



Eficiencia de Desplazamiento con $S_{wi} > S_{wirr}$ & $S_{gi} \neq 0$

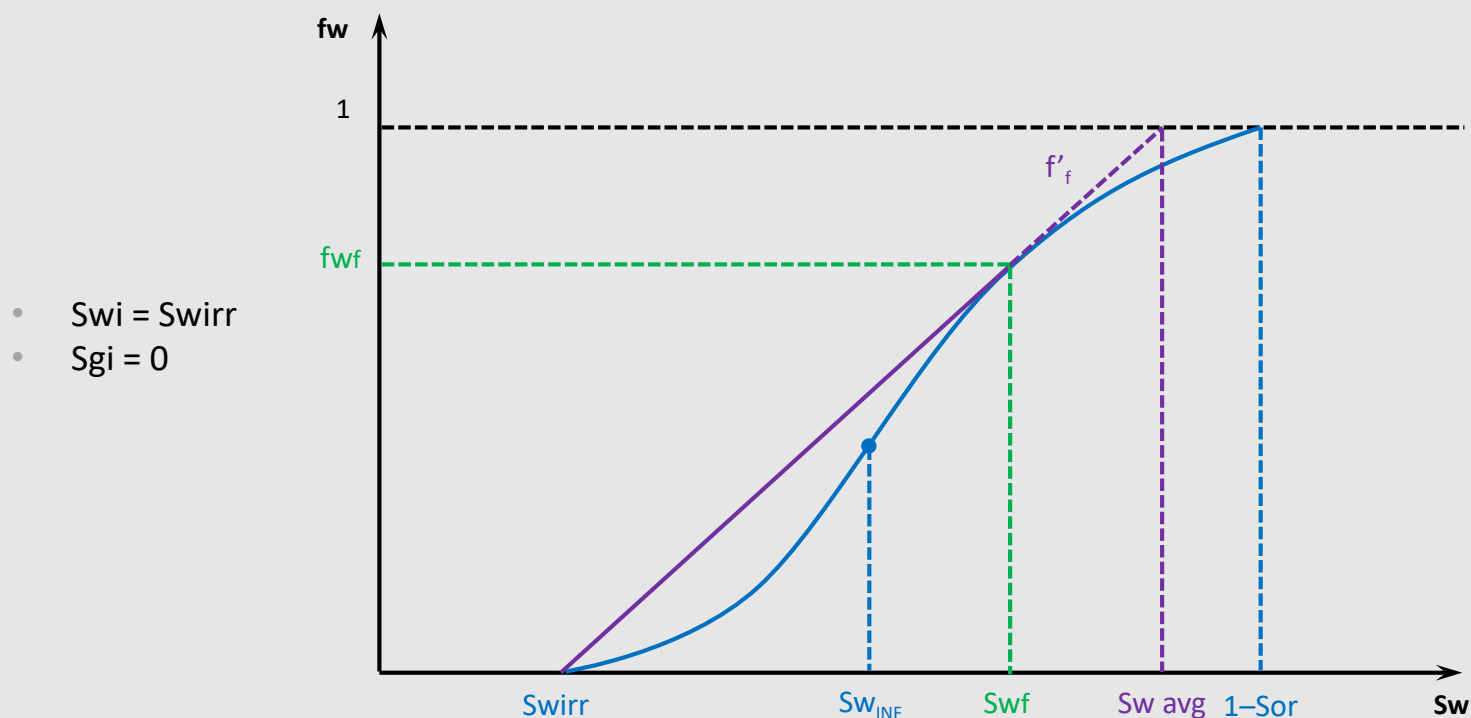
Álvaro Bugari – abugari@gmail.com

 J@R Consultora

2019

Introducción:

La forma habitual de modelar un barrido por flujo difuso es conocida. Se grafica la curva de flujo fraccional y, desde el valor de Sw_{irr} se traza una tangente a f_w para hallar las saturaciones del frente y promedio detrás de él.



Introducción:

Pero de hallarse el reservorio en condiciones iniciales distintas a $S_{wi} = S_{wirr}$ y $S_{gi} = 0$, la solución es levemente distinta.

En particular la bibliografía trata los casos de S_{wi} levemente mayor a S_{wirr} y $S_{gi} = 0$, o $S_{wi} = S_{wirr}$ y $S_{gi} > 0$ (Craig).

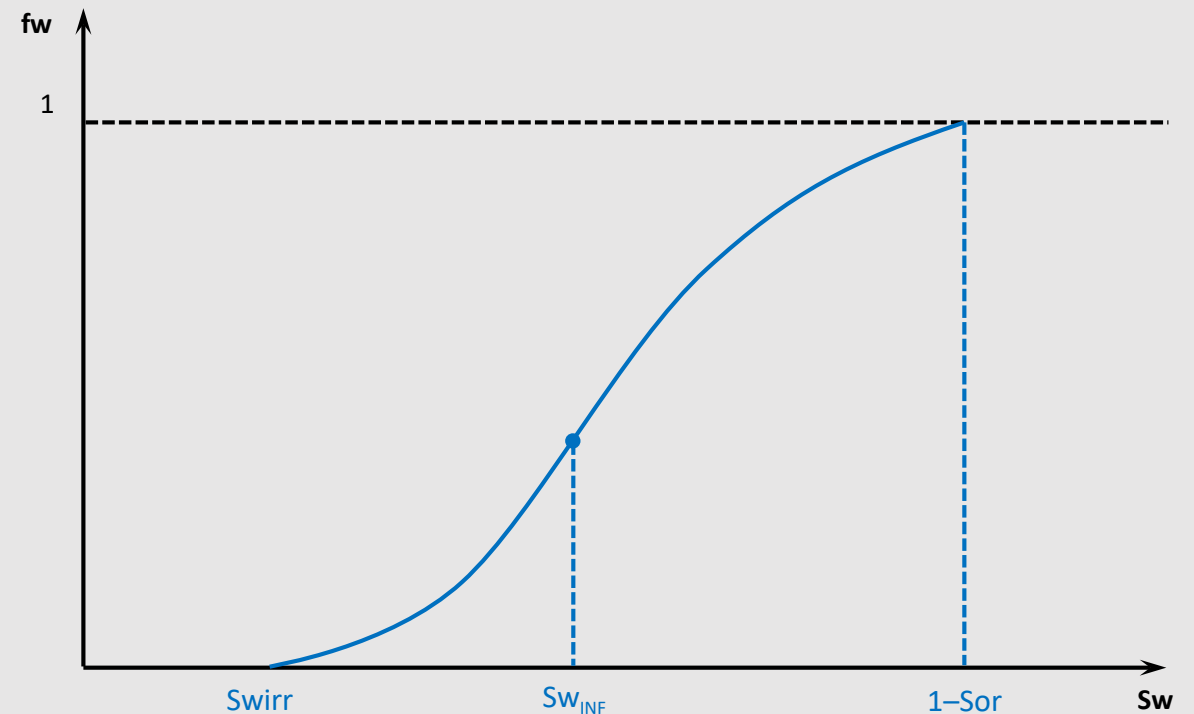
Además, existe un método para modelar cambios en la saturación de agua del banco de petróleo en una situación de barrido inmiscible con $S_{gi} > 0$ (Borgia & Vitali) pero no su impacto en la ecuación de avance frontal ni en los volúmenes recuperados.



Introducción:

Para estandarizar los nombres, se agrupará los casos según estos criterios:

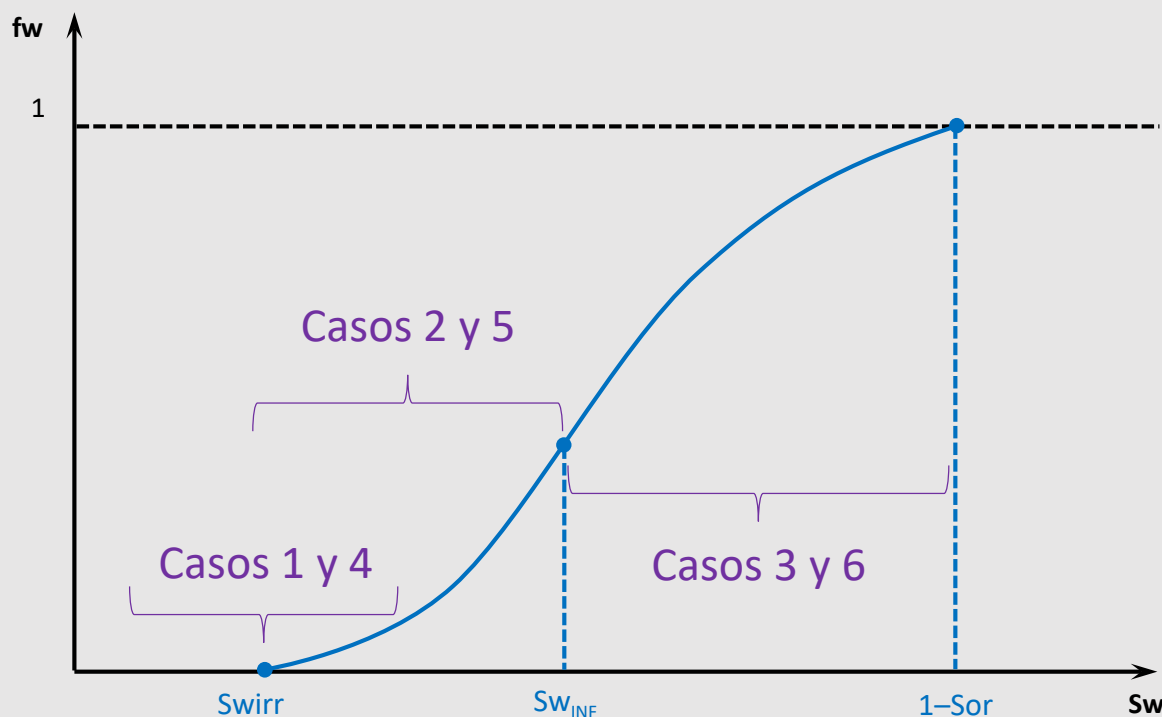
- Caso 1: $S_{wi} = S_{wirr}$ y $S_{gi} = 0$
- Caso 2: $S_{wi} > S_{wirr}$ y $S_{gi} = 0$
- Caso 3: $S_{wi} > S_{w_{INF}} > S_{wirr}$ y $S_{gi} = 0$
- Caso 4: $S_{wi} = S_{wirr}$ y $S_{gi} > 0$
- Caso 5: $S_{wi} > S_{wirr}$ y $S_{gi} > 0$
- Caso 6: $S_{wi} > S_{w_{INF}} > S_{wirr}$ y $S_{gi} > 0$



Introducción:

Para estandarizar los nombres, se agrupará los casos según estos criterios:

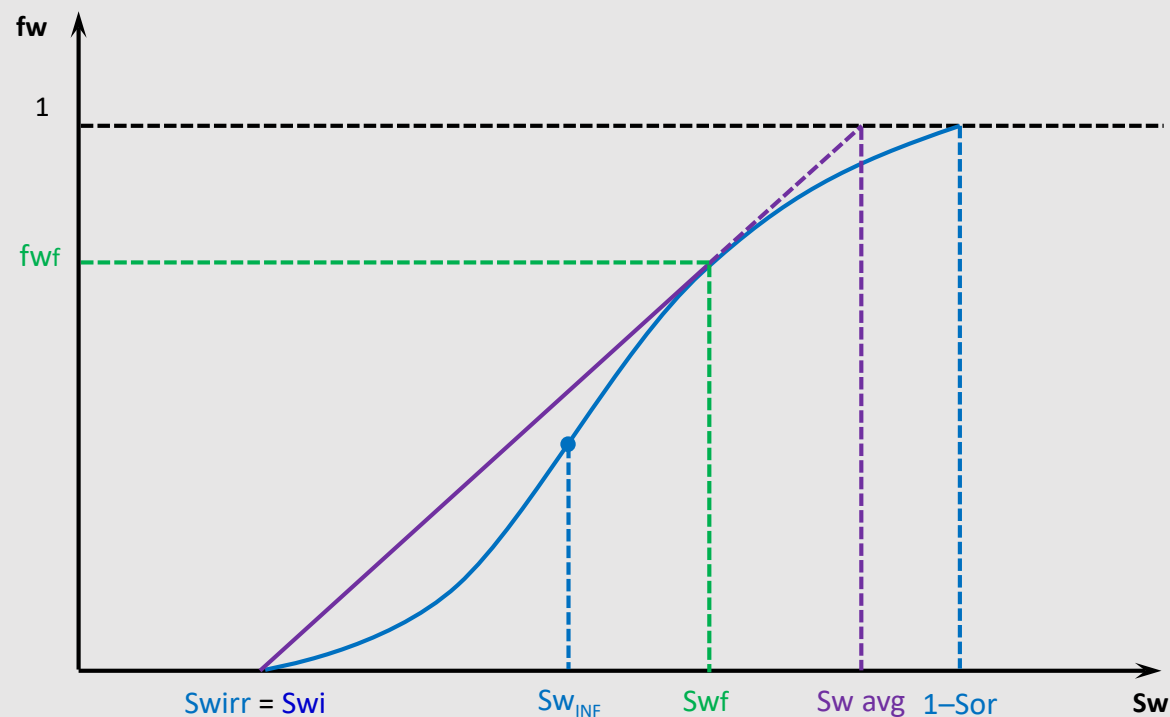
- Caso 1: $S_{wi} = S_{wirr}$ y $S_{gi} = 0$
- Caso 2: $S_{wi} > S_{wirr}$ y $S_{gi} = 0$
- Caso 3: $S_{wi} > S_{w_{INF}} > S_{wirr}$ y $S_{gi} = 0$
- Caso 4: $S_{wi} = S_{wirr}$ y $S_{gi} > 0$
- Caso 5: $S_{wi} > S_{wirr}$ y $S_{gi} > 0$
- Caso 6: $S_{wi} > S_{w_{INF}} > S_{wirr}$ y $S_{gi} > 0$



