

II FUNDAMENTOS DE LA SIMULACION NUMERICA DE RESERVORIOS

RESERVORIOS III

2024

Agenda

- ✓ Ecuación de flujo en medios porosos
- ✓ Discretización de la ecuación de flujo para distintos tipos de fluidos
- ✓ Ejemplos de reservorios heterogéneos. Cálculo de la transmisibilidad. Variación de parámetros vs P.

Ecuación de flujo en medios porosos

Ecuación de conservación de masa

Es una ecuación de balance material escrita para un componente en un volumen de control del sistema a ser modelado. En reservorios de petróleo el volumen de control es una porción de medio poroso que contiene una, dos o tres fases fluidas. El medio poroso es tratado como un continuo cuyas propiedades físicas en cualquier punto son las de un elemento representativo del medio.

Ecuación de Darcy

Se tienen en cuenta las siguientes suposiciones y limitaciones: fluido homogéneo, monofásico y newtoniano. No existe reacción química entre el fluido y el medio poroso. Flujo laminar. La k es independiente de la presión, la temperatura y del fluido. No existe efecto klinkenberg. No hay efectos electrocinéticos.

Ecuaciones de estado

Una ecuación de estado relaciona la densidad con la Presión y la Temperatura. Una manera simple de expresar esta relación es a través del Factor de volumen. (El factor de volumen puede expresarse como una relación entre volúmenes o entre densidades.

Ecuación de flujo en medios porosos

Fluidos incompresibles

**Fluidos poco
compresibles**

Fluidos compresibles

Flujos estacionarios

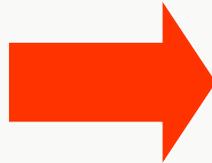
- ✓ Para un fluido y medio poroso incompresible

$$\rho \neq f(p) \quad c = 0 \text{ o } \rho \text{cte para toda } p$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = 0$$



**LAS SOLUCIONES
SON INDEPENDIENTES
DEL TIEMPO Y
DEPENDIENTES
DEL ESPACIO**

Flujos estacionarios

Para un fluido y medio poroso incompresible



Todas las propiedades son estacionarias o constantes en el tiempo

Flujos no estacionarios

- ✓ Para fluidos poco compresibles y compresibles

$$\rho = f(p) \quad c > 0$$

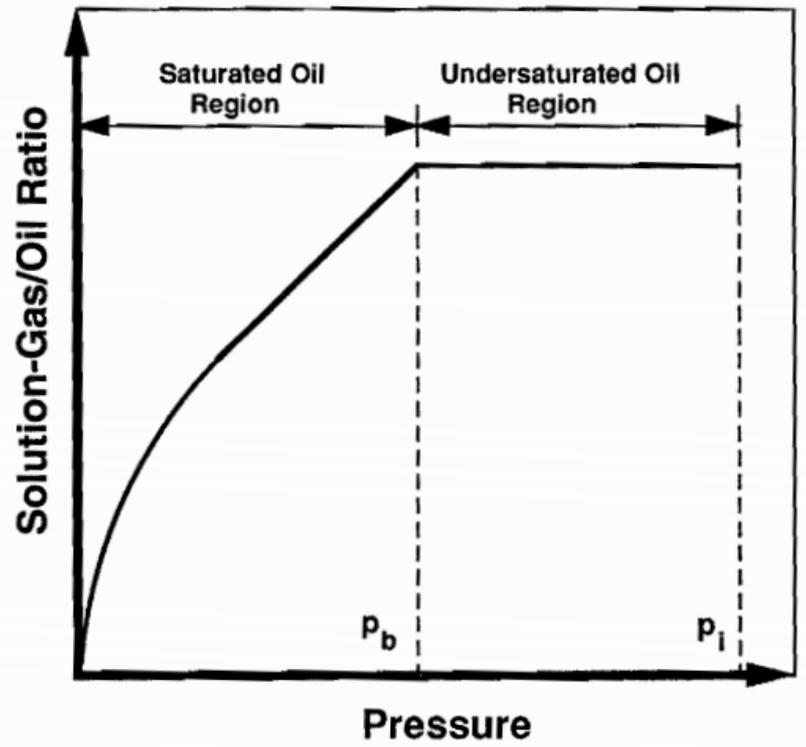
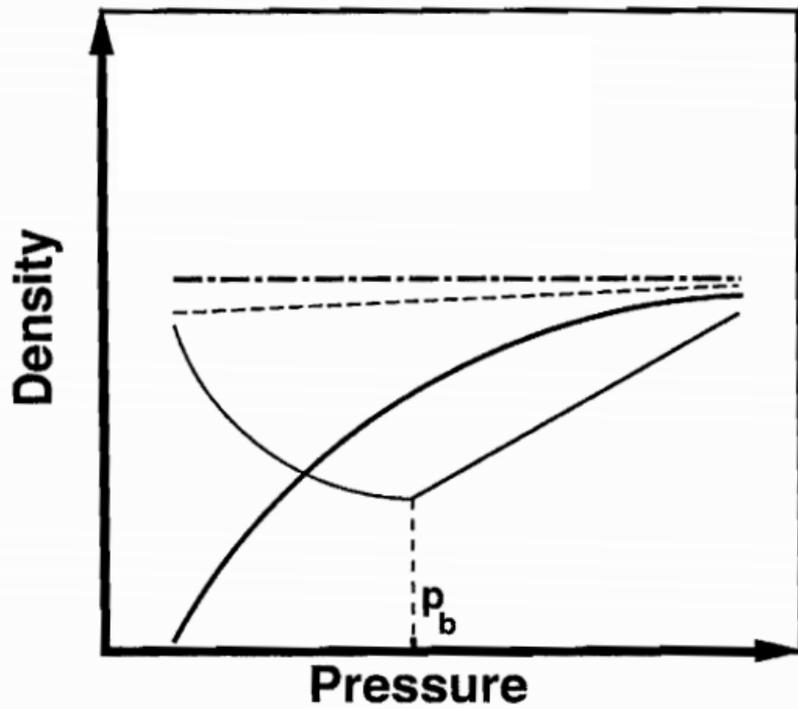
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \neq 0$$

