frac{S_o\ c_o + S_w\ c_w + c_f}{S_o}$$

$$c_o = \frac{2(B_{ob} - B_{oi})}{(p_i - p_b)(B_{ob} + B_{oi})}$$

De la figura IV.1:

$$p_i = 280\ Kg/cm^{2} \qquad B_{oi} = 1.31$$

$$p_b = 220\ Kg/cm^{2} \qquad B_{ob} = 1.38$$

$$c_o = \frac{2(1.38 - 1.31)}{(280 - 220)(1.38 + 1.31)}$$

$$c_o = 8.674 * 10^{-4} (Kg/cm^{2})^{-1}$$

Del apéndice A:

$$R_{swp} = 3.0$$

$$R_{sw}/R_{swp} = 0.76$$

$$R_{sw} = 3.0 * 0.76 = 2.28$$

$$c_{wp} = 45 * 10^{-6}$$

$$c_w/c_{wp} = 1.12$$

$$c_w = 1.12 * 45 * 10^{-6} = 4.48 * 10^{-6} (Kg/cm^{2})^{-1}$$

Con ϕ = 20%: $c_f = 53 * 10^{-6} (Kg/cm^{2})^{-1}$

$$c_e = \frac{0.875(8.674 * 10^{-4} + 0.125(4.48 * 10^{-6} + 53 * 10^{-6}}{0.875}$$

$$c_e = 9.28 * 10^{-4}$$

Finalmente:

$$N_p = \frac{733.6*10^6 * 9.28*10^{-4} * (280 - 220)}{1.38}$$

$$N_p = 29.6*10^6 \ m^3 \text{ o @ c.s.}$$

b) Durante la etapa de bajosaturación $R_s = R_{si}$

$$G_p = N_p \ R_s$$

De la figura IV.1 : $R_{si} = 180$

$$G_p = 29.6*10^6 * 180$$

$$G_p = 5\ 328*10^6 \ m^3 \text{ g @ c.s.}$$

c) El volumen poroso a p_b:

$$V_p = v_{pi} \ (1 - c_f \ \Delta' p)$$

$$V_{pi} = A \ H \ \phi = 2.096*10^8 * 20 * 0.20$$

$$V_{pi} = 838.4*10^6 \ m^3$$

$$V_p = 838.4*10^6 \ (1 - 53*10^{-6}(280 - 120))$$

$$V_p = 835.7*10^6 \ m^3$$

d) La porosidad a p_b:

$$\phi = \phi_i \ (1 - c_f \ \Delta' p)$$

$$\phi = 0.20 \ (1 - 53*10^{-6}(280 - 220))$$

$$\phi = 0.1994$$

e) El volumen original de aceite:

$$N = V_{oi} \ / \ B_{oi}$$

$$N = 733.6*10^6 \ / \ 1.31 = 560*10^6 \ m^3 \text{ o @ c.s.}$$

f) La recuperación de p_i a p_b :

$$Rec = N_p \ / \ N$$

$$Rec = 29.6*10^6 \ / \ 560*10^6$$

$$Rec = 0.0528$$

Para la resolución de los siguientes incisos se considera que la producción inicia a p_b.

$$N_b = N - N_p = (560 - 29.6)*10^6$$

$$N_b = 530.4*10^6 \ m^3$$

g) La producción acumulada de aceite:

$$\Delta N_p = \frac{N_b(B_t - B_{ti})}{B_o + B_g(R_p - R_s)}$$

De la figura IV.1

$$R_{si} = 180 \qquad B_{ob} = 1.38$$

A 180 Kg/cm^2: $R_s = 112$; $B_o = 1.318$; $B_g = 0.0081$

Con lo cual:

$$B_t = B_o + B_g\ (R_{si} - R_s)$$
$$B_t = 1.318 + 0.0081(180 - 112) = 1.8688$$
$$B_{ti} = B_{ob} = 1.38$$

Como $S_g < S_{gc}$:

$$R_p = (R_{si} + R_s)/2$$
$$R_p = (180 + 112)/2 = 146$$

Entonces:

$$\Delta N_p = \frac{530.4*10^6(1.8688 - 1.38)}{1.318 + 0.0081(146 - 112)}$$

$$\Delta N_p = 162.71*10^6\ m^3$$

Finalmente obtenemos N_p sumando la producción de la etapa de bajosaturación:

$$N_p = 29.6*10^6 + 162.71*10^6$$
$$N_p = 192.3*10^6\ m^3$$

h) La producción acumulada de gas:

$$\Delta G_p = \Delta N_p\ R_p$$
$$\Delta G_p = 162.7*10^6 * 146 = 23\ 754*10^6\ m^3$$

Finalmente se obtiene la G_p sumando la G_p de bajosaturación:

$$G_p = 5\ 328*10^6 + 23\ 754.2*10^6$$

$$G_p = 29\ 082*10^6\ m^3{}_g$$

i) El volumen de gas disuelto producido :

Como la saturación de gas no ha alcanzado el valor de la saturación crítica, el gas libre no fluye hacia los pozos, por lo cual todo el gas producido es gas disuelto.

$$G_{pd} = 29\ 082*10^6\ m^3$$

j) La saturación de aceite a 180 Kg/cm^2

$$S_o = \frac{(N_b - \Delta N_p)B_o}{V_{pb}}$$

V_{pb} ya se calculó en el inciso c:

$$S_o = \frac{(530.4*10^6 - 162.7*10^6)1.318}{835.7*10^6}$$

$$S_o = 0.5799$$

k) La recuperación total a 180 Kg/cm^2

$$Rec = N_p / N$$
$$Rec = 192.3*10^6 / 560*10^6$$
$$Rec = 0.3434$$

IV.3.9 De un yacimiento de aceite que originalmente fué bajosaturado y que actualmente produce por el mecanismo de desplazamiento de gas disuelto liberado y sin entrada de agua, sólo se conoce la siguiente información:

	p (Kg/cm^2)	B_o	B_g	B_t	N_p (m^3)
p_i =	250	1.30			
	190	1.45	0.006		
	160	1.25	0.008	1.73	333 620

S_{wi} = 25 %

$c_f = 3.25*10^{-5}$ (Kg/cm^2)$^{-1}$

$c_w = 4.36*10^{-4}$ (Kg/cm^2)$^{-1}$

A 160 kg/cm^2 $S_g < S_{gc}$. Determine:

a) El volumen de aceite contenido originalmente en el yacimiento.

b) El volumen de aceite producido a la p_b .

Solución:

Se considera p_b = 190 Kg/cm^2 por presentar el máximo B_o.

a) Analizando la etapa de bajosaturación:

$$Rec_{bs} = \frac{N_p}{N}$$

$$Rec_{bs} = \frac{B_{oi}\ c_e\ \Delta' p}{B_o}$$

$$c_e = \frac{S_o\ c_o + S_w\ c_w + c_f}{S_o}$$

Como no hay W_p ni W_e , S_w se puede considerar constante.

$$S_o = 1 - S_w = 1 - 0.25 = 0.75$$

$$c_o = \frac{2\ (B_o - B_{oi})}{(p_i - p)(B_o + B_{oi})}$$

$$c_o = \frac{2\ (1.45 - 1.30)}{(250 - 190)(1.45 + 1.30)}$$

$$c_o = 1.82*10^{-3}\ (Kg/cm^2)^{-1}$$

$$C_e = \frac{0.75(1.82*10^{-3}) + 0.25(4.36*10^{-4}) + 3.25*10^{-5}}{0.75}$$

$$c_e = 2*10^{-3}\ (Kg/cm^2)^{-1}$$

$$Rec_{bs} = \frac{1.30 * 2*10^{-3} * (250 - 190)}{1.45}$$

$$Rec_{bs} = 0.1076$$

Analizando ahora la etapa de saturación:

$$N(B_t - B_{ti}) = N_p(B_o + B_g(R_p - R_s))$$

$$Recs = \frac{N_p}{N} = \frac{B_t - B_{ti}}{B_o + B_g(R_p - R_s)}$$

Como todavía no ha habido flujo de gas ($S_g < S_{gc}$) y como no hay datos se puede considerar que $R_p \cong R_s = R_{si}$. entonces:

$$Recs = (B_t - B_{ti})/B_o$$

$$Recs = (1.73 - 1.45)/1.25$$

$$Recs = 0.224$$

La recuperación total es:

$$Rec = Recbs + Recs(1 - Recbs)$$

$$ec = 0.1076 + 0.224(1 - 0.1076)$$

$Rec = 0.3075 = N_{p1\sigma o} / N$

$$N = \frac{N_{p1\sigma o}}{0.3075} = \frac{333\ 620}{0.3075} = 1.085 * 10^{6}\ m^{3}$$

$V_{oi} = N\ B_{oi} = 1.085 * 10^{6} * 1.3$

$V_{oi} = 1.41 * 10^{6}\ m^{3}$ @ c.y.

b)

$Recbs = N_{pbs} / N$

$N_{pbs} = Recbs\ N$

$N_{pbs} = 0.1076 * 1.985 * 10^{6}$

$N_{pbs} = 116\ 746\ m^{3}$

CAPITULO V PREDICCION DEL COMPORTAMIENTO DE YACIMIENTOS

V.1 Introducción.

Como se señaló anteriormente, el objetivo de la ecuación de balance de materia es la predición del comportamiento del yacimiento y su confiabilidad se confirma con el hecho de poder reproducir a través de ella la historia de producción conocida.

Una vez que la ecuación de balance de materia ha sido ajustada para un yacimiento, será válida mientras no actúe otro mecanismo de empuje que no haya sido considerado, como pueden ser: la entrada de agua, la expansión del gas disuelto liberado , un casquete de gas o algún empuje artificial.

Para obtener una buena predicción es imprescindible contar con datos suficientes y de buena calidad que sean representativos del yacimiento y evaluar qué mecanismos de empuje son los que se encuentran presentes para darle prioridad al que sea más efectivo.

Aunque en este trabajo se trata muy poco, debe tenerse presente que cuando existe un frente de avance de agua o gas, la predicción incluye la determinación de las posiciones futuras del contacto entre los fluidos para conocer qué pozos deben cerrarse por invasión del fluido desplazante y además evitar el fenómeno de conificación.

Debe tenerse presente también que el objetivo de la ingeniería es la optimización y por lo tanto, debe tomarse en cuenta el rendimiento económico de las técnicas de explotación posibles. Por esta razón, la predicción debe presentarse también en función del tiempo; para hacerlo se requiere conocer la capacidad productiva de cada pozo de acuerdo con las instalaciones con que cuenta, la declinación de su producción y el programa de períodos de cierre por intervenciones (pruebas, reparaciones, etc).

En este capítulo se presentan algunos ejemplos relativos a la predicción del comportamiento de yacimientos y la determinación de la entrada de agua.

V.2 Deducciones.

V.2.1 A partir de la ecuación de Darcy obtenga la expresión para calcular el índice de productividad:

a) Para flujo lineal.

b) Para flujo radial.

Solución:

El índice de productividad (J) se define como:

$$J = \frac{q_o @ \text{ c.s.}}{P_{ws} - P_{wf}}$$

Por otro lado, la ecuación de Darcy es:

$$v = -\frac{k}{\mu}\frac{\Delta p}{\Delta L}$$

El gasto se obtiene como:

$$q = v\ A$$

De la ecuación de Darcy:

$$q = -\frac{k}{\mu}\frac{\Delta p}{\Delta L}A$$

En el yacimiento $\Delta p = p_{ws} - p_{wf}$; para un gasto de aceite medido a condiciones estándar:

$$q_o = -\frac{k_o}{\mu_o B_o}\frac{(p_{ws} - p_{wf})}{\Delta L}A$$

Haciendo $A / \Delta L = C$

$$q_o = -C\frac{k_o}{\mu_o}\frac{(p_{ws} - p_{wf})}{B_o}$$

Sustituyendo este gasto en el índice de productividad:

$$J = \frac{-Ckk_{ro}(p_{ws}-p_{wf})}{\mu_o\ B_o\ (p_{ws} - p_{wf})}$$

$$J = -C\frac{k\ k_{ro}}{\mu_o\ B_o}$$

b) Para flujo radial:

La ecuación de Darcy es:

$$v = -\frac{k}{\mu}\frac{dp}{dL}$$

Haciendo dL = dr (r = radio):

$$v = -\frac{k}{\mu}\frac{dp}{dr}$$

En la ecuación del gasto q = v A:

$$q_o = -\frac{k\ kro}{\mu o Bo}\frac{dp}{dr} A$$

Donde A = 2 Π r h (cilindro)

$$q_o = -\frac{k\ kro}{\mu o Bo}\left[2\ \Pi\ h\ r\ \frac{dp}{dr}\right]$$

Que se puede escribir como:

$$q_o \frac{dr}{r} = \frac{2\ \Pi\ k\ kro}{\mu o\ Bo}\ dp$$

Donde :

$$q_o \int_{rw}^{re} \frac{dr}{r} = \frac{2\ \Pi\ k\ kro\ h}{\mu o\ Bo}\int_{pwf}^{pws} dp$$

Resolviendo:

$$q_o\ (Ln\ re - Ln\ rw) = \frac{2\ \Pi\ k\ kro\ h}{\mu o\ Bo}\ (pws - pwf)$$

$$q_o\ Ln\ (re/rw) = \frac{2\ \Pi\ k\ kro\ h}{\mu o\ Bo}\ (pws - pwf)$$

Despejando:

$$q_o = \frac{2\,\Pi\,k\,k_{ro}\,h\,(p_{ws} - p_{wf})}{\mu_o\,B_o\,Ln(r_e/r_w)}$$

Sustituyendo en el índice de productividad:

$$J = \frac{2\,\Pi\,k\,k_{ro}\,h\,(p_{ws} - p_{wf})}{\mu_o\,B_o\,Ln(r_e/r_w)\,(p_{ws} - p_{wf})}$$

Eliminando términos y haciendo $2\Pi = C$:

$$J = C\,\frac{k\,k_{ro}\,h}{\mu_o\,B_o\,Ln(r_e/r_w)}$$

V.2.2 A partir de la ecuación de Darcy para flujo radial demuestre que:

$$R = \frac{k_{rg}\,\mu_o\,B_o}{k_{ro}\,\mu_g\,B_g} + R_s$$

Solución:

Por definición:

$$R = \frac{q_g}{q_o}$$

Donde el gas obtenido (q_g) es la suma del gas libre que sale del yacimiento más el gas que sale disuelto en el aceite:

$$q_g = q_{gl} + q_{gd}$$

Sustituyendo en R:

$$R = \frac{q_{gl} + q_{gd}}{q_o}$$

$$R = \frac{q_{gl} + q_o\,R_s}{q_o}$$

Que se puede escrbir como:

$$R = \frac{q_{gl}}{q_o} + R_s \qquad \textbf{(A)}$$

De la ecuación de Darcy:

$$q = C \frac{k\ k_{ro}\ h\ (p_{ws} - p_{wf})}{\mu_o\ B_o\ Ln(r_e/r_w)}$$

Aplicándola al gasto de gas libre y al gasto de aceite:

$$q_{gl} = C \frac{k\ k_{rg}\ h\ (p_{ws} - p_{wf})}{\mu_g\ B_g\ Ln(r_e/r_w)}$$

$$q_o = C \frac{k\ k_{ro}\ h\ (p_{ws} - p_{wf})}{\mu_o\ B_o\ Ln(r_e/r_w)}$$

Sustituyendo en A:

$$R = \frac{C \dfrac{k\ k_{ro}\ h\ (p_{ws} - p_{wf})}{\mu_g\ B_g\ Ln(r_e/r_w)}}{C \dfrac{k\ k_{ro}\ h\ (p_{ws} - p_{wf})}{\mu_o\ B_o\ Ln(r_e/r_w)}} + R_s$$

Eliminando términos:

$$R = \frac{\dfrac{k_{rg}}{\mu_g\ B_g}}{\dfrac{k_{ro}}{\mu_o\ B_o}} + R_s$$

Que se puede escribir como:

$$R = \frac{k_{rg}\ \mu_o\ B_o}{k_{ro}\ \mu_g\ B_g} + R_s$$

Que es la expresión buscada.