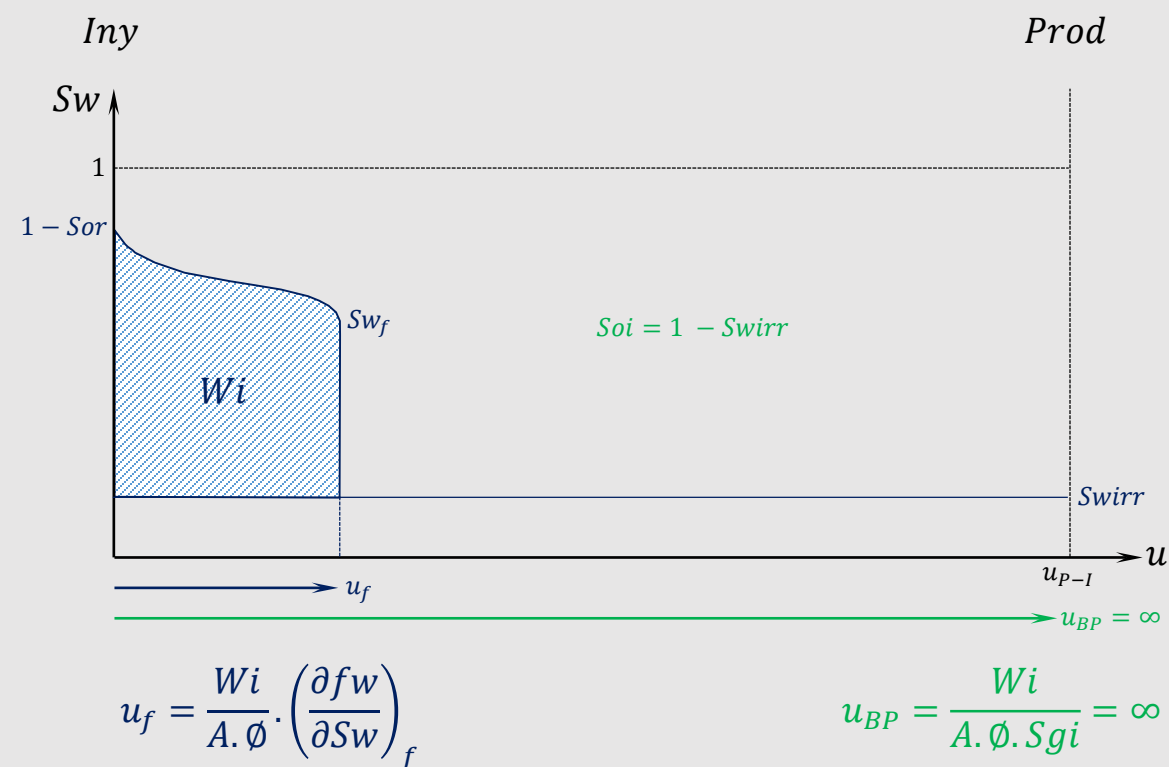
Desarrollo: Caso 1

$$S_{wi} = S_{wirr} \text{ \& } S_{gi} = 0$$

Curva de flujo fraccional



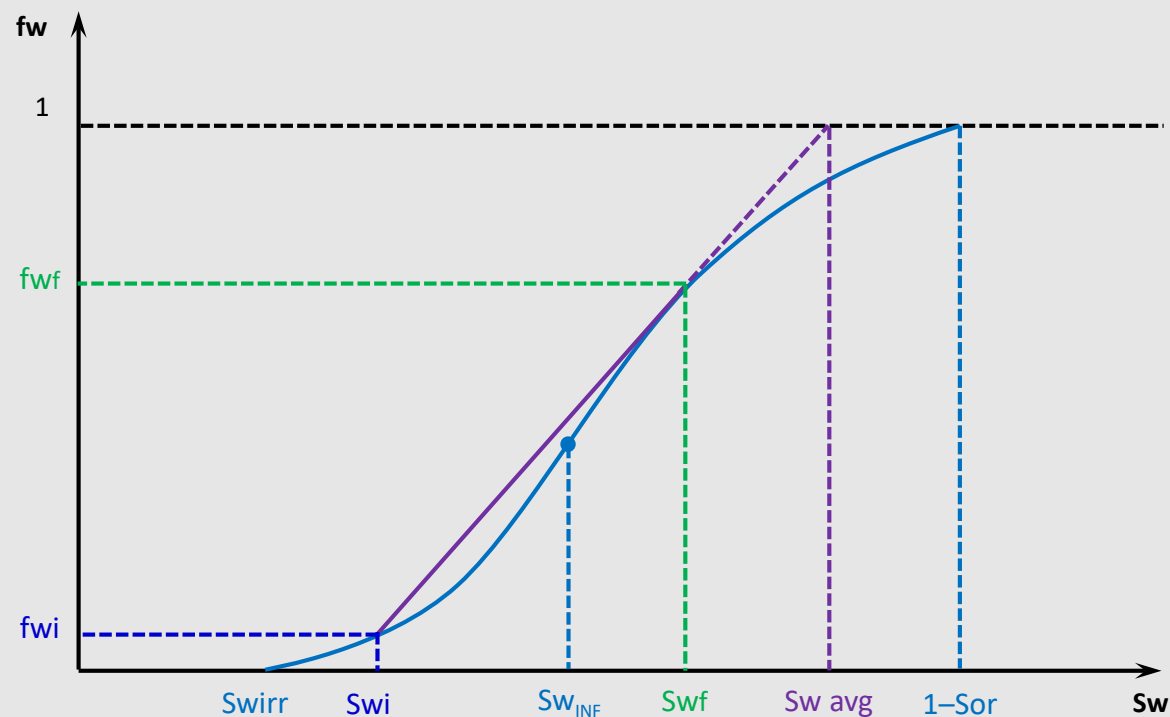
Perfil de avance frontal



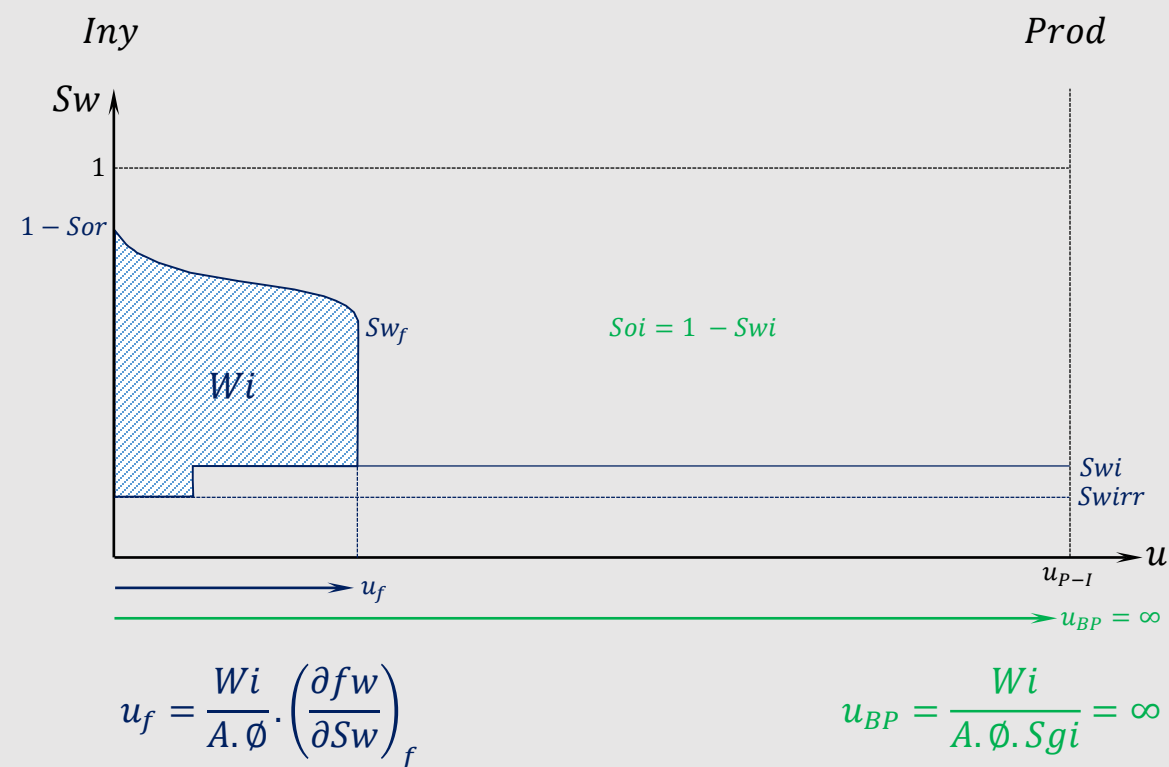
Desarrollo: Caso 2

$$S_{wi} > S_{wirr} \text{ \& } S_{gi} = 0$$

Curva de flujo fraccional



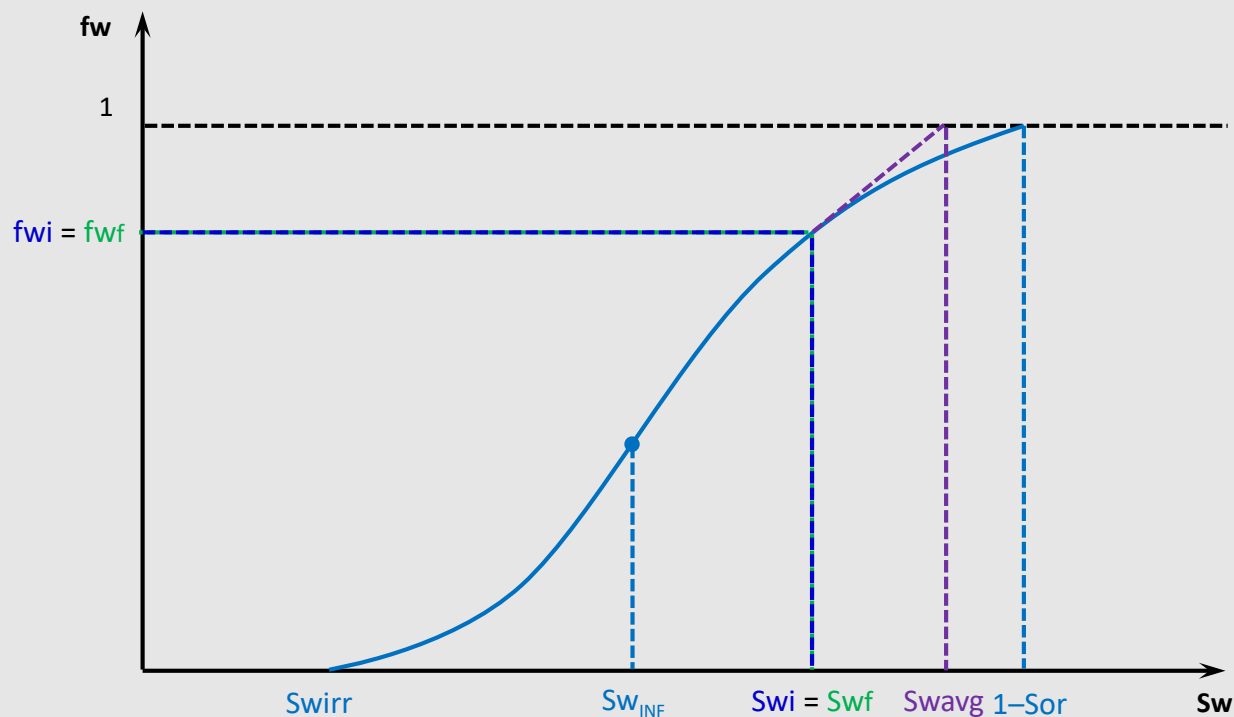
Perfil de avance frontal



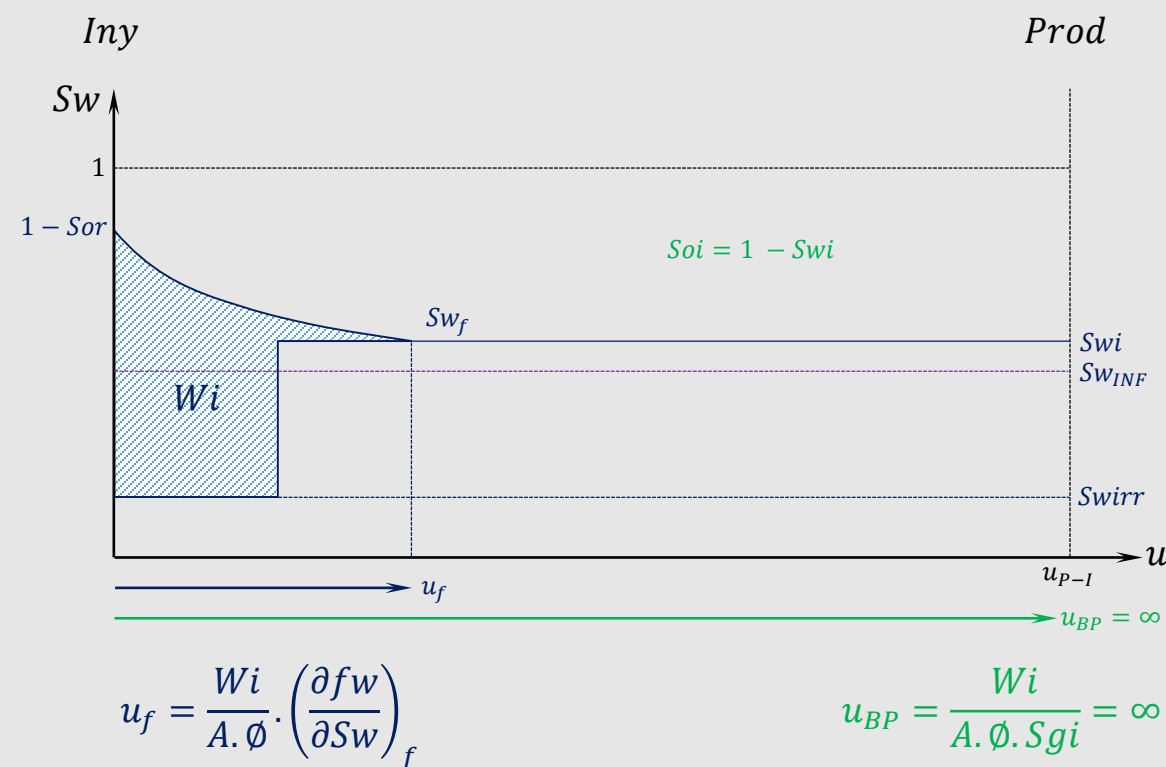
Desarrollo: Caso 3

$$S_{wi} > S_{w_{INF}} \text{ \& } S_{gi} = 0$$

Curva de flujo fraccional