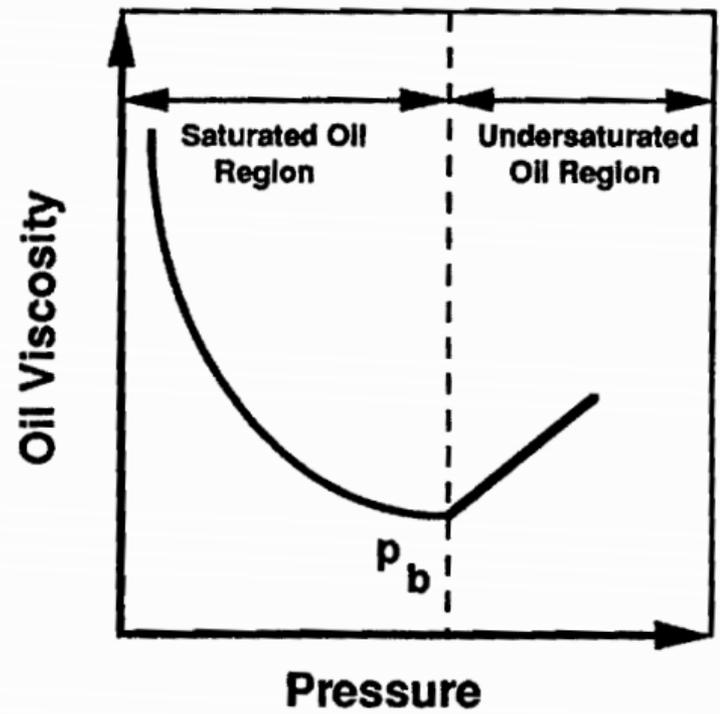
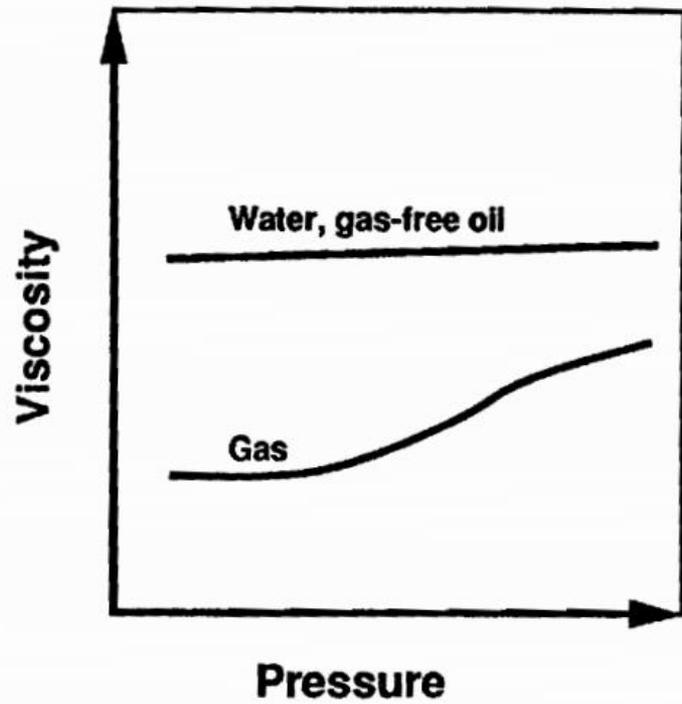
$$\frac{\partial p}{\partial t} \neq 0$$

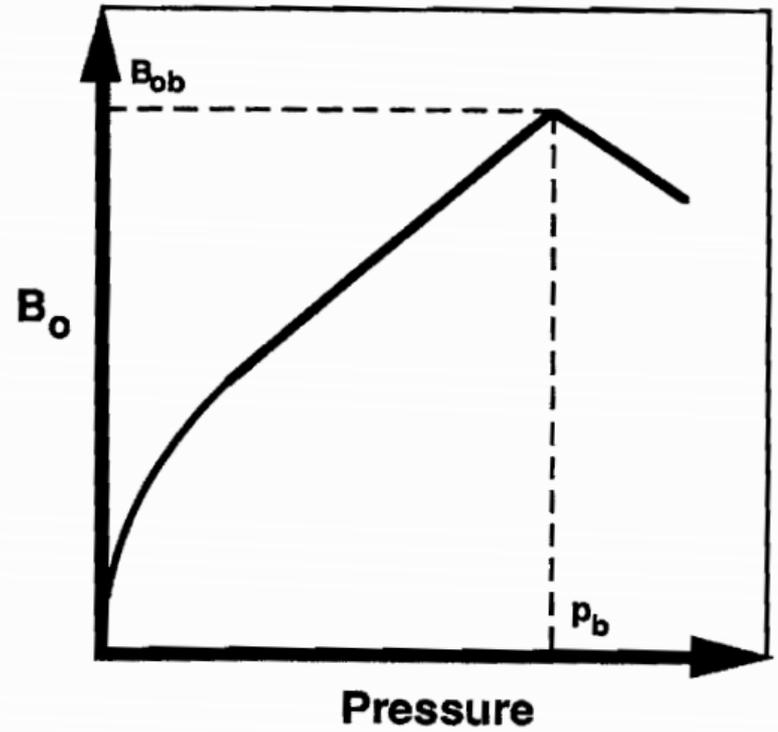
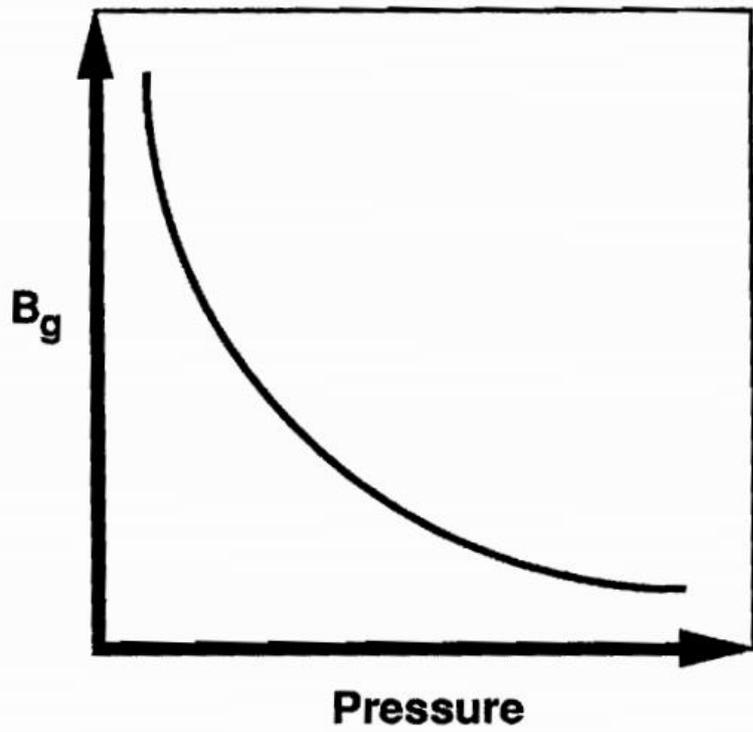
$$\frac{\partial u}{\partial t} \neq 0$$



