

SIMULACIONES NUMÉRICAS DE FENÓMENOS DE RETENCIÓN PARA LA APLICACIÓN EN RESERVORIOS DE PETRÓLEO

María Verónica D'Angelo *, Silvina Dengra †

*Grupo de Medios Porosos.

Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires.
Paseo Colón 850 (C1063ACV) Buenos Aires, Argentina
vdangelo@fi.uba.ar

†Departamento de Computación.

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
Pabellón I, Ciudad Universitaria, 1428 Capital Federal.
sdengra@dc.uba.ar

Key Words: Reservorios, Retención, Polímeros, Elementos Finitos.

Abstract. *El desplazamiento de un fluido no-Newtoniano en un medio poroso es un fenómeno presente en diversos procesos industriales, donde las características del medio, las del fluido y la interacción entre el fluido y la matriz porosa juegan un rol fundamental. Un ejemplo donde lo anterior se pone en evidencia es la Ingeniería de Reservorios. En Recuperación Asistida de Petróleo, el uso de soluciones poliméricas (generalmente soluciones de macromoléculas con características reofluidizantes) es habitual para aumentar la eficiencia del desplazamiento. En estos casos la interacción entre la matriz porosa y el fluido es de suma importancia y afecta fuertemente el fenómeno de transporte¹. En este trabajo se presentan simulaciones numéricas con el objetivo de estudiar el fenómeno de transporte, en particular los procesos de retención que pueden estar presentes cuando una solución polimérica fluye en un medio poroso. Se utilizan como datos ensayos de laboratorio publicados². Como primer paso se considera la ecuación de transporte en una dimensión (ecuación de convección-difusión unidimensional) con un término de retención global y se la resuelve mediante el método de Elementos Finitos. Los resultados muestran que a partir de la inclusión de un término no lineal de retención, es decir el uso de un modelo sencillo con un único parámetro, se obtienen resultados que ajustan con los datos experimentales. Esto permite concluir que bajo condiciones equivalentes a las experimentales, la inclusión de un único parámetro asociado al término de retención total permite englobar satisfactoriamente las no linealidades del fenómeno.*

1. INTRODUCCIÓN

En nuestros días el 85 % de la demanda de energía mundial es abastecida por la energía originada en restos fósiles y el petróleo ocupa más del 30 % de dicha demanda. A pesar de que existe una gran cantidad de esfuerzo y dinero dedicado a la investigación para la utilización de fuentes energéticas renovables (solar, eólica, biomasa, entre otras), éstas aún no son competitivas a gran escala. El consumo de petróleo creció de 3,2 billones de m^3 en 1975 a 4,4 billones de m^3 en el 2000 y se espera que sea de 5,2 billones de m^3 en el 2010. Esto se debe principalmente al acceso actual a áreas de reservas probables y al avance de la tecnología que permiten producir reservas que previamente eran no redituables. Por lo tanto no sólo se realizan esfuerzos para descubrir nuevas reservas, sino para desarrollar nuevas tecnologías que permitan hacer más eficiente la recuperación de petróleo³.

La Recuperación Asistida es considerada como la última etapa de la secuencia de la extracción de petróleo. La etapa inicial consiste en la utilización de la energía propia del yacimiento para la extracción (expansión de las componentes volátiles) o el bombeo mecánico. Cuando se reduce considerablemente esta energía propia y la producción declina, se ingresa a la etapa secundaria, que consiste en la inyección (o inundación) de agua para darle energía adicional al yacimiento. La producción de petróleo luego de estas dos etapas es del orden del 40 % respecto de la cantidad del petróleo original *in situ*. Cuando la inyección de agua deja de ser efectiva teniendo en cuenta el costo/beneficio se procede a la tercera etapa o Recuperación Asistida, como la inyección de polímero, la inyección de gas, la inyección de microemulsiones, la combustión *in situ*, etc., dependiendo de las condiciones particulares del yacimiento.

En el Reservorio se desea desplazar el petróleo que puede quedar en la formación luego del barrido con agua, o mejorar la relación de producción petróleo/agua en el pozo productor. Técnicamente una manera de lograr esto es con la aplicación de procesos de Recuperación Asistida de Petróleo (R.A.P.) como la adición de surfactantes, para recuperar el petróleo residual, o la adición de polímeros, para recuperar el petróleo que queda relegado durante la inyección de agua, el que puede quedar atrapado o bien por una relación de movilidades desfavorable o bien por la presencia de grandes heterogeneidades en el Reservorio⁴.