V.2.3 a) Deduzca la ecuación de saturación de aceite en yacimientos con empuje de gas disuelto liberado mencionando las suposiciones que se hagan.

b) A partir de la ecuación encontrada, deduzca la ecuación de la recuperación de aceite.

Solución:

La saturación de aceite se define como :

$$S_o = \frac{V_o}{V_p}$$

$V_o = (N - N_p)\ B_o$ es el aceite que queda en el yacimiento.

Considerando que el volumen poroso no cambia durante la explotación:

$$V_p = V_{pi} = \frac{V_{oi}}{S_{oi}}$$

$$V_p = \frac{N\ B_{oi}}{1 - S_{wi}}$$

Entonces:

$$S_o = \frac{(N - N_p)\ B_o}{\dfrac{N\ B_{oi}}{1 - S_{wi}}}$$

Que se puede escribir como:

$$S_o = \frac{(N - N_p)\ B_o\ (1 - S_{wi})}{N\ B_{oi}}$$

b) Por definición:

$$Rec = \frac{N_p}{N}$$

La ecuación encontrada anteriormente se puede escribir como:

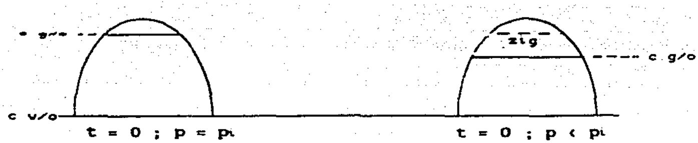
$$S_o = (1 - Rec)(1 - S_{wi})\ B_o/B_{oi}$$

De la cual se puede despejar Rec:

$$1 - Rec = \frac{S_o\ B_{oi}}{(1 - S_{wi})\ B_o}$$

$$Rec = 1 - \frac{S_o\ B_{oi}}{(1 - S_{wi})\ B_o}$$

V.2.4 Deduzca la ecuación de la saturación de aceite para un yacimiento hipotético cuyas condiciones iniciales y después de un cierto período de explotación son las siguientes:



Solución:

La saturación de aceite en la zona de aceite es:

$$S_o = \frac{V_{ozo}}{V_{pzo}}$$

El volumen de aceite en la zona de aceite es el volumen remanente menos el aceite que quedó entrampado en la zona invadida.

$$S_o = \frac{V_{or} - V_{ozig}}{V_{pi} - V_{pzig}}$$

Donde:

$$V_{or} = (N - N_p)\, B_o$$

$$V_{ozig} = \frac{V_{gzig}}{S_{gzig}}\, S_{orzig}$$

Donde V_{gzig} es igual a la expansión del casquete (es el volumen de gas que invade la zona de aceite).

$$V_{gzig} = mNB_{ti}(B_g/B_{gi} - 1)$$

Por lo cual:

$$V_{ozig} = \frac{mNB_{ti}(B_g/B_{gi} - 1)\, S_{orzig}}{S_{gzig}}$$

Por otro lado:

$$V_{pi} = \frac{N\, B_{oi}}{1 - S_{wi}}$$

$$V_{pzig} = \frac{V_{gzig}}{S_{gzig}}$$

$$V_{pzig} = \frac{mNB_{ti}(B_g/B_{gi} - 1)}{S_{gzig}}$$

Finalmente:

$$S_o = \frac{(N-N_p)B_o - mNB_{ti}(B_g/B_{gi}-1)S_{orzig}/S_{gzig}}{\dfrac{N\ B_{oi}}{1 - S_{wi}} - \dfrac{mNB_{ti}(B_g/B_{gi} - 1)}{S_{gzig}}}$$

V.2.5 a) Escriba las consideraciones que se hacen en el método de Tarner para la predicción del comportamiento de yacimientos con empuje de gas disuelto liberado y la secuencia de cálculo indicando las ecuaciones necesarias. b) Haga lo mismo para el método de Muskat.

Solución:

El método de Tarner considera:

- El volumen del yacimiento es constante.
- No existe gas libre inicial.
- Producción despreciable de agua.
- Distribución uniforme de aceite y gas liberado (no hay segregación de fluidos).
- No hay entrada de agua al yacimiento.
- La predicción comienza al alcanzar la presión de burbujeo.
- Para los cálculos se considera $N = 1.0$

La secuencia de cálculo es:

1. Seleccionar $\Delta'p$ y suponer su ΔN_p correspondiente (es fraccional por ser $N = 1.0$).
2. Calcular $N_p = \sum \Delta N_p$
3. Determinar G_p después de ocurrida la Δp con:

$$G_p = \frac{B_t - B_{ti} - N_p(B_t - R_{si}\ B_g)}{B_g}$$

4. Calcular la saturación de aceite:

$$S_o = (1 - N_p)\ B_o\ (1 - S_w)\ /\ B_{oi}$$

5. Determinar k_g/k_o y calcular R:

$$R = R_s + \frac{k_{rg}\ \mu_o\ B_o}{k_{ro}\ \mu_g\ B_g}$$

6. Determinar la R promedio en la Δp:

$$R = (R_1 + R_2)/2$$

7. Determinar ΔG_p:

$$\Delta G_p = \Delta N_p\ \overline{R}$$

8. Obtener G_p:

$$G_p = \sum \Delta G_p$$

9. Comparar el valor obtenido en el paso 8 con el valor obtenido en el paso 3. Si no coinciden suponer otra ΔN_p y empezar de nuevo. cuando se logra la aproximación deseada se pasa a otro período (otra Δp).

b) El método de Muskat supone:

- Yacimiento homogéneo e isotrópico.
- Distribución uniforme de presión.
- No hay segregación gravitacional.
- Composición constante del aceite.

La secuencia de cálculo es la siguiente:

1. Seleccionar una Δp y obtener la pendiente de las curvas de R_s vs p ; B_o vs p y B_g vs p a la presión media del intervalo considerado.
2. determinar X_p, Y_p y Z_p:

$$X_p = \frac{B_g}{B_o}\frac{dR_s}{dp}\ ;\ Y_p = \frac{\mu_o}{\mu_g\ B_g}\frac{dB_o}{dp}\ ;\ Z_p = \frac{1}{B_g}\frac{dB_g}{dp}$$

3. Obtener k_g/k_o con la S_o al principio del período.
4. Calcular ΔS_o con:

$$\frac{\Delta S_o}{\Delta p} = \frac{S_o(X_p + k_g/k_o\ Y_p) - Z_p\ S_g}{1 + \dfrac{k_g\ \mu_o}{k_o\ \mu_g}}$$

5. Calcular la S_o al final del período:

$$S_o = S_{oi} - \sum \Delta S_o$$

6. Calcular la recuperación y R:

$$Rec = 1 - \frac{B_{oi}\ S_o}{S_{oi}\ B_o}$$

$$R = R_s + \frac{k_g\ \mu_o\ B_o}{k_o\ \mu_g\ B_g}$$

7. Continuar con el siguiente intervalo de presión.

V.2.6 a) En el método de Muskat aparece el volumen de gas remanente en el yacimiento @ c.s. (G_r). Indique a qué es igual y b) Obtenga dG_r/dp.

Solución:

a) El gas remanente es la suma del gas disuelto en el aceite y el gas libre:

$$G_r = V_{gd} + V_{gl}$$

Donde:

$$V_{gd} = \frac{V_p\ S_o\ R_s}{B_o}$$

$$V_{gl} = \frac{V_p\ S_g}{B_g}$$

Sustituyendo:

$$G_r = \frac{V_p\ S_o\ R_s}{B_o} + \frac{V_p\ S_g}{B_g}$$

Que se puede escribir como:

$$G_r = V_p \left[\frac{S_o\ R_s}{B_o} + \frac{S_g}{B_g} \right]$$

b) Derivando la expresión obtenida en el inciso (a) con respecto a la presión :

$$\frac{dG_r}{dp} = V_p\ \frac{d(S_oR_s/B_o + S_g/B_g)}{dp}$$

Que se puede escribir como:

$$\frac{dG_r}{dp} = V_p\left[\frac{d}{dp}(S_oR_s/B_o) + \frac{d}{dp}(S_g/B_g)\right]$$

Resolviendo las derivadas:

$$\frac{dG_r}{dp} = V_p\left\{\frac{S_o}{B_o}\frac{dR_s}{dp} + \frac{R_s}{B_o}\frac{dS_o}{dp} + \frac{S_oR_s}{B_o^2}\frac{dB_o}{dp} + \frac{1}{B_g}\frac{dS_g}{dp} + \frac{S_g}{B_g^2}\frac{dB_g}{dp}\right\}$$

V.2.7 Aplicando el principio de superposición, obtenga la expresión de Stanley para el cálculo de la entrada de agua al yacimiento.

Solución:

Para la ecuación de Van Everdingen y Hurst, que es:

$$W_e = B\sum_{o}^{t}\bar{Q}(t)\,\Delta p \qquad \textbf{(A)}$$

Donde $\bar{Q}(t)$es la entrada adimensional; Stanley estableció que:

$$\bar{Q}(t) = (\bar{t})^{\alpha}$$

$\bar{t}$ es el tiempo adimensional y $0.5 \le \alpha \le 0.8$

Sustituyendo en la ecuación A:

$$W_e = C\sum_{o}^{t}(\bar{t})^{\alpha}\,\Delta p$$

El principio de superposición establece que el acuífero responde de manera independiente a cada decremento de presión, cuando se presentan decrementos sucesivos.

Explicando lo anterior de forma numérica:

Suponga que se dan n caídas de presión sucesivas en n períodos de tiempo adimensional.

La primera Δp actúa durante los n períodos.

La segunda Δp actúa durante n - 1 períodos.

La tercera Δp actúa durante $n - 2$ períodos.

.

.

.

La $(n - 1)$ésima Δp actúa durante 2 períodos.

La enésima Δp actúa durante 1 período.

Entonces se puede escribir:

$$W_e = C \left[\Delta p_1 (\bar{t})_n^{\alpha} + \Delta p_2 (\bar{t})_{n-1}^{\alpha} + \Delta p_3 (\bar{t})_{n-2}^{\alpha} + \right.$$

$$\left. \ldots + \Delta p_{n-1} (\bar{t})_2^{\alpha} + \Delta p_n (\bar{t})_1^{\alpha} \right]$$

Lo que se puede representar mediante:

$$W_e = C \sum_{i=1}^{n} \Delta p_i (\bar{t})_{n+1-i}^{\alpha}$$

Que es la ecuación de Stanley para calcular W_e.

V.3 Yacimientos con empuje de gas disuelto liberado.

V.3.1 Aplique el metodo de Tarner para deteminar la N_p de un yacimiento cuyo volumen original de aceite es de $300 \cdot 10^6 m^3$ @ c.s. Hágalo para el siguiente período de explotación:

$p (Kg/cm^2)$	B_o	B_g	R_s	S_o	μ_g/μ_o
240	1.410	0.0081	108.45	0.7491	$1.3333 \cdot 10^{-2}$
230	1.398	0.0088	104.35		1.2610 "

$S_{wi} = 20\%$; $W_e = W_p = 0.0$

La relación k_{rg}/k_{ro} vs S_l se presenta en la figura V.1

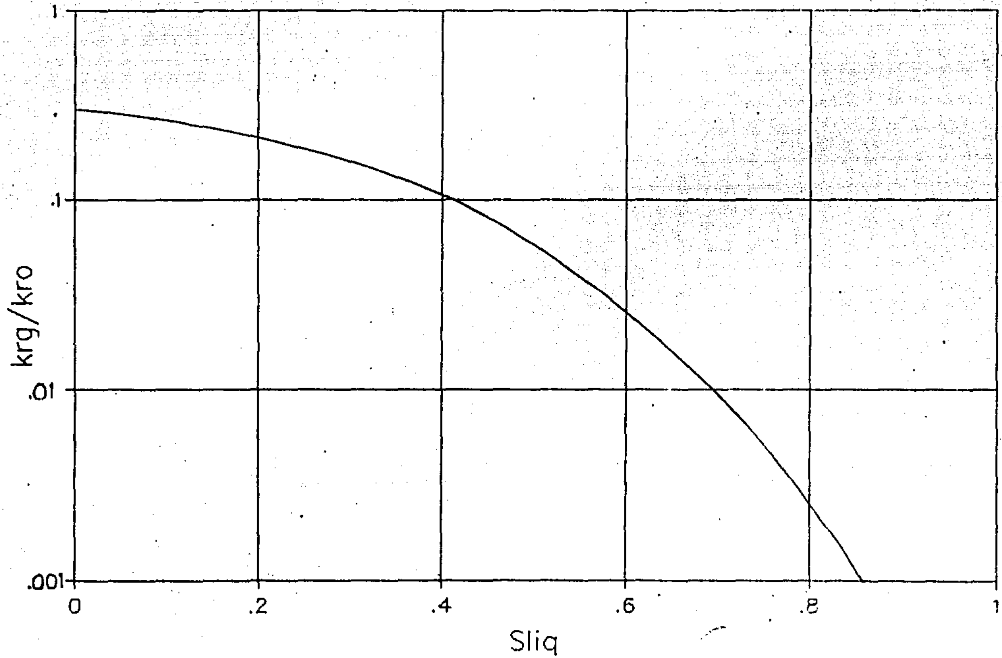
Solución:

En el método de Tarner se usa $N = 1.0$, por lo que la N_p obtenida a través de él es igual a la recuperación.