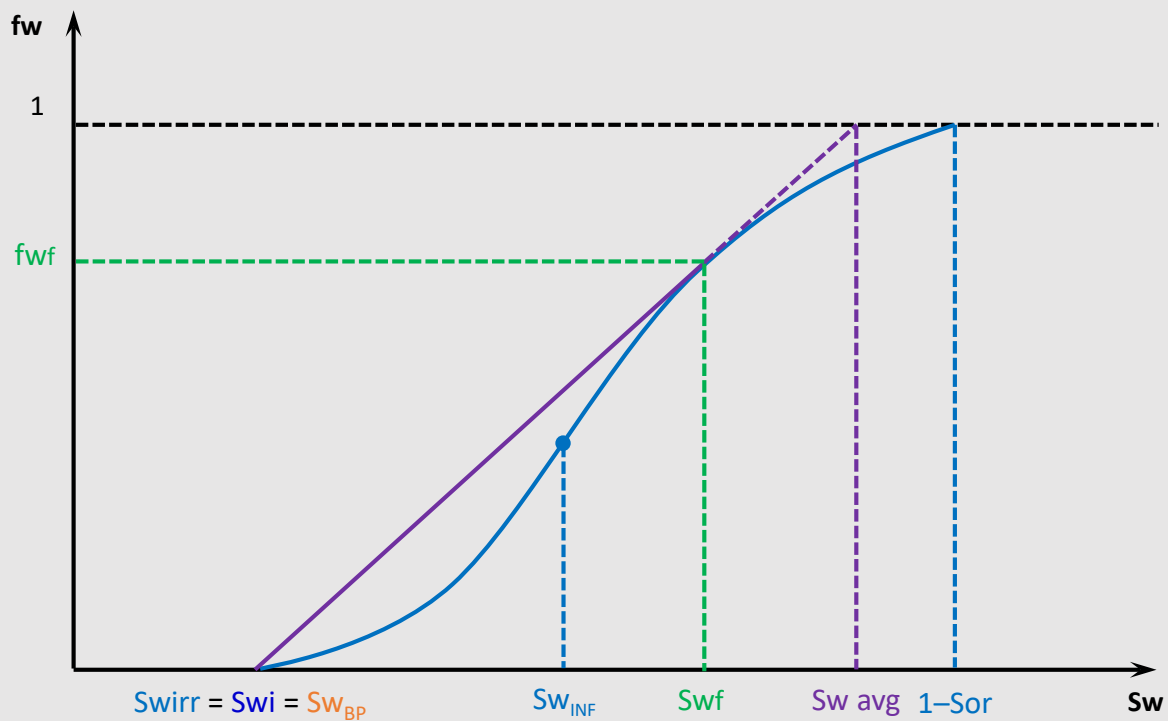
Perfil de avance frontal



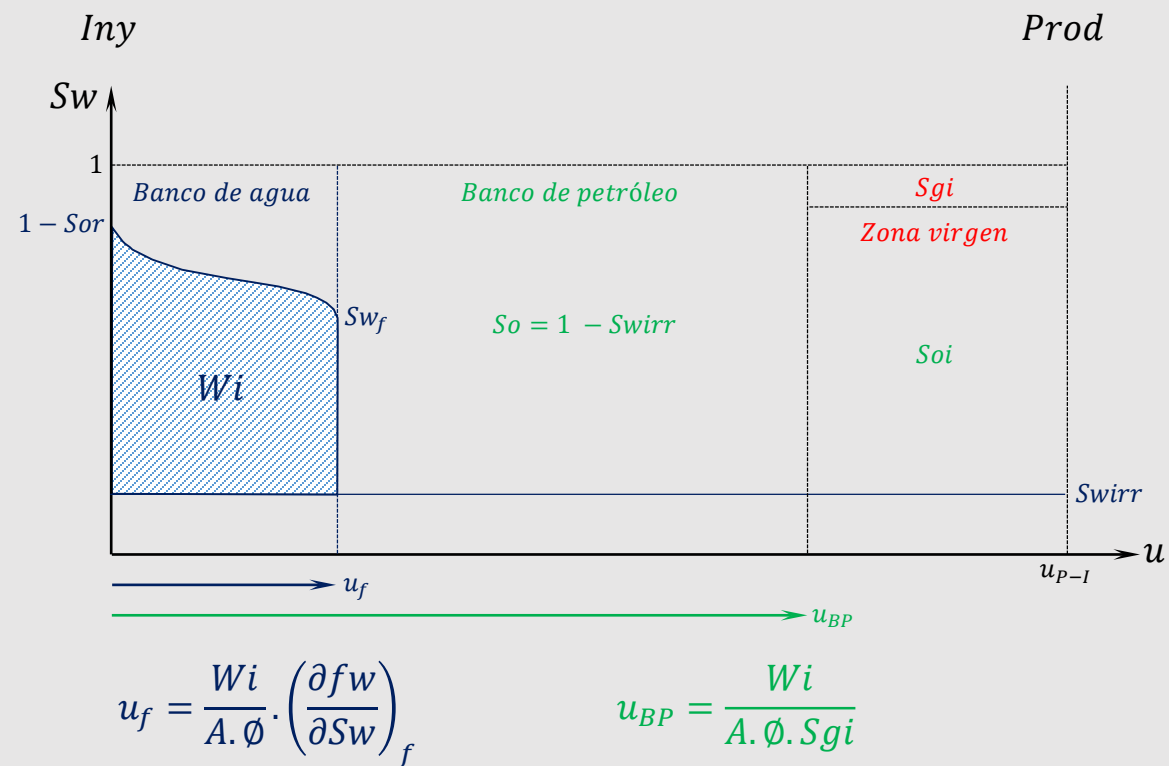
Desarrollo: Caso 4

$S_{wi} = S_{wirr}$ & $S_{gi} > 0$

Curva de flujo fraccional



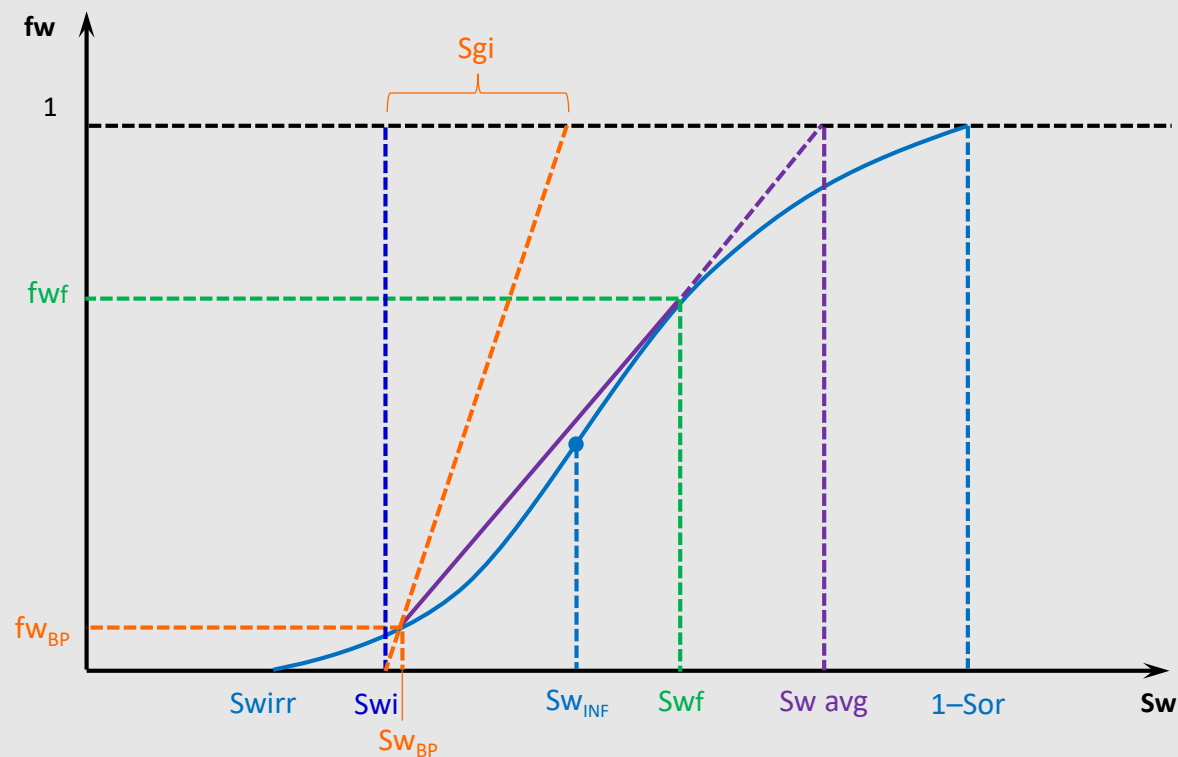
Perfil de avance frontal



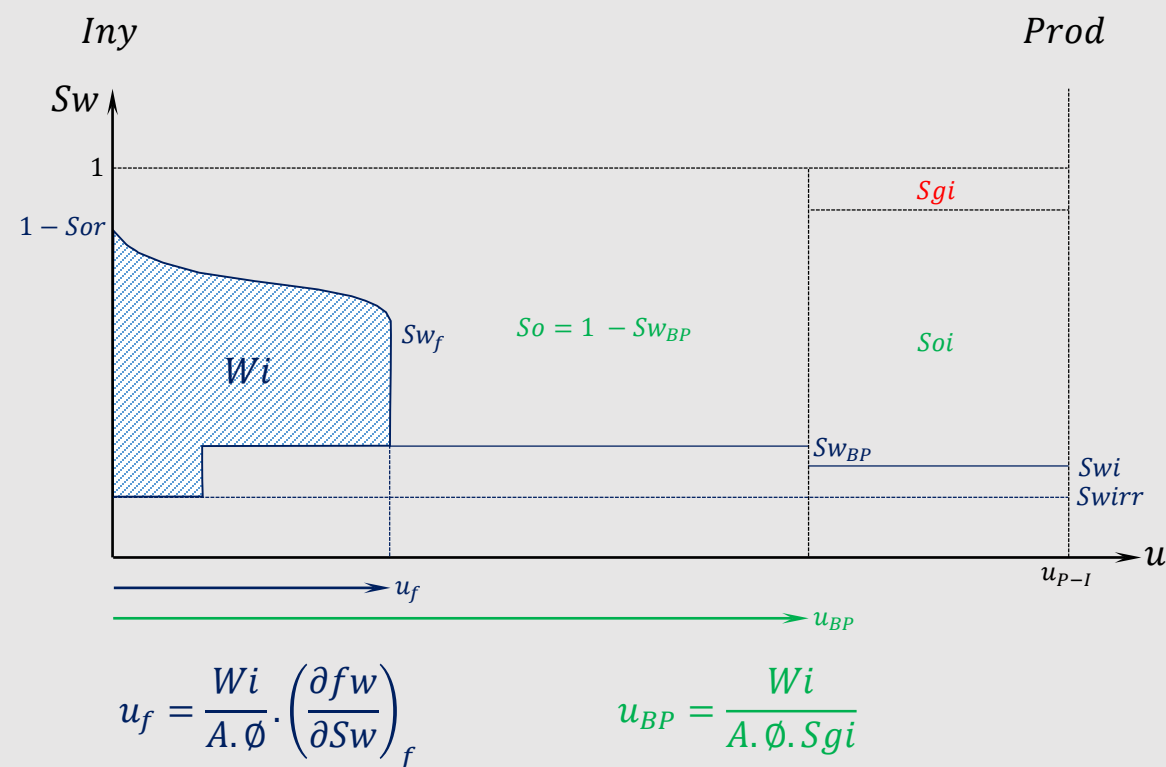
Desarrollo: Caso 5

$$S_{wi} > S_{wirr} \text{ \& } S_{gi} > 0$$

Curva de flujo fraccional



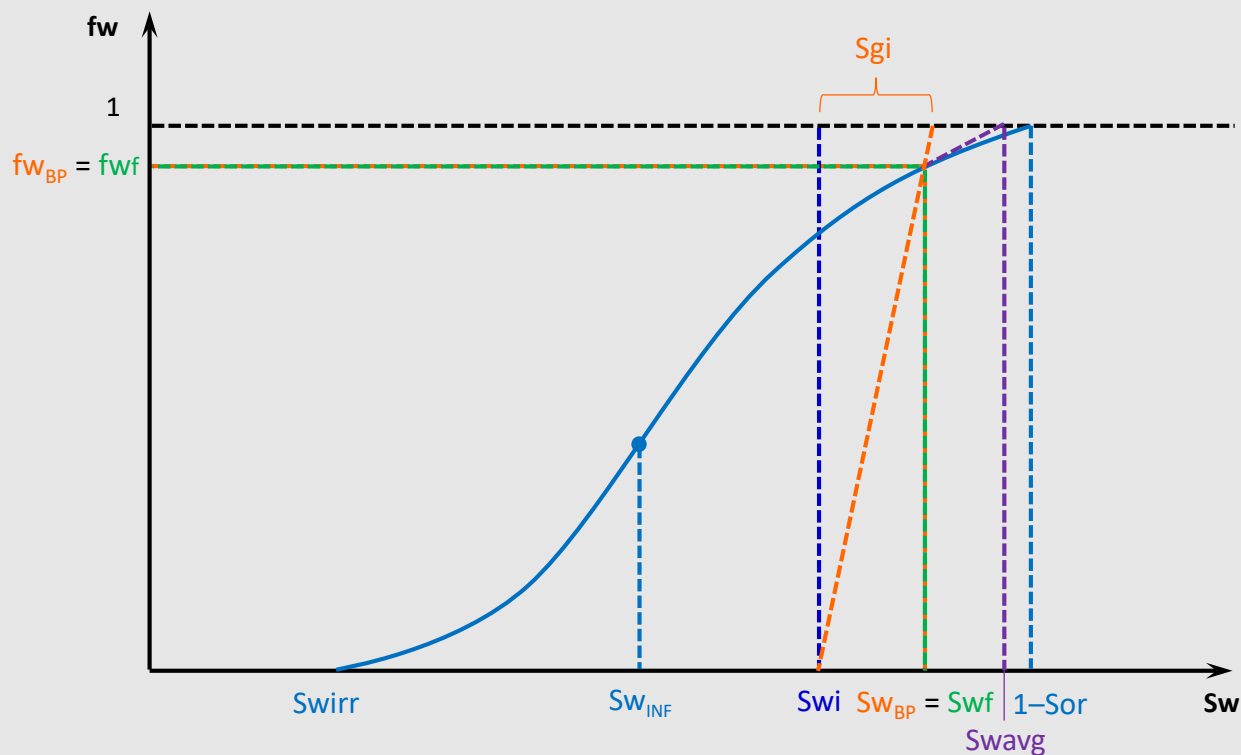
Perfil de avance frontal



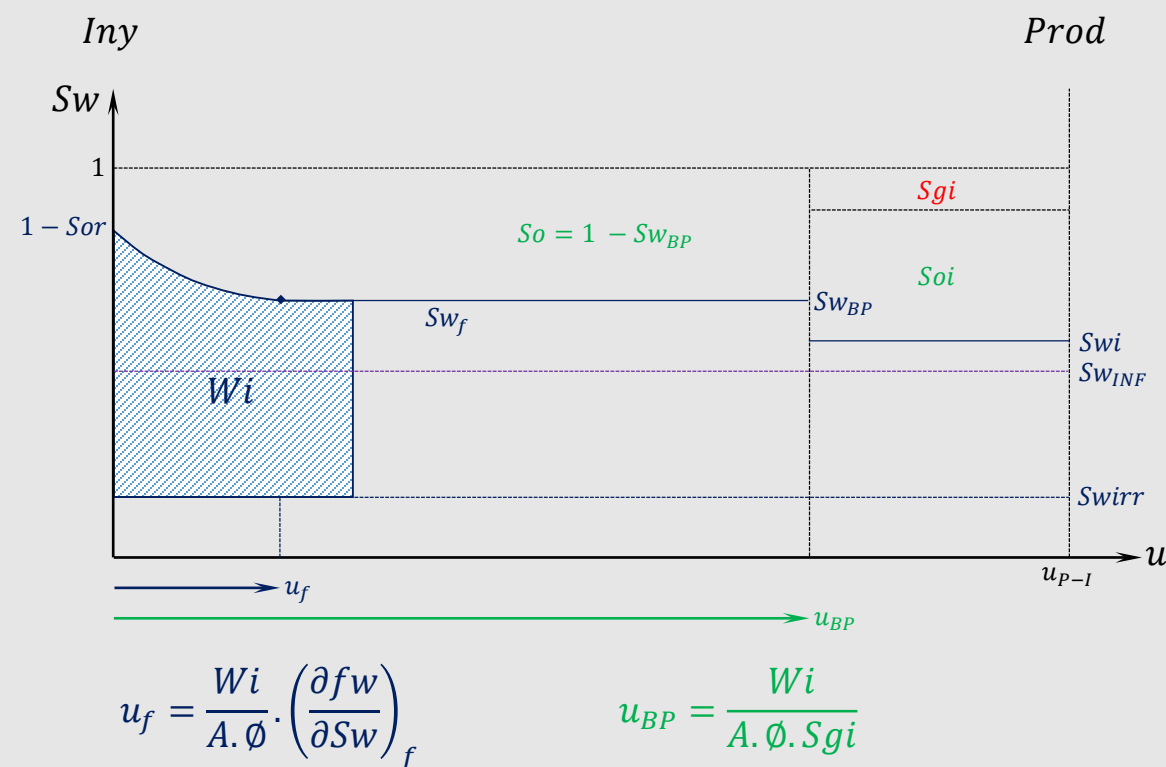
Desarrollo: Caso 6

$$S_{wi} > S_{w_{INF}} \text{ \& } S_{gi} > 0$$