La inundación por polímero, que es el caso estudiado, consiste en agregar polímeros al agua subterránea o al agua de inyección para, de esta manera, aumentar la viscosidad dando una reducción en la relación de movilidades entre los fluidos inyectado y desplazado (ecuación 1), produciendo esto último un aumento en la eficiencia del barrido y una disminución de la zona de saturación de petróleo.

$$M = \frac{\lambda_p}{\lambda_a} = \frac{\mu_p/k_p}{\mu_a/k_a} \quad (1)$$

donde λ , μ y k son la movilidad, la viscosidad y la permeabilidad, y los subíndices p y a corresponden al petróleo y al agua, respectivamente. Otro beneficio al utilizar soluciones poliméricas es que se aumenta la eficiencia de desplazamiento dado que se reducen las fuerzas capilares e intersticiales, reduciendo el volumen total de agua requerido para alcanzar la saturación de petróleo residual.

El uso de polímeros para controlar el agua inyectada en los pozos de petróleo ha sido estudiado y cobrado amplio interés a partir de la década del 80. El desplazamiento con polímero ha sido aplicado en muchos yacimientos de petróleo para mejorar la eficiencia vertical y areal de barrido de las inyecciones de agua y muchos estudios de laboratorio se han realizado para contribuir al conocimiento del flujo de soluciones poliméricas en medios porosos⁵. Debido al alto costo de este tipo de Recuperación hoy en día no es ampliamente utilizada. Sin embargo a medida que las Reservas mundiales de petróleo decrecen, el interés en este proceso de recuperación es cada vez más importante.

Es ampliamente reconocido que durante el flujo de soluciones poliméricas en medios porosos una porción del polímero es retenido y una baja retención de polímero en el reservorio es esencial para el éxito de una operación de Recuperación Asistida de Petróleo utilizando polímeros. Evaluar la viabilidad de una inundación con polímero en un yacimiento dado requiere conocer no sólo el comportamiento reológico de la solución en condiciones de reservorio (*i.e* la movilidad y la reducción de permeabilidades de la fase acuosa) sino también la interacción de la solución con la matriz porosa del reservorio, *i.e* principalmente la retención y cualquier cambio en la solución durante el contacto con el medio poroso. Otros aspectos prácticos que deben considerarse son las interacciones del polímero con la salinidad del agua son importantes para algunos polímeros.

Además de las aplicaciones en inundación con polímero, la utilización de polímeros hidrosolubles de alto peso molecular tiene otras aplicaciones en la industria del petróleo. En yacimientos maduros de petróleo y gas la producción de agua es cada vez mayor debida a la existencia de acuíferos naturales o bien debido a la existencia de estimulaciones previas que involucran inyección de agua. Esto genera problemas relacionados con un aumento en la relación producción agua/petróleo, la separación, manipulación y bombeo de ambas fases, la aparición de emulsiones en la formación, etc. Para evitar estos problemas una tecnología aplicada suele ser el sellado de las capas productoras de agua mediante la utilización de modificadores de la permeabilidad relativa, como son los polímeros y los geles. En este caso es importante un conocimiento del Reservorio, así como de la reología del polímero (comportamiento en flujo) y de la existencia de fenómenos de retención. También se usan polímeros hidrosolubles en la estimulación de pozos, la fracturación de la formación, la perforación y terminación de pozos.

Una manera de encarar el modelado del flujo de soluciones poliméricas en medios porosos es la aproximación macroscópica la cual usa una formulación del continuo para modelar los diversos aspectos observados en los experimentos de flujo de polímeros, como dispersión, volumen excluido, interacción fluido-matriz porosa, etc. En este trabajo se utilizaron ecuaciones de flujo macroscópicas de convección-difusión generalizadas para describir los fenómenos observados experimentalmente. Se presentan simulaciones numéricas de experiencias realizadas en lechos porosos de esferas de vidrio utilizando técnicas de radiotrazadores². Las experiencias consisten en el desplazamiento miscible de una solución polimérica de scleroglucano, por otra

solución idéntica, pero con un trazador radiactivo (NaI^{131} , emisor gamma) unido químicamente al polímero. Esta técnica permite seguir a las macromoléculas dentro del medio y estudiar la interacción polímero-matriz porosa.