**LAS SOLUCIONES
SON DEPENDIENTES
DEL TIEMPO Y
DEPENDIENTES
DEL ESPACIO**







Ecuación de flujo en medios porosos en sistema discreto. Fluidos poco compresibles

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{B_l^o \mu_l q_{lsc}}{\beta_c k_x V_b} = \frac{\phi \mu_l c_l}{\beta_c \alpha_c k_x} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1)$$

donde $l = o, w$

$$T_{l_{xi-1/2}}^n p_{i-1}^{n+1} - \left[\left(\frac{V_b \phi c_l}{\alpha_c B_l^o \Delta t} \right)_i + T_{l_{xi+1/2}}^n + T_{l_{xi-1/2}}^n \right] p_i^{n+1} + T_{l_{xi+1/2}}^n p_{i+1}^{n+1} = - \left[q_{lsci} + \left(\frac{V_b \phi c_l}{\alpha_c B_l^o \Delta t} \right)_i p_i^n \right]$$



$$\left(\beta_c \frac{k_x A_x}{\mu_l B_l \Delta x} \right)$$

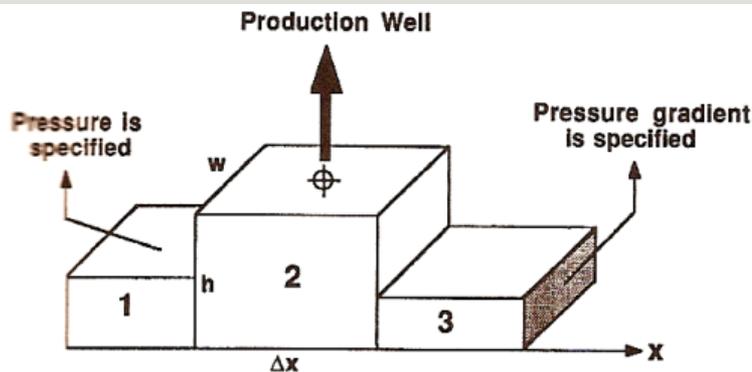
EJEMPLO 2

1- Considere el flujo 1D, monofásico estacionario de petróleo en el reservorio heterogéneo, horizontal de la figura 1. La tabla 1 muestra las propiedades de las celdas.

Las condiciones de frontera son:

- Presión en la celda 1 se mantiene en 3000 psia
- Caudal de producción de la celda 2 1000STB/D
- El gradiente de presión en el extremo derecho del sistema es 0.2 psi/ft

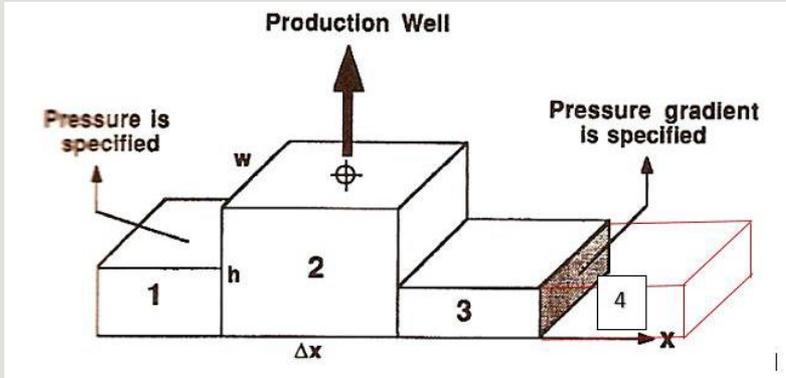
La viscosidad del fluido es 2 cp y $B_o=1$ RB/STB. Calcule la distribución de presiones en el sistema.



Grilla	Δx (ft)	h(ft)	w(ft)	k_x (md)
1	200	40	100	200
2	400	60	100	160
3	300	20	100	180

$$\left(\beta_c \frac{A_x k_x}{\mu_l B_l \Delta x} \right)_{i\pm 1/2, j} = \beta_c \frac{2A_{x_{i,j}} A_{x_{i\pm 1, j}} k_{x_{i,j}} k_{x_{i\pm 1, j}}}{\Delta x_{i\pm 1, j} A_{x_{i,j}} k_{x_{i,j}} + \Delta x_{i,j} A_{x_{i\pm 1, j}} k_{x_{i\pm 1, j}}} \times \frac{1}{\mu_l B_l}$$

EJEMPLO 2



$$T_{i\pm 1/2} = \beta_c \frac{A_x k_x}{\mu_l B_l \Delta x}$$

$$T_{i+1/2}(p_{i+1} - p_i) - T_{i-1/2}(p_i - p_{i-1}) + q^*_i = 0$$

$$T_{23}(p_3 - p_2) - T_{12}(p_2 - p_1) + q^*_2 = 0$$

$$T_{34}(p_4 - p_3) - T_{23}(p_3 - p_2) + q^*_3 = 0$$

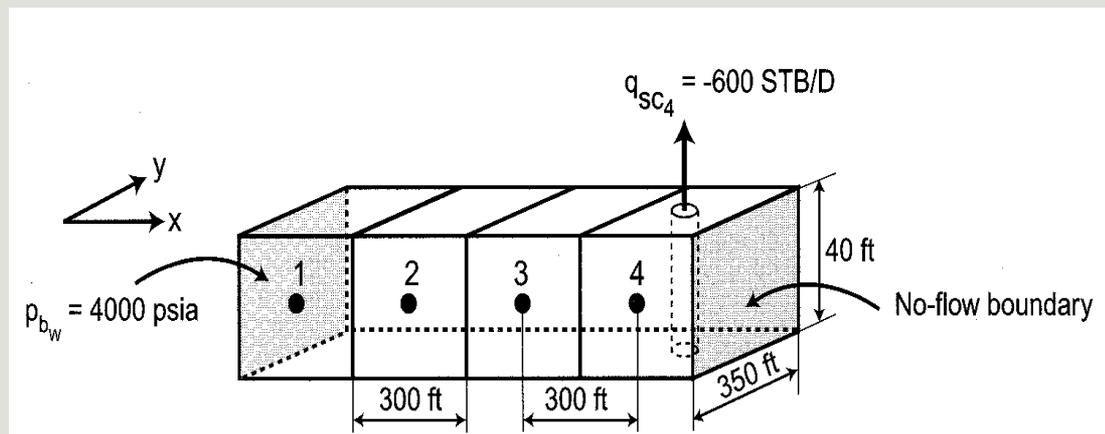
$$p_1 = C$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} \approx \frac{p_4 - p_3}{x_4 - x_3} = C$$

$$p_4 = C(x_4 - x_3) + p_3$$

EJEMPLO 3

Para la grilla 1D, centrada en el bloque, de la figura 2 determine la distribución de presión durante el primer año de producción. La presión inicial del sistema es de 4000 psia. Las propiedades de la roca y fluido son: $\Delta x=300$ ft, $\Delta y=350$ ft y $\Delta z=40$ ft, $BI=1$ RB/STB, $ci=3.5 \times 10^{-6}$ psi⁻¹, $kx=15$ mD, $\phi=0.18$, $\mu=1.0$ cP y $B^0=1$ RB/STB. Use un salto de tiempo $\Delta T=15$ días. Asuma que BI es constante dentro del rango de presiones de interés.