Curva de flujo fraccional



Perfil de avance frontal

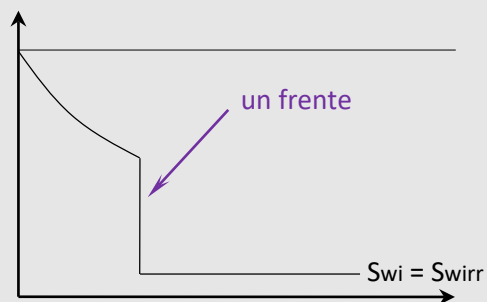


Resumen de Casos:

Sin gas inicial:

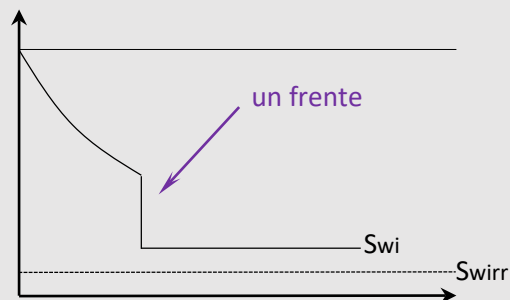
Caso 1:

$S_{wi} = S_{wirr}$
 $S_{gi} = 0$



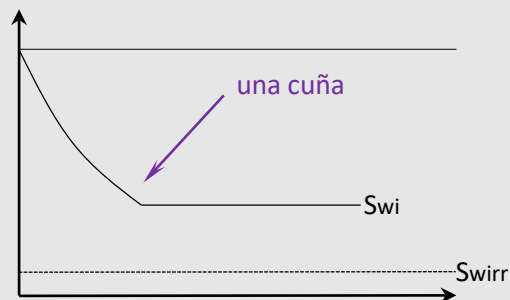
Caso 2:

$S_{wi} > S_{wirr}$
 $S_{gi} = 0$



Caso 3:

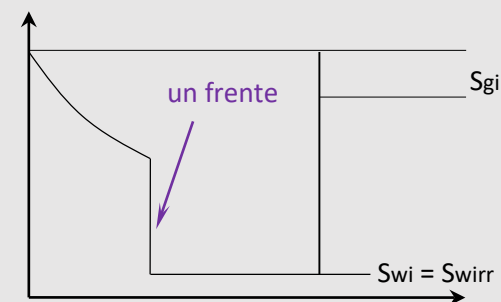
$S_{wi} > S_{w_{INF}}$
 $S_{gi} = 0$



Con gas inicial:

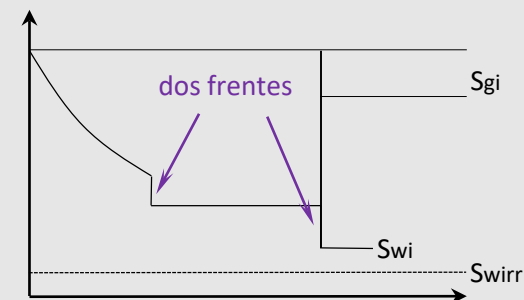
Caso 4:

$S_{wi} = S_{wirr}$
 $S_{gi} > 0$



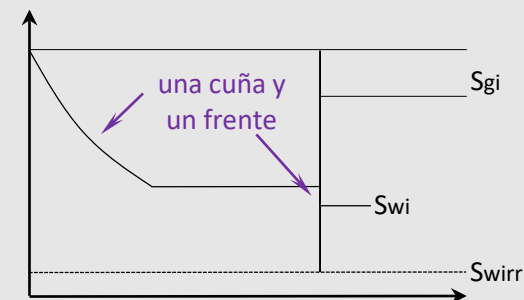
Caso 5:

$S_{wi} > S_{wirr}$
 $S_{gi} > 0$

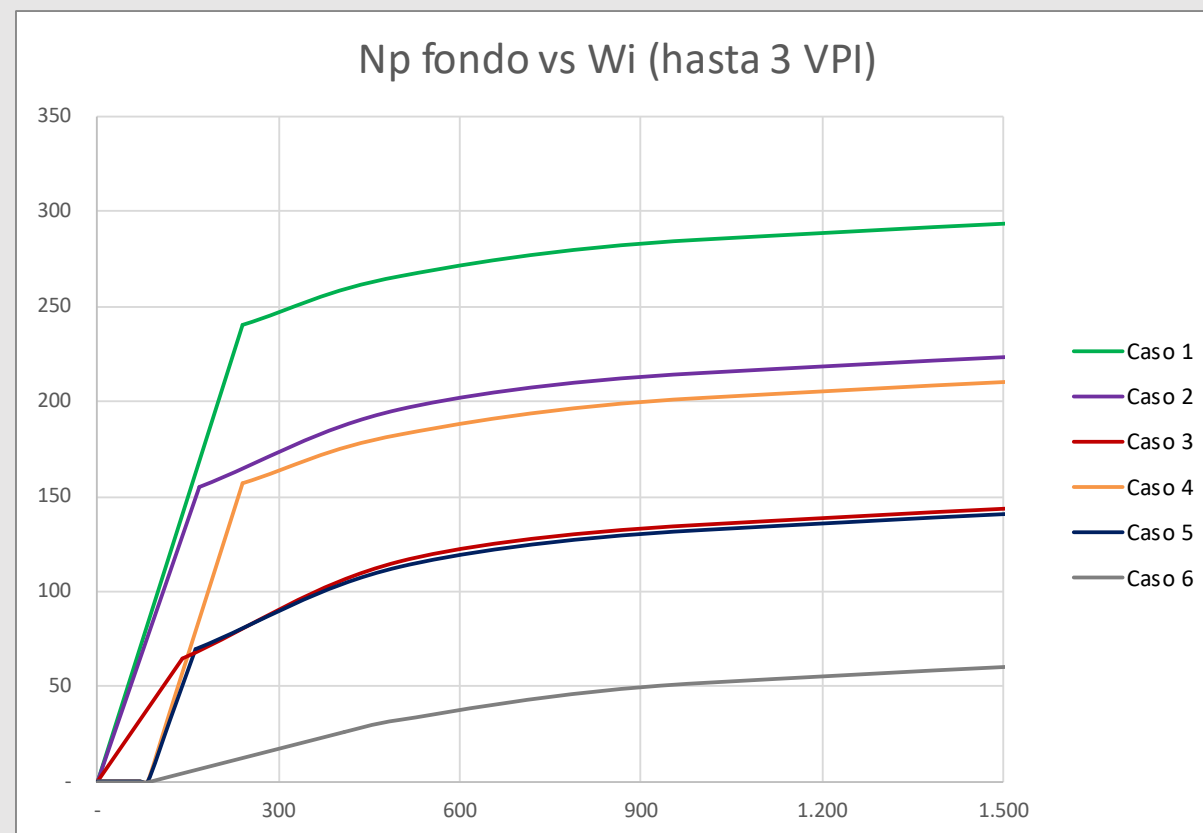
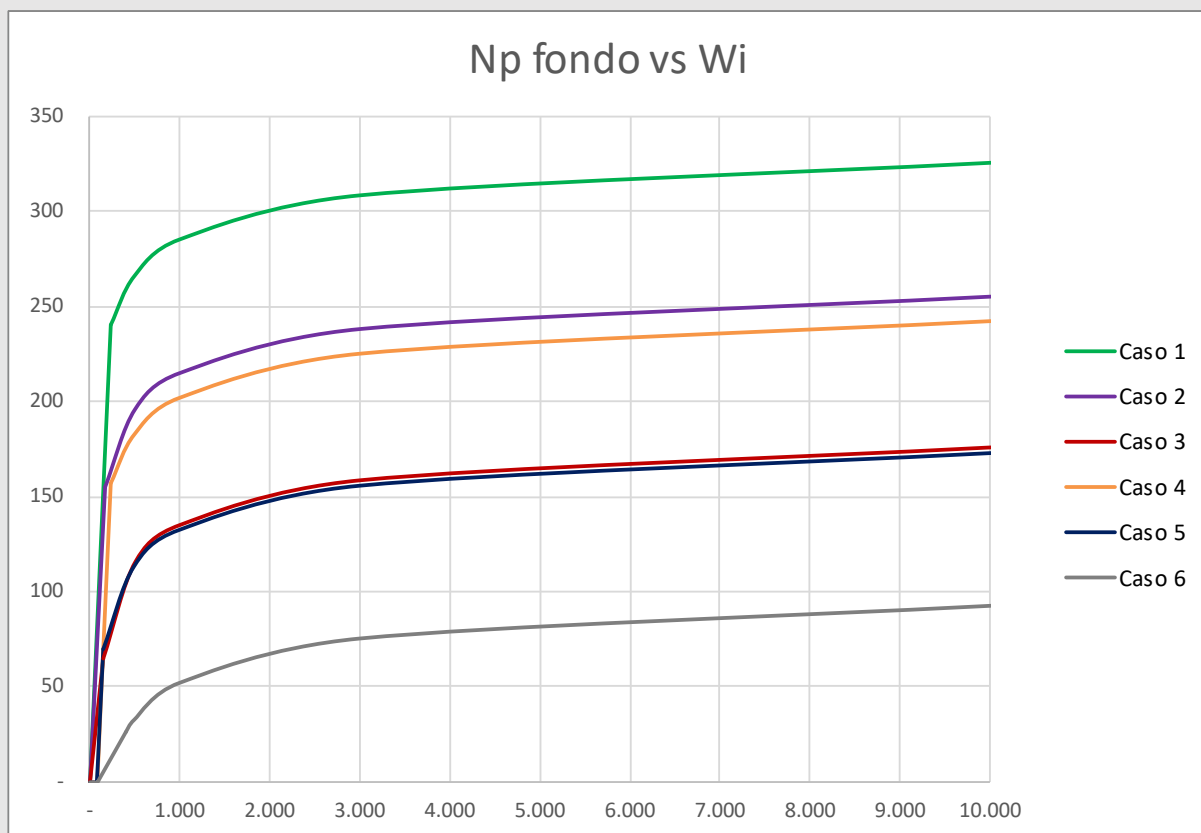


Caso 6:

$S_{wi} > S_{w_{INF}}$
 $S_{gi} > 0$

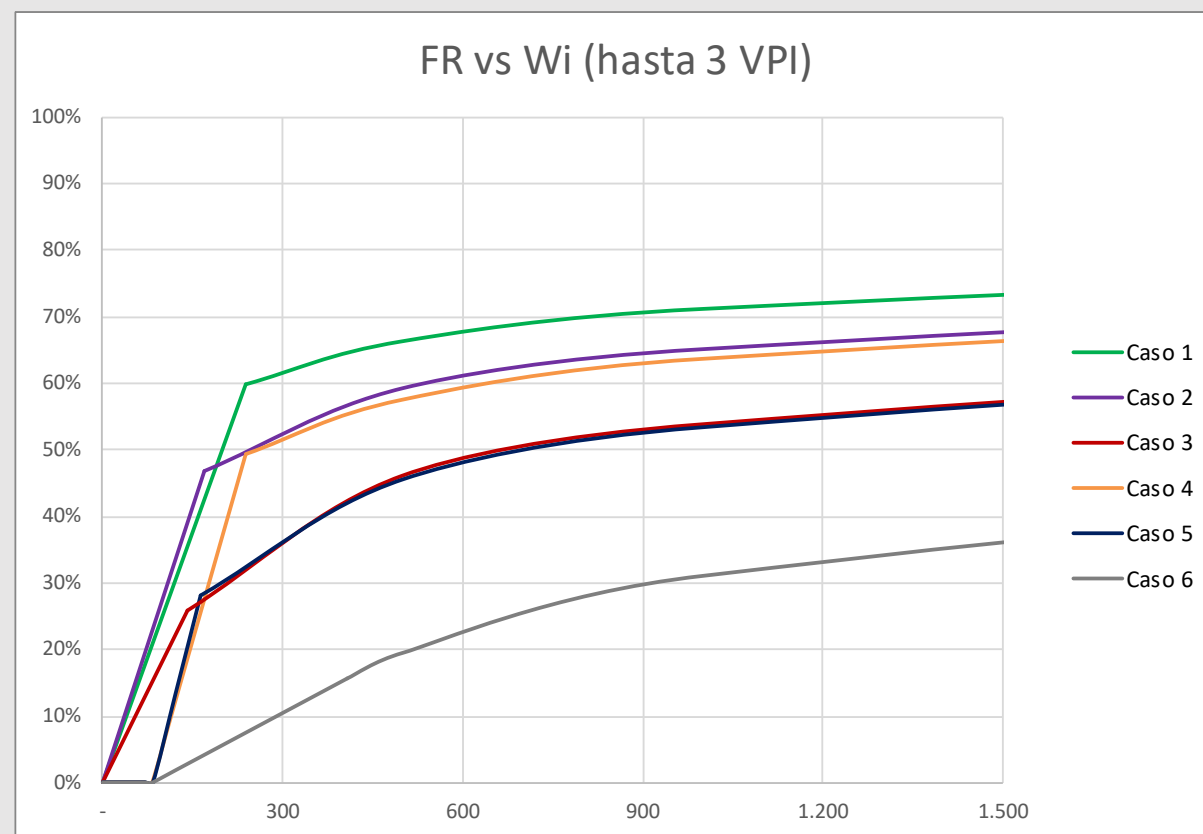
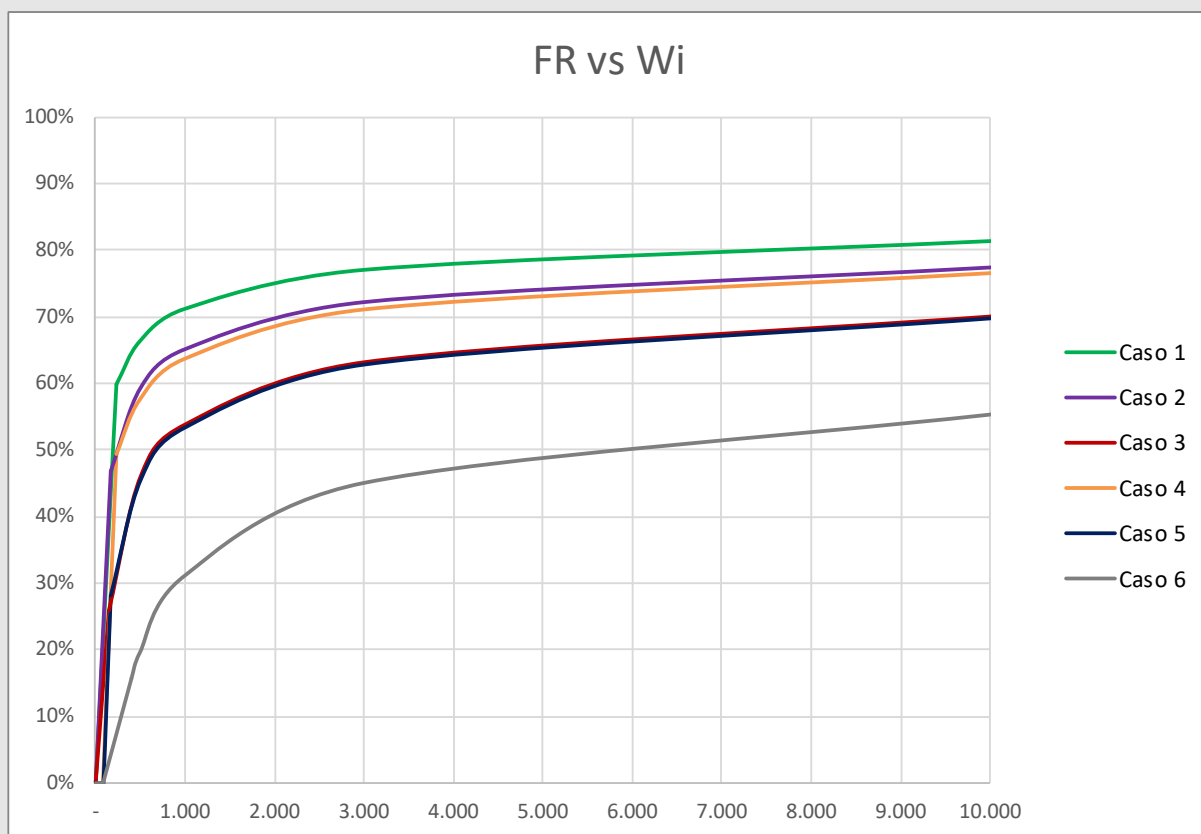


Resultados – Acumulada de petróleo a tiempos largos y a 3 VPI



Recordar que, para el estudio de la eficiencia de desplazamiento, se asume que la eficiencia areal y la vertical son 100%.

