

APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DEL X-PLOT AL ESTUDIO DE LA ENTRADA DEL AGUA EN EL RESERVORIO DE SIDI E1-ITAYEM, TÚNEZ

**Ershaghi, SPE, U. de California del Sur
LJ.. Handy, SPE, U. de de California del Sur
M.. Hamdi, U. de California del Sur**

SPE 14209

La técnica **X-PLOT** es un método aplicable a yac. petrolíferos bajo la inyección del agua o empuje natural de agua.

El procedimiento es una linearización del gráfico del corte del agua vs. la recuperación, permitiendo la extrapolación a cortes elevados:

$$E_R = mx + n \quad (1)$$

E_R = eficiencia de la recup. total del reservorio, N_p/N

N = petróleo inicial en el lugar, STB [m^3 en cond. tanque]

N_p = producción de petróleo acumulado, bbl [m^3]

Además con la información del campo, se puede obtener la curva de la relación de las k_r .

Este paper muestra como a partir de la ec. 1 tanto en una simulación, como con los datos de la actuación del campo puede obtenerse una **estimación del agua producida a cualquier alto valor del corte desde la pendiente del X-PLOT**

El procedimiento X-PLOT requiere graficar vs. la **recuperación fraccional**.

$$X = \ln\left(\frac{1}{f_w} - 1\right) - \frac{1}{f_w}$$

En ausencia de efectos de estratificación **se obtiene un gráfico lineal para valores de corte superiores a 50%** . La formación de una línea recta indica que la actuación está siendo controlada por la relación de las permeabilidades relativas característica del reservorio.

El volumen poral invadido a cualquier f_w de la ec. del avance frontal puede ser expresada como:

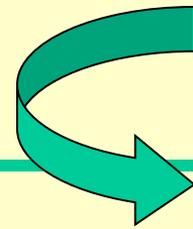
$$V_{pi} = \frac{1}{(df_w / dS_w)} \quad (2)$$

V_{pi} = número de vol. porales invadidos

En la práctica, (2) requiere una curva k_r válida para todo el campo
Si expresamos la recuperación de petróleo en términos de los **volúmenes actualmente producidos**, la ec. 1 se escribirá como:

$$x = m' N_p + n'$$

dónde: $m' = 1/ (Nm)$ y $n' = - n/m$



del paper de Ershaghi–Omoregie: $V_{pi} = -1/[bf_w (1-f_w)]$ (3)

b = pend. de k_o/k_w vs. S_w en semilog $b = 1/[m(1-S_{wi})]$

Entonces de la definición de m'

$$V_{pi} = -m(1-S_{wi})/[f_w (1-f_w)] = -(1-S_{wi})/[mN f_w (1-f_w)]$$

Ahora el agua producida en términos del volumen actual puede estimarse de:

$$W_i = -B_{oi} / [m' f_w (1-f_w)] \quad (4)$$

donde $m' = 1/(Nm)$ es en 1/volumen.

TABLE 1—PERFORMANCE OF THE SIMULATED WATERFLOOD

Year	Water Cut	x	Cumulative Oil (STB)
3	0.8881	3.1975	204,228
3.5	0.9066	3.3758	212,776
4	0.9200	3.5293	220,109
4.5	0.9295	3.6549	226,530
5	0.9369	3.7652	232,747
5.5	0.9429	3.8647	237,406
6	0.9478	3.9541	242,106
6.5	0.9520	4.0378	246,422
7	0.9556	4.1156	250,409
7.5	0.9586	4.1854	254,113
8	0.9614	4.2553	257,570
8.5	0.9637	4.3166	260,810
9	0.9657	4.372	263,864
10	0.9681	4.4775	268,506
12	0.9742	4.6577	279,266
15	0.9794	4.8877	291,259

$$W_i = \frac{1.258}{1.88 \times 10^{-5} (1 - 0.9794)(0.9794)} = 3,316,427 \text{ bbl}$$

