

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL TRANSPORTE DE TRAZADORES EN FLUJOS DE SOLUCIONES POLIMÉRICAS NO NEWTONIANAS EN IMPLEMENTACIONES DE EOR

Horacio P. Burbridge^a, Marcela Raviculé^a, Juan E. Juri^b y Ana M. Ruiz^c

^a*Gerencia de productos, procesos y técnicas analíticas, YPF Tecnología S.A., Avenida del petróleo argentino s/n entre 129 y 143. Berisso, Buenos Aires. C.P: 1923, Argentina, horacio.burbridge@ypftecnologia.com, <https://www.y-tec.com.ar>*

^b*Gerencia de proyectos especiales, YPF S.A., Macacha Güemes 515, 1106 Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina, juan.juri@ypf.com, <http://www.ypf.com>*

^c*Equipo de reservorios operativos de Manantiales Behr Norte, YPF S.A., Argentina, ana.ruiz.m@ypf.com, <http://www.ypf.com>*

Palabras clave: Recuperación mejorada de petróleo (EOR), fluidodinámica computacional (CFD), no newtonianos, Ley de Carreau, transporte de trazadores.

Resumen. Después de las recuperaciones primaria y secundaria, los reservorios aún contienen un porcentaje importante de crudo remanente y para lograr su extracción se requiere de la implementación de métodos de recuperación mejorada (EOR), entre ellos la inyección de químicos, soluciones poliméricas, gas y solventes. Durante la inyección de polímeros, dependiendo de las condiciones de flujo y de las características de la instalación, puede ocurrir la degradación de los mismos. La degradación de la solución de polímero implica una clara disminución en la viscosidad, y una consecuente reducción en la eficiencia de barrido en el reservorio. Como método de determinación de la viscosidad efectiva que tiene la solución polimérica en pozo, se planteó la utilización de la herramienta de perfil de tránsito de fluido (*flow log*) que se utiliza en los pozos inyectoros de agua para estimar caudales en pozo. La herramienta inyecta un trazador radioactivo y tiene dos sensores de radiación gamma que proveen curvas de radiación vs tiempo. Los niveles de radiación detectados están directamente relacionados a la concentración del trazador en el flujo principal de agua o de polímero. La forma de estas curvas resulta ser un potencial indicador de la posible degradación de las moléculas de polímero, pero esta aplicación aún debe ser estudiada. Para entender el fenómeno fluidodinámico que ocurre en el proceso de difusión del trazador y sus consecuencias sobre las curvas obtenidas, en este trabajo se realizaron varias simulaciones utilizando técnicas de CFD. Los diferentes casos simulados corresponden a diferentes soluciones de polímero fluyendo por un conducto bidimensional (2D). Las variaciones de concentración y, en consecuencia, de la viscosidad de la solución, se representaron modificando los parámetros característicos en la ley de Carreau para fluidos no newtonianos. Luego de alcanzado el estado estacionario se inyectó un segundo fluido (trazador) y se utilizó una ecuación de transporte de especies para el mismo. Finalmente, se obtuvieron curvas de concentración de trazador para analizar cómo impacta la fluidodinámica del proceso en la forma de las mismas.

1 INTRODUCCIÓN

Después de las recuperaciones primaria y secundaria, los reservorios contienen un porcentaje importante de crudo remanente y para lograr su extracción se requiere de la implementación de métodos de recuperación mejorada (EOR), entre ellos la inyección de químicos, gas y solventes. Hoy en día, la inyección de soluciones poliméricas, es uno de los métodos implementados a escala comercial y con el cual se puede llegar a recuperar hasta un 12 % del petróleo remanente, dependiendo de factores técnicos y económicos.

Durante la inyección de polímeros, dependiendo de las condiciones de flujo y de las características de la instalación, puede ocurrir la degradación de los mismos. La degradación de la solución de polímero implica una clara disminución en la viscosidad, y una consecuente reducción en la eficiencia de barrido en el reservorio. Es por ello que la detección temprana en pozo de este fenómeno puede contribuir a mejorar las eficiencias de las operaciones en pilotos de EOR.

Muchos yacimientos maduros con inyección de agua en Argentina son precandidatos a una explotación con tecnologías de proceso EOR. En el marco de un proyecto piloto realizado en la cuenca del Golfo San Jorge (Argentina) por YPF SA, se realizó una prueba de inyektividad de polímero en pozo. Durante este ensayo se registraron perfiles de tránsito de fluidos (*flow-log*) para determinar la admisión de polímero por punzado. Esta herramienta es de uso masivo para monitorear la inyección de agua en proyectos de recuperación secundaria (ISO 2975/VII, 1977).

En la Figura 1 se muestra el esquema de la herramienta de perfil de tránsito de fluido como la que se usa en los pozos inyector de agua para estimar caudales en pozo. La medición se fundamenta en la obtención de la diferencia entre los tiempos de tránsito del trazador radioactivo cuando pasa por dos detectores de rayos gamma situados a cierta distancia conocida. Esta diferencia de tiempos de tránsito se obtiene usando una correlación cruzada (Zheng and Liu, 2006; Hill, Boehm and Akers, 1988).

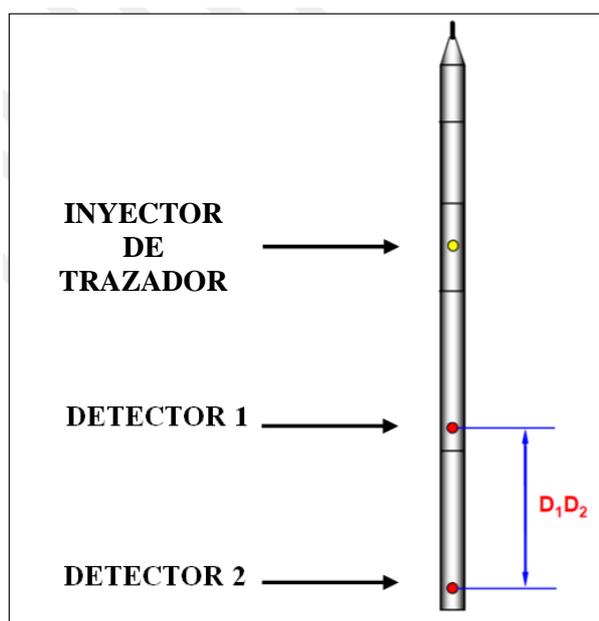


Figura 1: Herramienta de perfil de tránsito de fluido.

Cuando la herramienta se utiliza en pozos con inyección de agua en reservorio el régimen de flujo es turbulento y la reología del fluido es newtoniana, lo cual favorece la difusión del

trazador radioactivo en el caudal principal de agua en pozo (ver Figura 2). Pero cuando la herramienta se utiliza con inyección de polímeros la reología del fluido es no-newtoniana y, debido al aumento de viscosidad, el régimen de flujo resulta laminar, lo cual dificulta el proceso de difusión del trazador en el flujo principal de polímero.

Así, se observa que las curvas de concentración de trazador obtenidas para flujo de polímeros son irregulares (ver Figura 3), dado que la viscosidad de la solución es mayor a la del agua. Esto sugiere que, si el polímero no se degrada, debería obtenerse una curva irregular (con varios picos y ciertas características que aquí se pretenden determinar). Por el contrario, si el polímero sufrió degradación las curvas deberían tener forma más próxima a una campana, como las curvas que se presentan en el caso de flujo de agua. A partir de estas observaciones resulta de interés analizar los registros que se obtienen y establecer correlaciones que permitan inferir si la solución ha sufrido degradación antes de ingresar a los punzados.