EJEMPLO 3

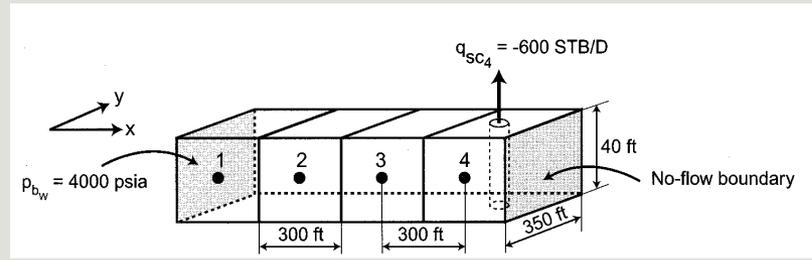
Formulación Implícita

$$T_{l_{xi+1/2}}^n (p_{i+1}^{n+1} - p_i^{n+1}) - T_{l_{xi-1/2}}^n (p_i^{n+1} - p_{i-1}^{n+1}) + q_{lsci} = \left(\frac{V_b \phi c_l}{\alpha_c B_l^o \Delta t} \right)_i (p_i^{n+1} - p_i^n)$$

$$T_{l_{xi+1/2}}^n p_{i+1}^{n+1} - \left[\left(\frac{V_b \phi c_l}{\alpha_c B_l^o \Delta t} \right)_i + T_{l_{xi+1/2}}^n + T_{l_{xi-1/2}}^n \right] p_i^{n+1} + T_{l_{xi-1/2}}^n p_{i-1}^{n+1} = - \left[q_{lsci} + \left(\frac{V_b \phi c_l}{\alpha_c B_l^o \Delta t} \right)_i p_i^n \right]$$

$$T_{i\pm 1/2} = \beta_c \frac{A_x k_x}{\mu_l B_l \Delta_x}$$

EJEMPLO 3



$$T_{i\pm 1/2} = \beta_c \frac{A_x k_x}{\mu_l B_l \Delta_x}$$

$$T_{l_{xi+1/2}}^n P_{i+1}^{n+1} - \left[\left(\frac{V_b \phi c_l}{\alpha_c B_l^o \Delta t} \right)_i + T_{l_{xi+1/2}}^n + T_{l_{xi-1/2}}^n \right] P_i^{n+1} + T_{l_{xi-1/2}}^n P_{i-1}^{n+1} = - \left[q_{lsci} + \left(\frac{V_b \phi c_l}{\alpha_c B_l^o \Delta t} \right)_i P_i^n \right]$$

Para la celda 2

$$T_{2-3}^n P_3^{n+1} - \left[\left(\frac{\phi V_b c_l}{\alpha_c B_l^0 \Delta t} \right) + T_{2-3}^n + T_{1-2}^n \right] P_2^{n+1} + T_{1-2}^n P_1^{n+1} = - \left[q_2 + \left(\frac{\phi V_b c_l}{\alpha_c B_l^0 \Delta t} \right) P_2^n \right]$$

EJEMPLO 3

$$T_{i\pm 1/2} = \beta_c \frac{A_x k_x}{\mu_l B_l \Delta_x} = ?$$

$$\left(\frac{\phi V_b c_l}{\alpha_c B_l^0 \Delta t} \right) = ?$$

Para la celda 2

$$T_{2-3}^n p_3^{n+1} - \left[\left(\frac{\phi V_b c_l}{\alpha_c B_l^0 \Delta t} \right) + T_{2-3}^n + T_{1-2}^n \right] p_2^{n+1} + T_{1-2}^n p_1^{n+1} = - \left[q_2 + \left(\frac{\phi V_b c_l}{\alpha_c B_l^0 \Delta t} \right) p_2^n \right]$$

Para la celda 3

$$T_{3-4}^n p_4^{n+1} - \left[\left(\frac{\phi V_b c_l}{\alpha_c B_l^0 \Delta t} \right) + T_{3-4}^n + T_{2-3}^n \right] p_3^{n+1} + T_{2-3}^n p_2^{n+1} = - \left[q_3 + \left(\frac{\phi V_b c_l}{\alpha_c B_l^0 \Delta t} \right) p_3^n \right]$$

Para la celda 4

$$\cancel{T_{4-5}^n} p_5^{n+1} - \left[\left(\frac{\phi V_b c_l}{\alpha_c B_l^0 \Delta t} \right) + \cancel{T_{4-5}^n} + T_{4-3}^n \right] p_4^{n+1} + T_{3-4}^n p_3^{n+1} = - \left[q_4 + \left(\frac{\phi V_b c_l}{\alpha_c B_l^0 \Delta t} \right) p_4^n \right]$$

EJEMPLO 4

Dado los siguientes datos, determinar el cambio en la transmisibilidad al gas de gravedad 0.61 y al petróleo cuando la presión declina desde 2014.7 hasta 1614.7 psi.