Las ecuaciones usadas son:

FIGURA V.1

RELACION DE PERMEABILIDADES



$$G_p = \frac{B_t - B_{ti} - N_p(B_t - R_{si}B_g)}{B_g}$$

cuyo resultado se verifica con:

$$R = R_s + \frac{k_{rg}\ \mu_o\ B_o}{k_{ro}\ \mu_g\ B_g}$$

$$\bar{R} = (R_1 + R_2)/2$$

$$\Delta G_p = \Delta N_p\ \bar{R}$$

Suponiendo $\Delta N_p = 0.015$

Con la ecuación de balance de materia :

$$B_t = B_o + B_g\ (R_{si} - R_s)$$

$$B_t = 1.398 + 0.0088(108.45 - 104.35)$$

$$B_t = 1.431$$

$$B_{ti} = B_{oi} = 1.410$$

$$G_p = \frac{1.4341 - 1.410 - N_p(1.4341 - 108.45 * 104.35)}{0.0088}$$

$$G_p = \frac{0.0241 - N_p * 0.47664}{0.0088}$$

$$G_p = \frac{0.0241 - 0.015 * 0.47664}{0.0088}$$

$$G_p = 1.9262$$

Por otro lado, con la ecuación de R:

$$S_o = \frac{(1 - N_p)(1 - S_w)\ B_o}{B_{ob}}$$

$$S_o = \frac{(1 - N_p)(1 - 0.20)\ 1.398}{1.410}$$

$$S_o = 0.7932(1 - N_p)$$

$$S_o = 0.7932(1 - 0.015) = 0.7813$$

$$S_L = S_o + S_v = 0.7813 + 0.20 = 0.9813$$

De la figura V.1:

para $S_L = 0.9813 \rightarrow krg/kro = 0.0$

$$R = R_s + 0 = R_s$$

$$R = \frac{R_{si} - R_s}{2}$$

$$\bar{R} = \frac{108.45 + 104.35}{2}$$

$$\bar{R} = 106.4$$

$$G_p = 0.015 * 106.4$$

$$G_p = 1.596$$

Como los dos valores de G_p obtenidos son diferentes, se ensayará con otro valor de ΔN_p.

Suponiendo $N_p = 0.020$

Con la ecuación de balance de materia :

$$G_p = \frac{0.0241 - 0.020 * 0.47664}{0.0088}$$

$$G_p = 1.6554$$

Con R:

$$S_o = 0.7932\ (1 - 0.020) = 0.7748$$

$$S_L = 0.7748 + 0.20 = 0.9748$$

De la gráfica: $krg/kro = 0.0$

Por lo que: $R = R_s$

$$\bar{R} = 106.4$$

$$G_p = 0.020 * 106.4$$

$$G_p = 2.128$$

Como los resultados tampoco en esta ocasión son iguales, se debe ensayar con otro valor de ΔN_p; para encontra el valor correcto se grafican los resultados obtenidos anteriormente (figura V.2)

FIGURA V.2

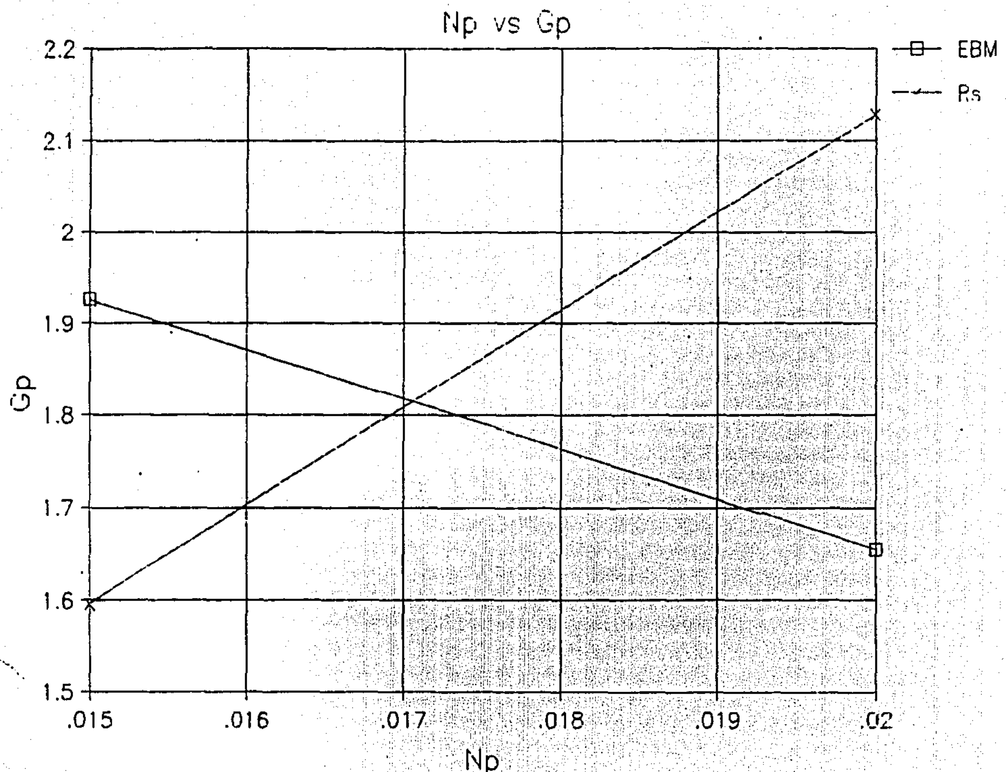
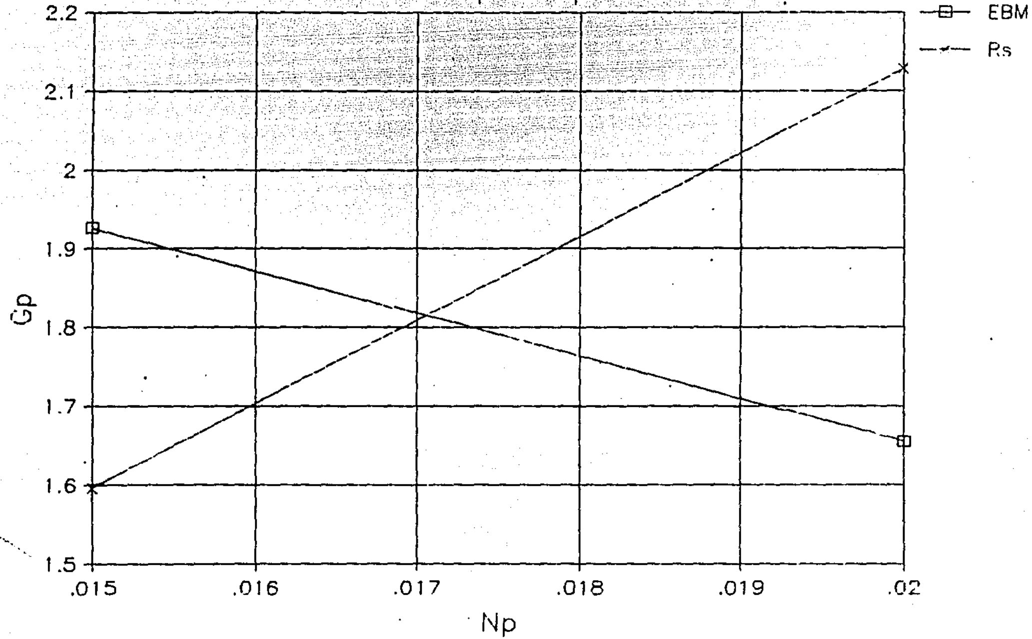


FIGURA V.2

Np vs Gp



De la intersección de las rectas de la figura V.2 se obtiene

$$\Delta N_p = 0.0171$$

Con la ecuación de balance de materia :

$$G_p = \frac{0.0241 - 0.0171 * 0.47664}{0.0088}$$

$$G_p = 1.8178$$

Con R :

$$S_o = 0.7932\ (1 - 0.0171) = 0.7796$$

$$S_L = 0.7796 + 0.20 = 0.9796$$

De la figura V.1 : $k_{rg}/k_{ro} = 0.0$

Por lo cual sigue siendo : $\bar{R} = 106.4$

$$G_p = 0.0171 * 106.4$$

$$G_p = 1.8194$$

Como ahora las G_p obtenidas por ambos procedimientos son muy parecidas, se puede asegurar que:

$$Rec = 0.0171$$

Por lo tanto:

$$N_p = N\ Rec$$

$$N_p = 300*10^6 * 0.0171$$

$$N_p = 51.3*10^6\ m^3$$

V.3.2 De un yacimiento saturado sin casquete de gas se tiene la siguiente información:

t(días)	p(Kg/cm^2)	B_o	B_g	R_s	R_p	N_p	μ_o/μ_g
0	230	1.450	0.00456	0	0	0	0.0
180	210	1.432	0.00490	129	140	278 000	32.1
349	195	1.403	0.00544	117	160	738 000	36.8

Determine la relación k_{rg}/k_{ro} existente en el yacimiento a las presiones de 230, 210 y 195 Kg/cm^2. Considere que cada ΔN_p se obtiene con gastos constantes.

Solución:

Sabemos que :

$$\bar{R} = \frac{q_g}{q_o} = \frac{\Delta G_p \ / \ \Delta t}{\Delta N_p \ / \ \Delta t} = \frac{\Delta G_p}{\Delta N_p}$$

$$G_p = R_p \ N_p$$

$$R_p = \frac{k_{rg} \ \mu_o \ B_o}{k_{ro} \ \mu_g \ B_g} + R_s$$

de donde se obtiene:

$$\frac{k_{rg}}{k_{ro}} = (R - R_s) \frac{B_g}{B_o \ \mu_o/\mu_g}$$

A 230 Kg/cm^2:

$$G_p = 0 * 0 = 0$$

$$\frac{k_{rg}}{k_{ro}} \quad \text{no se puede calcular}$$

A 210 Kg/cm^2:

$$G_p = 140 * 278\ 000 = 38.92*10^6$$

$$R = \frac{38.92*10^6 - 0}{278*10^3 - 0} = 140$$

$$\frac{k_{rg}}{k_{ro}} = (140 - 129) \frac{0.00490}{32.1 * 1.432}$$

$$\frac{k_{rg}}{k_{ro}} = 0.00117$$

A 195 Kg/cm^2:

$$G_p = 160 * 738\ 000 = 118.08*10^6 \ m^3$$

$$R = \frac{118.08*10^6 - 38.92*10^6}{738*10^3 - 278*10^3}$$

$$R = 172$$

$$\frac{k_{rg}}{k_{ro}} = (172 - 117)\ \frac{0.00544}{36.8 * 1.403}$$

$$\frac{k_{rg}}{k_{ro}} = 0.00580$$

V.3.3 Un yacimiento produce por empuje de gas disuelto . $p_i = 200$ Kg/cm^2 , $S_{wi} = 0.10$, $N = 100*10^6 m^3$ @ c.s. , $B_{oi} = 1.44$. Cuando su presión se abatió a 140 Kg/cm^2: $B_o = 1.372$, $R_s = 95.7$, $B_g = 0.0105$, Rec $= 0.099$, $\mu_o/\mu_g = 87$. Calcule N_p a 130 Kg/cm^2 si a esta presión: $B_o = 1.359$, $R_s = 91.2$, $B_g = 0.0116$, $\mu_o/\mu_g = 91.7$

Datos:

p(Kg/cm^2)	B_o	B_g	μ_o/μ_g	R_s	S_o	k_g/k_o	S_g
200	1.440						
140	1.372	0.0105	87	95.7	0.7726	9.7178	0.1274
130	1.359	0.0116	91.7	91.2	0.7473		0.1526

La recuperación a 140 fué de 0.099

Solución:

$$S_{o140} = \frac{(1 - Rec)\ B_o\ (1 - S_w)}{B_{oi}}$$

$$S_{o140} = \frac{(1 - 0.099) * 1.372 * (1 - 0.10)}{1.44}$$

$$S_{o140} = 0.7726$$

$$k_g/k_o = \frac{(1 - S)^2\ (1 - S^2)}{S^4}$$

$$S = S_o/S_{oi} = 0.7726/(1 - 0.10) = 0.8584$$

$$k_g/k_o = \frac{(1 - 0.8584)^2\ (1 - 0.8584^2)}{0.8584^4}$$

$$k_g/k_{o140} = 9.7178*10^{-3}$$

El decremento de S_o en ese período se calculará con el método de Muskat:

$$\frac{dR_s}{dp} = \frac{95.7 - 91.2}{10} = 0.45$$

$$\frac{dB_g}{dp} = \frac{0.0105 - 0.0116}{10} = -0.00011$$

$$\frac{dB_o}{dp} = \frac{1.372 - 1.359}{10} = 0.0013$$

$$S_g = 1 - S_o - S_w = 1 - 0.7726 - 0.10$$

$$S_g = 0.1274$$

$$B_o = (1.372 + 1.359)/2 = 1.3655$$

$$\bar{B}_g = (0.0105 + 0.0116)/2 = 0.01105$$

$$\bar{\mu}_o/\bar{\mu}_g = (87 + 91.7)/2 = 89.35$$

$$X_p = \frac{\bar{B}_g}{B_o}\frac{dR_s}{dp}$$

$$X_p = \frac{0.01105 * 0.45}{1.3655} = 3.642*10^{-3}$$

$$Y_p = \frac{\bar{\mu}_o}{\mu_g B_o}\frac{dB_o}{dp}$$

$$Y_p = \frac{89.35 * 0.0013}{1.3655} = 0.08506$$

$$Z_p = \frac{1}{B_g}\frac{dB_g}{dp}$$

$$Z_p = \frac{-0.00011}{0.01105} = -9.955*10^{-3}$$

$$\Delta S_o = \Delta p\left[\frac{S_o(X_p + Y_p k_g/k_o) - Z_p S_g}{1 + k_g\mu_o/k_o\mu_g}\right]$$

$$\Delta S_o = 10\left[\frac{0.7726*(3.64+85.06*9.7178)*10^{-3} - (-9.955*10^{-3} *0.1274)}{1 + 9.7178*10^{-3} * 89.35}\right]$$

$$\Delta S_o = 0.02526$$

$$S_{o190} = S_{o140} - \Delta S_o$$

$$S_{o190} = 0.7726 - 0.02526 = 0.74734$$

$$Rec_{190} = 1 - \frac{S_{o190}\ B_{oi}}{S_{oi}\ B_{o190}} = 1 - \frac{0.74734*1.44}{(1 - 0.10)*1.359}$$

Por otro lado:

$$Rec_{190} = \frac{N_{p190}}{N}$$

De donde:

$$N_{p190} = Rec_{190}\ N = 0.12012*100*10^6$$

$$N_{p190} = 1.2012*10^7\ m^3\ @\ c.s.$$

V.3.4 De un yacimiento se tiene la siguiente información:

$p(Kg/cm^2)$	B_o	B_g	R_s	μ_g/μ_o	k_{rg}/k_{ro}
200	1.440	0.0065	120.00	0.01527	0.0000
190	1.431	0.0069	116.40	0.01453	0.0023
180	1.421	0.0072	112.50	0.01385	0.0085

S_{wi} = 20% ; p_i = 200 Kg/cm^2.