El scleroglucano es un polisacárido no-iónico que posee un excelente poder viscosificante en una amplia variedad de aguas de reservorio, muestra una alta resistencia a esfuerzos de corte y posee una buena estabilidad térmica, lo que lo hace muy interesante para las aplicaciones de inundación con polímero⁶. Como se mencionó anteriormente, para aplicar este polímero en el yacimiento es necesario un completo entendimiento del transporte del mismo en el medio, de la retención y las propiedades reológicas en el medio poroso. Este polímero tiene una estructura de tríple hélice en solución acuosa y muestra un comportamiento reofluidizante.

2. MODELO MATEMÁTICO

A escala macroscópica y si no existe interacción entre el fluido y la matriz porosa, puede escribirse la variación media de la concentración C mediante una ecuación de convección-difusión⁷ (ecuación (2)):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla C = D_{\parallel} \nabla_{\parallel}^2 C + D_{\perp} \nabla_{\perp}^2 C \quad (2)$$

donde U (cm/s) es la velocidad media; D_{\parallel} y D_{\perp} (cm^2/s) son los coeficientes de dispersión en la dirección paralela y normal al flujo, respectivamente (en general $D_{\perp} \ll D_{\parallel}$).

Por retención entendemos todos los fenómenos que remueven polímero de la fase acuosa, siendo los mecanismos que contribuyen a la retención en su conjunto la adsorción, el entrapamiento mecánico y la retención hidrodinámico¹. Para tener en cuenta los mecanismos de retención, un nuevo término debe agregarse a la ecuación (2). La ecuación que describe el fenómeno cuando existe tanto adsorción en la matriz porosa como fenómenos de retención, puede escribirse como^{1,8}:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla C = D_{\parallel} \nabla_{\parallel}^2 C + D_{\perp} \nabla_{\perp}^2 C - \frac{\rho}{\phi} \frac{\partial \Gamma}{\partial t} \quad (3)$$

donde C , ρ , ϕ , D_{\parallel} y D_{\perp} se definieron anteriormente, U (cm/s) es la velocidad media intersticial del polímero a través del medio y Γ (g/g) es el término que tiene en cuenta la cantidad retenida de polímero. Γ es usualmente una isoterma no-lineal (Isoterma de Freundlich o de Langmuir), y este tipo de relación puede representar el total de los fenómenos que producen el efecto de retención.

La velocidad U , como se definió, se refiere a la velocidad media intersticial del polímero, está dada por la expresión:

$$U = \frac{Q}{A\phi_p} = \frac{v_s}{f} \quad (4)$$

donde Q (cm^3/s) es el caudal de inyección volumétrico, A (cm^2) es la sección transversal, ϕ_p es la porosidad efectiva disponible para el polímero, y f es la fracción aparente de espacio poral

accesible ($f = \phi_p/\phi$), y tiene un valor de entre 0,85 – 1 para el transporte de polímero a través de un medio poroso no consolidado¹.

El fenómeno que incluye el término de “retención” ha sido estudiado por distintos autores en particular en el caso de adsorción^{1,5,9}. El caso de entrapamiento mecánico y retención hidrodinámica también ha sido estudiado por otros autores¹⁰⁻¹².

Para una geometría dada, la dispersión depende sólo de un número adimensional, el número de Péclet (P_e), que mide el peso relativo entre los fenómenos convectivos y difusivos:

$$P_e = \frac{\tau_d}{\tau_c} \quad (5)$$

donde τ_c y τ_d son los tiempos característicos convectivos y difusivos respectivamente. Este parámetro puede, y suele usarse para describir las distintas zonas de dispersión.

En el caso de medios no consolidados, como los utilizados en las experiencias que se utilizan como referencia, la ecuación (5) puede escribirse como:

$$P_e = \frac{Ud}{D_m} \quad (6)$$

d es una longitud característica, D_m es el coeficiente de difusión molecular del trazador y U es la velocidad media.