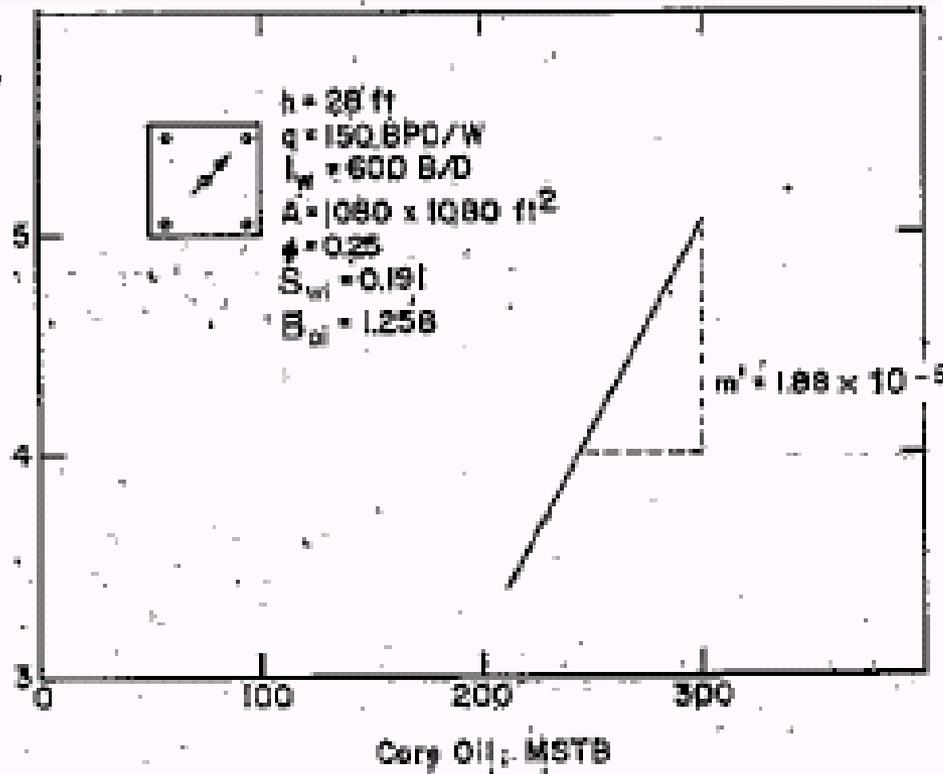


Fig. 1—x-plot of the simulated waterflood.

La figura 1 muestra el X-PLOT del **Caso 1**, una secundaria simulada. La Tabla 1 muestra la similitud de los datos de la actuación. El **m'** **computado del gráfico es $1,88 \times 10^{-5} \text{ 1/bbl}$** . A un corte de agua de 0,9794, le corresponde una inyección total de **3.316.427 bbl**, verificando la actual inyección de **3.285.000 bbl** (un inyector a 600 BWPD por 15 años).

$$W_i = -B_{oi} / [m' f_w (1 - f_w)]$$

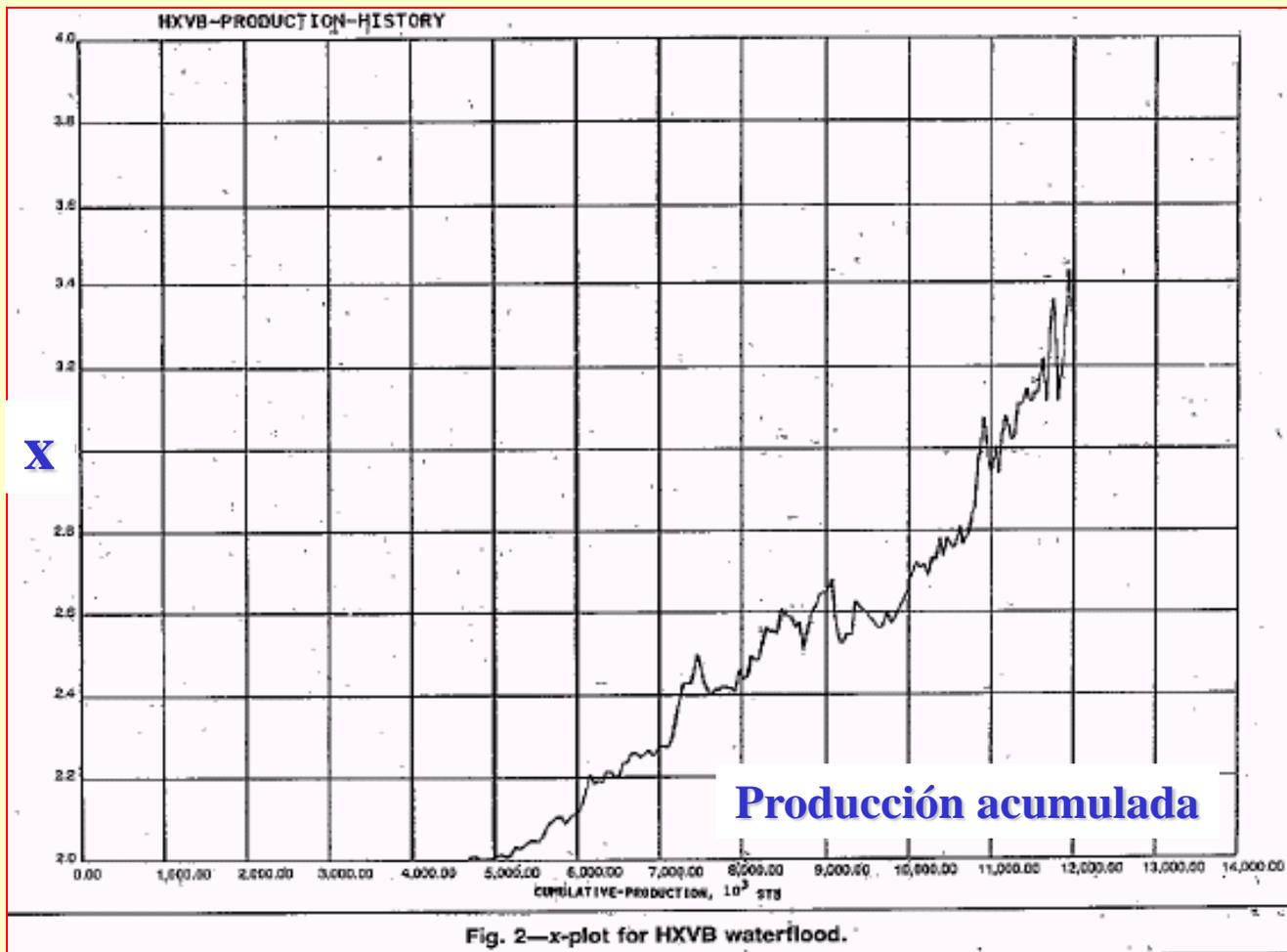


Fig. 2—x-plot for HXVB waterflood.