Aplicando el método de Muskat, determine S_o, R y Rec para el intervalo de 190 a 180 Kg/cm^2.

Solución:

Las ecuaciones a usar son:

$$\frac{dS_o}{dp} = \frac{S_o(X_p + Y_p k_g/k_o) - Z_p\ S_g}{1 + k_g\mu_o/(k_o\mu_g)}$$

$$X_p = \frac{B_g}{B_o}\frac{dR_s}{dp} \qquad Y_p = \frac{1}{\mu_g\ B_o}\frac{dB_o}{dp} \qquad Z_p = \frac{1}{B_g}\frac{dB_g}{dp}$$

$$Rec = 1 - \frac{B_{oi}\ S_o}{S_{oi}\ B_o}$$

$$R = R_s + \frac{k_g\ \mu_o\ B_o}{k_o\ \mu_g\ B_g}$$

Para mayor claridad, se presentará el desarrollo del método en forma tabulada:

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
i	p	$\bar{p}$	dR_s/dp	dB_o/dp	dB_g/dp	μ_o/μ_g	B_g	B_o
1	200					65.49	0.0065	1.440
2		195	0.36	$9*10^{-4}$	$-4*10^{-5}$	67.16	0.0067	1.436
3	190					68.82	0.0069	1.431
4		185	0.39	$10*10^{-4}$	$-3*10^{-5}$	70.51	0.0071	1.426
5	180					72.20	0.0072	1.421

	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
i	X_p	Y_p	Z_p	S_o	S_g	k_{rg}/k_{ro}
1				0.8000	0.00000	0.0000
2	0.00168	0.042092	-0.005970			
3				0.7866	0.01344	0.0023
4	0.00194	0.049446	-0.004225			
5				0.7722	0.01440	0.0085

	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)
i	$S_g Z_p$	$S_o(X_p+Y_p k_o/k_g)$	$((16)-(15))\Delta p$	$1+k_g\mu_o/k_o\mu_g$	ΔS_o
1					
2	0.0000000	0.001344	0.01344	1.0000	0.01314
3					
4	-0.0000567	0.001617	0.01673	1.6217	0.01440
5					

	(20)	(21)	(22)	(23)	(24)	(25)
i	S_o/B_o	Rec	B_o/B_g	(22)(14)(6)	R_s	$R=(23)+(24)$
1		0.00000			120.00	120.00
2					118.20	
3	0.549686	0.0105[illegible]	.39	32.82714	116.40	149.23

4					114.45	
5	0.543420	0.02184	189.97	121.12051	112.50	233.62

V.3.5 Se tiene un yacimiento con empuje de gas disuelto liberado. Aplicando el método de Tracy obtenga su comportamiento durante el período de explotación considerado.

$p (Kg/cm^2)$	B_o	B_g	R_s	μ_o/μ_g
180	1.395	0.0070	98.67	34.02
175	1.389	0.0072	97.00	34.59
170	1.383	0.0074	94.25	35.80
165	1.377	0.0077	91.75	37.14

Considere S_{wi} = 0.20 y:

S_o	k_{rg}/k_{ro}
0.80	0.0000
0.79	0.0000
0.78	0.0002
0.77	0.0003

Solución:

Las ecuaciones que utiliza este método son:

$$\phi_n = \frac{B_o - B_g R_s}{B_o - B_{oi} + B_g (R_{si} - R_s)}$$

$$\phi_g = \frac{B_g}{B_o - B_{oi} + B_g (R_{si} - R_s)}$$

$$\Delta N_p = \frac{1 - (N_{p1} \phi_{n2} + G_{p1} \phi_{g2})}{R \phi_{g2} + \phi_{n2}}$$

$$N_{p2} = N_{p1} + \Delta N_p$$

$$S_o = \frac{(1 - N_p) B_o S_{oi}}{B_{oi}}$$

$$\Delta G_p = \Delta N_p \bar{R}$$

$$N = N_{p1} \phi_{n2} + G_{p1} \phi_{g2} + \Delta N_p (R \bar{\phi}_{g2} + \phi_{n2})$$

A continuación se presenta el desarrollo del método en forma tabular:

ϕn	ϕg	Rsupuesta	$\bar{R}$	ΔNp	Np
	1.1952	98.67	----	0.000000	0.000000
114.64	0.3573	97.00	97.835	0.004318	0.004318
33.11	0.2182	94.25	95.625	0.010495	0.014813
19.00	0.1588	93.00	93.625	0.010219	0.025030

So	kg/ko	Bo/Bg	Rcalc	$\bar{R}$	ΔGp	ΔNp	N
0.8000	0.00000	------	98.67	------	0.0000	0.000	-------
0.7931	0.00000	------	97.00	97.835	0.4224	0.422	0.99990
0.7814	0.00000	------	94.25	95.625	1.0035	1.426	0.99998
0.7770	0.00024	178.83	93.30	93.775	1.3890	2.815	0.99960

V.4 Evaluación de la entrada de agua al yacimiento.

V.4.1 Se tiene un yacimiento con la siguiente historia de producción:

t	P_c v/o		$\bar{p}y$	qo	qg	qw	We
0	267.1	pi→	258.0	1000	90 000	0.0	0
90	265.8		255.8	1200	108 000	0.0	3 940
180	261.2		250.2	1100	99 000	0.0	27 340
270	256.5		244.5	1000	90 000	0.0	76 310
360	249.8		234.8	990	89 100	0.0	155 480
450	245.4		230.4	950	85 500	0.0	397 640
540	240.6		222.6				

Datos adicionales: Suponga que a condiciones iniciales 1 m^3 de aceite en el yacimiento, ocupa un volumen de 0.806 m^3 en la superficie. A la presión de burbujeo (160 Kg/cm^2) 1 m^3 de aceite en el yacimiento, 0.781 m^3 en la superficie. Suponga:un comportamiento lineal del B_o y constante de B_w = 1.0; S_{wi} = 0.20 ; c_w = 4*19^{-5}(Kg/cm^2)$^{-1}$ c_f = 108$10^{-5}$(Kg/cm^2)$^{-1}$. Los gastos de la tabla anterior están en m^3/d.

Determine:

a) La constant. trada de agua (haga los cálculos para flujo radial)

b) El volumen original de aceite @ c.y. evaluado cuando p_y = 222.6 Kg/cm^2.

Solución:

a) Para evaluar la constante de entrada de agua en este caso se puede usar el método de Stanley:

$$C = \frac{W_e}{\sum_{i=1}^{n} \Delta p_i \, (\bar{t})^{\alpha}_{n+1-i}}$$

Por tratarse de flujo radial α = 0.8

El tiempo adimensional se obtendrá como $\bar{t}$= t/90 , es decir, se tomarán períodos de 90 días.

Para el primer período:

$$\Delta p_1 = \left[p(\bar{t}=0) - p(\bar{t}=1)\right]/2$$

Para los períodos siguientes:

$$\Delta p_j = (p_{j-2} - p_j)/2$$

Con las ecuaciones anteriores se construyó la siguiente tabla:

$\bar{t}$	Δp	$(\bar{t})^{\alpha}$	$\sum \Delta p \, (\bar{t})^{\alpha}$	C
0	0.00	0.000	0.00	
1	0.65	1.000	0.65	6061
2	2.90	1.741	4.03	6784
3	4.65	2.408	11.26	6777
4	5.70	3.031	22.75	6834
5	5.55	3.624	37.82	6793
6	4.60	4.193	55.32	6863

De donde se obtiene :

$\bar{C}$ = 6685 es la constante de entrada de agua

Como la presión del yacimiento es mayor que la presión de burbujeo, se trata de un yacimiento de aceite bajosaturado.

La ecuación de balance de materia es: ($W_p = 0$)

$$N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta'p = N_p\ B_o - W_e$$

De donde:

$$N = \frac{N_p\ B_o - W_e}{B_{oi}\ c_e\ \Delta'p}$$

$$B_o = \frac{V_o\ @\ c.y}{V_o\ @\ c.s.}$$

$$B_{oi} = \frac{1}{0.806} = 1.24$$

$$B_{o222.6} = \frac{1}{0.781}$$

$$c_e = \frac{S_o\ c_o + S_w\ c_w + c_f}{S_o}$$

$$S_o = 1 - S_w = 1 - 0.20 = 0.80$$

$$c_o = \frac{2(B_o - B_{oi})}{\Delta'p\ (B_o + B_{oi})}$$

$$c_o = \frac{2(1.28 - 1.24)}{(258 - 222.6)(1.28 + 1.24)}$$

$$c_o = 8.97*10^{-4}\ (Kg/cm^2)^{-1}$$

$$c_e = \frac{0.80(8.97*10^{-4}) + 0.20(4*10^{-5}) + 10*10^{-5}}{0.80}$$

$$c_e = 1.032*10^{-3}(Kg/cm^2)^{-1}$$

N_p puede obtenerse a partir del gasto de aceite:

$$= \bar{q}_o\ \Delta t = 1040 * 540 = 0.5616*10^6\ m^3$$

Sustituyendo:

$$N = \frac{0.5616*10^6 * 1.28 - 379.64*10^3}{1.24 * 1.032*10^{-3} * (258 - 222.6)}$$

$$N = 7.488*10^6 \ m^3$$

$$V_{oi} = N \ B_{oi} = 7.488*10^6 * 1.24$$
$$V_{oi} = 9.285*10^6 \ m^3 \ @ \ c.y.$$

V.4.2 Se tiene un yacimiento saturado sin casquete original de gas, el cual tiene un acuífero activo asociado , cuyo régimen de flujo es variable y radial; se le ha determinado una constante de entrada de agua de 6735 $m^3/(Kg/cm^2)$. El volumen original de aceite es de $810*10^6 m^3$ @ c.y. y el comportamiento del yacimiento es el siguiente:

t(días)	p(Kg/cm^2)	B_o	B_g	R_s	R_p
0	268	1.350	0.0006	120	
90	264	1.342	0.0010	100	140
180	260	1.339	0.0015	78	180
270	255	1.333	0.0022	50	230

Considerando que no hay producción de agua y S_{wi} = 0.2, determine N_p para cada nivel de presión.

Solución:

Primero se debe evaluar la entrada de agua; por tratarse de régimen de flujo variable y radial, se usará el método de Stanley:

$$We = 6735 \sum_{i=1}^{n} \Delta p_i (\bar{t})^{0.5}_{n+1-i}$$

Suponiendo que la caída de presión en el yacimiento es igual a la caída de presión en el contacto agua-aceite.

Resolviendo: (se usan períodos de 90 días)

$\bar{t}$	$(\bar{t})^{0.8}$	Δp	$\sum \Delta p\ (\bar{t})^{0.8}$	$W_e (m^3)$
0	0.000	0	0.000	0
1	1.000	4	4.000	26 940
2	1.741	8	14.964	100 782
3	2.408	9	32.560	219 292

La ecuación de balance de materia para este caso es:

$$N_p(B_o + B_g(R_p - R_s)) = N(B_t - B_{ti}) + W_e$$

De donde:

$$N_p = \frac{N(B_t - B_{ti}) + W_e}{B_o + B_g(R_p - R_s)}$$

$$N = \frac{V_{oi}}{B_{oi}} = \frac{810*10^6}{1.35} = 600*10^6\ m^3$$

$$B_t = B_o + B_g\ (R_{si} - R_s)$$

Para 268 Kg/cm^2:

$$B_{ti} = B_{oi} = 1.350$$

$$N_p = 0.0$$

Para 264 Kg/cm^2:

$$B_t = 1.342 + 0.001(1.20 - 100) = 1.382$$

$$N_p = \frac{600*10^6(1.382 - 1.350) + 26\ 940}{1.342 + 0.0010(140 - 100)}$$

$$N_p = 13.912*10^6\ m^3$$

Para 260 Kg/cm^2:

$$B_t = 1.339 + 0.0015(120 - 78) = 1.492$$

$$N_p = \frac{600*10^6(1.492 - 1.350) + 100\ 782}{1.339 + 0.0015(180 - 78)}$$

$$N_p = 54.96*10^6\ m^3$$

Para 255 Kg/cm^2:

$$B_t = 1.333 + 0.0022(120 - 50) = 1.729$$

$$N_p = \frac{600*10^6(1.729 - 1.350) + 219\ 292}{1.333 + 0.0022(230 - 50)}$$

$$N_p = 131.65 \cdot 10^6 \ m^3$$

Resumiendo:

t	N_p (10^6 m^3)
0	0.000
90	13.912
180	54.960
270	131.650

V.4.3 Calcule W_e con la ecuación de Hurst, si C = 70 y a = 0.025 Considere períodos de explotación de seis meses.

t(años)	p (en la frontera)
0.00	267.0
0.25	266.6
0.50	265.8
0.75	263.9
1.00	261.2
1.25	259.1
1.50	256.5

p en Kg/cm^2

Solución:

La ecuación de Hurst es:

$$W_e = \int_o^t \frac{(p_i - p)\ \Delta t}{\log\ (at)}$$

En este caso:

$$W_e = 70 \sum_o^t \frac{(p_i - p)\ \Delta t}{\mathrm{Log}\ (0.025\ t)}$$

p es la presión a la mitad del período:

t(años)	$p_i - p$	$\frac{182(p_i-p)}{\mathrm{Log\ at}}$	$\sum 182(p_i-p)$	W_e
0.0	0.0	0.000	0.000	0.00
0.5	0.4	110.638	110.638	7744.66
1.0	3.1	587.586	698.224	48875.68
1.5	7.9	1265.780	1964.004	137480.28

V.4.4 Aplicando la ecuación de balance de materia en forma de recta calcule N y C si $m = 0$

Datos:

t(días)	p(Kg/cm^2)	$N_p (10^6 m^3)$	$G_p (10^6 m^3)$	$W_p (m^3)$
0	200	0.0	0	0
182	170	1.5	690	21000
365	150	2.5	2150	78000

$p_i = p_b$

p(Kg/cm^2)	B_o	B_g	R_s
200	1.440	0.0065	120
170	1.410	0.0081	108
150	1.385	0.0096	100

Suponga flujo radial en régimen permanente y acuífero infinito. Calcule W_e para 547 días si la presión será de 140 Kg/cm^2

Solución:

Para determinar N y C se usa la ecuación:

$$N + C \frac{\sum \Delta p \ (t)^{0.8}}{E_o} = \frac{F}{E_o}$$

Que es la ecuación de una recta donde:

$$F = N_p \ (B_o + B_g(R_p - R_s)) + W_p \ B_w$$

$$E_o = B_t - B_{ti}$$

$$B_t = B_o + B_g \ (R_{si} - R_s)$$

$$B_{ti} = B_{oi}$$

$$R_p = G_p/N_p$$

N es la ordenada al origen.