La tabla da las propiedades del gas. Las propiedades del petróleo y dimensiones de la grilla son:

P(psi)	μ_g (cP)	Z
14.7	0.0113	1.0000
414.7	0.0118	0.9550
814.7	0.0125	0.9140
1214.7	0.0134	0.8790
1614.7	0.0145	0.8530
2014.7	0.0156	0.8380

$$\Delta x = 100 \text{ ft}, \Delta y = 100 \text{ ft}, \Delta z = 10 \text{ ft}$$

$$T = 580^\circ R$$

$$T_{sc} = 520^\circ R$$

$$c_i = 3.5 \times 10^{-6} \text{ psi}^{-1}$$

$$p_{sc} = 14.7 \text{ psi}$$

$$k_x = 4.2 \text{ md}$$

$$\mu_l = 3.0 \text{ cp}$$

$$B_l^0 = 1.22 \frac{RB}{STB} \text{ a } 1014.7 \text{ psi}$$

$$\beta_c = 1.127$$

$$\alpha_c = 5.614583$$

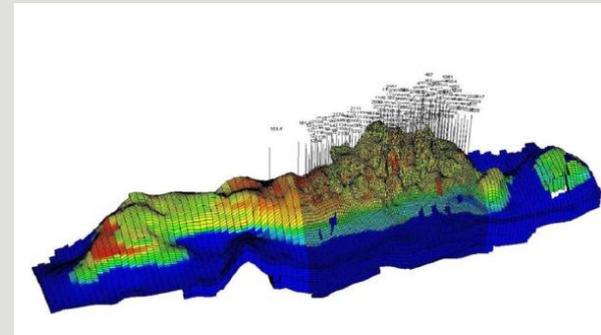
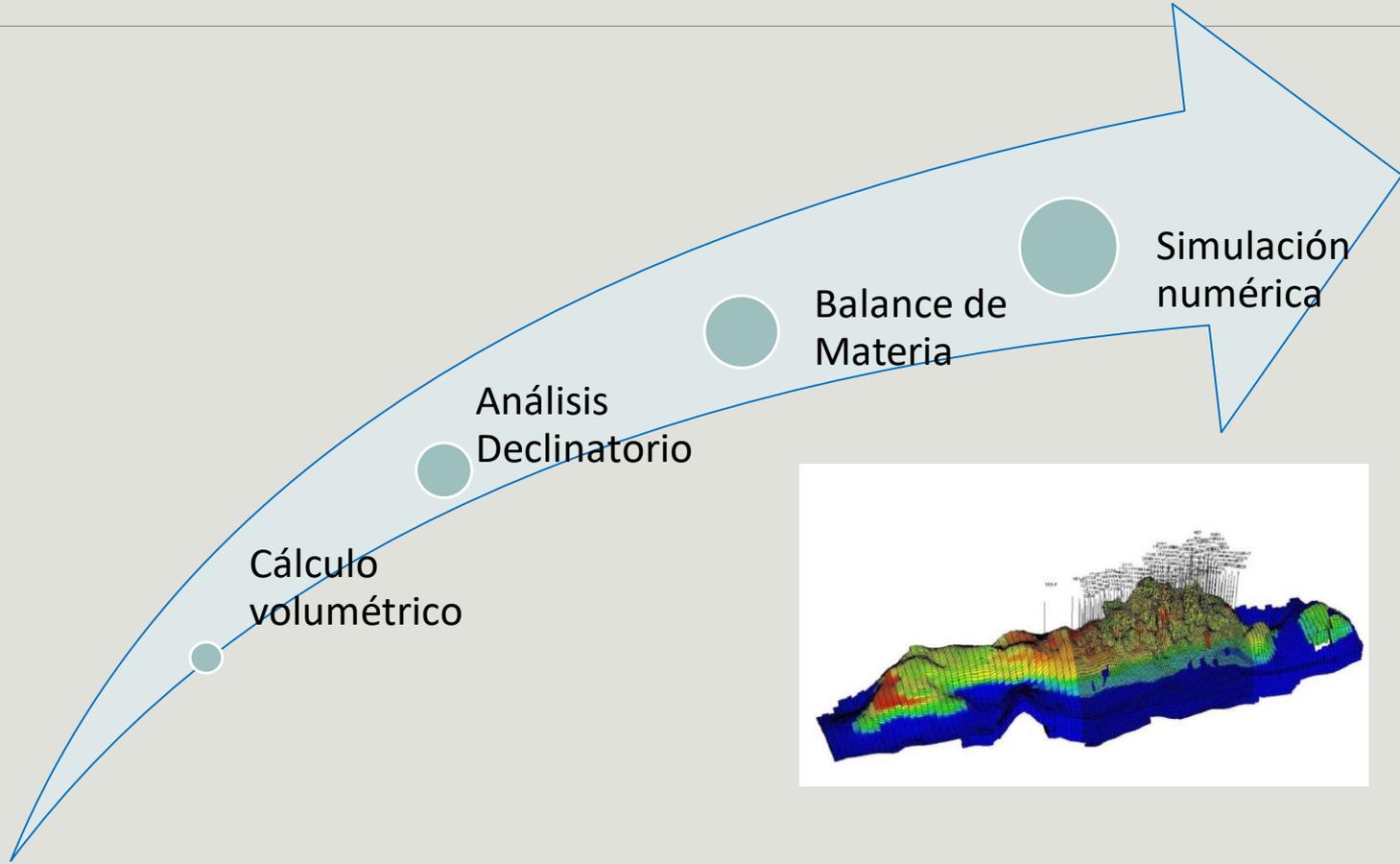
$$B_l = B_l^0 / [1 + c_l(p - p^0)]$$

$$B_g = \frac{p_{sc} T z}{\alpha T_{sc} p}$$


$$T_{i\pm 1/2} = \beta_c \frac{A_x k_x}{\mu_l B_l \Delta_x}$$

Simulación numérica

Certidumbre



Incertidumbre

Modelo estático y Modelo dinámico

Modelo estático

Comprende datos geológicos, geofísicos, petrofísicos, geomecánicos, geoquímicos y de fluidos

Modelo dinámico

Está constituido por datos de inyección-producción, modelo roca-fluido, análisis PVT y modelo de presiones.

Los modelos estáticos y dinámicos son elementos claves para evaluar y seleccionar opciones futuras de recuperación (pozos infill, IOR, EOR)

Modelo de Presiones

- ✓ Cuantificar la energía del yacimiento
- ✓ Caracterizar el Sistema Pozo-reservorio
- ✓ Identificar barreras o límites

Ensayos de Pozos

Modelo de Presiones

5

- ✓ Presión inicial y promedio del área de drenaje
- ✓ Daño de la formación
- ✓ Permeabilidad efectiva
- ✓ Tamaño del yacimiento
- ✓ Comunicación entre pozos
- ✓ Detección de límites