La **Figura 2** muestra el X-PLOT para una secundaria en Wilmington. Del cálculo de W_i , la inyección total al corte de 0,9103 se estima será **76.530.431 bbl**. Esto es un total acuerdo con el **volumen de inyección real de 77.516.746 bbl**, considerado los errores en la estimación de B_o y m'

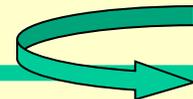
Aplicación al cálculos del ingreso de agua de una acuífera

Se han propuesto varias técnicas para estimar la cantidad de agua acumulada que ha entrado en reservorios de gas y petróleo. Entre estas están:

- la teoría de van Everdingen y Hurst en estado inestable.
- el método aproximado de Fetkovitch,
- el método de Carter y Tracy,
- el método de Balance de Material.

Una estimación de la entrada acumulada de agua a cualquier tiempo con esas técnicas requiere el dato de presión del reservorio y además de la historia de la actuación.

La técnica propuesta en este paper considera que **un reservorio con empuje de agua es análogo a un reservorio bajo inyección de agua**. Sin tener en cuenta el caudal de inyección y la presión, el agua acumulada producida es controlada por la curva compuesta de k_r , que describe el flujo de petróleo y agua en el reservorio, la que incluye la influencia de la eficiencia de barrido vertical en el sistema.



Considere el X-PLOT de un **reservorio de tres capa**. Como se muestra en la Figura 3, la rotura en las sucesivas capas resulta en un cambio en el gráfico. **Si la característica de la relación de la k_r de las tres capas es idéntica, entonces la tendencia es a permanecer paralelas. La línea recta final representa la conducta compuesta del depósito.** La pendiente de esta tendencia compuesta se usa para estimar la entrada de agua a cualquiera corte de agua alto.

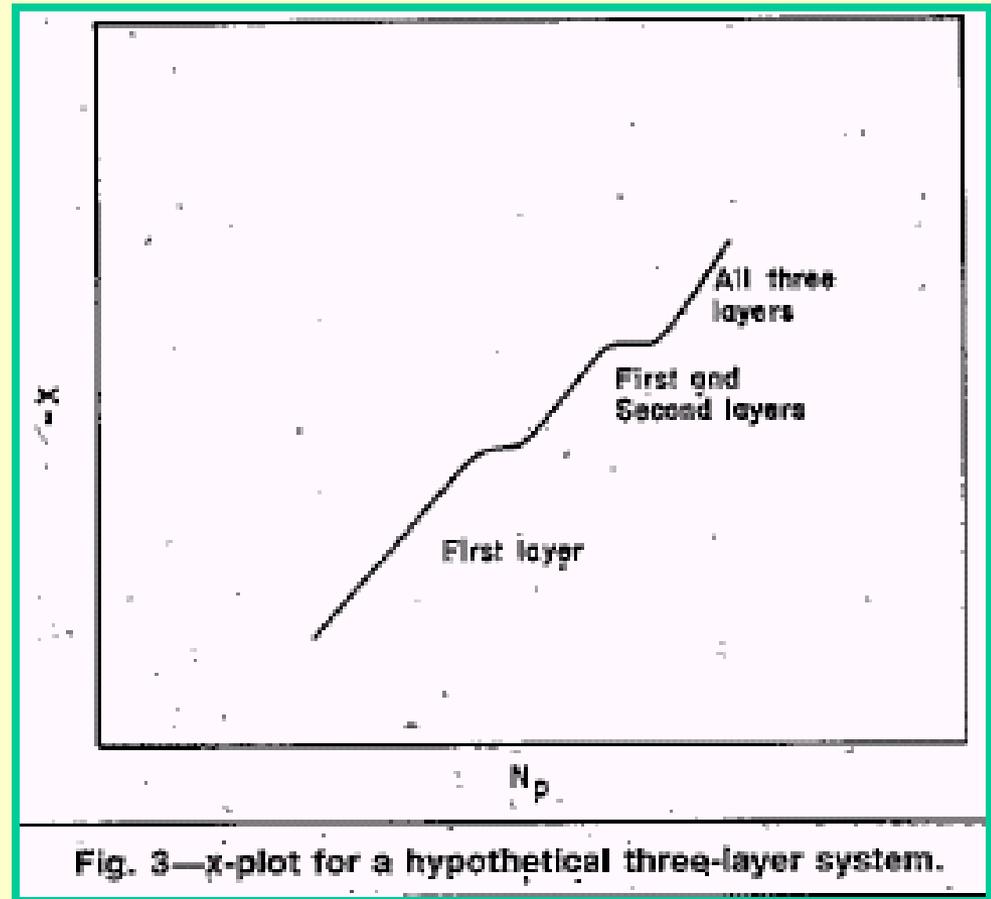


Fig. 3—x-plot for a hypothetical three-layer system.