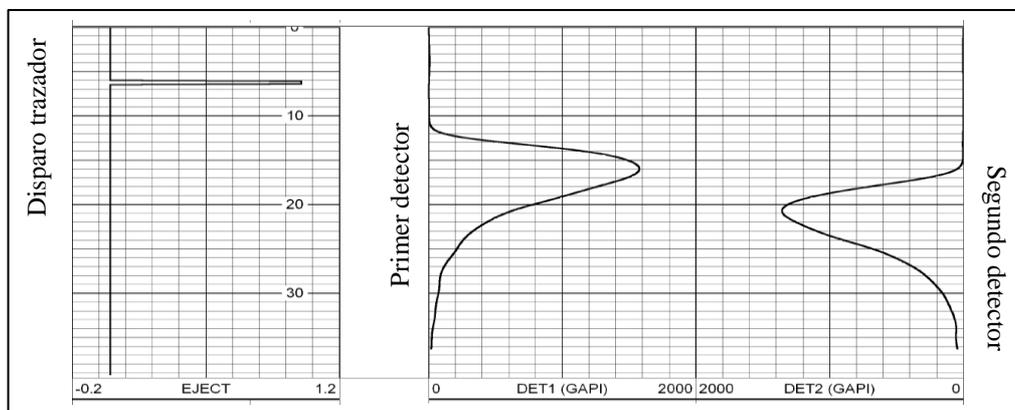


Figura 2: Curvas de concentración de trazador radioactivo para un flujo de agua obtenidas en campo.

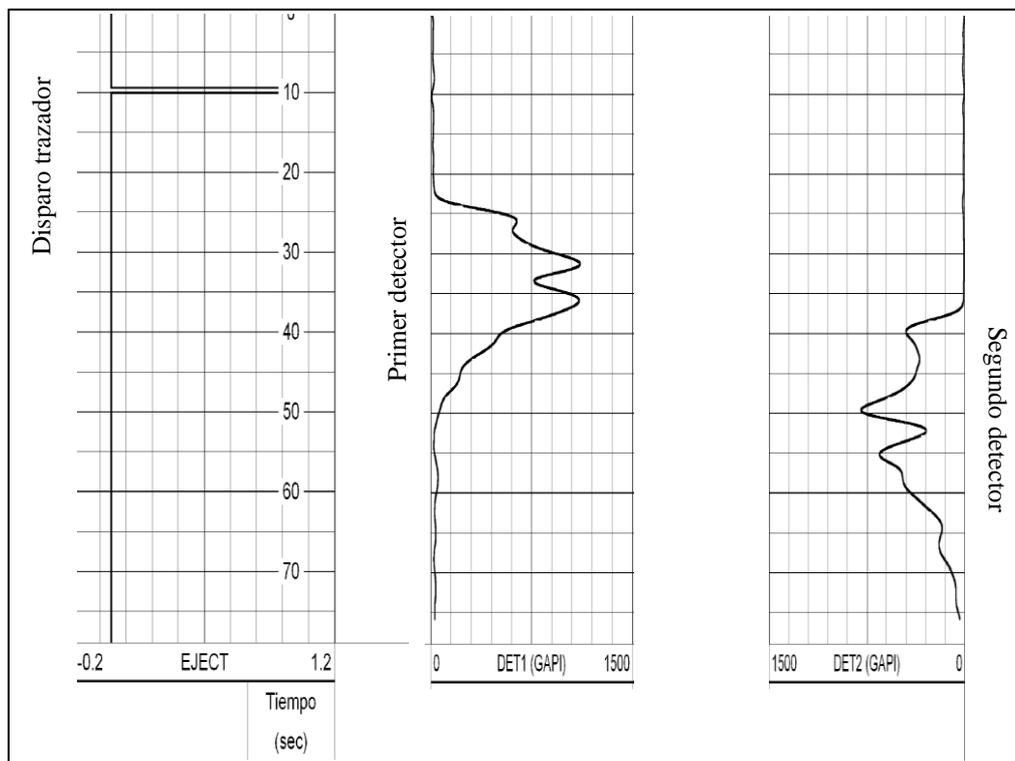


Figura 3: Curvas de concentración de trazador radioactivo para un flujo de polímero obtenidas en campo.

Como primer paso, para entender el fenómeno fluidodinámico que ocurre en el proceso de difusión del trazador y sus consecuencias sobre las curvas obtenidas, se realizaron varias simulaciones fluidodinámicas (CFD), correspondientes a diferentes soluciones no-newtonianas, variando los coeficientes de la ley de viscosidad de Carreau, lo que en la práctica ocurre cuando se tienen diferentes concentraciones de polímero. Como resultado de estas simulaciones se obtienen curvas de concentración que no pueden compararse en forma inmediata con las curvas obtenidas en campo dado que éstas últimas están dadas en términos de radiación detectada. Sin embargo, es evidente que las curvas obtenidas numéricamente permitirán discernir qué fenómenos físicos pueden tener impacto en la forma de las curvas reales detectadas en campo con los sensores de radiación. Esto se debe a que el fenómeno de difusión y transporte del fluido con trazador radioactivo puede considerarse gobernado por una ecuación de transporte como la utilizada en las simulaciones.

Comparando las curvas correspondientes a diferentes concentraciones de polímero, se buscó identificar cómo la variación de la concentración (viscosidad) influye en la forma de las curvas y si esto puede ayudar en la identificación de un posible proceso de degradación.

2 ECUACIÓN DE TRANSPORTE Y LEY DE CARREAU.

Para modelar el transporte y mezcla de fluidos puede utilizarse una ecuación de transporte para la fracción másica utilizando especies químicas (en este caso, dos especies: solución de polímero y agua con trazador).

La fracción másica local de cada especie Y_i se calcula aplicando una ecuación de convección-difusión para cada una de las especies. La expresión general de esta ecuación se describe en la documentación de teoría de ANSYS Fluent (2016) y es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (1)$$

donde R_i es la tasa de producción neta de la especie i por reacciones químicas y S_i es la tasa de creación por adición de la fase dispersa más cualquier fuente definida específicamente para el caso particular del que se trate. En la expresión (3) ρ es la densidad, \vec{v} es el vector velocidad t es tiempo y \vec{J}_i es vector de flujo difusivo de la especie i . Esta ecuación debe ser resuelta para $N-1$ especies donde N es el número total de especies químicas presentes en el sistema (en este caso $N=2$).

Con respecto al modelado de la viscosidad, para fluidos newtonianos incompresibles, el tensor de tensiones de corte $\bar{\tau}$ es proporcional al tensor tasa de deformación \bar{D} :

$$\bar{\tau} = \mu \bar{D} \quad \bar{D} = \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

en donde μ es la viscosidad dinámica newtoniana.

Actualmente las herramientas de CFD, tanto las versiones comerciales como las open source, cuentan con una importante variedad de modelos y metodologías para simular flujos de fluidos no newtonianos. Para algunos de ellos, la tensión de corte se puede escribir en términos de una viscosidad no newtoniana η , de manera similar a la ley de Newton para fluidos newtonianos:

$$\bar{\tau} = \eta(\bar{D}) \bar{D} \quad (3)$$

En general, es una función de los tres invariantes del tensor de tasa de deformación. Sin embargo, en los modelos no newtonianos disponibles en ANSYS Fluent 17.1 se considera que

es una función solamente de la tasa de corte $\dot{\gamma}$ y está relacionada con el segundo invariante del tensor de tasa de deformación y se define como:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2} \overline{\overline{D:D}}}$$

Si el flujo no es isotérmico, la dependencia de la viscosidad con la temperatura puede ser incluida además de la dependencia de la viscosidad con la tasa de corte. En este caso, la viscosidad total consta de dos partes y se calcula como sigue:

$$\mu = \eta(\dot{\gamma}) H(T)$$

donde T es la temperatura y $H(T)$ es la dependencia de la temperatura, conocida como la ley de Arrhenius.

$$H(T) = \exp\left[\alpha\left(\frac{1}{T-T_0} - \frac{1}{T_\alpha-T_0}\right)\right]$$

donde α es la relación entre la energía de activación y la constante termodinámica y T_α es una temperatura de referencia para la cual $H(T) = 1$. T_0 se toma nula por defecto, y corresponde a la menor temperatura que es termodinámicamente aceptable. Luego T y T_0 son temperaturas absolutas.