Resultados – Factor de recuperación a tiempos largos y a 3 VPI



Recordar que, para el estudio de la eficiencia de desplazamiento, se asume que la eficiencia areal y la vertical son 100%.

Conclusiones

- Cuando existe agua inicial móvil, es empujada hacia adelante.
- En los casos 2 y 3, por no haber saturación de gas inicial, esa agua no tiene otra dirección en qué moverse más que en el sentido del flujo, produciendo un corte de agua en fondo igual a fwi.
- En los casos 5 y 6, el gas que está desapareciendo permite que, en el banco de petróleo, el agua y petróleo móviles no sólo avancen, sino que se redistribuyan, modificando la saturación de ambos fluidos en el banco de petróleo.
- **La existencia de agua inicial móvil ocasiona que parte del agua inyectada se destine a movilizarla, disminuyendo la eficiencia.**
- **La existencia de gas móvil ocasiona el doble efecto negativo de tener que inyectar agua para alcanzar el llenado y aumenta la saturación de agua en el banco de petróleo, acentuando el efecto del punto anterior.**



7° CONGRESO **IAPG**
Producción
y Desarrollo
de Reservas

5 – 8 de Noviembre 2019
Mar del Plata, Argentina



Muchas gracias

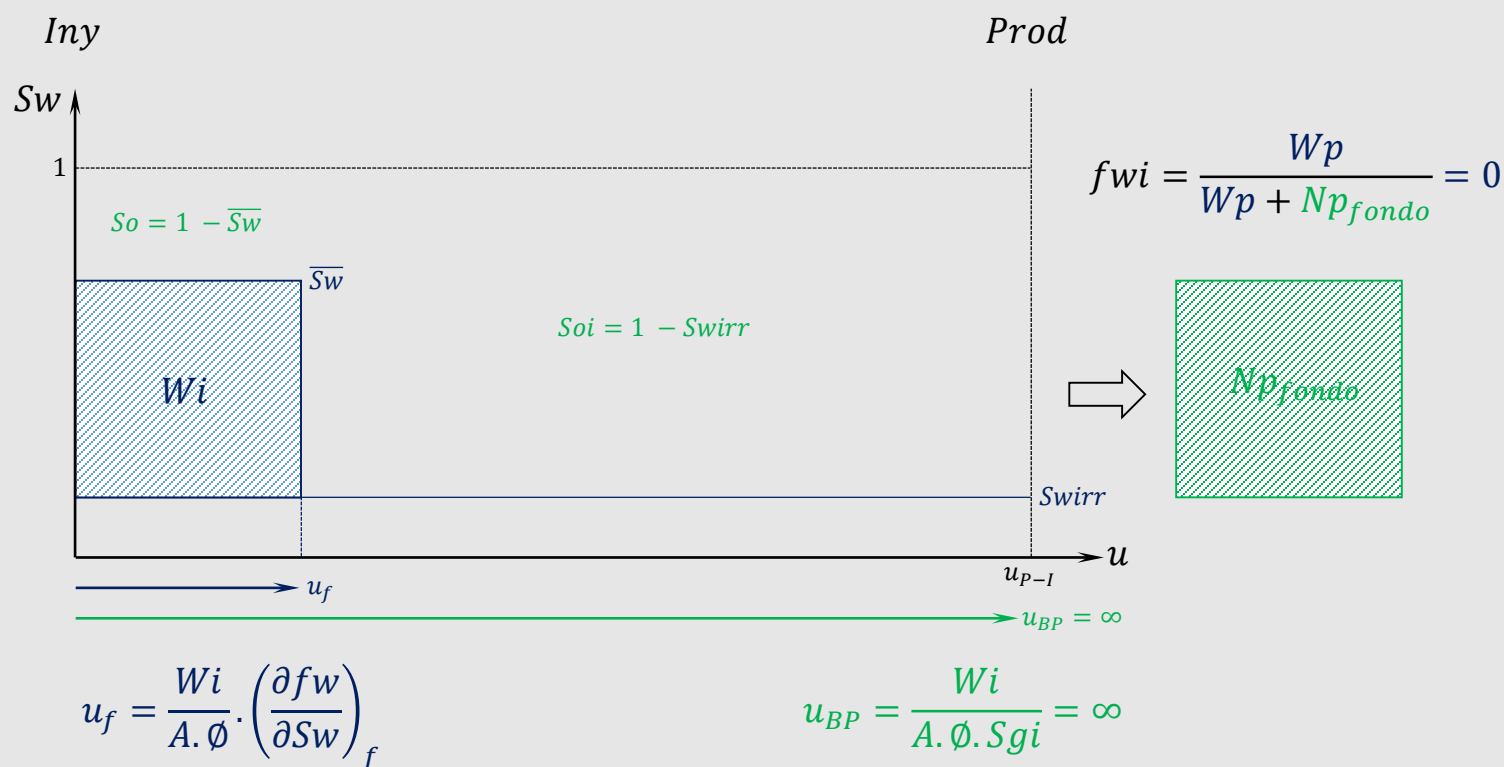
Álvaro Bugari – abugari@gmail.com

 J@R Consultora

2019

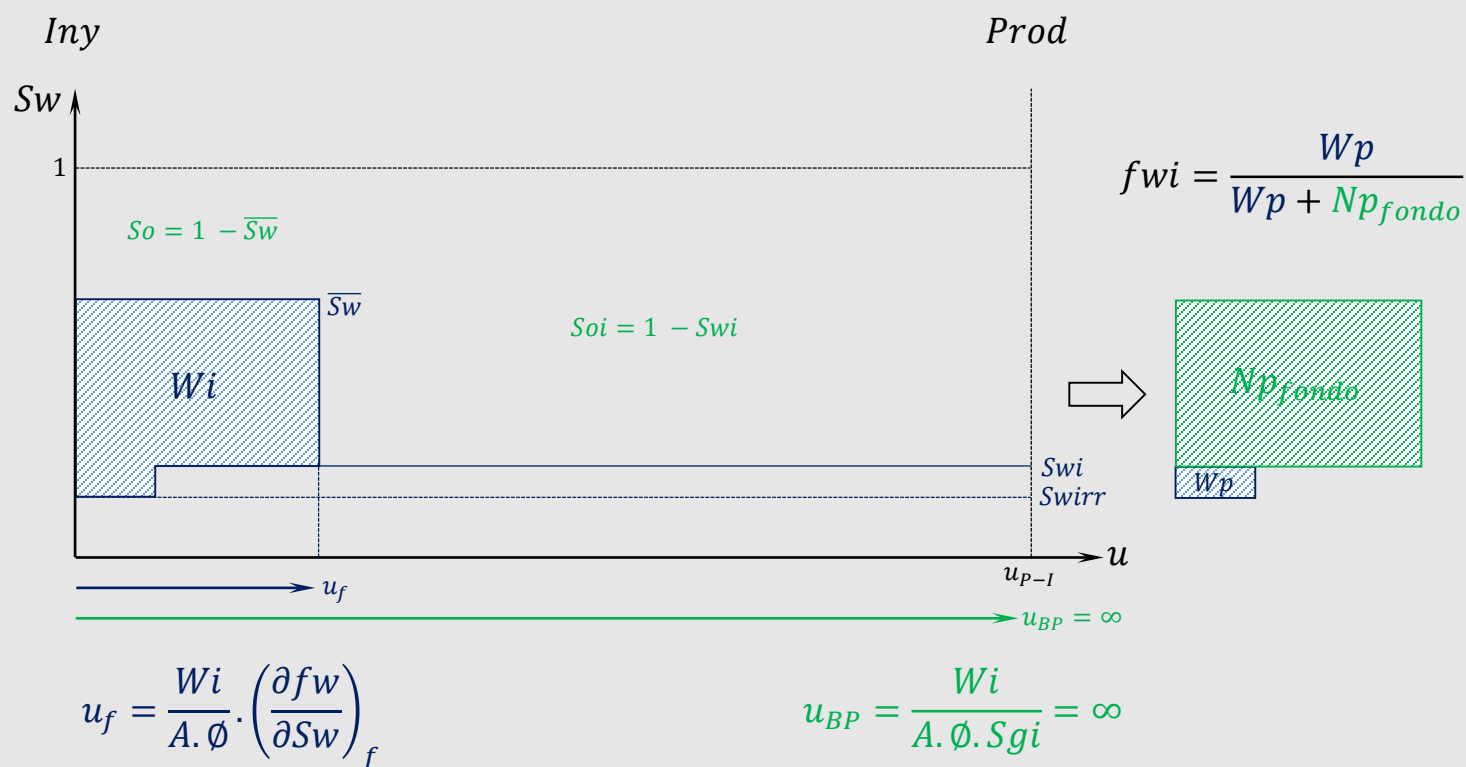
Anexo I – Caso 1

Producciones de petróleo y agua por caso, previo al breakthrough con el perfil de avance representado por su saturación promedio



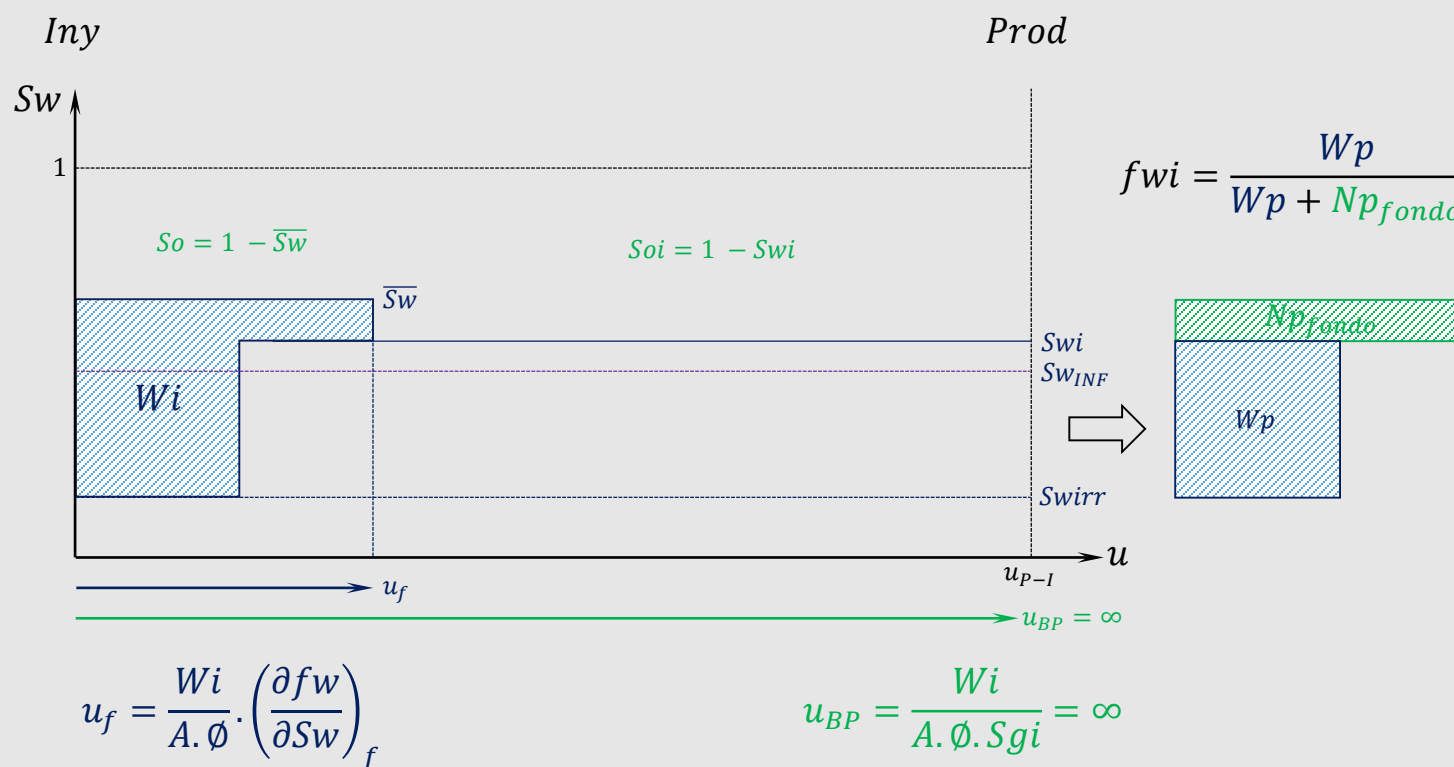
Anexo I – Caso 2

Producciones de petróleo y agua por caso, previo al breakthrough con el perfil de avance representado por su saturación promedio