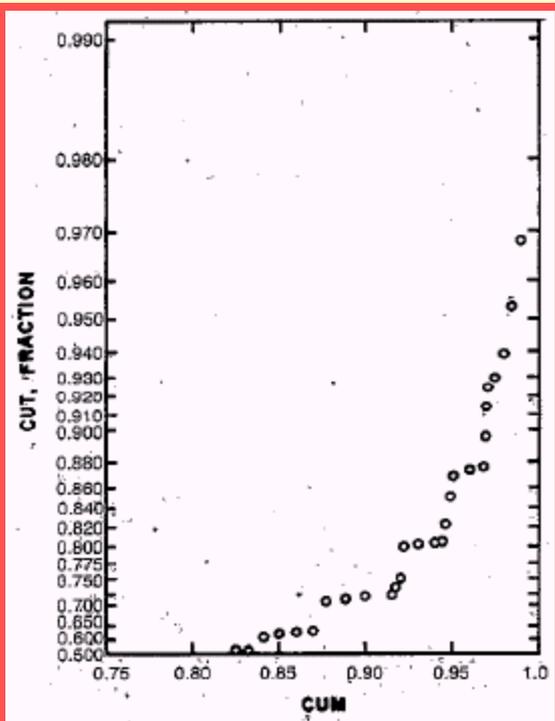


Fig. 4—x-plot for a 10-layer reservoir with mobility ratio = 0.125 (data from Snyder and Ramey⁴).

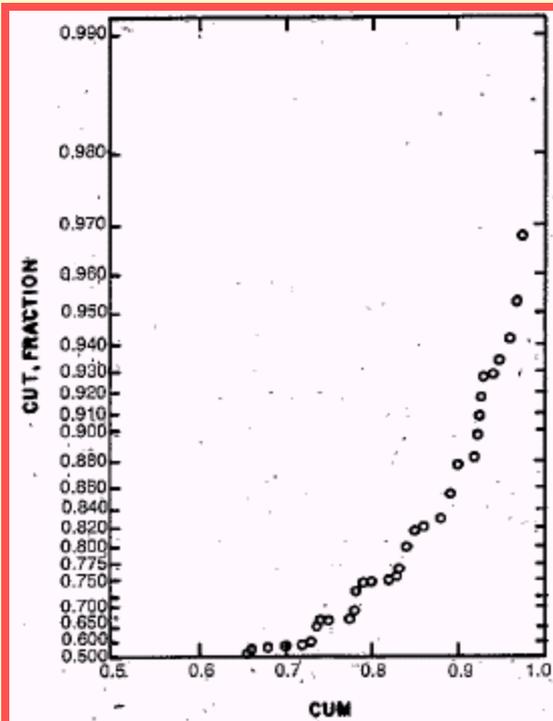


Fig. 5—x-plot for a 10-layer reservoir with mobility ratio = 1.0 (data from Snyder and Ramey⁴).

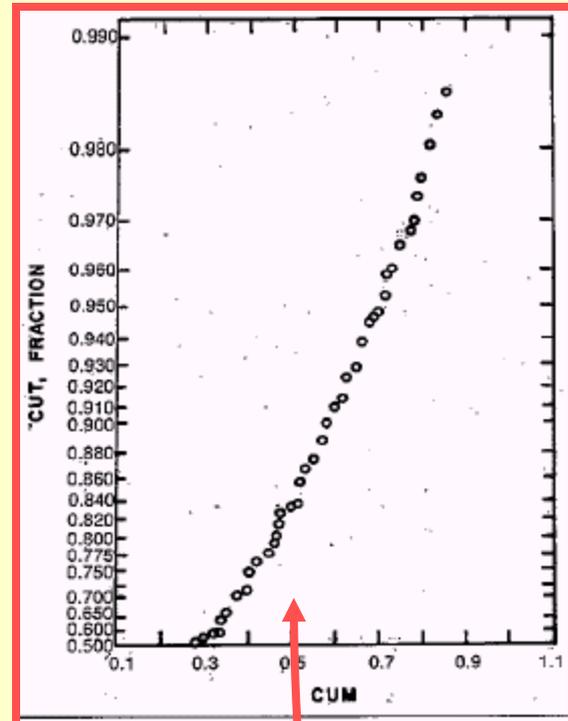


Fig. 6—x-plot for a 10-layer reservoir with mobility ratio = 10 (data from Snyder and Ramey⁴).

Snyder y Ramey en su discusión sobre sistemas estratificados, indicaron que la relación de movilidades entre agua y petróleo también afecta la forma de la curva del WOR vs. la recuperación. Para $M > 1$, la naturaleza de la función escalón del gráfico de X vs. la recuperación desaparece y desarrolla una forma mas lisa. Las figuras 4 a 6 muestra el X-PLOT para $M = 0,125$, 1, y 10 respectivamente. La curvatura final del gráfico es causada por la naturaleza de la ecuación de la k_r usada por Snyder y Ramey.

Aplicación al reservorio de Sidi E1-Itayem

El reservorio de Sidi E1-Itayem se localiza en el lado norte de Sfax, Túnez (Figura 7). Este reservorio, descubierto en 1971, es un **reservorio de carbonato que consiste en varios bloques** (figura 8). El intervalo productivo es una caliza numulítica, que consiste en **tres capas con un espesor total de 52 m**. Los análisis de los datos de coronas de tres pozos indican una matriz de **baja k**, yendo de **0,6 a 2,4 md**, y θ desde **3,8 a 14,4%**. Otros detalles sobre las propiedades del reservorio se listan en la Tabla 2.