En cuanto a la dependencia respecto de la tasa de corte, ANSYS Fluent ofrece cuatro opciones para la modelización de flujos no newtonianos:

- Ley de potencia
- Modelo de Carreau para fluidos pseudoplásticos
- Cross model
- Modelo de Herschel-Bulkley para plásticos de Bingham

En particular, el modelo de Carreau intenta describir una amplia gama de fluidos mediante el establecimiento de una curva de ajuste para ensamblar la ley de viscosidad de Newton (fluido newtoniano) con la ley para fluidos pseudoplásticos no newtonianos.

La Figura 4 muestra la Ley de Carreau en ejes a escala logarítmica.

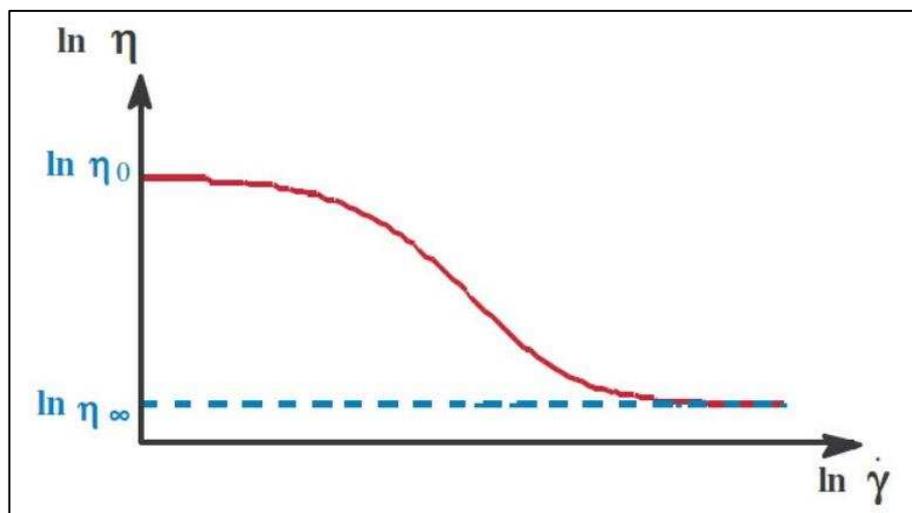


Figura 4: Ley de Carreau para fluidos pseudoplásticos.

En el modelo de Carreau, la viscosidad viene dada por:

$$\eta = H(T) \left(\eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) [1 + \gamma^2 \lambda^2]^{(n-1)/2} \right)$$

En la expresión anterior, λ es la constante de tiempo, n es el índice de ley de potencia (como se describe para la ley de potencia de fluidos no newtonianos), η_0 y η_{∞} son, respectivamente, las viscosidades correspondientes a tasa de corte cero e infinito.

La aplicación de las ecuaciones mencionadas anteriormente permite analizar, en este proyecto, la difusión y mezcla de un trazador en la corriente principal de flujo en el conducto. Esto se hace mediante el modelado de la reología no newtoniana del flujo utilizando la Ley de Carreau para calcular viscosidad en función de la tasa de corte. Los modelos CFD en 2D que se desarrollaron para esto se describen en el siguiente apartado.

3 MODELO NUMÉRICO BIDIMENSIONAL

Se realizaron simulaciones de la dispersión de un trazador en un fluido newtoniano (agua) en condiciones de régimen turbulento utilizando un modelo de CFD. Luego, se efectuaron simulaciones de la dispersión del trazador en soluciones con diferentes concentraciones de polímero. Estas soluciones tienen una reología no newtoniana, y exhiben mayor viscosidad que el agua, por lo cual, las condiciones de flujo corresponden a las de régimen laminar.

Para todas las simulaciones se empleó el software de CFD ANSYS Fluent, y se desarrollaron modelos bidimensionales (2D).

3.1 Geometría y características básicas de los casos.

Se construyó una geometría 2D representando el espacio entre el *casing* y la herramienta, como se representa en la Figura 5.

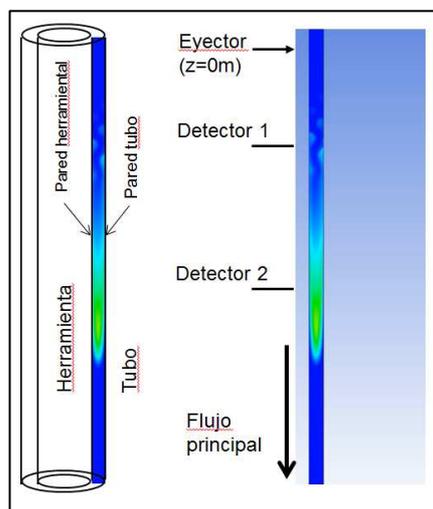


Figura 5: Geometría y características del pulso de inyección de trazador.

La distancia entre el inyector de trazador, de diámetro 0.5mm, y el primer detector es de 2.84m. El segundo detector se encuentra 3.11m abajo del primer detector. La geometría utilizada para la simulación simplemente consiste en un rectángulo plano lo suficientemente extenso en su dimensión longitudinal (16 m) como para que la zona de inyección de trazador y de los detectores esté lo suficientemente alejada de la entrada y la salida. El huelgo que queda entre la herramienta y el *casing* es de 44,21mm.

Los casos analizados son los siguientes:

- Dispersión de agua (trazador) en un flujo turbulento de agua (newtoniano) con número de Reynolds $Re=9720$
- Dispersión de agua (trazador) en flujo laminar de una solución polimérica (2500ppm) no newtoniana con números de Reynolds $Re=172$
- Dispersión de agua (trazador) en flujo laminar de una solución polimérica (1500ppm) no newtoniana con números de Reynolds $Re=365$
- Dispersión de agua (trazador) en flujo laminar de una solución polimérica (1000ppm) no newtoniana con números de Reynolds $Re=624$

En todos los casos el caudal es de $128 \text{ m}^3/\text{día}$ ($V=0,132\text{m/s}$). Es importante tener en cuenta que en estos casos el Reynolds se calcula una vez realizada la simulación, a partir de los datos de viscosidad que se obtienen de la misma, adoptando la viscosidad media para su cálculo. Las diferentes concentraciones se implementan cambiando los coeficientes de la Ley de Carreau, dado que al cambiar la concentración varía la viscosidad de la solución.

Es importante notar que el modelo 2D tiene algunas limitaciones en cuanto a similitud con el caso real que, en rigor, es tridimensional ya que la inyección de trazador se realiza en un punto específico de la circunferencia de la herramienta. Sin embargo estas simulaciones consisten en una primera etapa del proceso, pudiendo luego realizarse simulaciones 3D si los resultados de las presentes simulaciones captan los principios físicos del problema de difusión y permiten entender cómo estos determinan los diferentes tipos de curvas.

3.2 Malla de volúmenes finitos.

Para estas simulaciones se utilizó una malla que cuenta con 502652 nodos y 495457 celdas, y que se desarrolla en forma no estructurada desde el contorno de entrada hasta una región anterior a la entrada de fluido con trazador. Si bien, como se indicó anteriormente, en la región de entrada la malla es no estructurada, la misma cuenta con cuatro capas de celdas que se desarrollan en forma regular desde las paredes hacia el interior. La región de entrada del flujo principal se puede observar en la Figura 6.

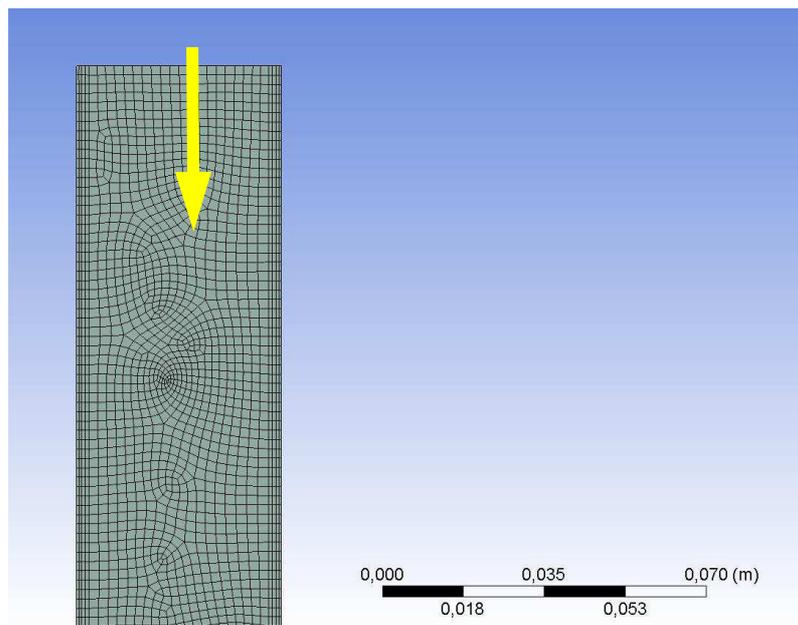


Figura 6: Malla de volúmenes finitos: detalle de la zona de entrada del flujo principal.