C es la pendiente de la recta.

Aplicando las ecuaciones anteriores resulta:

B_t	R_p	F	F/E_o	$\bar{t}$	Δp	$\sum \Delta p t^{\alpha}$	$\sum \Delta p t^{\alpha}/E_o$
1.4400		0.0	--	0	0.00		
1.5072	460	$6.4 \cdot 10^6$	$0.95 \cdot 10^8$	1	1.00	15.00	223.21
1.5770	860	$21.8 \cdot 10^6$	$1.59 \cdot 10^8$	2	1.74	51.10	372.99
				3	2.41	94.65	

En la figura V.5 se graficaron los valores de F/E_o vs $\sum \Delta p t^{\alpha}/E_o$

FIGURA V.5

F/Eo vs SUM dp(t)^a / Eo

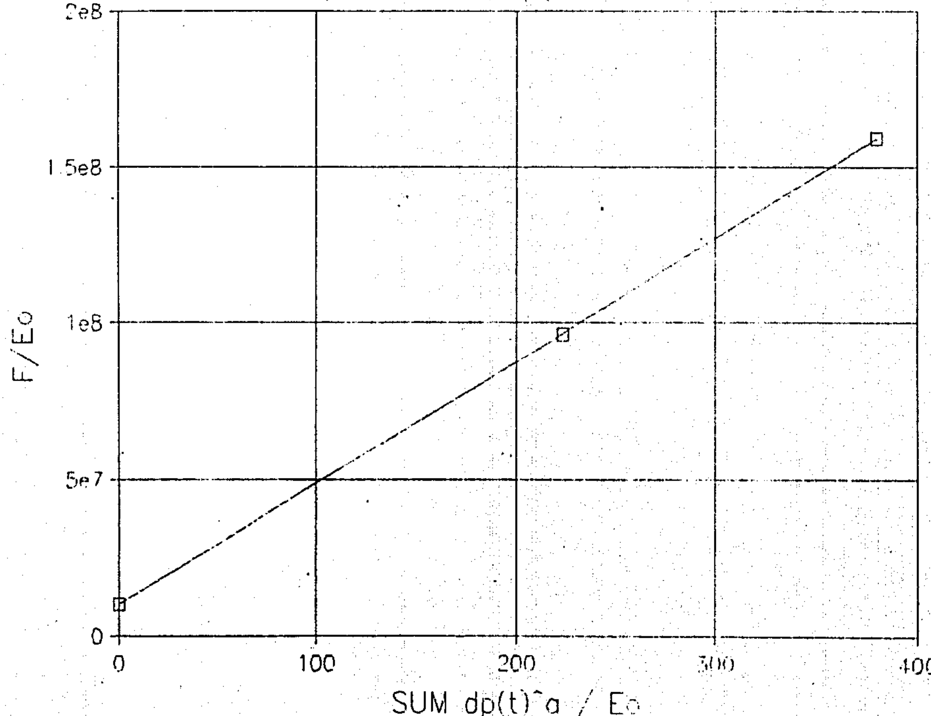
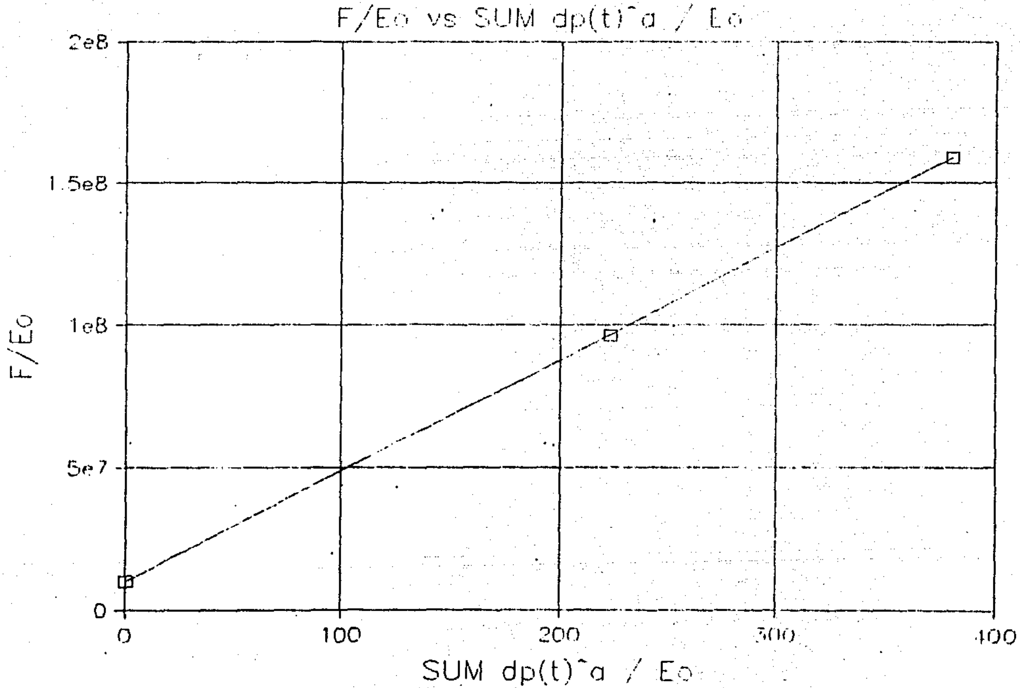


FIGURA V.3



F/Eo vs SUM dp(t)^a / Eo
2e8
1.5e8
1e8
5e7
0
F/Eo
0
100
200
300
400
SUM dp(t)^a / Eo

resultando una recta de la cual se obtiene:

$$N = 10*10^{6}\ m^{3}$$

$$C = 3.8*10^{5}$$

W_e a 140:

$$W_e = C \sum \Delta p\ (\bar{t})^{\alpha}$$

Entonces:

$$W_{e140} = 3.8*10^{5} * 94.65$$

$$W_e = 36*10^{6}\ m^{3}\ v\ @\ c.y.$$

V.4.5 De un yacimiento con entrada de agua se tiene la siguiente información:

t(años)	K
0.0	-
0.5	54.1
1.0	40.2
1.5	33.6
2.0	31.1
2.5	28.7
3.0	27.2

Se desea conocer los valores de las constantes C y a de la ecuación de Hurst.

Solución:

Las ecuaciones de Hurst son:

$$W_e = C \sum \frac{\Delta p\ \Delta t}{\log at}$$

$$\text{Log } a \sum K_j + \sum (K_j \text{ Log } t_j) = n\ C$$

$$\text{Log } a \sum K_j\ t_j + \sum (K_j\ t_j \text{ Log } t_j) = C \sum t_j$$

Donde n es el número de periodos Δt

Efectuando las sumatorias

j	t_j(días)	K_j	$K_j t_j$	$\text{Log} t_j$	$K_j \text{Log} t_j$	$K_j t_j \text{Log} t_j$
1	182.5	54.1	9873	2.261	122.32	22323
2	365.0	40.2	14673	2.562	102.99	37591
3	547.5	33.6	18396	2.738	91.99	50364
4	730.0	31.1	22703	2.863	89.04	64999
5	912.5	28.7	26188	2.960	84.95	77517
6	1095.0	27.2	29784	3.039	82.66	90513
Σ	3832.5	214.9	121617		573.95	343307

Sustituyendo:

$$214.9 \text{ Log } a + 573.95 = 6 \text{ C} \qquad \text{(A)}$$

$$121\ 617 \text{ Log } a + 343\ 307 = 3\ 832.5 \text{ C} \qquad \text{(B)}$$

De A:

$$C = 35.8167 \text{ Log } a + 95.66$$

Sustituyendo en B:

$$121\ 617 \text{ Log } a + 343\ 307 = 3832.5\ (35.8167 \text{ Log } a + 95.66)$$

$$-\ 23\ 310 = 15\ 650.5 \text{ Log } a$$

$$\text{Log } a = -\ 23\ 310/15\ 650.5 = -\ 1.4894$$

$$a = 10^{-1.4894} = 0.0324$$

Sustituyendo en A:

$$214.9 * (-1.4894) + 573.95 = 6 \text{ C}$$

$$C = 42.313$$

Entonces la ecuación de Hurst queda:

$$W_e = 42.313 \sum_{0}^{t} \frac{182.5\ \Delta p}{\text{Log}(0.0324\ t)}$$

V.4.6 De un yacimiento se tiene la siguiente información:

$p_y > p_b$	$c_o = 30*10^{6} (\text{Kg/cm}^2)^{-1}$	$B_o = 1.4 - 0.0003\ p$
$W_p = 0$	$\alpha = 0.8$	

t(días)	p(Kg/cm^2)	Np(m^3)
0.0	350.0	0
182.5	349.5	11 492
365.0	347.3	35 671
547.5	344.5	73 562

Determine:

a) N y C

b) W_e para el mismo yacimiento al cabo de dos años, si su presión será de 340 Kg/cm^2.

Solución:

a) Este problema se puede resolver usando la ecuación de balance de materia que es:

$$N_p\ B_o = N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta'p + W_e$$

W_e puede evaluarse por el método de Stanley:

$$W_e = C \sum \Delta p\ (\bar{t})^{\alpha}$$

Entonces se puede escribir:

$$N_p\ B_o = N\ B_{oi}\ c_e\ \Delta'p + C \sum \Delta p\ (\bar{t})^{0.8}$$

Esta ecuación se puede acomodar tal que:

$$\frac{N_p\ B_o}{B_{oi}\ c_e\ \Delta'p} = N + C\ \frac{\sum \Delta p\ (\bar{t})^{0.8}}{B_{oi}\ c_e\ \Delta'p}$$

Que es la ecuación de una recta con pendiente C y ordenada al origen N. Por lo tanto graficando varios puntos se puede obtener n y C de manera simultánea.

Se graficará:

$$x = \frac{\sum \Delta p\ (\bar{t})^{0.8}}{B_{oi}\ c_e\ \Delta'p} \quad \text{vs} \quad y = \frac{N_p\ B_o}{B_{oi}\ c_e\ \Delta'p}$$

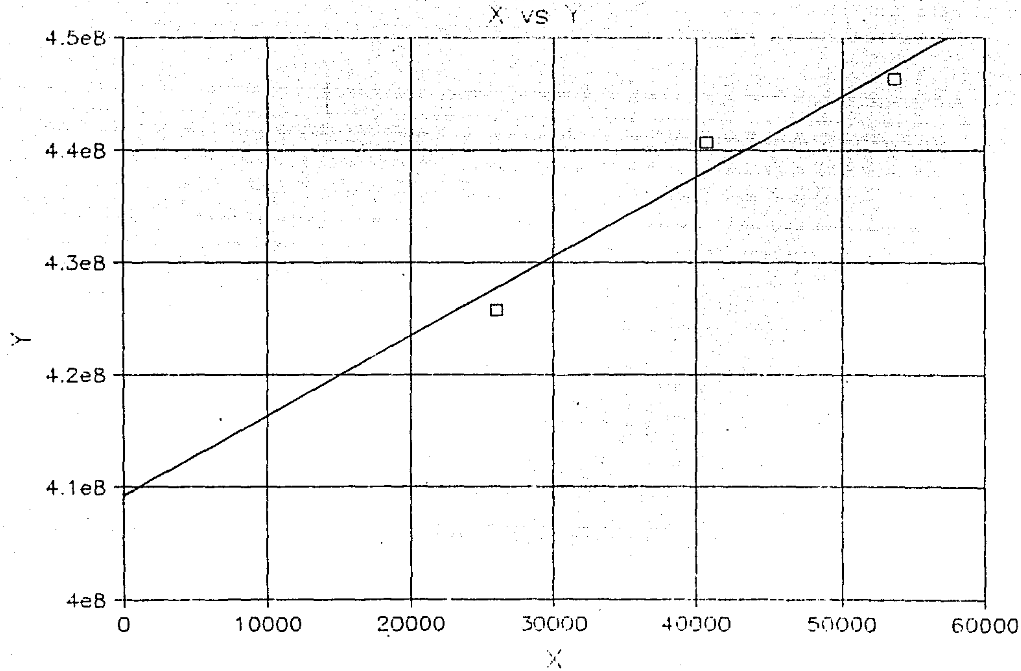
Resolviendo en forma tabular:

p	B_o	$\bar{t}$	Δp	$\sum\Delta p(t)^{\alpha}$	$\Delta'p$	$B_{oi}c_e\Delta'p$	t^{α}
350.0	1.2950	0	0.00	0.00	0.0	0.00	0.000
349.1	1.2953	1	0.90	0.90	0.9	$3.49 \cdot 10^{-5}$	1.000
347.3	1.2959	2	2.70	4.24	2.7	10.49 "	1.741
344.5	1.2966	3	4.60	11.47	5.5	21.37 "	2.408
340.0		4	7.30	24.59			3.031

p	x	y
350.0	0	0.0000
349.1	25 940	$4.2573 \cdot 10^{8}$
347.3	40 708	4.4069 "
344.5	53 679	4.4638 "

La gráfica de x vs y se presenta en la figura V.4 de la cual

FIGURA V.4


X vs Y
4.5e8
4.4e8
4.3e8
4.2e8
4.1e8
4e8
Y
0
10000
20000
30000
40000
50000
60000
X

se obtiene:

$$N = 409.5 * 10^6 \; m^3$$

$$C = 770$$

b) Para $p = 340 \; Kg/cm^2$:

$$\bar{t} = \frac{730}{182.5} = 4$$

$$\bar{t}^{0.8} = 3.031$$

$$\Delta p = 349.3 - 340 = 7.3$$

$$\sum \Delta p \; (\bar{t})^{0.8} = 24.54 \text{ (calculado en la tabla)}$$

$$W_e = 770 * 24.54$$

$$W_e = 18\,896 \; m^3$$

CAPITULO VI YACIMIENTOS CON SEGREGACION GRAVITACIONAL

VI.1 Introducción.