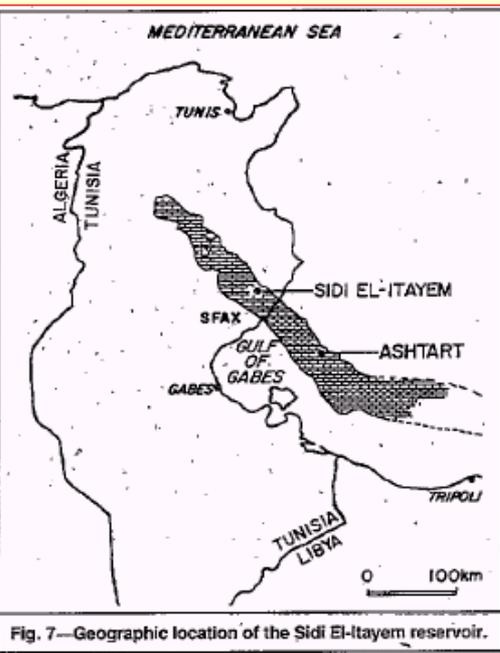


Fig. 7—Geographic location of the Sidi El-Itayem reservoir.

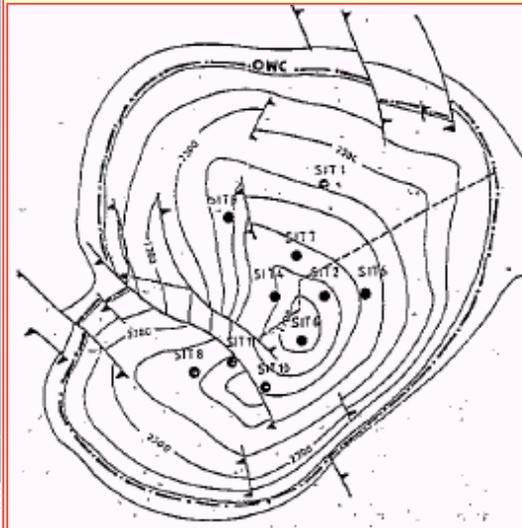
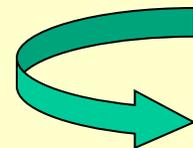
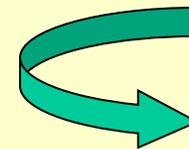
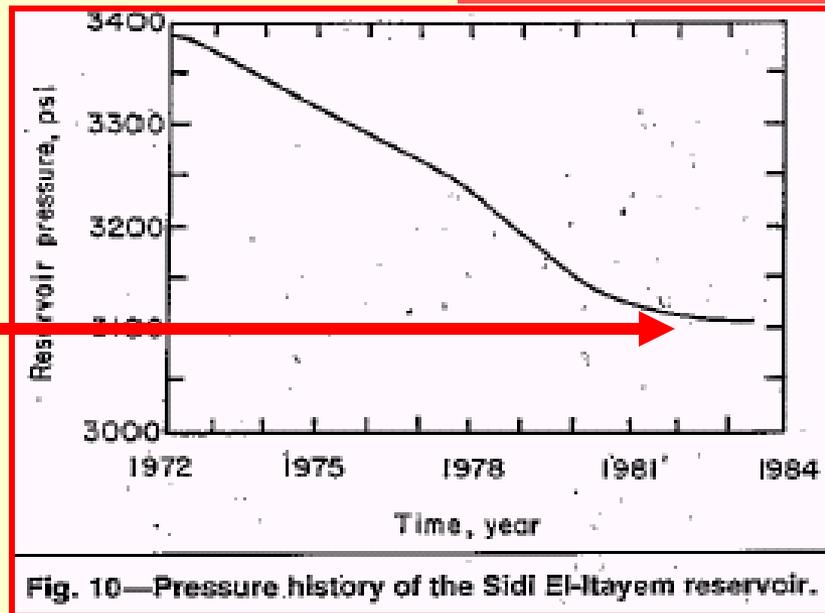
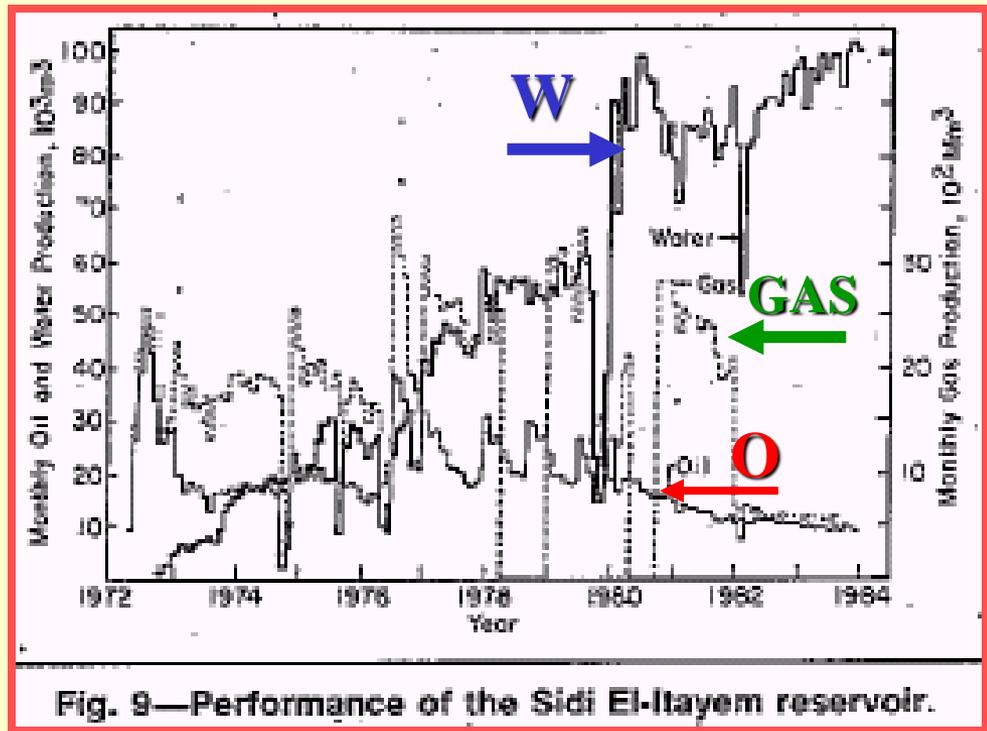