Las Figuras 7 y 8 muestran detalles de la transición de la malla especialmente en la zona de inyección y la región posterior hacia los detectores, en donde, como consecuencia del método empleado para su generación (*mapped*) la malla es estructurada. La discretización de la malla resulta suficiente en todos los casos, teniendo en cuenta los números de Reynolds involucrados, y la concentración de celdas y nodos hacia las paredes. ($Y^+ = 5$ en la región no estructurada para el caso turbulento).

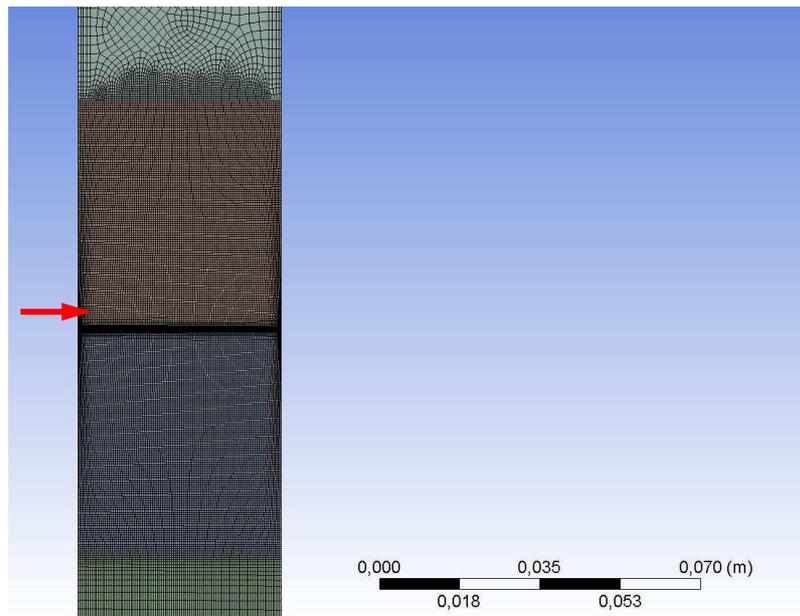


Figura 7: Malla de volúmenes finitos: detalle de la transición en zona del inyector de trazador.

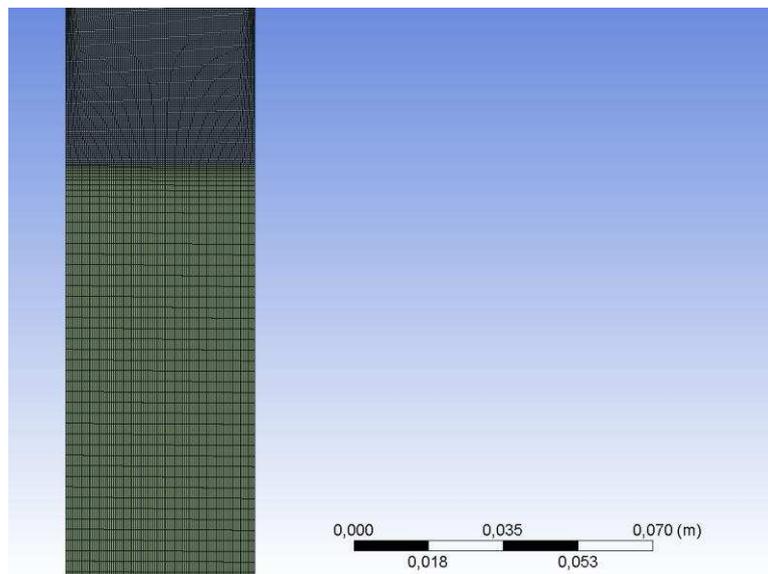


Figura 8: Malla de volúmenes finitos: detalle de la malla en la zona de detectores.

3.3 Características del modelo en ANSYS Fluent.

En el código CFD ANSYS Fluent se resuelven las ecuaciones de gobierno para flujo incompresible (conservación de masa y de cantidad de movimiento) y una ecuación de transporte para la fracción másica de agua (con trazador) respecto del fluido que corresponde

al flujo principal en el pozo (agua o solución polimérica). La ecuación de energía resulta desacoplada y no se resuelve en estos casos.

La simulación es transitoria, sin embargo primeramente se corre un caso estacionario para llegar a la condición de flujo desarrollado antes de inyectar el fluido que representa al trazador. Para este caso estacionario se parte de una inicialización de tipo “standard” con una velocidad uniforme en todo el dominio igual a -0.132 m/s en la dirección “y” sobre la cual actúa, además, el efecto de la gravedad.

Para el caso laminar, que corresponde al flujo principal de solución polimérica, la misma se comporta como un fluido no-newtoniano de tipo *shear-thinning*, es decir que su viscosidad disminuye con los esfuerzos de corte. Por lo tanto, se utiliza el Ley de Carreau para modelar esta variación de la viscosidad de la solución polimérica con los esfuerzos de corte.

Las curvas de viscosidad en función de la tasa de corte corresponden a las del polímero Flopaam 3631S (ver Figura 9) para distintas concentraciones de polímero.

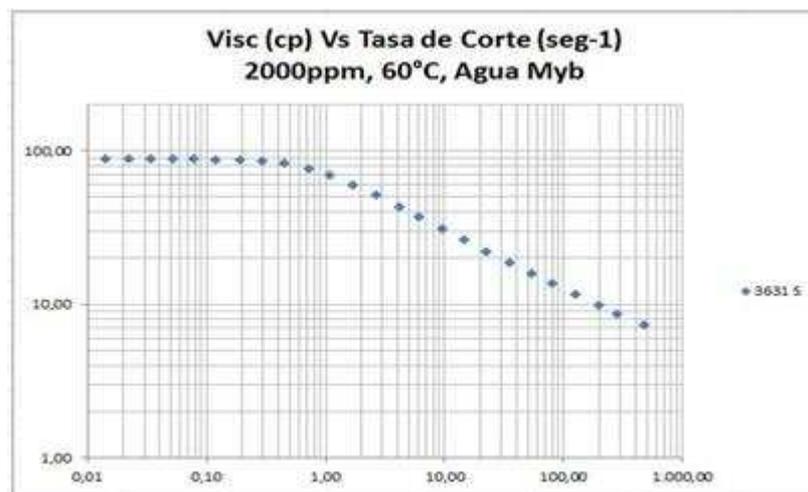


Figura 9: Ley de Carreau para la solución con polímero Flopaam 3631S a 2000ppm.