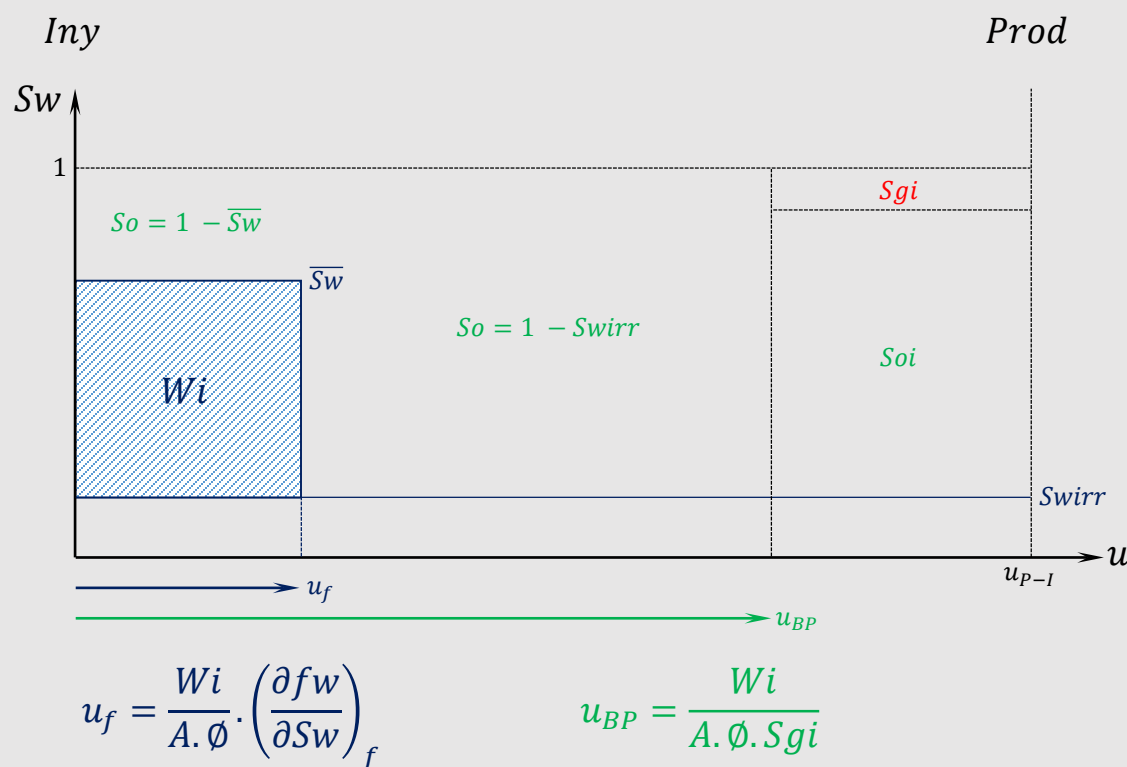
Anexo I – Caso 3

Producciones de petróleo y agua por caso, previo al breakthrough con el perfil de avance representado por su saturación promedio



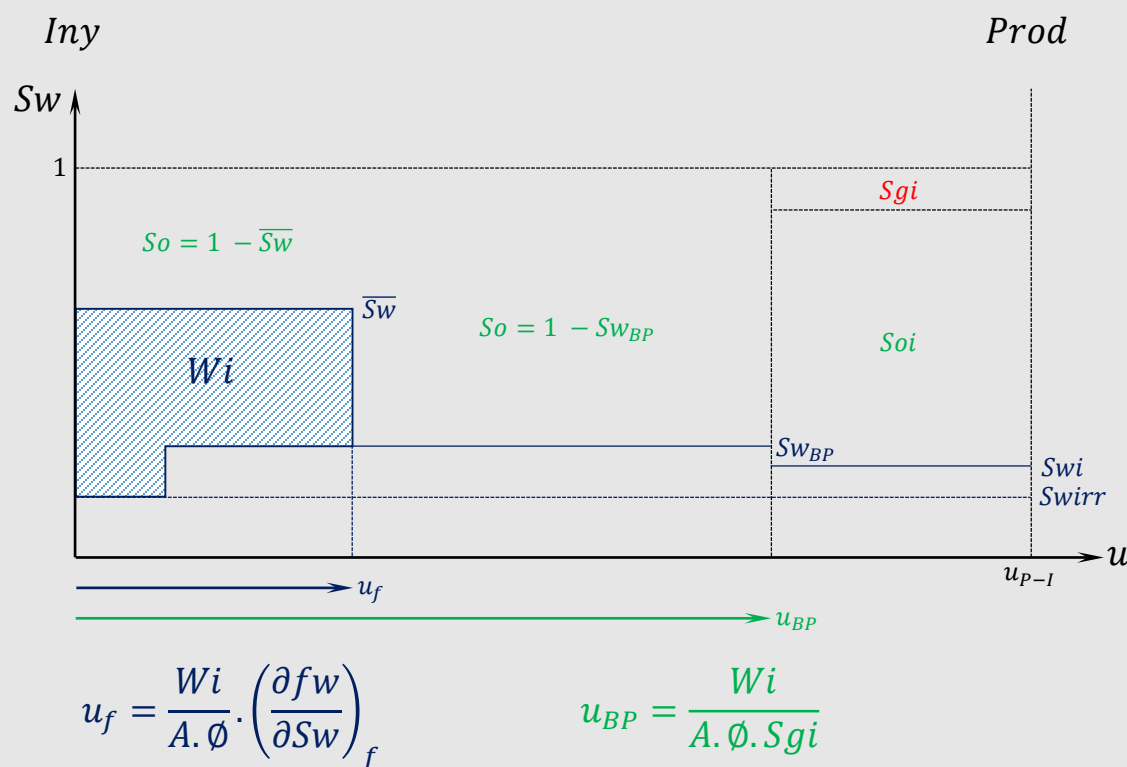
Anexo I – Caso 4

Producciones de petróleo y agua por caso, previo al breakthrough con el perfil de avance representado por su saturación promedio



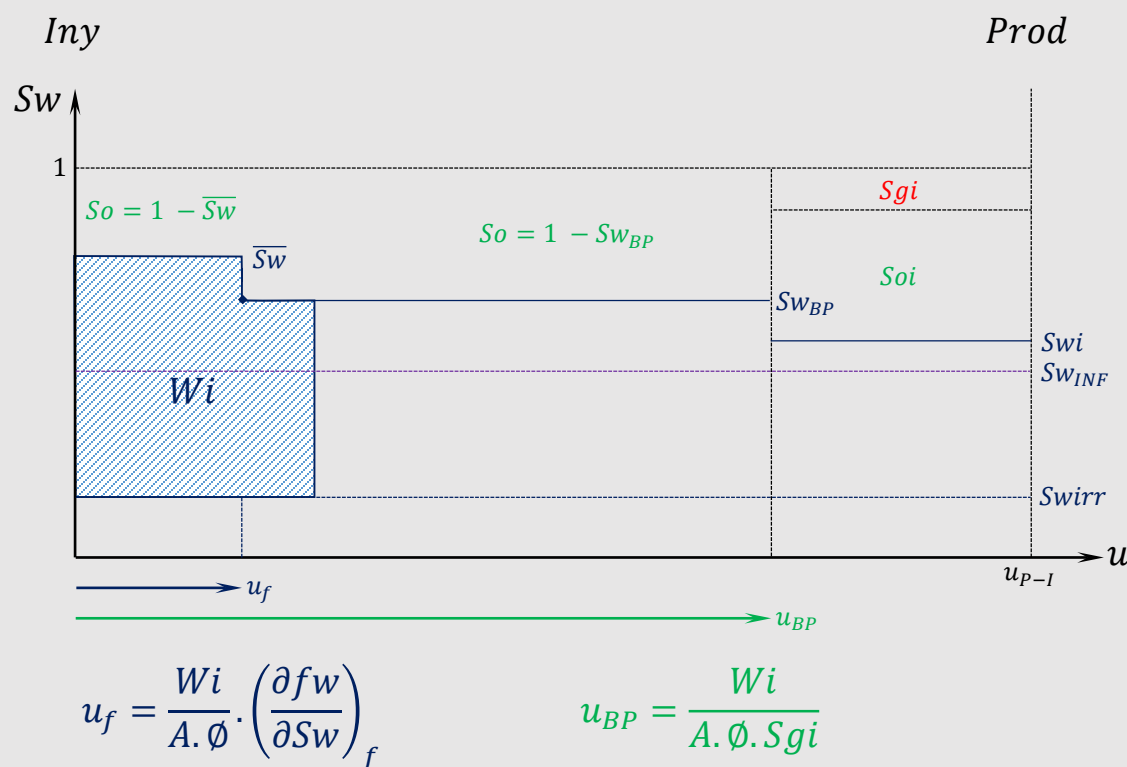
Anexo I – Caso 5

Producciones de petróleo y agua por caso, previo al breakthrough con el perfil de avance representado por su saturación promedio



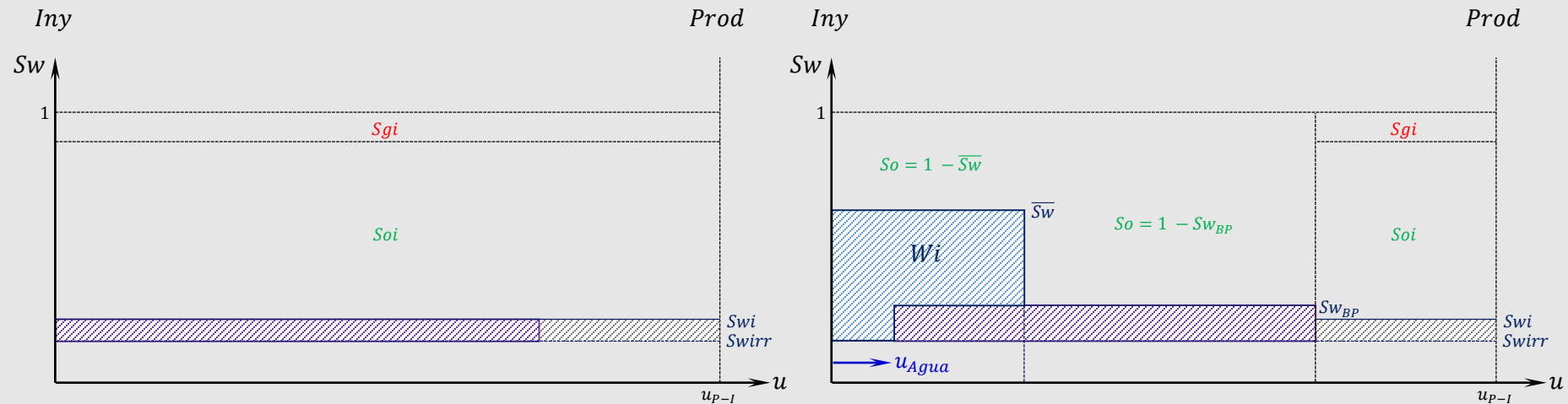
Anexo I – Caso 6

Producciones de petróleo y agua por caso, previo al breakthrough con el perfil de avance representado por su saturación promedio





Anexo II – Comprobación del volumen de agua inicial previo a la respuesta

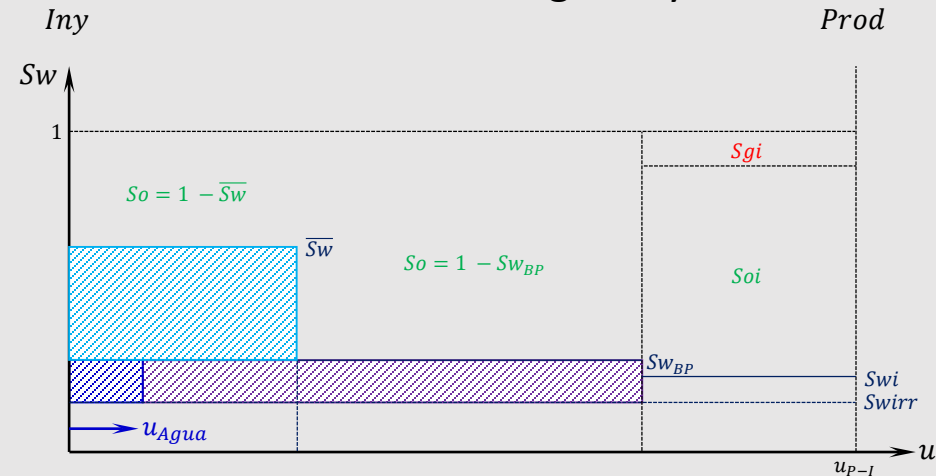


- Si la zona por delante de u_{BP} es virgen entonces los volúmenes que representan las áreas violetas deberían ser iguales.
- El primero es: $Volumen = u_{BP} \cdot A \cdot \phi \cdot (Swi - Swirr)$



Anexo II – Comprobación del volumen de agua inicial previo a la respuesta

- Pero para definir el segundo se necesita conocer qué porción del agua inyectada está barriendo petróleo y cual está barriendo agua.
- Para realizar este cálculo puede dividirse el volumen de agua inyectada en dos:



- De esta forma vemos que el rectángulo celeste está desplazando petróleo mientras que el azul está desplazando agua de formación.