En yacimientos que presentan un gran relieve estructural, ya sea por tener un espesor muy grande o por tener un gran ángulo de echado, y que cuentan con buena permeabilidad en sentido vertical, se puede presentar el fenómeno de la segregación gravitacional.

La segregación gravitacional consiste en el ascenso del gas que paulatinamente se va liberando del aceite, hacia la parte superior del yacimiento, donde se acumula formando un casquete secundario de gas que al crecer empujará al aceite hacia la parte inferior del yacimiento.

Las burbujas del gas liberado tienden a subir por tener una densidad menor que la de los líquidos del yacimiento, pero el gradiente de presión que se establece por la producción misma tenderá a arrastrarlas hacia los pozos. Para que la segregación de los fluidos actúe como un mecanismo de empuje eficiente, se debe permitir la acumulación de gas en el casquete secundario, por lo cual es necesario restringir el ritmo de producción de tal manera que el gradiente de presión que se establezca hacia los pozos no arrastre a las burbujas de gas hacia ellos, permitiendo que asciendan dentro del yacimiento.

Generalmente, cuando en un yacimiento se permite actuar predominantemente el mecanismo de segregación gravitacional se incrementa en buen grado la recuperación final del aceite del yacimiento; sin embargo, cuando es necesario reducir el ritmo de producción se debe realizar una evaluación económica porque al diferir la producción se reduce el rendimiento económico que en algún caso podría anular el incremento económico generado por el incremento de la recuperación.

En este capítulo se presentan algunos ejemplos de yacimientos con segregación gravitacional

VI.2 Yacimientos con segregación gravitacional.

VI.2.1 Usando el término de Smith determine en cuáles de los siguientes casos existen posibilidades de segregación gravitacional:

caso	K_o (mD)	μ_o (cp)	α (°)
a	5	2.0	5
b	100	0.3	5
c	5	2.0	30
d	100	2.0	5
e	5	100.0	7
f	100	2.0	30
g	30	1.0	6

$\rho_o - \rho_g = 0.5 \text{ g/cm}^3$

Solución:

Sea TS el término de Smith:

$$TS = k_o/\mu_o(\rho_o - \rho_g)\text{sen } \alpha$$

a) $TS = 5/2 * 0.5 * \text{sen } 5 = 0.087$

b) $TS = 100/0.3 * 0.5 * \text{sen } 5 = 14.52$

c) $TS = 5/2 * 0.5 * \text{sen } 30 = 0.625$

d) $TS = 100/2 * 0.5 * \text{sen } 5 = 4.36$

e) $TS = 5/100 * 0.5 * \text{sen } 7 = 0.003$

f) $TS = 100/2 * 0.5 * \text{sen } 30 = 12.5$

g) $TS = 30/1 * 0.5 * \text{sen } 6 = 1.57$

Para que en un yacimiento sea efectivo el mecanismo de empuje por segregación gravitacional el término de Smith debe ser mayor que 10.

Entonces, los únicos casos favorables para la segregación gravitacional son b y f.

VI.2.2 Se tiene un yacimiento que produce por segregación gravitacional en $400 \cdot 10^6$ m^3 de roca. La distribución del volumen de roca con respecto a la profundidad se muestra en la figura VI.1; las propiedades PVT son las que aparecen en la tabla VI.1

Haciendo las siguientes consideraciones:

- No se tiene entrada ni producción de agua.
- La presión de burbujeo (175 Kg/cm^2) no varía con la profundidad.
- La presión inicial varía según p_i = 0.075Prof - 50. Prof(m)
- Las expansiones de la roca y del agua congénita son despreciables.
- Desprecie el gradiente de presión de la columna de gas en el casquete.
- Considere constante el gradiente de presión del aceite.
- La porosidad (20%), la saturación de agua (20%) son constantes en todo el yacimiento.
- Todos los pozos producen abajo de 3 180 m.
- La saturación de aceite residual es de 25%
- Use una tolerancia de 3% en los resultados.

Obtenga la recuperación de aceite y la presión media del yacimiento:

a) cuando el contacto gas-aceite se encuentre a 3 060 m.

b) cuando el contacto gas-aceite se encuentre a 3 120 m.

Solución:

a) Contacto a 3 060 m.

Ajuste del volumen de gas liberado:

De la figura VI.1 se obtiene el volumen de roca ocupado por el casquete:

$$V_R = 68 \cdot 10^6 \ m^3$$

Se supone una presión en el contacto gas-aceite; sea:

$$p_{c\ g/o} = 170 \ Kg/cm^2$$

En la figura VI.2 se observa la distribución de presión correspondiente. (De 3 000 a 3 060 m la p no varía porque se desprecia el gradiente de presión del gas y de 3 060 a 3 200 m el gradiente de presión es constante y paralelo a la p_i)

Como se observa, la p cruza la línea de p_b (175) a la

FIGURA VI.1

DISTRIBUCION DEL VOLUMEN DE ROCA

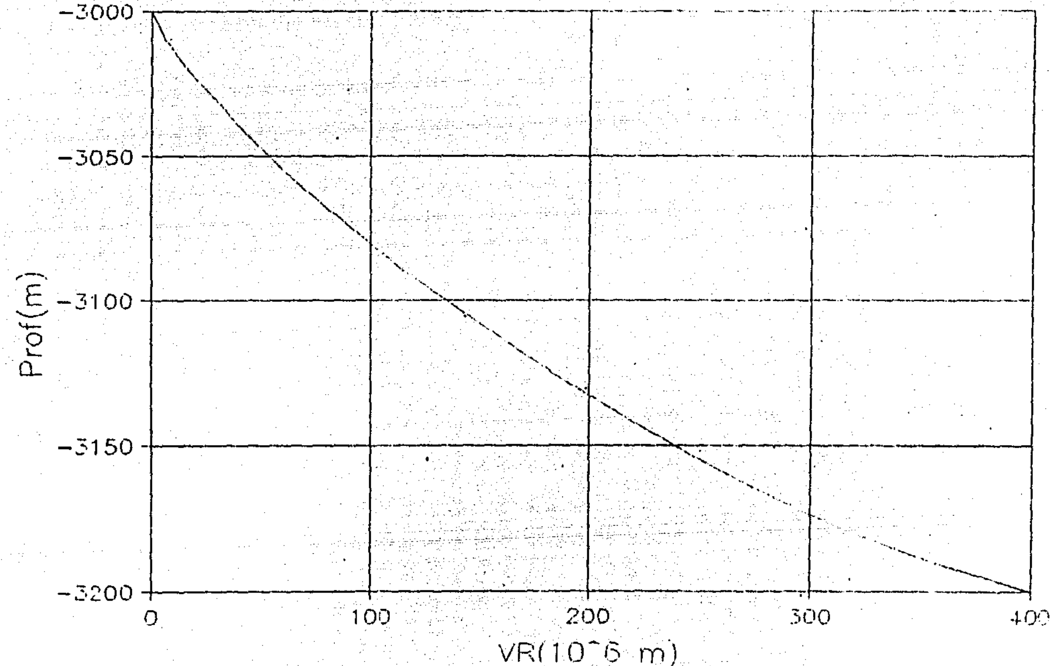


TABLA IV.1

ANALISIS PVT

p(Kg/cm^2)	Bo	Rs	Bg
190	1.3868	1500	******
188	1.3871	1500	******
186	1.3874	1500	******
184	1.3877	1500	******
182	1.3880	1500	******
180	1.3883	1500	******
178	1.3885	1500	******
176	1.3888	1500	******
175	1.3890	1500	0.0072
170	1.3830	1457	0.0074
165	1.3770	1419	0.0077
160	1.3700	1380	0.0080
155	1.3640	1341	0.0083
150	1.3580	1307	0.0086
145	1.3520	1272	0.0089
140	1.3450	1237	0.0092
135	1.3390	1198	0.0096
130	1.3330	1167	0.0100
125	1.3270	1133	0.0103
120	1.3220	1098	0.0107
115	1.3160	1063	0.0112
110	1.3100	1028	0.0117
105	1.3040	997	0.0121
100	1.2980	963	0.0129
95	1.2920	928	0.0137
90	1.2860	897	0.0143
85	1.2800	860	0.0154
80	1.2750	824	0.0160
75	1.2690	789	0.0173
70	1.2630	754	0.0187
65	1.2570	717	0.0202
60	1.2510	680	0.0220
55	1.2450	643	0.0242
50	1.2390	606	0.0268
45	1.2320	568	0.0303
40	1.2250	529	0.0347
35	1.2180	495	0.0402
30	1.2110	448	0.0480
25	1.2090	402	0.0588
20	1.1940	356	0.0744
15	1.1830	301	0.0960

profundidad de 3 130 m. Entonces se puede dividir en los siguientes bloques:

bloque	intervalo(m)	
1	3000 - 3020	
2	3020 - 3040	i = 3 bloques
3	3040 - 3060	c g/o
4	3060 - 3080	
5	3080 - 3100	n = 7 bloques
6	3100 - 3120	n - i = 4
7	3120 - 3130	pb
8	3130 - 3140	
9	3140 - 3160	z = 11 bloques
10	3160 - 3180	z - n = 4
11	3180 - 3200	

El volumen de gas libre en el yacimiento (G_{gl}) es el gas liberado del aceite original en el casquete mas el gas que se ha liberado del aceite saturado que se encuentra entre el c g/o y la profundidad de la pb.

$$G_{gl} = \sum_{j=1}^{i} \frac{V_{cg_j}\ \phi_j\ (1-S_w)_j\ B_{g_j}\ (R_{sb_j}-R_{s_j})}{B_{ob_j}}$$

$$+ \sum_{j=i+1}^{n} \frac{V_{gd_j}\ \phi_j\ (1-S_w)_j\ B_{g_j}\ (R_{sb_j}-R_{s_j})}{B_{ob_j}}$$

Donde V_{cg_j} es el volumen de roca de cada uno de los bloques que integran el casquete de gas y V_{gd_j} es el volumen de roca de cada uno de los bloques de la zona de aceite saturado entre el contacto gas-aceite y la presión de burbujeo.

De los datos y las consideraciones tenemos:

$$G_{gl} = \sum_{j=1}^{7} \frac{0.16\ V_{cg_j}\ B_{g_j}\ (1500-R_{s_j})}{1.389}$$

Aplicando esta ecuación:

	j	$V_R \cdot 10^{-6}$	$\overline{Prof}$	$\bar{p}$	B_g	R_s	G_{gl} (m^3 @ c.y.)
	1	16	3010	170.0	0.00740	1457	579 990
	2	24	3030	170.0	0.00740	1457	869 987
c g/o	3	28	3050	170.0	0.00740	1457	1 014 985
	4	32	3070	171.0	0.00736	1466	922 970
	5	34	3090	172.5	0.00730	1479	610 124
	6	38	3110	174.0	0.00724	1491	269 536
pt	7	16	3126	174.5	0.00722	1496	56 588
							Σ 4 324 180

A continuación se obtiene el volumen de roca ocupada por este volumen de gas liberado con:

$$V_{gl} = \frac{V_{gl}}{\bar{\phi}\,\bar{S}_{gcg}}$$

Cuando se cuenta con la variacion de la porosidad y de la S_v con respecto a al profundidad, $\bar{\phi}$ y $\bar{S}_{gcg}$ deben ponderarse con respecto al volumen de roca. Como en este caso son constantes en todo el yacimiento:

$$\phi = 0.20$$

$$S_{gcg} = 1 - \bar{S}_{vcg} - S_{or} = 1 - 0.20 - 0.25$$

$$S_{gcg} = 0.55$$

Entonces:

$$V_{gl} = \frac{4\ 324\ 180}{0.20 * 0.55}$$

$$V_{gl} = 39\ 310\ 727 \ m^3 \text{ de gas @ c.y.}$$

Calculando la tolerancia:

$$tol = \frac{|68*10^6 - 39\ 310\ 727|}{68*10^6} * 100$$

$$tol = 42.2\ \%$$

Como se observa el volumen de roca ocupado por este gas liberado es menor en 42% que el volumen de roca ocupado por el casquete cuando el co[illegible]to está a 3060 m.

Por lo tanto la presion supuesta en el contacto no es correcta y debe supon[illegible] nuevamente (se tomará una presión menor para obtener mayor [illegible] de gas liberado).

Sea:

$$P_{c\ g/o} = 167.5\ Kg/cm^2$$

En la figura VI.2 se observa la distribución de presión correspondiente.

Como se observa, la p cruza la línea de p_b (175) a la profundidad de 3 156 m. Entonces se puede dividir en los siguientes bloques:

bloque	intervalo(m)	
1	3000 - 3020	
2	3020 - 3040	i = 3 bloques
3	3040 - 3060	
		c g/o
4	3060 - 3080	
5	3080 - 3100	n = 8 bloques
6	3100 - 3120	n - i = 5
7	3120 - 3140	
8	3140 - 3156	
		p_b
9	3156 - 3180	z = 10 bloques
10	3180 - 3200	z - n = 2

Calculando el volumen de gas liberado:

	j	V_R*10^{-6}	$\overline{Prof}$	$\bar{p}$	B_g	R_s	G_{gl} (m^3 @ c.y.)
	1	16.0	3010	167.50	0.00755	1438	862 733
	2	24.0	3030	167.50	0.00755	1438	1 294 099
	3	28.0	3050	167.50	0.00755	1438	1 509 783
c g/o							
	4	32.0	3070	168.50	0.00750	1444	1 548 164
	5	34.8	3090	169.75	0.00740	1455	1 334 877
	6	38.4	3110	171.25	0.00735	1468	1 040 366
	7	42.8	3130	172.25	0.00729	1480	718 818
	8	36.0	3148	174.10	0.00724	1492	240 187
p_b							
							Σ 8 549 027

$$V_{gl} = \frac{8\ 549\ 027}{0.20 * 0.55}$$

$$V_{gl} = 77\ 718\ 427\ m^3 \text{ de gas @ c.y.}$$

$$tol = \frac{|68*10^6 - 77\ 718\ 427|}{68*10^6} * 100$$

$$tol = 14.29\ \%$$

Como se observa: el volumen de roca ocupado por este gas liberado es mayor en 14.29 % que el volumen de roca del casquete, por lo cual nuevamente la presión supuesta es incorrecta y se debe suponer nuevamente (un poco mayor que 167.5 para que se libere una menor cantidad de gas).