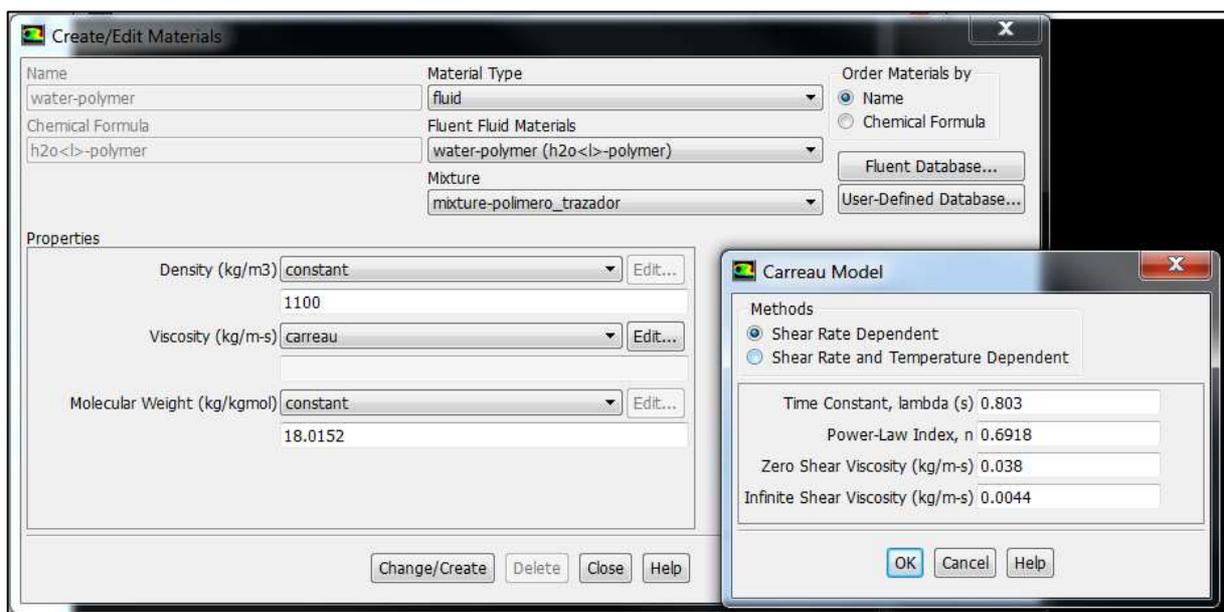


Figura 10: Definición de la solución polimérica en ANSYS Fluent.

La Figura 10 muestra la definición de materiales en ANSYS Fluent. Uno de los fluidos consiste en la solución de polímero para el cual se activa la Ley de Carreau. Según puede observarse en dicha figura el programa permite la definición de los parámetros n , λ , η_{∞} y η_0 de dicha ley que son conocidos. Variando estos parámetros pueden representarse diferentes concentraciones de polímero en agua. Es decir, para cada concentración de polímero corresponde un conjunto de parámetros n , λ , η_{∞} y η_0 . También se define un segundo fluido consistente en agua, para representar la inyección de trazador.

Para el caso turbulento, que corresponde a la inyección de agua, tanto el fluido del caudal principal en el *casing* como el fluido de inyección de trazador corresponden a agua a 60 °C. Se activa el modelo de turbulencia SST para modelar el flujo que se produce entre el *casing* y la herramienta. Detalles de este modelo de turbulencia se encuentran en los manuales de usuario de ANSYS Fluent (2016).

Para representar el transporte del fluido con trazador en el seno del flujo principal, se activa el modelo de especies químicas para el cual deben definirse la difusividad másica y las especies involucradas (agua/solución polimérica para los casos laminares y agua/agua para el caso turbulento).

3.4 Condiciones de contorno y métodos numéricos.

Para el caso estacionario se consideran una entrada y una salida. El resto de las condiciones de contorno son condiciones de pared. En la entrada el flujo es uniforme con una velocidad de 0.132 m/s entrando una única especie, constituida por la solución de polímero en los casos laminares, o por agua en el caso turbulento, en forma normal al contorno. El contorno de salida se define simplemente como un *pressure outlet*. Con estas condiciones se corre el caso estacionario utilizando el esquema numérico que se indica en la Figura 11.

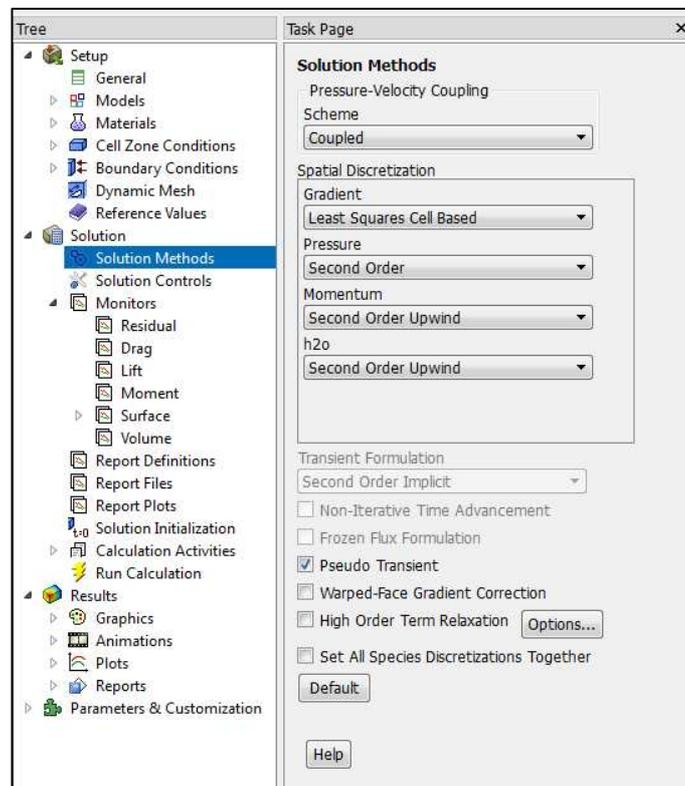


Figura 11: Esquema numérico utilizado para la corrida estacionaria.

Luego de obtenido el estado estacionario se procede a realizar la simulación transitoria para lo cual se activa la entrada para inyección del trazador. Por dicha entrada se inyecta agua mediante un pulso de 0.8 s de duración a una velocidad de 3.18 m/s. El pulso termina en forma de rampa como se muestra en la Figura 12:

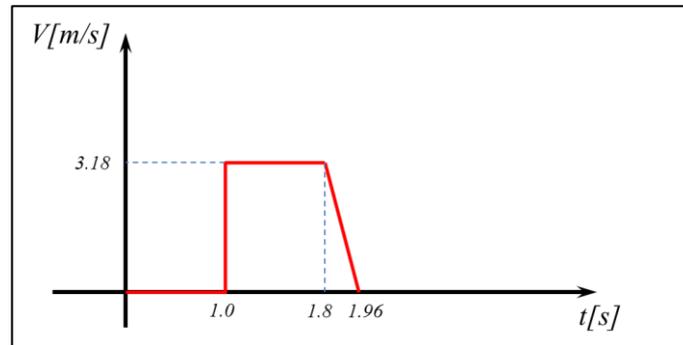


Figura 12: Inyección de agua (con trazador).

Para definir el pulso en la entrada del trazador se recurre a una UDF (*User Defined Function*) que debe ser programada en código C y compilada para su ejecución con ANSYS Fluent.

Con las condiciones de contorno así definidas se procede a correr el transitorio con el esquema numérico que se detalla a continuación en la Figura 13:

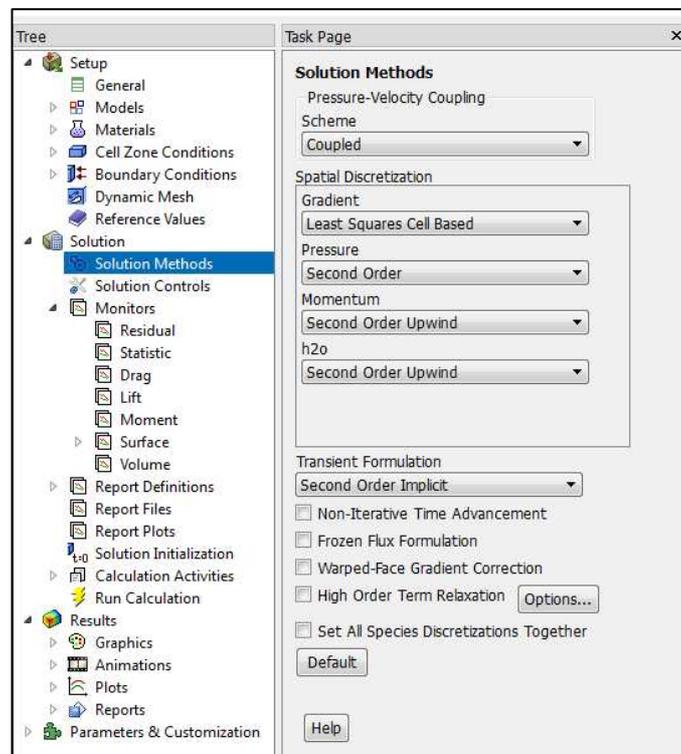


Figura 13: Esquema numérico utilizado para la corrida transitoria.