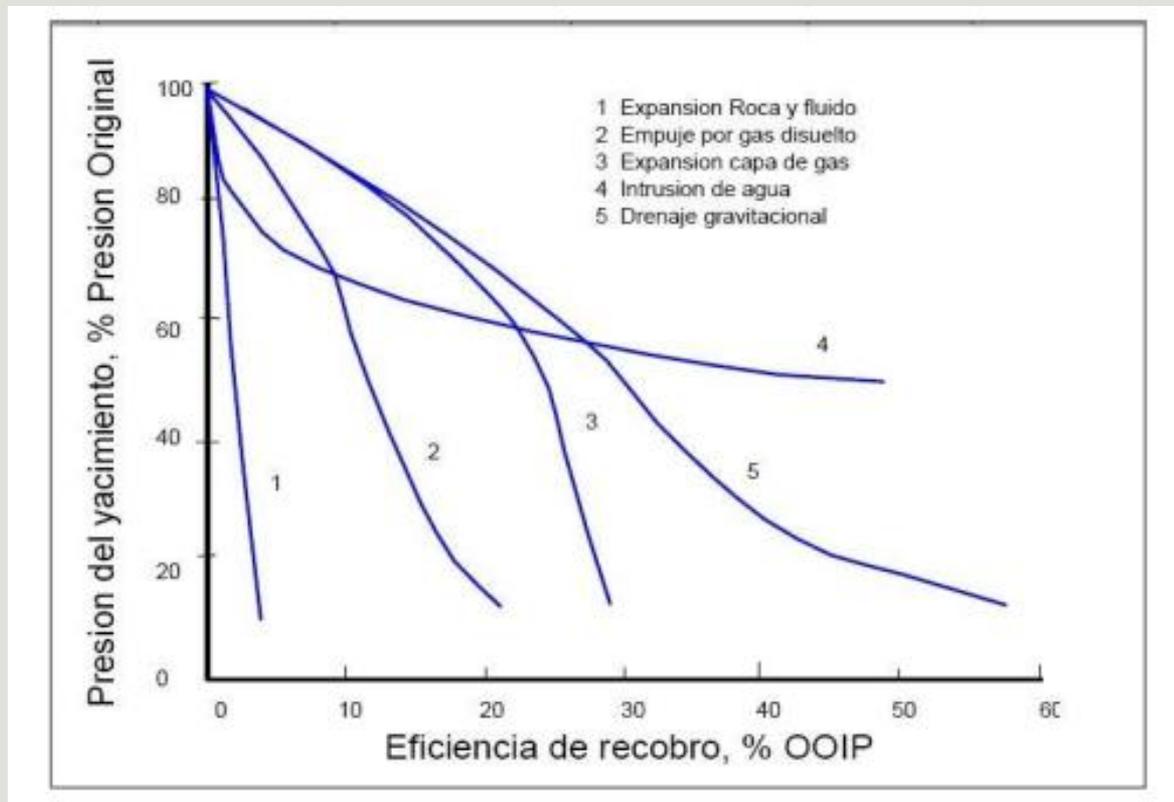
Análisis PVT

- ✓ Permiten definir las propiedades y distribución de los fluidos en el reservorio, mediante la caracterización físico química, bajo distintas condiciones de Presión y Temperatura, lo que permitirá estimar volúmenes iniciales de hidrocarburos almacenados y por consiguiente las reservas a recuperar.

Análisis PVT

7

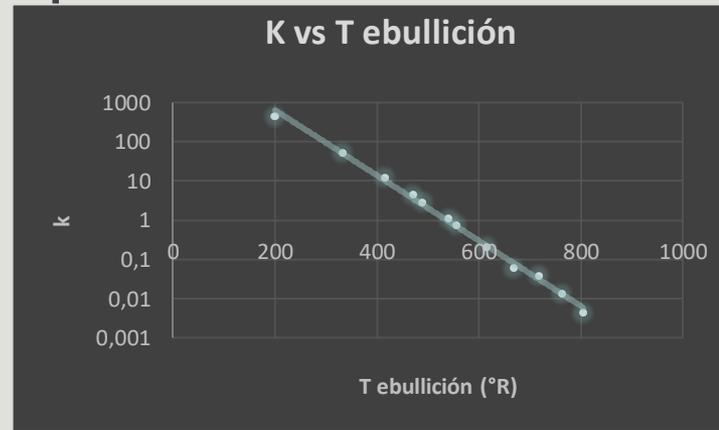
✓ ¿Para qué?



Análisis PVT

		Gas del Flash	Petróleo del Flash
	Componente	[% Molar]	[% Molar]
N ₂	Nitrógeno	0,530	
CO ₂	Dióxido de Carbono	0,943	
C ₁	Metano	29,676	0,067
C ₂	Etano	24,995	0,476
C ₃	Propano	25,630	2,164
iC ₄	i-Butano	2,802	0,647
nC ₄	n-Butano	9,585	3,402
iC ₅	i-Pentano	1,794	1,663
nC ₅	n-Pentano	2,320	3,078
C ₆	Hexanos	1,030	5,036
C ₇	Heptanos	0,356	5,864
C ₈	Octanos	0,246	6,382
C ₉	Nonanos	0,072	5,513
C ₁₀	Decanos	0,021	4,846
C ₁₁	Undecanos		4,236
C ₁₂	Dodecanos		3,453
C ₁₃	Tridecanos		3,183
C ₁₄	Tetradecanos		2,740
C ₁₅	Pentadecanos		2,417
C ₁₆	Hexadecanos		2,127
C ₁₇	Heptadecanos		1,779
C ₁₈	Octadecanos		1,645
C ₁₉	Nonadecanos		1,601
C ₂₀₊	Eicosanos y Sup		37,683
	Total :	100,000	100,000

✓ Chequeo



Se observa linealidad al graficar las constantes de equilibrio en escala logarítmica vs la temperatura de ebullición de los componentes puros, esto indica que las fracciones líq y gaseosas consideradas de los componentes son correctas.