Las experiencias usadas como referencia consisten en el desplazamiento de una solución polimérica de scleroglucano en un medio poroso construido a partir de esferas de vidrio monodispersas, lo que genera un medio poroso de simple porosidad. Las experiencias utilizan técnicas de radiotrazadores, donde el trazador se encuentra unido químicamente a las macromoléculas, lo que permite seguir a las mismas dentro del medio y estudiar la interacción macromolécula-matriz porosa. En particular vamos a utilizar los resultados obtenidos para experiencias en las que el medio poroso está saturado inicialmente con una solución polimérica y luego se inyecta la misma solución, pero con un trazador radiactivo (NaI^{131}) unido químicamente a las macromoléculas de polímero (*Experimento II*). Las mediciones de actividad, proporcionales a la concentración de polímero, se realizan en distintas secciones o “caras”, las cuales corresponden a la distancia (en *cm*) en el medio poroso, medida desde la cara de inyección.

En las experiencias que fueron simuladas² los perfiles de concentración obtenidos se alejan de la forma sigmoidea típica de la solución de la ecuación de convección-difusión presentando una zona de crecimiento más allá del valor esperado de saturación. Dicho comportamiento pone de manifiesto los procesos de retención y la interacción entre la matriz porosa y la solución de macromoléculas cuando una solución de polímero fluye a través de una estructura porosa (figura 1).

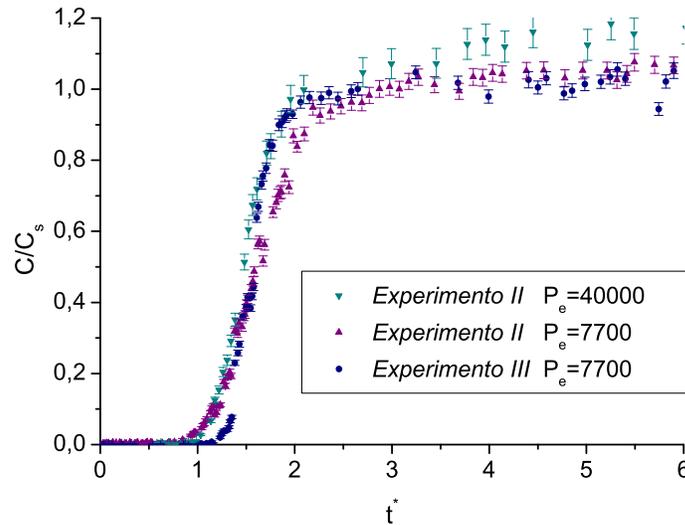


Figura 1: Concentración normalizada en función del t^* para la sección 3 ($x = 3\text{cm}$). Corresponden a un valor de $P_e = 7700$ y $P_e = 40000$ para el *Experimento II* (solución polimérica con trazador radiactivo desplazando solución polimérica sin trazador) y a un valor de $P_e = 7700$ para el *Experimento III* (solución polimérica con trazador radiactivo desplazando agua sin trazador). Luego de la curva gaussiana aparece una zona de crecimiento que se interpreta como un proceso de retención.

Aplicamos el método de elementos finitos para resolver, en el caso unidimensional, la ecuación de convección-difusión-retención (ecuación (3)) con el objetivo de reproducir el comportamiento observado.

3. ECUACIONES DEL PROBLEMA

Dado que el crecimiento más allá del valor de saturación esperado en los perfiles de concentración experimentales corresponde a la totalidad de los procesos presentes y que es difícil separar las distintas contribuciones de los procesos de retención se agrega en la ecuación (3) un término global para caracterizar todos los mecanismos presentes. Consideramos el caso más simple en el cual el término asociado a la retención en la ecuación (3) puede escribirse como un término de la forma λC . La ecuación que nos interesa resolver se escribe entonces como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{U} \cdot \vec{\nabla} C = \vec{\nabla} (D \vec{\nabla} C) + \lambda C \quad (7)$$

A menudo es útil expresar la ecuación a resolver numéricamente, en nuestro caso la ecuación (7), de manera adimensional. Para ello podemos hacer el siguiente cambio de variables:

$$\begin{aligned} C &= C_o C' \\ x &= x_o x' \\ t &= t_o t' \end{aligned} \quad (8)$$

Con estas variables la ecuación (7) puede reescribirse (caso de una dimensión) en función de las variables primadas de la siguiente manera (se escribieron las variables sin primar por comodidad):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{\tilde{P}_e} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \tilde{\lambda} C$$

donde por analogía se ha usado la definición usual del número de Péclet $\frac{Ud}{D_m}$ para reescribir el término $\tilde{P}_e = \frac{Ux_o}{D_{||}}$, donde se utiliza el $D_{||}$ en vez del coeficiente de dispersión molecular D_m , la longitud característica d es, en este caso, x_o y $\tilde{\lambda} = \lambda t_o$ es un coeficiente adimensional asociado a los procesos totales de retención.