Para obtener registros de concentración de la especie 2 (agua) en la especie 1 (solución polimérica o agua según se trate de un caso laminar o turbulento respectivamente) en función del tiempo, se definen dos monitores sobre segmentos trazados en la posición que

corresponde a los detectores. Estos monitores se configuran para registrar el promedio (*average*) de la fracción másica de agua inyectada (especie2) en el flujo principal de solución polimérica o agua (especie 1). La corrida tiene lugar durante un tiempo suficiente como para que toda la masa del fluido inyectado haya pasado por los sensores. El paso de tiempo se adopta lo suficientemente pequeño como para que puedan capturarse todos los picos y valles en las curvas de concentración (típicamente valores entre 0.005 y 0.01 segundos)

4 RESULTADOS

Las simulaciones CFD permiten visualizar el proceso de dispersión del trazador en el flujo del fluido inyectado. También permiten obtener datos de concentración de trazador en función del tiempo. Estos datos fueron integrados en planillas de cálculo para luego proceder a efectuar su representación gráfica. Así, se buscaron características típicas de estas curvas que varíen de acuerdo al valor de la viscosidad dada por las diferentes concentraciones de polímero en la solución. Una vez entendidas estas características esto podría permitir identificar, a partir del análisis de los registros de la herramienta real, si la viscosidad que llega a los punzados corresponde a un cierto rango esperado o si, por el contrario, el polímero ha sufrido degradación.

4.1 Concentración de trazador en el flujo principal

El proceso de difusión del fluido inyectado en un flujo turbulento de agua (ver Figura 14.a) es muy distinto del proceso de difusión del mismo trazador en el flujo laminar no-newtoniano de polímero (ver Figura 14.b). Una de las características más importantes de los flujos turbulentos es que favorecen los procesos de mezcla. Por ende, en el flujo de agua la concentración del trazador en la vena de fluido tiene una distribución más homogénea que en los casos de los flujos laminares con polímero.

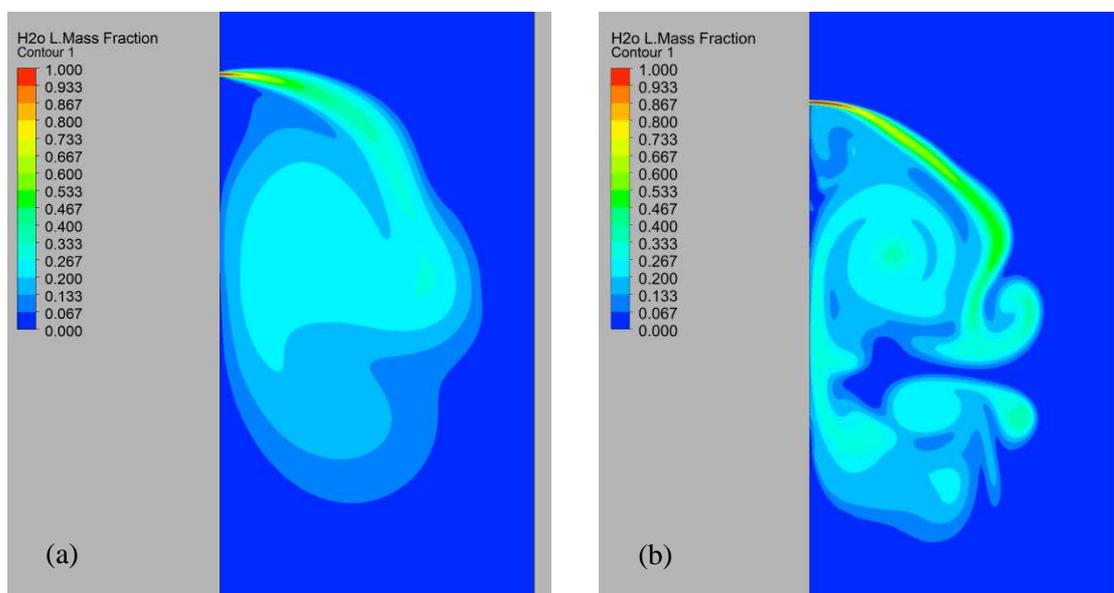


Figura 14: Fracción másica de trazador $t=0.22$ s después del inicio de la inyección. (a) En flujo de agua. (b) En flujo de polímero.

La Figura 14b muestra la fracción másica de agua inyectada en el flujo principal de una solución polimérica correspondiente a 2500ppm para un instante $t=1.22$ s de la simulación transitoria, lo cual corresponde a $t=0.22$ s luego del disparo. Puede observarse cómo el

incremento de viscosidad, y consecuente disminución del número de Reynolds determina un proceso de difusión y mezcla completamente diferente. Esto produce un fenómeno denominado *fingering* viscoso que consiste en una distribución no uniforme de la masa de trazador.

En la Figura 15 se comparan las fracciones máxicas de agua inyectada en el flujo principal de agua (ver Figura 15.a) y en flujo principal de solución polimérica a una concentración de 2500 ppm (ver Figura 15.b). Ambos casos corresponden a un tiempo de simulación $t=14.22$ s, cerca del instante del arribo de las primeras partículas con trazador al primer detector.

El fenómeno de *fingering* se observa claramente en las imágenes de la concentración del trazador en el flujo de polímero (ver Figura 15.b). Desde un punto de vista teórico la aparición de este fenómeno se debe a las propiedades del régimen de flujo laminar (ausencia de turbulencia para homogeneizar la mezcla) y al “deslizamiento” entre fluidos provocado por la diferencia de viscosidad entre el polímero y la solución acuosa que transporta el trazador. Sin embargo, este segundo efecto se mostró insignificante en estas simulaciones.

Es evidente que este fenómeno tendrá consecuencias relevantes en la forma de las curvas de concentración en función del tiempo obtenida por los detectores (monitores) debido a que en el caso laminar, con un perfil de velocidades próximo a una distribución parabólica, parte de la masa de trazador se transporta cerca de las paredes a una velocidad muy inferior a la de las partículas que viajan en la vena central, produciéndose un fenómeno de “estiramiento” de la masa de trazador.

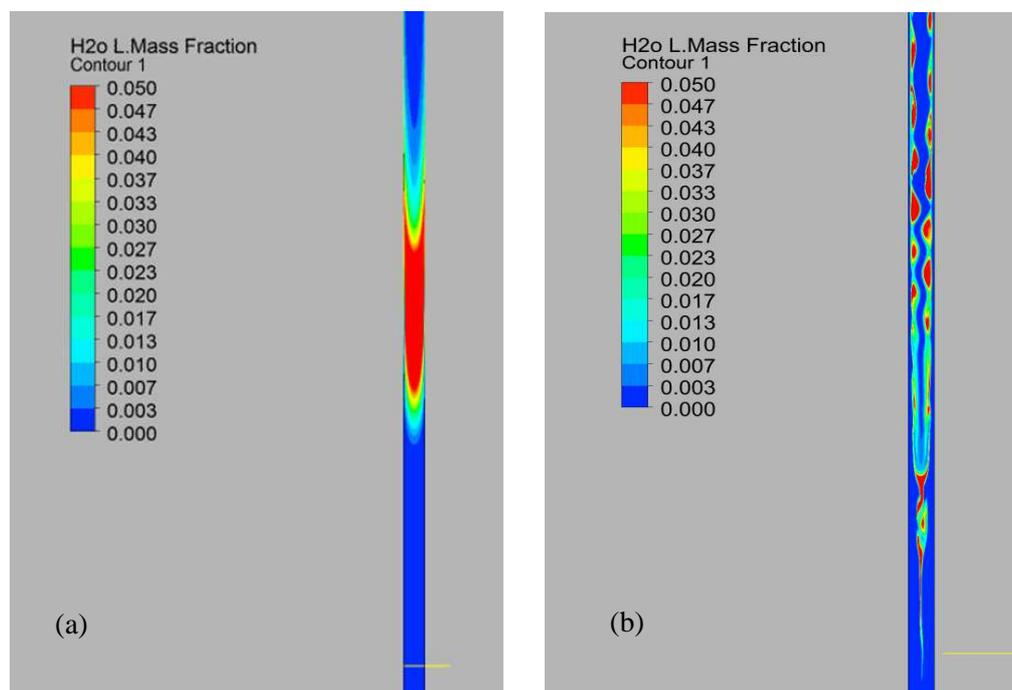


Figura 15: Fracción máxicas de trazador $t=13.22$ s después del inicio de la inyección. (a) En flujo de agua. (b) En flujo de polímero.