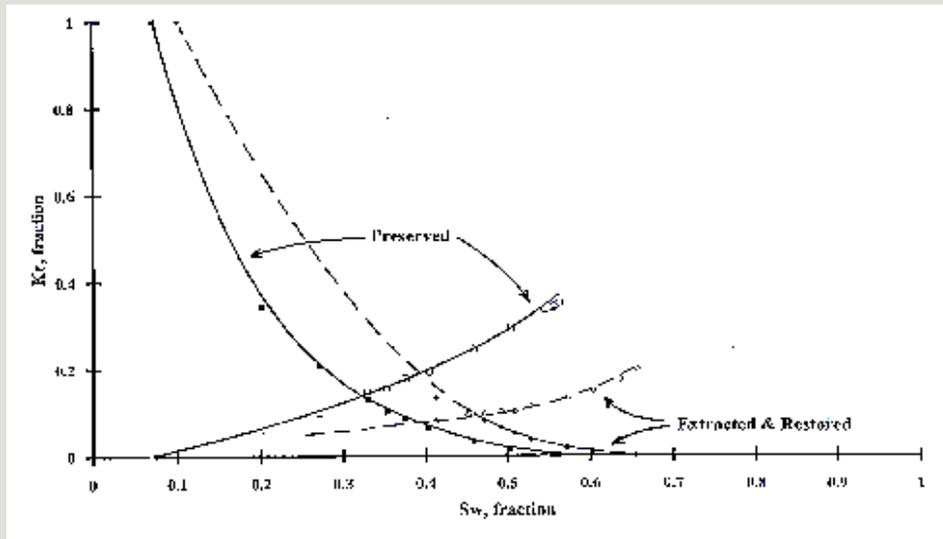
Modelo Roca Fluido

9

Caracteriza el flujo multifásico de fluidos en el medio poroso

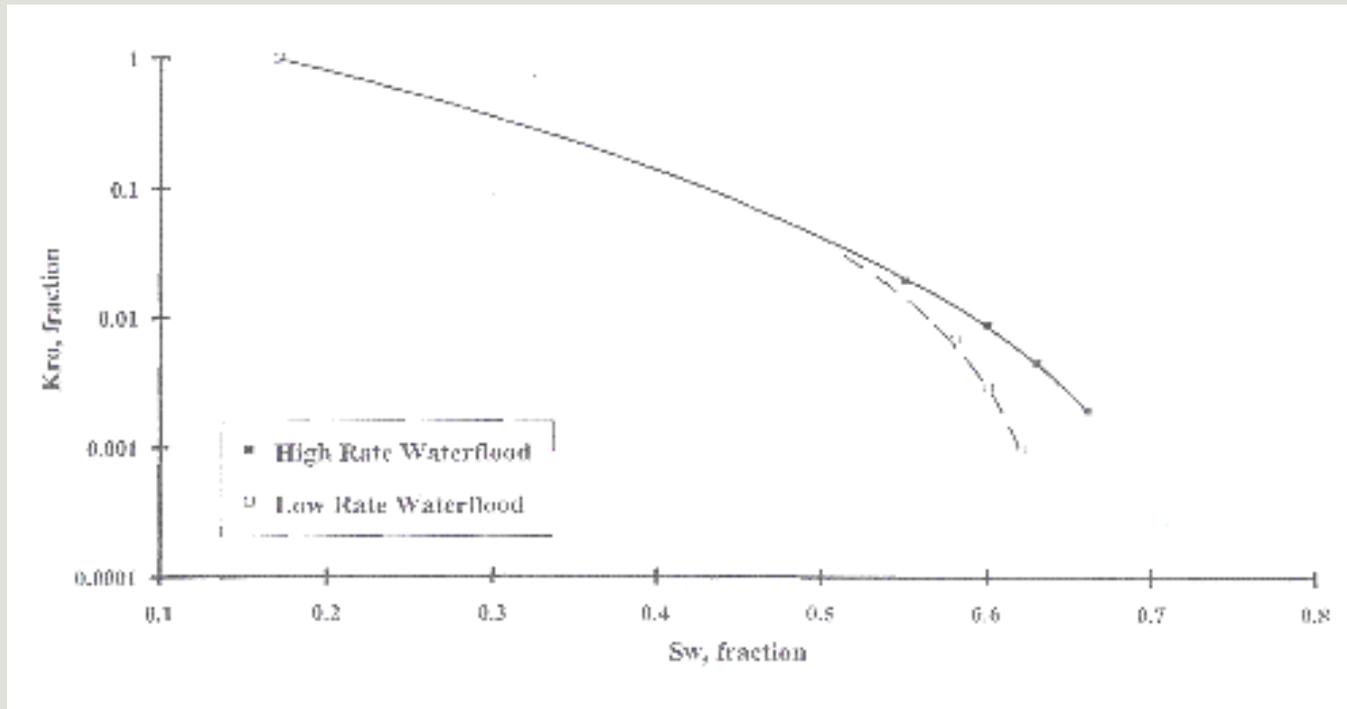
- ✓ Porosidad
- ✓ Saturación
- ✓ Permeabilidad
- ✓ Anisotropías
- ✓ Permeabilidades relativas
- ✓ Presiones capilares
- ✓ Mojabilidad

1.- Validar los datos por problemas asociados a mojabilidad o P_c .

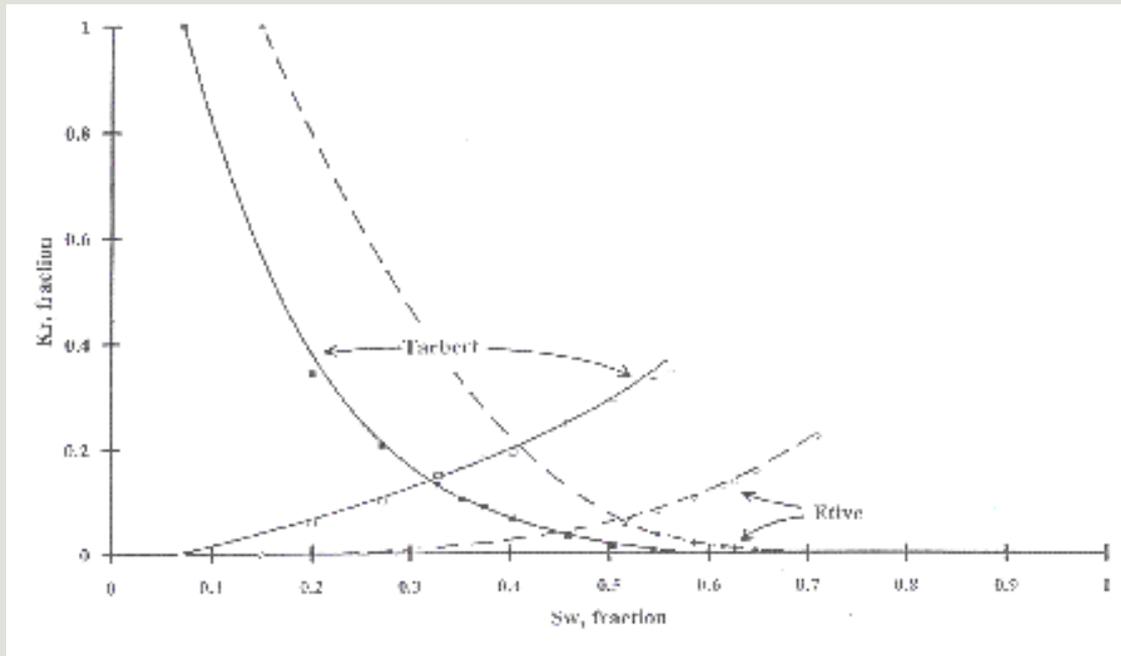


- ✓ Fluidos usados para la obtención de la corona
- ✓ Preservación de la misma
- ✓ Manipulación
- ✓ Condiciones de ensayo