Las simulaciones numéricas fueron realizadas sólo para el caso del *Experimento II* (figura 1) que consisten, como se explicó anteriormente, en el desplazamiento de una solución polimérica sin trazador, por otra solución igual, pero con trazador unido químicamente a las macromoléculas de polímero. El objetivo es estudiar la posibilidad de describir, mediante un término global, los procesos de retención presentes en las experiencias realizadas y obtener el comportamiento de los perfiles de concentración experimentales.

4. SIMULACIÓN NUMÉRICA

La ecuación (9) fue discretizada espacialmente mediante el método de Galerkin de elementos finitos, y temporalmente mediante el método α . Se utilizó el programa Matlab para la resolución numérica de las ecuaciones.

4.1. Caso con retención: λ constante

En la figura 2 se muestran los resultados obtenidos para los perfiles de concentración en función de la posición, para 4 tiempos adimensionales (t igual a 1, 3, 5 y 8 respectivamente) cuando se considera el término de retención con λ constante. La cantidad de nodos utilizados N_e es 100, con un valor de $\tilde{P}_e = 100$ y del parámetro que cuantifica la retención $\lambda = 0,5$.

Estos perfiles muestran una diferencia con respecto a las curvas gaussianas que se obtendrían en el caso de no tener el término extra con el parámetro λ . Recordemos que los perfiles de la figura 2 (a diferencia de los obtenidos experimentalmente) son de concentración en función de la posición, para distintos tiempos fijos. Se observa para una posición fija un aumento de la concentración en función del tiempo, y que ésta alcanza un valor (dependiente de la posición) luego del cual la concentración no varía más con el tiempo. Sin embargo este valor alcanzado depende de la posición y disminuye a medida que nos alejamos de la posición $x = 0$ (equivalente a la línea de inyección). El comportamiento anterior se observa claramente cuando se grafican (figura 3) los perfiles de concentración en función del tiempo para distintas posiciones.

Este término, entonces, no es suficiente para recuperar el comportamiento de crecimiento más allá del valor de saturación, observado en perfiles experimentales. Debido a ello, se introdujo una modificación en la definición de la constante λ , como se describe en la próxima sección.

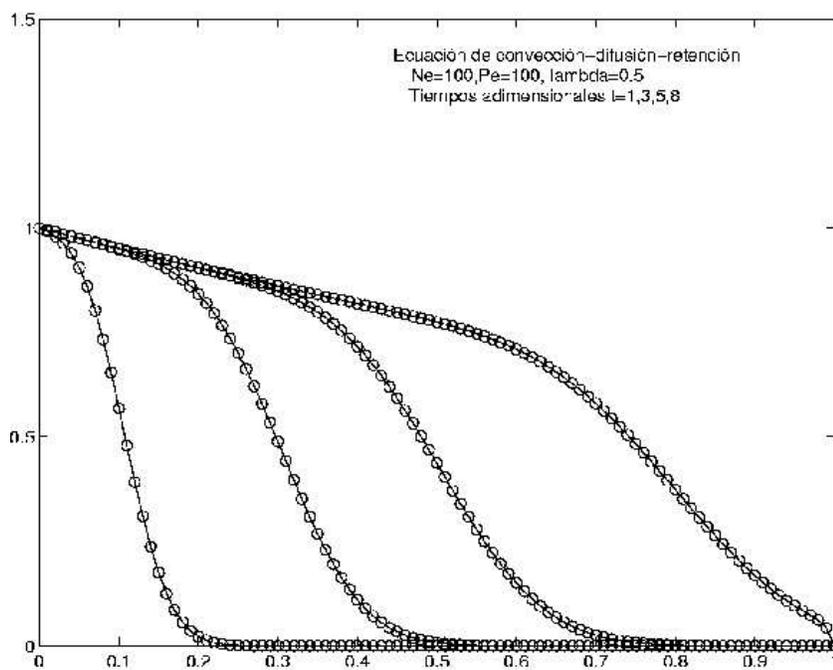


Figura 2: Evolución del perfil de concentración en función de la posición para tiempos adimensionales igual a 1, 3, 5 y 8 respectivamente, para un valor de $\bar{P}_e = 100$ y $\lambda = 0,5$.