4.2 Curvas de concentración

En la Figura 16 se observan las curvas de concentración de trazador en función del tiempo correspondientes al caso turbulento con agua fluyendo por el conducto. Se muestran curvas para dos detectores posicionados a 2,53 m y 5,64 m respectivamente, medidos desde el punto de inyección.

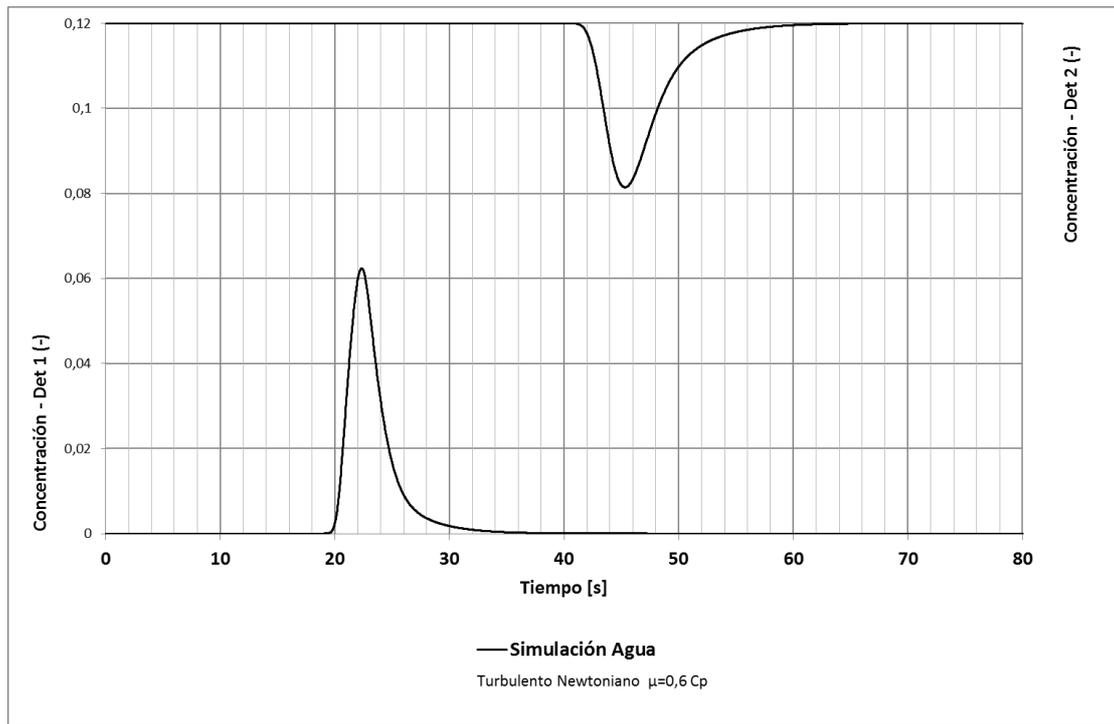


Figura 16: Curvas de concentración de trazador en función del tiempo para el caso turbulento (agua).

En la Figura 17 se observan las curvas de concentración de trazador en función del tiempo correspondientes al caso laminar con solución de polímero a 2500ppm fluyendo por el conducto.

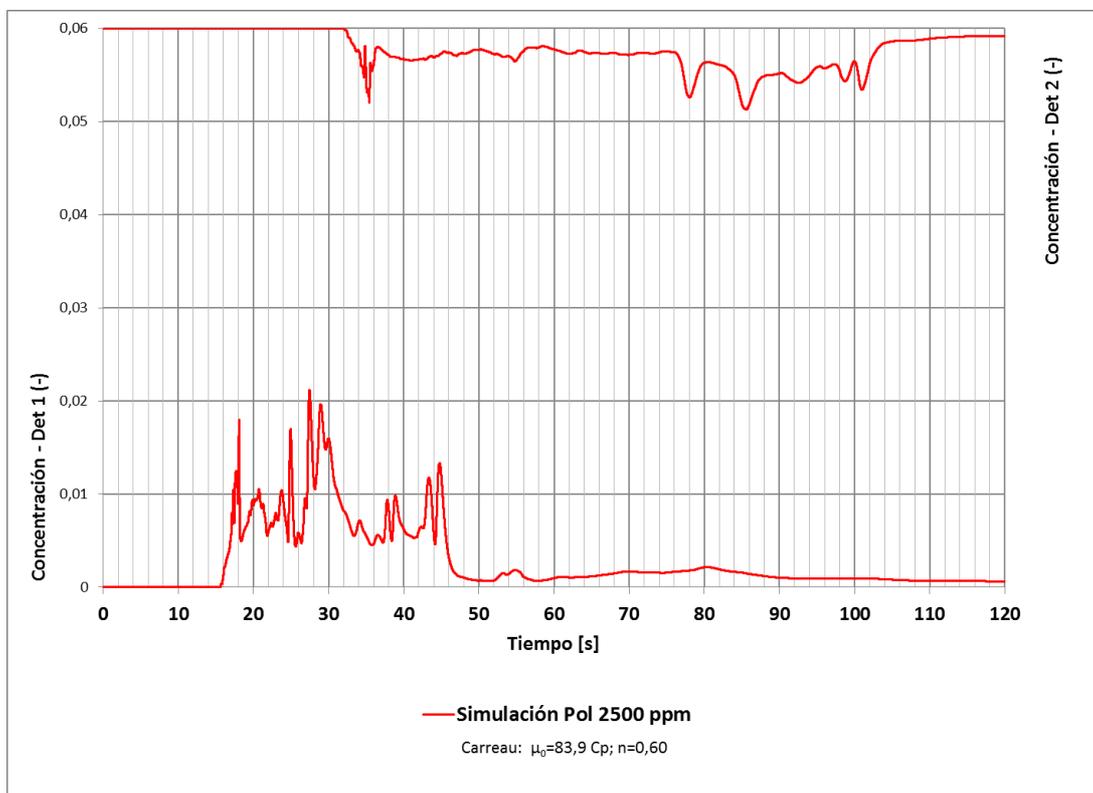


Figura 17: Curvas de concentración de trazador en función del tiempo. Comparación.

En la Figura 18 se observan las curvas de concentración de trazador en función del tiempo correspondientes a todos los casos corridos, para su comparación. Las curvas son obtenidas por los dos detectores (monitores) posicionados según ya fue indicado.

La curva resultante para el caso de agua presenta una forma de campana bien determinada con un único pico, mientras que las curvas para las diferentes concentraciones de polímero presentan formas irregulares.

Mediante estas comparaciones se pudo determinar que cuanto mayor es la viscosidad menor es la altura de los picos que aparecen en las curvas y mayor es el tiempo que toda la masa de trazador tarda en ser evacuada (tiempo de tránsito de la curva). Esto significa que a mayor viscosidad resulta una curva que presenta valores significativos de concentración de trazador durante un lapso de tiempo mayor. Si se determinara un tiempo de tránsito característico de la curva, se podría afirmar que el tiempo característico de las curvas correspondientes a mayor viscosidad de la solución tiende a ser mayor que el tiempo característico de las curvas que corresponden a soluciones con menor viscosidad.