Fig. 8—Structural location of wells in Sidi El-Itayem.

Average formation thickness, ft	17
Original reservoir pressure, psi	3,385
Reservoir temperature, °F	246
Average porosity, %	8.4
Average matrix permeability, md	1.3
Average initial water saturation, %	0.2
Oil gravity, °API	40
Oil viscosity, cp	0.44
Water viscosity, cp	0.4
Bubblepoint pressure, psi	1,195
Initial oil FVF, RB/STB	1.24
Estimated initial oil in place, STB	132×10^6



El presencia de una acuífera activa puede ser detectada examinando la historia de actuación. **Aumentan las tendencias del WOR** y se **estabiliza la presión del reservorio** como se muestra en la figura 9 y 10.



El corte de agua aumenta vs. la producción acumulada en varios pozos mostrando un arreglo no uniforme. Los pozos en la zona del sur del reservorio muestran mayor incremento de la relación que los del norte. **La producción de agua es parcialmente controlada a través del cierre de los pozos con altos cortes.** La **Tabla 3** muestra el resumen de los **cálculos de los volúmenes de agua entrada al reservorio y la estimación individual por pozo** con el procedimiento propuesto.

TABLE 3—SUMMARY OF W_i COMPUTATIONS FOR SIDI EL-ITAYEM FIELD

x-plot	m' (1/m ³)	f_w (Dec. 1983)	W_i (10 ⁶ m ³)	W_p (10 ⁶ m ³)	N_p (10 ⁶ m ³)	G_p (10 ⁶ m ³)
Entire field	1.7×10^{-6}	0.9209	10.013	6.99	2.58	1.224
Southern part (Wells Sit-06, 08, 10 and 11)	6.47×10^{-6}	0.9467	3.79	3.35	0.643	0.433
Northern part (Wells Sit-01, 02, 04, 05, 07, and 09)	1.885×10^{-6}	0.8797	6.215	3.64	1.74	0.79
Well Sit-01	1.294×10^{-4}	0.8507	0.517	0.173	0.0907	0.028
Well Sit-02	1.294×10^{-4}	0.9410	1.726	1.987	0.978	0.533
Well Sit-04	2.022×10^{-4}	0.7106	0.240	0.054	0.189	0.056
Well Sit-05	2.647×10^{-6}	0.9471	0.934	0.844	0.224	0.106
Well Sit-06	2.647×10^{-6}	0.973	1.438	1.486	0.449	0.242
Well Sit-07	1.655×10^{-6}	0.8209	0.410	0.396	0.214	0.049
Well Sit-08	9.1×10^{-6}	0.9524	0.30	0.353	0.145	0.065
Well Sit-09	5.5×10^{-6}	0.8841	2.199	0.183	0.042	0.0169
Well Sit-10	4.101×10^{-6}	0.9515	0.654	0.49	0.10	0.054
Well Sit-11	2.891×10^{-6}	0.9641	1.239	1.076	0.149	0.071

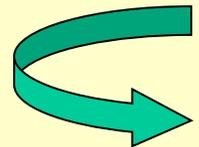
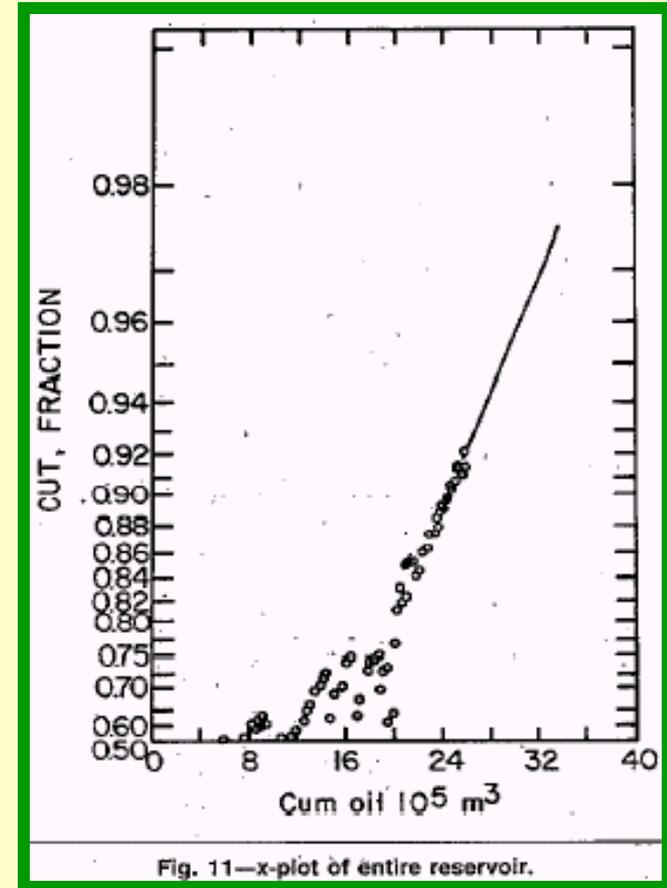
El examen del X-PLOT para el reservorio entero (Fig. 11) presenta una tendencia temprana relacionada a la conducta combinada de los pozos Sit-01 a Sit-05.