Anexo II – Comprobación del volumen de agua inicial previo a la respuesta

- Y calculando:

$$Volumen = u_f \cdot A \cdot \phi \cdot (\overline{S_w} - S_{w_{BP}})$$

$$Volumen = u_{Agua} \cdot A \cdot \phi \cdot (S_{w_{BP}} - S_{wirr})$$

- Luego:

$$Wi = Volumen + Volumen$$

$$Volumen = Wi - Volumen$$

$$u_{Agua} \cdot A \cdot \phi \cdot (S_{w_{BP}} - S_{wirr}) = Wi - u_f \cdot A \cdot \phi \cdot (\overline{S_w} - S_{w_{BP}})$$

$$u_{Agua} = \frac{Wi}{A \cdot \phi \cdot (S_{w_{BP}} - S_{wirr})} - \frac{u_f \cdot A \cdot \phi \cdot (\overline{S_w} - S_{w_{BP}})}{A \cdot \phi \cdot (S_{w_{BP}} - S_{wirr})}$$

$$u_{Agua} = \frac{Wi}{A \cdot \phi \cdot (S_{w_{BP}} - S_{wirr})} - u_f \frac{(\overline{S_w} - S_{w_{BP}})}{(S_{w_{BP}} - S_{wirr})}$$

Anexo II – Comprobación del volumen de agua inicial previo a la respuesta

- Esta ecuación es válida para todos los casos.
- Cabe recordar que para los casos los casos 2 y 3 $Sw_{BP} = Sw_i$. Y que para los casos 1 y 4, por no haber agua inicial móvil, los denominadores se hacen 0.
- Finalmente, se realiza el chequeo y se verifica que ambas ecuaciones devuelvan el mismo resultado de volumen de agua de formación:

$$Volumen = u_{BP} \cdot A \cdot \emptyset \cdot (Sw_i - Sw_{irr})$$

$$Volumen = (u_{BP} - u_{Agua}) \cdot A \cdot \emptyset \cdot (Sw_{BP} - Sw_{irr})$$

- Esta verificación es correcta hasta el fill-up.
- Si quisiera realizarse post fill-up debería incluirse el agua producida.

Anexo III – Resumen de fórmulas

Distancia inyector-frente de banco de petróleo:

u_{BP}

- Antes del fill-up:

$$u_{BP} = \frac{Wi}{A. \phi. Sgi}$$

*(si $Sgi = 0$, $u_{BP} \rightarrow \infty$; podemos considerar
 $u_{BP} = u_{Iny-Prod}$ desde el comienzo: Casos 1, 2 y 3)*

- En el fill-up:

$$u_{BP} = \frac{Wi_{FU}}{A. \phi. Sgi} = u_{Iny-Prod}$$

(para los casos 1, 2 y 3, entonces, el $Wi_{FU} = 0$)

- Posterior al fill-up:

$$u_{BP} = u_{Iny-Prod}$$

Anexo III – Resumen de fórmulas

Distancia inyector-frente de banco de agua:

u_{frente}

- Antes del fill-up:

$$u_f = \frac{Wi}{A \cdot \phi} \cdot \left(\frac{\partial f_w}{\partial S_w} \right)_f = \frac{Wi}{A \cdot \phi} \cdot f'_f$$

recordando que para los casos 1, 2 y 3, no existen momentos "antes del fill – up"

- En el fill-up:

$$u_{f_{FU}} = \frac{Wi_{FU}}{A \cdot \phi} \cdot \left(\frac{\partial f_w}{\partial S_w} \right)_f = \frac{Wi_{FU}}{A \cdot \phi} \cdot f'_f$$

de nuevo, recordando que para los casos 1, 2 y 3, $Wi_{FU} = 0$

Anexo III – Resumen de fórmulas

Distancia inyector-frente de banco de agua:

u_{frente}

- Entre el fill-up y el breakthrough:

$$u_f = \frac{Wi}{A \cdot \phi} \cdot \left(\frac{\partial f_w}{\partial S_w} \right)_f = \frac{Wi}{A \cdot \phi} \cdot f'_f$$

- En el breakthrough:

$$u_{f_{BT}} = u_{Iny-Prod} = \frac{Wi_{BT}}{A \cdot \phi} \cdot \left(\frac{\partial f_w}{\partial S_w} \right)_f = \frac{Wi_{BT}}{A \cdot \phi} \cdot f'_f = cte$$

- Posterior al breakthrough:

$$u_{Iny-Prod} = \frac{Wi}{A \cdot \phi} \cdot \left(\frac{\partial f_w}{\partial S_w} \right)_{Prod} = \frac{Wi}{A \cdot \phi} \cdot f'_{Prod} = cte$$

para que u permanezca constante los incrementos de Wi causarán una disminución de f'

Anexo III – Resumen de fórmulas

Distancia inyector-frente de agua que desplaza agua: u_{Agua}

- Es independiente de momentos como el fill-up o el breakthrough pero puede calcularse su valor en ellos utilizando en la fórmula los valores correspondientes:

$$u_{\text{Agua}} = \frac{Wi}{A \cdot \phi \cdot (S_{w_{BP}} - S_{wirr})} - u_f \frac{(\bar{S}_w - S_{w_{BP}})}{(S_{w_{BP}} - S_{wirr})}$$

$$u_{\text{Agua}_{FU}} = \frac{Wi_{FU}}{A \cdot \phi \cdot (S_{w_{BP}} - S_{wirr})} - u_{f_{FU}} \frac{(\bar{S}_w - S_{w_{BP}})}{(S_{w_{BP}} - S_{wirr})}$$

$$u_{\text{Agua}_{BT}} = \frac{Wi_{BT}}{A \cdot \phi \cdot (S_{w_{BP}} - S_{wirr})} - u_{f_{BT}} \frac{(\bar{S}_w - S_{w_{BP}})}{(S_{w_{BP}} - S_{wirr})}$$

*la única precaución a tener es en los casos 1 y 4, donde $S_{w_{BP}} = S_{wirr}$ y la fórmula se convierte en $u_{\text{Agua}} = \infty - \infty$.
En esos casos, para salvar la indeterminación, se utiliza $u_{\text{Agua}} = 0$*

Anexo III – Resumen de fórmulas

Volumen de agua inyectada:

W_i

- Antes del fill-up:

$$W_i = u_f \cdot A \cdot \phi \cdot (\bar{S}_w - S_{w_{BP}}) + u_{Agua} \cdot A \cdot \phi \cdot (S_{w_{BP}} - S_{wirr})$$
$$W_i = A \cdot \phi \left(u_f \cdot (\bar{S}_w - S_{w_{BP}}) + u_{Agua} \cdot (S_{w_{BP}} - S_{wirr}) \right)$$

recordando que para los casos 1 y 4, $u_{Agua} \rightarrow 0$ porque $S_{w_{BP}} = S_{wirr}$; y que para los casos 2 y 3 la $S_{w_{BP}} = S_{wi}$.

- En el fill-up:

$$W_{i_{FU}} = VP \cdot S_{gi} = u_{Iny-Prod} \cdot A \cdot \phi \cdot S_{gi}$$
$$W_{i_{FU}} = A \cdot \phi \left(u_{f_{FU}} \cdot (\bar{S}_w - S_{w_{BP}}) + u_{Agua_{FU}} \cdot (S_{w_{BP}} - S_{wirr}) \right)$$

misma aclaración que antes

- Entre el fill-up y el breakthrough:

$$W_i = A \cdot \phi \left(u_f \cdot (\bar{S}_w - S_{w_{BP}}) + u_{Agua} \cdot (S_{w_{BP}} - S_{wirr}) \right)$$

misma aclaración que antes

Anexo III – Resumen de fórmulas

Volumen de agua inyectada:

Wi

- En el breakthrough:

$$Wi_{BT} = A. \phi \left(u_{f_{BT}} \cdot (\overline{S_w} - S_{w_{BP}}) + u_{Aguá_{BT}} \cdot (S_{w_{BP}} - S_{wirr}) \right)$$
$$Wi_{BT} = A. \phi \left(u_{Iny-Prod} \cdot (\overline{S_w} - S_{w_{BP}}) + u_{Aguá_{BT}} \cdot (S_{w_{BP}} - S_{wirr}) \right)$$

misma aclaración que antes

- Para cualquier momento desde el comienzo de la inyección hasta el abandono:

$$Wi = \frac{u_{Sw} \cdot A. \phi}{\left(\frac{\partial f_w}{\partial S_w} \right)_{Sw}} = \frac{u_{Sw} \cdot A. \phi}{f'_{Sw}}$$

esta ecuación es válida en todo momento siempre y cuando se utilice con cuidado. La distancia entre el inyector y un plano de cualquier valor de saturación aumentará en función del agua inyectada hasta alcanzar el pozo productor, luego será constante. Si, en cambio, se estudia el pozo productor, (posterior al breakthrough) el valor de u permanecerá constante e igual a $u_{Iny-Prod}$ y Wi aumentará cuando f' disminuya.

Anexo III – Resumen de fórmulas

Volumen de petróleo producido en fondo:

Np_{fondo}

- Antes del fill-up:

$$Np = 0$$

(sólo válido para los casos 4, 5 y 6)

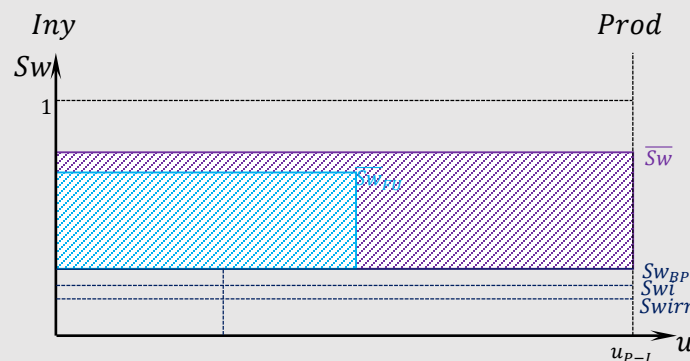
- En el fill-up:

$$Np = 0$$

(válido para todos los casos; sabiendo que $Wi_{FU} = 0$ en los casos 1, 2 y 3)

- Posterior al fill-up:

$$Np \cdot Bo = A \cdot \phi \cdot \left(\underbrace{u_f \cdot (\bar{S}_w - S_{w_{BP}})}_{\text{La parte del } Wi \text{ que desplaza petróleo}} - \underbrace{u_{f_{FU}} \cdot (\bar{S}_{w_{FU}} - S_{w_{BP}})}_{\text{La parte del } Wi \text{ que no desplazó petróleo por haber estado haciendo fill-up}} \right) = A \cdot \phi \cdot u_f \cdot (\bar{S}_w - S_{w_{BP}}) - Wi_{FU} \cdot f_{o_{BP}}$$



Anexo III – Resumen de fórmulas

Volumen de agua producida:

W_p

- Desde el comienzo de la inyección hasta el abandono:

$$W_p = (W_i - W_{i_{FU}}) - N_p \cdot B_o$$

ecuación válida para todos los casos, en todo momento;

- Pudiendo verificarse que para cualquier momento previo al breakthrough:

$$f_{w_{BP}} = \frac{W_p}{W_p + N_p \cdot B_o}$$

siendo $W_p = 0 \rightarrow f_{w_{BP}} = 0$, para los casos 1 y 4

y siendo $f_{w_{BP}} = f_{wi}$ para los casos 2 y 3