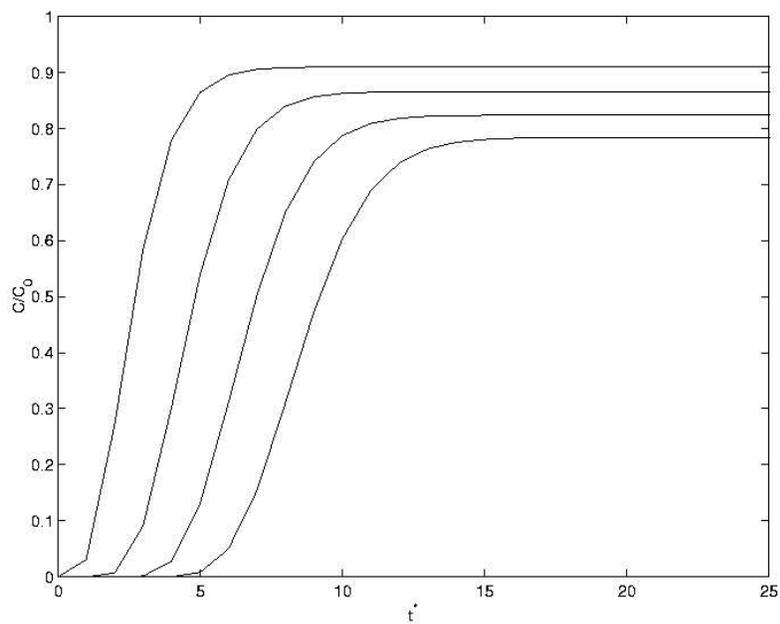


Figura 3: Evolución del perfil de concentración en función del tiempo, correspondiente a distintas posiciones.

4.2. Caso con retención $\lambda = \lambda(t)$

Consideramos en esta sección que λ varía linealmente de la forma $\lambda(t) = \lambda - m_\lambda t$. En las figuras 4, 5 y 6 se observan los resultados obtenidos para las experiencias correspondientes a un caudal de inyección de $Q = 0,375 \text{ ml/min}$ y para tres caras distintas (posiciones en el lecho a partir del punto de inyección) las tres caras y los ajustes obtenidos en las simulaciones realizadas. Los valores utilizados fueron $\tilde{P}_e = 100$. Se observa un buen ajuste de los valores experimentales con las curvas halladas numéricamente.

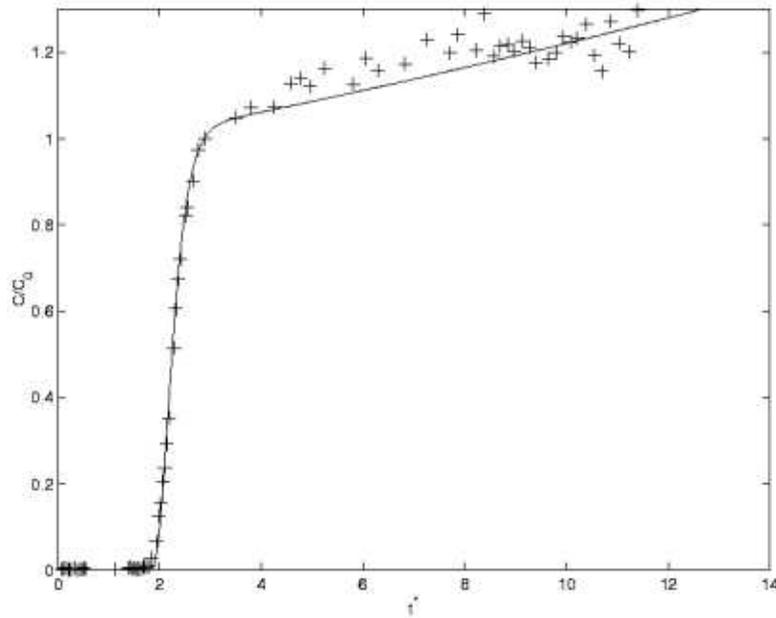


Figura 4: Evolución del perfil de concentración para la posición 3 del lecho modelada por elementos finitos con $\lambda = 0,005$ y $m_\lambda = 1,8$, $t_f = 22$. Las cruces corresponden a los datos experimentales y la línea llena a la solución numérica.