La adición del Sit-06 estabilizó el corte, pero una tendencia similar se desarrolló entonces y continuó hasta fines de 1977.

Después, la suma de Sit-07 a Sit-11 resultó en un período de fluctuaciones del corte. El pozo Sit-11 fue completado en 1979, y desarrolló una tendencia relativamente estable con $m' = 1,70 \times 10^{-6} \text{ 1/m}^3$. Esto corresponde a la estimación del volumen de agua entrada de $10,013 \times 10^6 \text{ m}^3$ a un corte de agua de 0,9209 como se muestra:

$$W_i = \frac{1,24}{1,7 * 10^{-6} * 0,9209(1 - 0,9209)} = 10,013 * 10^6 \text{ m}^3$$

De un cálculo de balance de material para el reservorio, que está por encima del punto de burbuja obtuvimos una entrada de agua de $10,399 * 10^6 \text{ m}^3$.



Los datos usados en el balance de material se muestran en la Tabla 4

Se usó la ec. de estado inestable del método de van Everdingen y Hurst para verificar los resultados, en la Tabla 5 se muestra la información adicional usada.

Si se usa una k_{matriz} de 1 a 2 md, se obtienen respuestas no lógicas a cualquier rango aceptable de r_{eD} . Por prueba y error, se vio que por ej., usar $k=200$ md y $r_{eD}=10$ resultan en $W_i=10,07*10^6$ m³. Esta $k \gg k_{matriz}$ lo que indica la presencia de una red de fracturas de alta k en el reservorio.



TABLE 4—DATA FOR WATER INFLUX ESTIMATION FROM THE MATERIAL-BALANCE METHOD

N_p , STB	16.24×10^6
N_i , STB	132×10^6
B_{oi} , RB/STB	1.24
B_{oi} , RB/STB	1.25
p_i , psia	3,185
p_o , psia	3,108
c_f , psi ⁻¹	5×10^{-5}
S_{wi}	0.2
c_w	3.6×10^{-6}
W_p , bbl	43.9×10^6
c_{oi} , vol/vol-psi	1.047×10^{-4}

$$W_o = N_p B_o + W_p B_w + \frac{NB_{oi}}{1 - S_{wi}} (p_i - p_o) [c_o (1 - S_{wi}) + c_f + c_w S_{wi}]$$

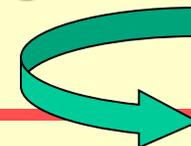
TABLE 5—RESERVOIR DATA FOR CALCULATION OF WATER INFLUX USING THE UNSTEADY-STATE APPROACH

c_f , psi ⁻¹	8.6×10^{-6}
$\theta/360$	1
r_o , ft	6,100
B_{wi} , RB/STB	1.00
U , bbl/psi	5,113
k , md	300
r_{eD}	10

$$W_o(t) = U \sum_{j=0}^{n-1} \Delta p_j W_o(t_o - t_{oj})$$

Análisis y Cálculos de W_i

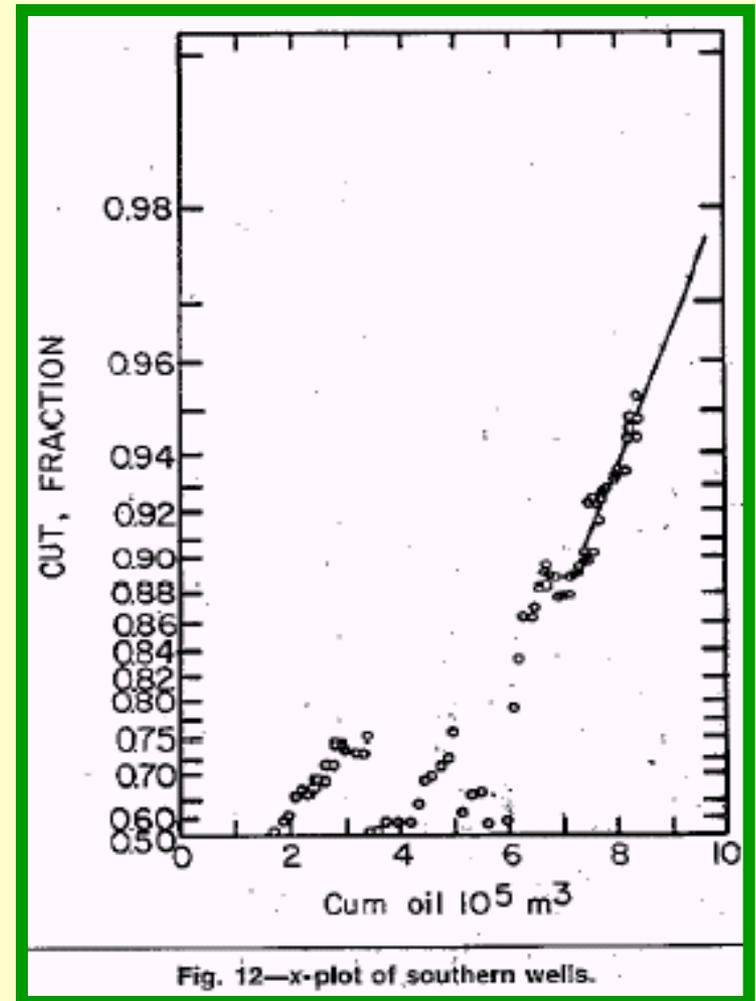
- ✓ La habilidad de estimar la cantidad de agua ingresada en el área de drenaje de pozos individuales abren nuevas posibilidades a la caracterización de reservorios.
- ✓ Por ej. la tendencia direccional del movimiento del agua puede mapearse y el desempeño de los pozos puede compararse a similares posiciones con respecto al contacto del W-O.
- ✓ Si las pendientes de los X-PLOT para pozos individuales son equivalentes, entonces el contorno cronológico de los W_i tendrá la misma forma como el contorno de los cortes de agua equivalentes.
- ✓ Pero cuando los pozos exhiben pendientes diferentes, a un dado corte de agua los W_i para pozos individuales serían diferentes.
- ✓ Esta es una importante herramienta de diagnóstico para estimar las heterogeneidades del reservorio.