Sea:

$$p_{c\,g/o} = 168.0\ Kg/cm^2$$

En la figura VI.2 se observa la distribución de presión correspondiente.

Como se observa, la p cruza la línea de p_b (175) a la profundidad de 3 153 m. Entonces se puede dividir en los siguientes bloques:

bloque	intervalo(m)	
1	3000 - 3020	
2	3020 - 3040	i = 3 bloques
3	3040 - 3060	c g/o
4	3060 - 3080	
5	3080 - 3100	n = 8 bloques
6	3100 - 3120	n - i = 5
7	3120 - 3140	
8	3140 - 3153	p_b
9	3153 - 3180	z = 10 bloques
10	3180 - 3200	z - n = 2

Calculando el volumen de gas liberado:

	j	$V_R * 10^{-6}$	$\overline{Prof}$	$\bar{p}$	B_g	R_s	G_{gl} (m^3 @ c.y.)
	1	16.0	3010	168.00	0.00752	1442	803 866
	2	24.0	3030	168.00	0.00752	1442	1 205 799
c g/o	3	28.0	3050	168.00	0.00752	1442	1 406 765
	4	32.0	3070	168.75	0.00747	1447	1 446 566
	5	34.8	3090	170.25	0.00739	1459	1 214 578
	6	38.4	[illegible]	171.75	0.00733	1472	907 843
	7	42.8	[illegible]	173.25	0.00727	1485	537 636
p_b	8	28.0	[illegible]	174.49	0.00722	1496	116 435
							Σ 7 639 486

$$V_{gl} = \frac{7\ 639\ 486}{0.20 * 0.55}$$

$$V_{gl} = 69\ 449\ 872\ m^3 \text{ de gas @ c.y.}$$

$$tol = \frac{|68*10^6 - 69\ 449\ 872|}{68*10^6} * 100$$

$$tol = 2.1\ \%$$

Como se observa: el volumen de roca ocupado por este gas liberado es mayor en 2.1 % que el volumen de roca del casquete, (tolerancia menor que 3%) por lo cual se considera que la presión supuesta es correcta.

Ahora que ya se ha ajustado el gas liberado se procede a calcular el aceite producido por el yacimiento con :

- Aceite producido por la zona del casquete y la zona saturada, hasta la presión de burbujeo:

$$Np_{1cgl} = \sum_{j=1}^{t} \frac{Vcg_j\ \phi_j\ (1-Sw)_j\ ce_j\ (pi_j - pb_j)}{Bob_j}$$

$$+ \sum_{j=t+1}^{n} \frac{Vgd_j\ \phi_j\ (1-Sw)_j\ ce_j\ (pi_j - pb_j)}{Bob_j}$$

- Aceite producido por la zona de bajosaturación:

$$Np_{1zob} = \sum_{j=n+1}^{z} \frac{Vcb_j\ \phi_j\ (1-Sw)_j\ ce_j\ (pi_j - p_j)}{Bo_j}$$

- Aceite producido por la acumulacion de gas en el casquete:

$$Np_2 = \sum_{j=1}^{t} (N_j - Np1_j) * \left[1 - \frac{Sorcg\ Bob_j}{(1-Sw)_j\ Bo_j} \right]$$

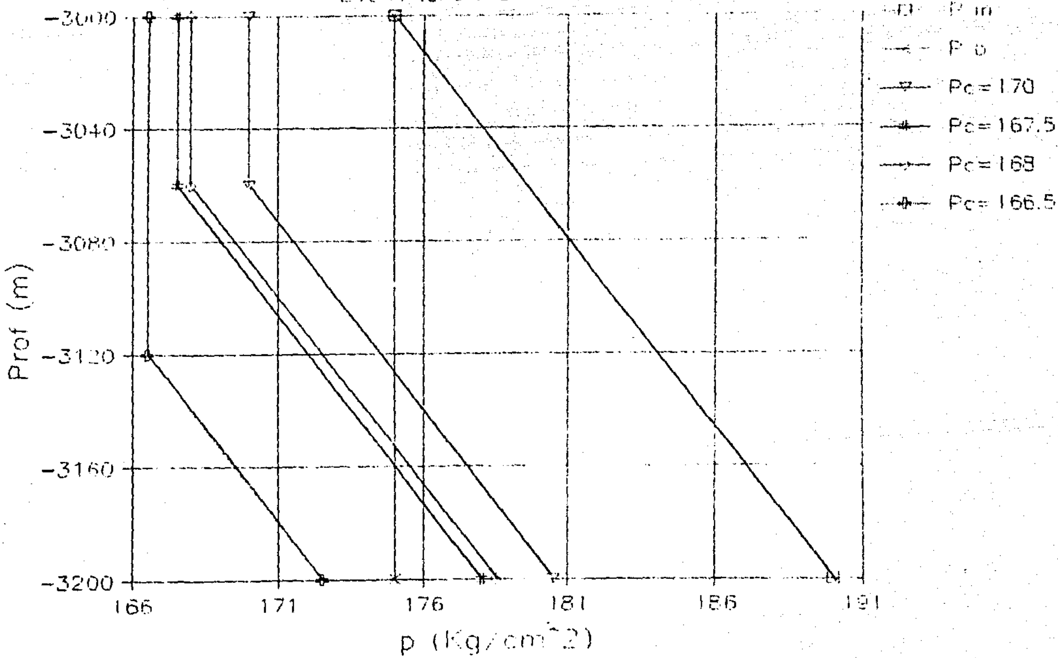
Donde N es el volumen original de aceite en cada uno de los bloques considerados y c_e es la compresibilidad efectiva en la etapa de bajosaturación.

Aplicando estas ecuaciones;

En este caso como se desprecian c_w y c_f:

FIGURA VI

DISTRIBUCION DE PRESION



$$c_e = c_o = \frac{2\,(B_{ob} - B_{oi})}{(B_{ob} + B_{oi})\,(p_i - p_b)}$$

i	p_i	$\bar{p}$	B_{oi}	B_o	c_e	$V_R * 10^{-6}$	N
1	175.75	168.00	1.3888	1.3810	0.000192	16.0	1843318
2	175.25	168.00	1.3885	1.3810	0.000160	24.0	2765574
3	178.75	168.00	1.3884	1.3810	0.000115	28.0	3226736
4	180.25	168.75	1.3883	1.3819	0.000096	32.0	3687964
5	181.75	170.25	1.3880	1.3830	0.000107	34.8	4011527
6	183.25	171.75	1.3878	1.3850	0.000105	38.4	4934429
7	184.75	173.25	1.3875	1.3860	0.000107	42.8	4935318
8	185.99	174.49	1.3874	1.3885	0.000105	28.0	3229062
9	187.49	175.99	1.3872	1.3888	0.000104	76.0	8765859
10	189.25	177.75	1.3870	1.3885	0.000101	80.0	9228338
							46628338

J	Np_1	Np_1	Np_2	
1	265.40	*********	1 263 813	
2	995.25	*********	1 895 834	
3	1390.09	*********	2 211 185	c g/o
4	1857.78	*********	*********	
5	2895.24	*********	*********	
6	3831.71	*********	*********	
7	5143.40	*********	*********	
8	3721.88	*********	*********	pb
9	*******	10471.89	*********	
10	*******	10706.98	*********	

Σ 20100.75 + 21178.87 + 5 370 832 = 5 412 111

$$Np = 5\ 412\ 111\ m^3\ @\ c.s.$$

Entonces:

$$Rec = \frac{5\ 412\ 111}{46\ 628\ 338} = 0.11607$$

Rec = 11.07 % del aceite original.

Para obtener la presión media del yacimiento se hace un promedio de las presiones de cada bloque ponderando con respecto al volumen original de aceite en el bloque:

$$p_v = \frac{\sum \bar{p}_j \, V_j \, \phi_j \, (1-S_w)_j}{\sum V_j \, \phi_j \, (1-S_w)_j}$$

$$p_v = 173.05 \text{ Kg/cm}^2$$

b) Para cuando el contacto gas-aceite se encuentra a una profundidad de 3120 m se aplicó el mismo procedimiento obteniendo:

Volumen de roca en el casquete:

$$V_R = 173.2 * 10^6 \text{ m}^3$$

Presión supuesta en el c g/o:

$$p_{c\,g/o} = 166.5 \text{ Kg/cm}^2$$

Volumen de gas liberado:

	j	$V_R * 10^{-6}$	$\overline{Prof}$	$\bar{p}$	B_g	R_s	G_{gl} (m^3 * [illegible])
	1	16.0	3010	166.50	0.00761	1430.4	976 184
	2	24.0	3030.	166.50	0.00761	1430.4	1 464 276
	3	28.0	3050	166.50	0.00761	1430.4	1 708 322
	4	32.0	3070	166.50	0.00761	1430.4	1 952 368
	5	34.8	3090	166.50	0.00761	1430.4	2 123 200
c g/o	6	38.4	3110	166.50	0.00761	1430.4	2 342 841
	7	42.8	3130	167.25	0.00756	1436.1	2 381 684
	8	47.0	3150	169.75	0.00741	1455.1	1 801 275
	9	57.0	3170	170.25	0.00739	1459.2	1 979 690
	10	80.0	3190	171.75	0.00733	1467.7	2 181 796
							$\sum$ 18 911 636

El volumen de roca ocupado por el gas liberado:

$$V_{gl} = \frac{18\ 911\ 636}{0.2 * 0.55}$$

$$V_{gl} = 172\ 923\ 960 \text{ m}^3 \text{ de roca}$$

La tolerancia:

$$tol = \frac{|173.2*10^6 - 172.92*10^6|}{173.2*10^6} * 100$$

$$tol = 0.1\ \% < 3\%$$

j	p_i	$\bar{p}$	B_{oi}	B_o	c_e	V_R*10^{-6}	N
1	175.75	166.50	1.3888	1.3788	0.000192	16.0	1843318
2	175.25	166.50	1.3885	1.3788	0.000160	24.0	2765574
3	178.75	166.50	1.3884	1.3788	0.000115	28.0	3226736
4	180.25	166.50	1.3883	1.3788	0.000096	32.0	3687964
5	181.75	166.50	1.3880	1.3788	0.000107	34.8	4011527
6	183.25	166.50	1.3878	1.3788	0.000105	38.4	4934429
7	184.75	167.25	1.3875	1.3797	0.000111	42.8	4935318
8	185.99	169.75	1.3874	1.3827	0.000102	47.0	5420210
9	187.49	170.25	1.3872	1.3833	0.000107	57.0	6574868
10	189.25	171.75	1.3870	1.3851	0.000101	80.0	9228551
							46628445

j	$Np_{1\geq gi}$	$Np_{1\geq ob}$	Np_2	
1	265.40	********	1 262 838	
2	995.25	********	1 894 222	
3	1390.09	********	2 209 968	
4	1857.80	********	2 525 676	
5	2895.24	********	2 746 667	
6	3831.71	********	3 378 383	c g/o
7	5335.67	********	*********	
8	6212.53	********	*********	
9	8957.49	********	*********	
10	13263.07	********	*********	
Σ	45005.08 +	******** +	14 017 758 =	14 017 763

$$Np = 14\ 017\ 763\ m^3_o\ @\ c.s.$$

Entonces:

$$Rec = \frac{14\ 017\ 763}{46\ 628\ 445} = 0.3016$$

$$Rec = 30.16\ \%\ \text{del aceite original.}$$

La presión media:

$$\bar{p}_y = 168.546\ Kg/cm^2$$

Resumiendo:

Posición del contacto	Rec	$\bar{p}_y$
3 060 m	11.07%	173.0 Kg/cm^2
3 120 m	30.16%	168.5 Kg/cm^2

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La ecuación de balance de materia es una buena herramienta para analizar el comportamiento de los yacimientos debido a su sencillez y a que aporta resultados confiables.

Se recomienda usar la ecuación de balance de materia para obtener predicciones del comportamiento del yacimiento; y no tanto para obtener el volumen original de aceite. La obtención de este último se debe realizar para asegurar que la ecuación de balance de materia se ajusta a las condiciones del yacimiento.

Los resultados de la ecuación de balance de materia serán válidos mientras prevalezcan en el yacimiento los mecanismos de empuje que se consideraron al aplicarla y son función de la presión media del yacimiento.

Para minimizar errores, la ecuación de balance de materia no debe aplicarse a los primeros períodos de producción, se debe seleccionar cuidadosamente el método de obtención de:

- k [illegible] yacimientos saturados.
- Co en yacimientos bajosaturados.

y al efectuar predicciones se debe tratar de usar intervalos pequeños de presión.

Se recomienda su uso para ajustar ciertos parámetros del yacimiento como lo son: el volumen original de aceite, entrada de agua al yacimiento,etc; antes de aplicar simuladores complejos.

En yacimientos con casquete de gas y/o entrada de agua, es recomendable la existencia de pozos de observación para determinar la posición real de los contactos entre los fluidos.

Esta serie de problemas tiene el propósito de cubrir todo el curso de Comportamiento de Yacimientos; se recomienda resolverlos en el orden establecido, para ir reafirmando los conceptos necesarios para los problemas subsecuentes (aun cuando la solución de cada uno de ellos es independiente de los demás). Se debe tener presente que el método de solución presentado para cada problema puede no ser único y que todos los datos usados en el planteamiento de los problemas presentados son hipotéticos.

NOMENCLATURA

A continuación se presenta una lista de los símbolos empleados en el desarrollo de este trabajo. Las unidades de medición usadas se indican en cada uno de los ejercicios, por lo cual aquí no se presentan.

A	Area.
A	Indice de empuje por expansión del sistema roca-fluidos en yacimientos bajosaturados.
A	Indice de empuje por expansión del aceite original en yacimientos saturados.
B	Factor de volumen.
B	Indice de empuje por entrada neta de agua en yacimientos bajosaturados.
B	Indice de empuje por expansión del casquete de gas. (Yacimientos saturados).
c	Factor de compresibilidad isotérmica.
C	Constante numérica.
C	Constante de entrada de agua.
C	Indice de empuje por entrada neta de agua en yacimientos saturados.
E	Expansión.
ENW	Entrada neta de agua al yacimiento.
EVW	Eficiencia volumétrica del agua desplazante.
F	Producción neta de fluidos @ c.y.
G	Volumen original de gas @ c.s.
Gp	Volumen producido acumulado de gas @ c.s.
H	Espesor.
J	Indice de productividad.
K	Constante numérica.
k	Permeabilidad absoluta.
k_f	Permeabilidad efectiva al fluido f.
k_{rf}	Permeabilidad relativa al fluido f.
m	Relación entre los volúmenes originales de gas y aceite en el yacimiento.
n	Número de moles.
N	Volumen original de aceite @ c.s.