2.- Necesidad de refinar los resultados



3.-Identificar distintos tipos de rocas



CONCLUSION

-
- ✓ **El uso correcto de las curvas de K_{rwo} involucra**
 - ✓ Identificar las curvas correctas con la mojabilidad representativa
 - ✓ Los resultados de laboratorio deben
 - ✓ Refinarse
 - ✓ Integrarse
 - ✓ Extenderse
 - ✓ Esto implica conocer los problemas asociados a las distintas técnicas de medición.
 - ✓ Reconocer y asignar los resultados en función del tipo de roca

Características de las curvas de K_{rwo}

Las curvas de k_r se presentan en escalas lineales, pero se recomienda hacerlo en escala semi-log ya que así se puede extrapolar hasta S_w muy bajas donde no existe la curva y al mismo tiempo se puede usar para validar los datos

EJEMPLO 5

1-Grafique Curvas de kro y krw en ejes cartesianos y semilog

¿Es una roca mojante al agua o al petróleo?. Si el ángulo de contacto disminuyera ¿hacia dónde se desplazarían las curvas?

2-Calcule krw y kro teniendo en cuenta las siguientes correlaciones y considerando que:

no=1.85

nw=1.68

$$K_{ro} = (K_{ro})_{S_{wc}} \left[\frac{1 - S_w - S_{or}}{1 - S_{or} - S_{wc}} \right]^{n_o}$$

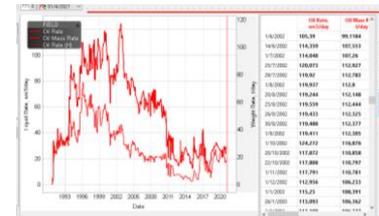
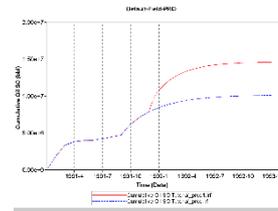
$$K_{rw} = (K_{rw})_{S_{or}} \left[\frac{S_w - S_{wc}}{1 - S_{or} - S_{wc}} \right]^{n_w}$$

Tabla1: Resultados del Laboratorio

Sw	Kro	Krw
fraction	fraction	fraction
0.071	1	0.000001
0.231	0.287	0.0962
0.247	0.252	0.105
0.275	0.202	0.117
0.3	0.165	0.13
0.326	0.13	0.141
0.343	0.111	0.151
0.367	0.0918	0.17
0.386	0.0782	0.184
0.406	0.0629	0.193
0.424	0.0491	0.2
0.446	0.0385	0.23
0.467	0.0285	0.252
0.485	0.0208	0.275
0.504	0.0137	0.291
0.522	0.00879	0.314
0.542	0.00428	0.335
0.555	0.00154	0.374
0.559	0.00086	0.388

Planificación del modelo de simulación

10

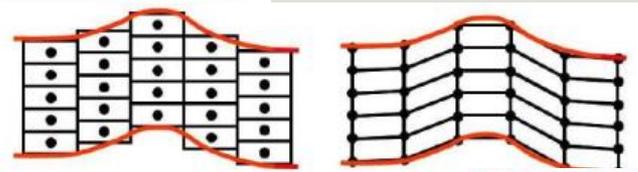
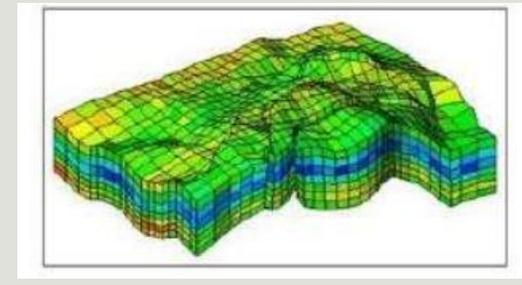
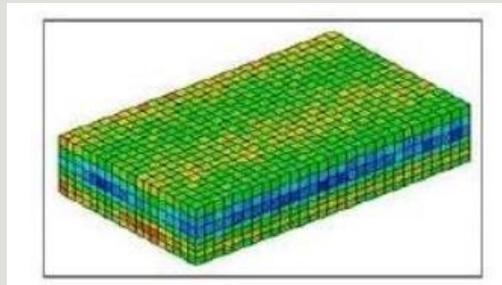
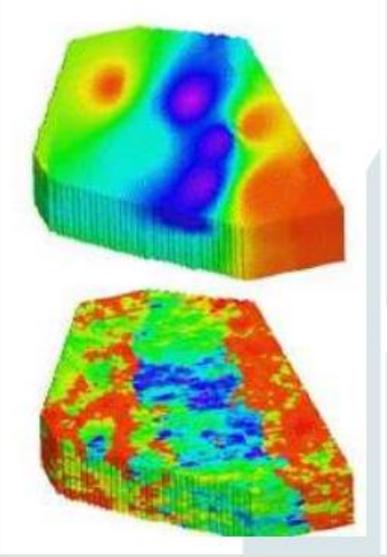


Grillado

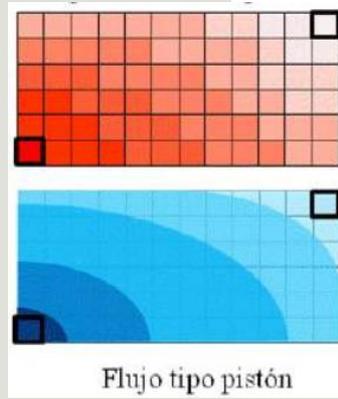
✓ Rectangular o cartesiana

✓ Corner point

✓ Determinísticos

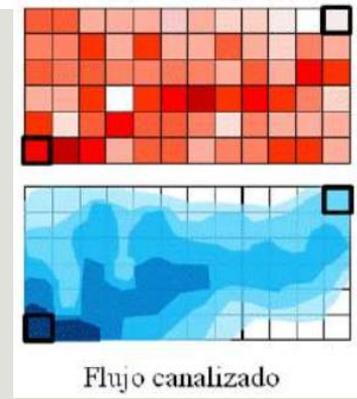


✓ Estocásticos



Flujo tipo pistón

✓ Interpolación



Flujo canalizado

✓ Simulación

FIN