Para el reservorio Sid E1-Itayem, se computó un total de $3,79 \times 10^6 \text{m}^3$ de **agua entrada del sur**, usando la actuación combinada de pozos Sit-06, 08, 10 y 11 mostrados en Fig. 11 (proyección 13).

En cálculo separado se obtuvo $6,21 \times 10^6 \text{m}^3$ de **entrada de agua de los pozos del norte** (Sit 01, 02, 04, 05, 07 y 09) mostrado en Fig. 12. **La suma de las dos está de acuerdo razonablemente bien con la entrada computada para el reservorio entero.**

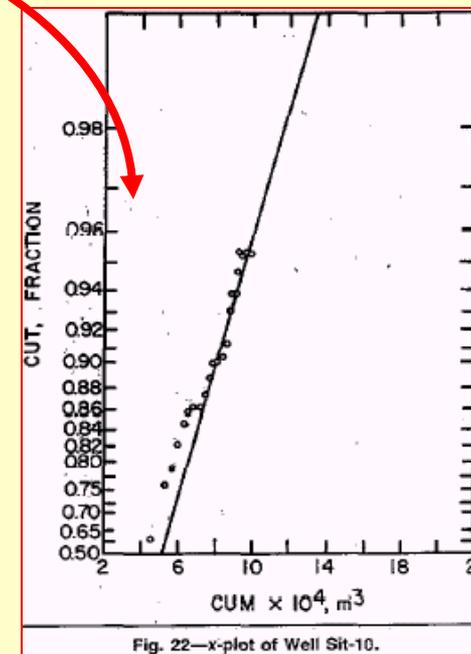
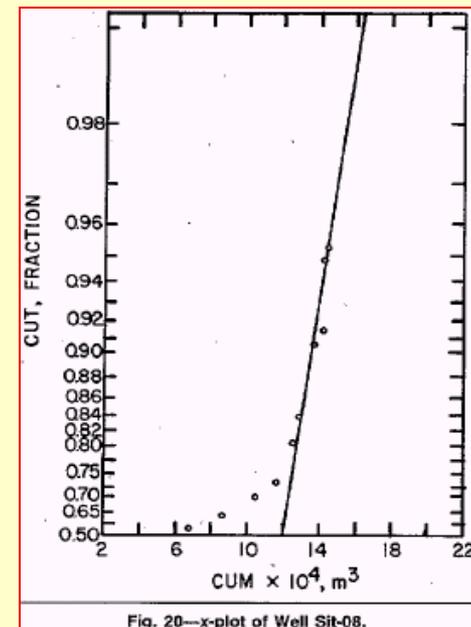
La pendiente de la actuación combinada de los pozos del sur indica pobres recuperaciones frente a los pozos de la parte del norte.



Similarmente, la pendiente del X-PLOT para los pozos individuales y grupos de pozos puede ser comparada (Fig. 11 a 23).

Entre los pozos del sur, por ej el pozo Sit -08 con **una gran pendiente muestra un bajo W_i** frente al pozo Sit -10 a similar corte de agua.

Esto significa que si el pozo Sit-08 hubiera continuado produciendo uno habría esperado que a un corte de agua de 0,98 con el tiempo 0,654 x 10⁶ m³ de agua habrían invadido su área de drenaje. El pozo Sit - 10 mostraba un corte de sólo 0,9515 para esta cantidad de invasión.



Conclusiones

- 1. Como una extensión de la técnica X_PLOT, se propone un método que permite estimar la producción de agua a cualquier corte de agua usando los datos de actuación del reservorio.**
- 2. La aplicación del procedimiento se ha demostrado para secundarias y cálculos de acuíferas activas.**
- 3. La comparación de los cálculos de W_i computados para los pozos individuales en un reservorio pueden servir como medida de la dirección del movimiento del agua y de heterogeneidades del reservorio.**