Mayor viscosidad => Mayor tiempo de tránsito de la curva.

Menor viscosidad => Menor tiempo de tránsito de la curva.

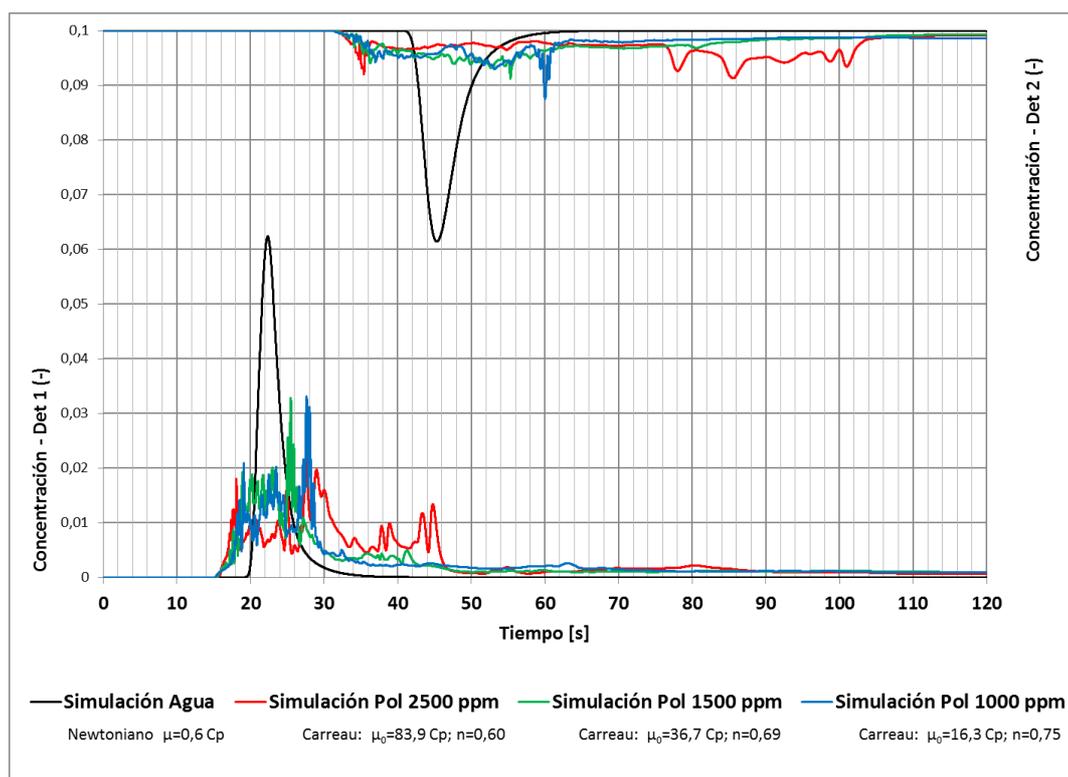


Figura 18: Curvas de concentración de trazador en función del tiempo. Comparación.

Se observa que en el segundo detector, que está a mayor distancia del punto de inyección del fluido con trazador, este fenómeno se acrecienta. Las curvas de polímero tienden a ser muy bajas y extenderse por mayor tiempo. El cambio en las características de las curvas parece ser tan amplio, que no es aconsejable utilizar el segundo detector dado que las curvas con polímero se diferencian poco entre sí. Esto es lo mismo que decir que debe tenerse cuidado de no alejar mucho el detector que se use para obtener las curvas si se desea tener características claras que permitan hacer una buena identificación. Dado que la simulación es

bidimensional y no representa al caso tridimensional real, no se puede sacar una conclusión cuantitativa extrapolable al caso real, pero sí se puede inferir que la distancia entre el inyector y el detector es un parámetro clave y que existirá un intervalo de posiciones aceptable para la colocación del detector que deberá respetarse.

Como ya se mencionó, el hecho que el tiempo de tránsito de las curvas sea mayor cuanto más laminar sea el régimen de flujo de la corriente principal, se debe a que las primeras partículas de trazador viajan por la vena central mientras que otras van quedando notablemente rezagadas al viajar en zonas cercanas a la pared del tubo, donde las velocidades son mucho menores. Este efecto no es tan intenso en el caso de inyección de un fluido con trazador en un flujo de agua, porque el trazador se mezcla mejor con el flujo principal debido a la difusión turbulenta y porque el perfil de velocidades en flujo turbulento es más uniforme que el perfil parabólico en flujo laminar.

Luego, teniendo en cuenta que el perfil de velocidades en flujo laminar es cercano a un perfil parabólico (no es exactamente parabólico porque el flujo es anular y porque el fluido es no-newtoniano), es teóricamente esperable que, en los casos en los que el flujo principal inyectado sea una solución polimérica, el tiempo de aparición del primer arribo sea menor que en el caso de agua.

Efectivamente, en la Figura 18 se observa que los primeros arribos se adelantan en los casos en los que el flujo es laminar. Nuevamente, en el segundo detector esta característica se acentúa notablemente, mostrando que, cuanto más lejos está el detector del punto de inyección, mayor será la distancia entre el primer arribo de los casos con polímero (laminares) y el primer arribo del caso de agua (turbulento).

No se aprecian diferencias significativas entre los primeros arribos de los tres casos correspondientes a polímero. Esto sugiere que por debajo de cierto número de Reynolds no hay diferencias apreciables en los perfiles de velocidad y los primeros arribos ya no se verán muy impactados por ulteriores disminuciones de este parámetro (es decir, no cambian los primeros arribos aunque se aumente la viscosidad/concentración).

5 CONCLUSIONES Y PRÓXIMOS PASOS.

La curva correspondiente al agua presenta una forma de campana bien determinada con un único pico, mientras que las curvas para las diferentes concentraciones de polímero presentan formas irregulares.

A mayor viscosidad menor es la altura de los picos que aparecen en las curvas y mayor es el tiempo que toda la masa de trazador tarda en ser evacuada, por lo que resulta una curva que presenta valores significativos de concentración de trazador durante un lapso de tiempo mayor.

Para un caudal determinado, al aumentar la viscosidad el régimen de flujo se torna laminar, el perfil de velocidades resulta de tipo parabólico y los primeros arribos se adelantan. Una vez establecido un patrón de flujo laminar, los mismos no se modifican significativamente aunque se siga variando la viscosidad. Evidentemente el régimen de flujo no sólo depende de la viscosidad, por lo cual la curva del trazador y los primeros arribos también son sensibles al caudal.

Cuando se analizan las curvas reales obtenidas en campo, aparecen algunas características inesperadas, producto de incertidumbres en el proceso de medición y adquisición de datos. Disminuir estas incertidumbres probablemente requeriría un trabajo de supervisión del proceso de adquisición de registros en campo. Aun así, y aunque una comparación directa de las curvas no tendría sentido en principio, se puede concluir que las simulaciones 2D capturan efectivamente la mecánica del proceso de difusión que ocurre en la realidad, aunque una simulación 3D sería seguramente más representativa.

Si bien aún se necesita más trabajo para encontrar una transformación que permita normalizar las curvas de campo para identificar con certeza posibles degradaciones, puede afirmarse que las curvas obedecen a un claro patrón de acuerdo a la viscosidad del fluido.

El control de los procesos de adquisición de datos que realizan los proveedores en campo y la calidad de los registros es de vital importancia para poder hacer esta evaluación.

REFERENCIAS

ANSYS Fluent 17.1 - Theory Guide.

ANSYS Fluent 17.1 - User's Guide.

Hill A.D, Boehm K.E. & Akers T.J. Tracer-Placement Techniques for Improved Radioactive-Tracer Logging. *Journal of Petroleum Technology. SPE 17317*. Vol.40-Issue13: 1484 - 1492. 1988.

Measurement of water flow in closed conduits-Tracer methods-Part VII: Transit time method using radioactive tracers. *ISO 2975/VII*; 1977.

Zheng H., and Liu X. B. Injection Profiling in Polymer Injectors in Daqing Oilfield. *103703-MS SPE Conference Paper*; 2006.