N_p Volumen acumulado de aceite producido @ c.s.

p Presión.

p_{ws} Presión estática.

p_{wf} Presión de fondo fluyendo.

Prof Profundidad.

q Ritmo o gasto de produccion.

$Q(\bar{t})$ Entrada adimensional de agua al yacimiento.

r Radio.

r_e Radio de drene.

r_w Radio del pozo.

R Constante del gas.

R Relación gas-aceite instantánea.

Rs Relación gas disuelto-aceite.

S_f Saturación del fluido f.

t Tiempo.

$\bar{t}$ Tiempo adimensional.

T Temperatura.

V Volumen.

VGLR Volumen de gas residual.

VIW Volumen de agua inyectada.

We Entrada de agua al yacimiento.

Wp Volumen acumulado de agua producida @ c.s.

Z Factor de desviación del gas real. (También llamado factor de supercompresibilidad.

Δ Diferencia o incremento.

ρ Densidad.

ϕ Porosidad.

μ Viscosidad.

α Exponente de Stanley (α = 0.8, flujo radial ; α = 0.5, flujo lineal).

@ c.s. "Medido a condiciones estándar".

@ c.y. "Medido a condiciones de yacimiento".

SUBINDICES

b Condiciones de burbujeo.

bs Bajosaturación.

c Crítica.

d	Disuelto.
e	Efectiva. extraído.
f	Formación.
g	Gas.
i	Inicial. invadida. de invasión.
iny	Inyección.
l	Libre. lavada.
max	Máximo.
o	Aceite.
p	Pura, poros.
r	Residual.
s	Sólidos, saturación.
t	Total.
w	Agua.
y	Yacimiento.
z	Zona.
zig	Zona invadida de gas.
ziw	Zona invadida de agua.
zl	Zona lavada.
zni	Zona no invadida.
1	Condiciones iniciales.
2	Condiciones finales.

BIBLIOGRAFIA

- Amix, J. W.: "Petroleum Reservoir Engineering. Physical properties" ; McGraw-Hill Co. 1960.

- Craft, B. C. And Hawkins, M. F.: "Applied Petroleum Reservoir Engineering"; McGraw-Hill Book Co. 1958.

- Garaicochea,F. y Bashbush, J.L.; "Apuntes de Comportamiento de Yacimientos"; Facultad de Ingeniería. UNAM.

- Garaicochea, F. "Problemas del curso de Comportamiento de yacimientos" División de Ciencias de la Tierra. Depto. de Explotación del Petróleo. Edición interna.

- Hall, Howard N.: "Compressibility of Reservoir Rocks."; Petroleum Transactions, AIME Vol. 198, 1953.

- Muskat, M.; "Physical Principles of Oil Production"; McGraw Hill Book Co. 1949.

APENDICE A

A continuación se presentan correlaciones para la determinación de la compresibilidad del agua del yacimiento y de la roca.

Primero se presenta la correlación de Dodson y Standing para la determinación de la compresibilidad del agua congénita (c_w) y comprende de la figura A.1 a la figura A.4, que se usan de la siguiente manera: .

Datos necesarios:

Presión media del yacimiento (Kg/cm^2)
Temperatura del yacimiento ($^\circ$C)
Salinidad (ppm)

Determinación:

a) Entre a la figura A.1 en el eje de las abscisas con el valor de la temperatura y suba verticalmente hasta la curva de presión correspondiente a la presión media. Lea el valor de la ordenada correspondiente a ese punto; este valor será la relación gas disuelto-agua pura (R_{swp}).

b) Entre a la figura A.2 en el eje de las abscisas con el valor de la salinidad y suba hata la curva de temperatura correspondiente a la T_y. Lea el valor de la relación (R_{sw}/R_{swp}) en el eje de las ordenadas. (Este es un factor de corrección por salinidad).

c) Obtenga R_{sw} mediante:

$$R_{sw} = \left[\frac{R_{sw}}{R_{swp}} \right] * R_{swp}$$

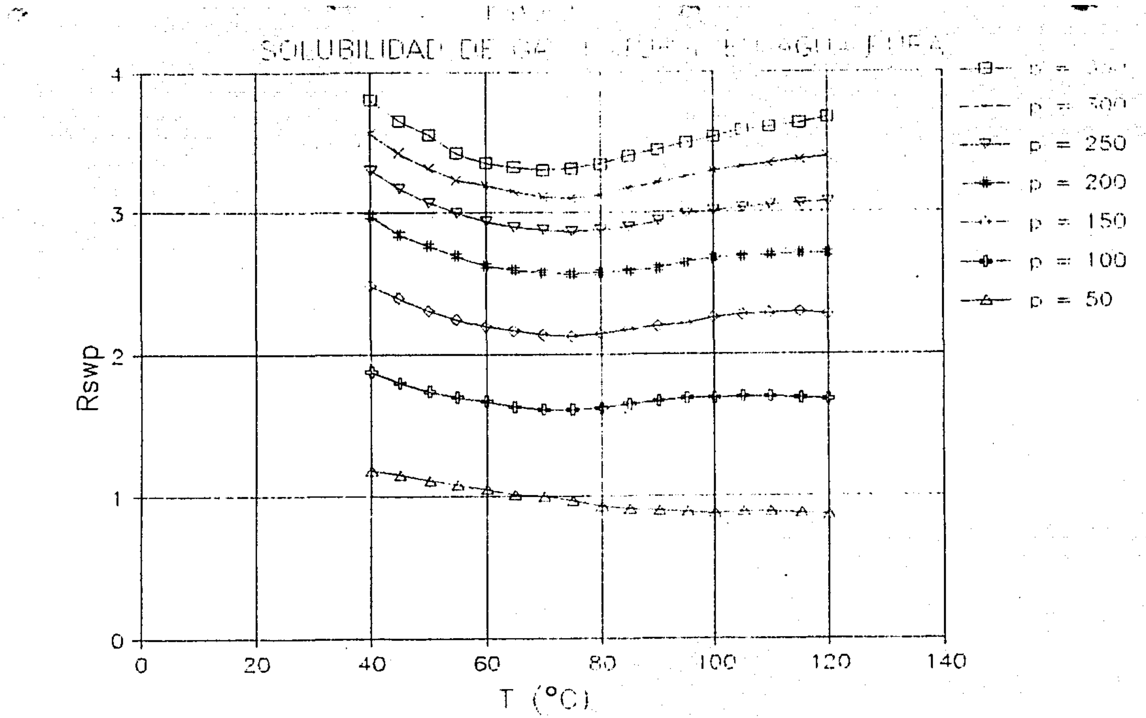
d) Entre a la figura A.3 con la T_y en el eje de las abscisas y suba hasta la curva de presión correspondiente a la $\overline{p}$ del yacimiento. En el eje de las ordenadas se lee el valor de la compresibilidad del agua pura (c_{wp}).

e) De la figura A.4 obtenga la relación (c_w/c_{wp}) entrando en el eje de las abscisas con la R_{sw} obtenida en c).

f) Finalmente obtenga la compresibilidad del agua del yacimiento con:

$$C_w = \left[\frac{C_w}{C_{wp}}\right] * C_{wp}$$

Después se presenta la correlación de Howard N. Hall para la determinación de la compresibilidad efectiva de la formación. Esta compresibilidad expresa el cambio de un volumen unitario de poros por cada unidad de variación de presión. Unicamente se requiere como dato la porosidad en valor porcentual y de la figura A.5 se obtiene directamente la compresibilidad de la formación (c_f).



SOLUBILIDAD DE GAS ... AGUA PURA
Rswp
T (°C)
p = 300
p = 250
p = 200
p = 150
p = 100
p = 50
0
1
2
3
4
0
20
40
60
80
100
120
140

FIGURA A.2

CORRECCION POR SALINIDAD

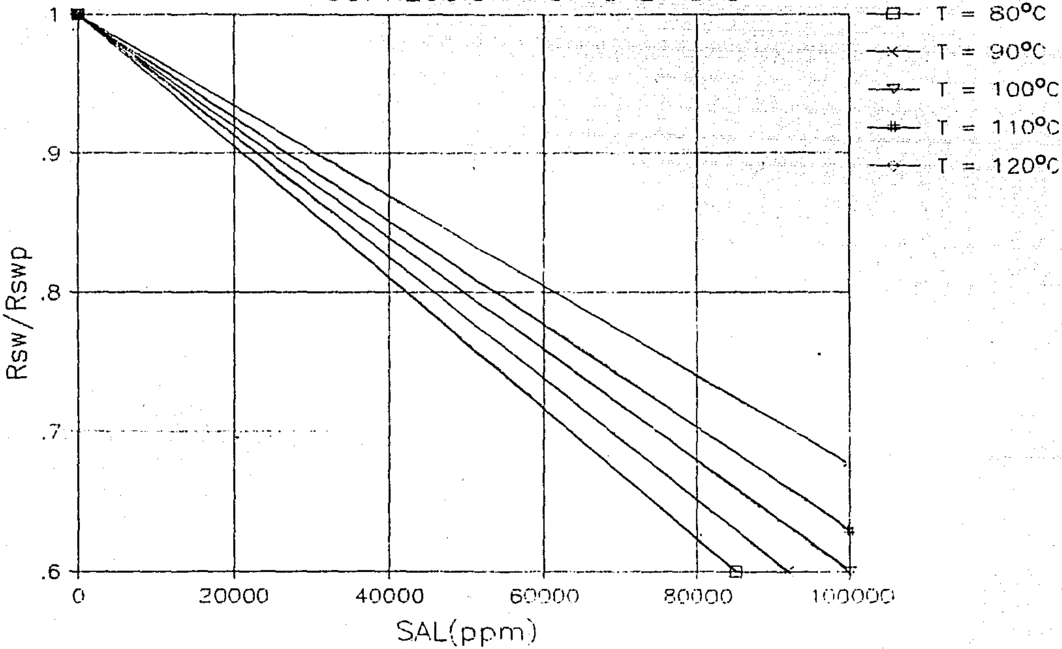


FIGURA A5

COMPRESIBILIDAD DEL AGUA PURA

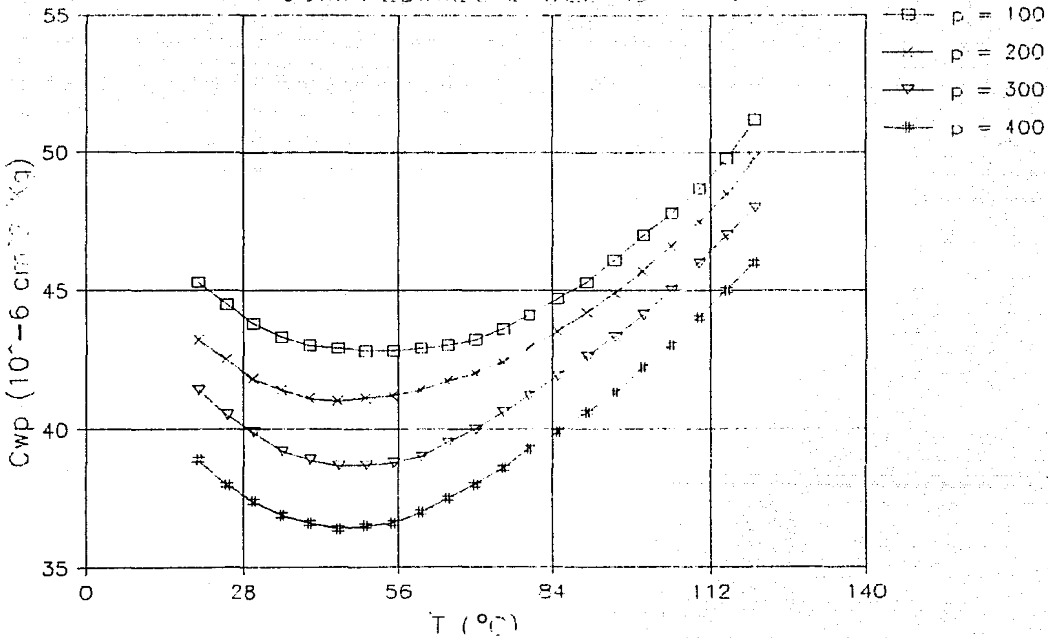


FIGURA A.4

CORRECCION POR GAS EN SOLUCION

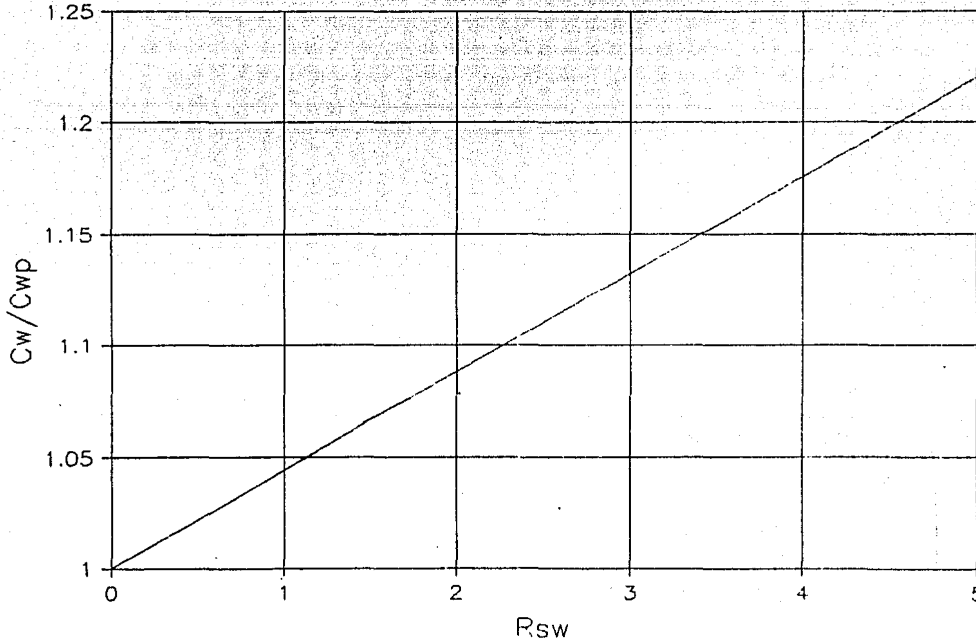


FIGURA A.5

COMPRESIBILIDAD DE LA FORMACION