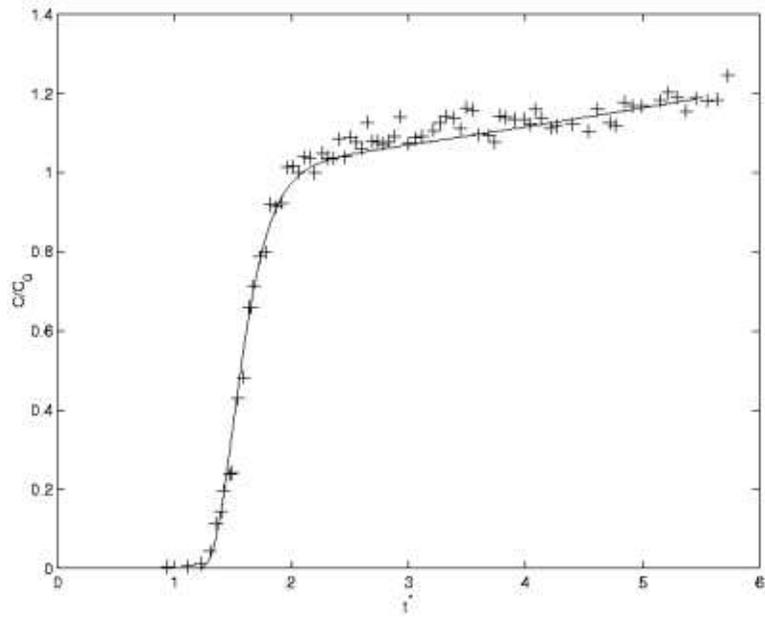


Figura 5: Evolución del perfil de concentración para la posición 3 del lecho modelada por elementos finitos con $\lambda = 0,005$ y $m_\lambda = 1,3$, $t_f = 11$. Las cruces corresponden a los datos experimentales y la línea llena a la solución numérica.

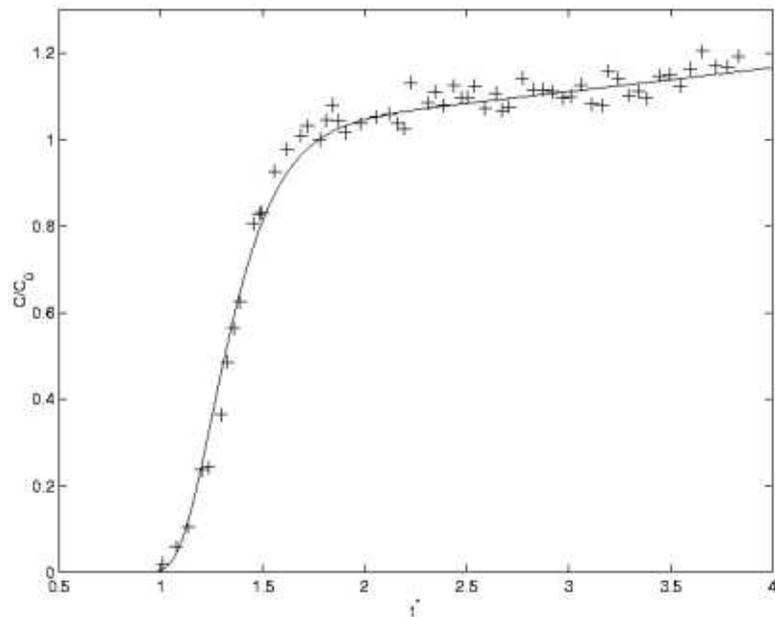


Figura 6: Evolución del perfil de concentración para la posición 3 del lecho modelada por elementos finitos con $\lambda = 0,005$ y $m_\lambda = 1,1$, $t_f = 8$. Las cruces corresponden a los datos experimentales y la línea llena a la solución numérica.

En las figuras 7, 8 y 9 se presentan los ajustes obtenidos para tres experiencias correspondientes a caudales de inyección de $Q = 0,375\text{ml}/\text{min}$, $Q = 0,25\text{ml}/\text{min}$ y $Q = 0,075\text{ml}/\text{min}$ y para una cara 6. Nuevamente se obtiene un buen ajuste de los perfiles experimentales con la solución numérica, salvo en la zona de baja concentración para caudales bajos.

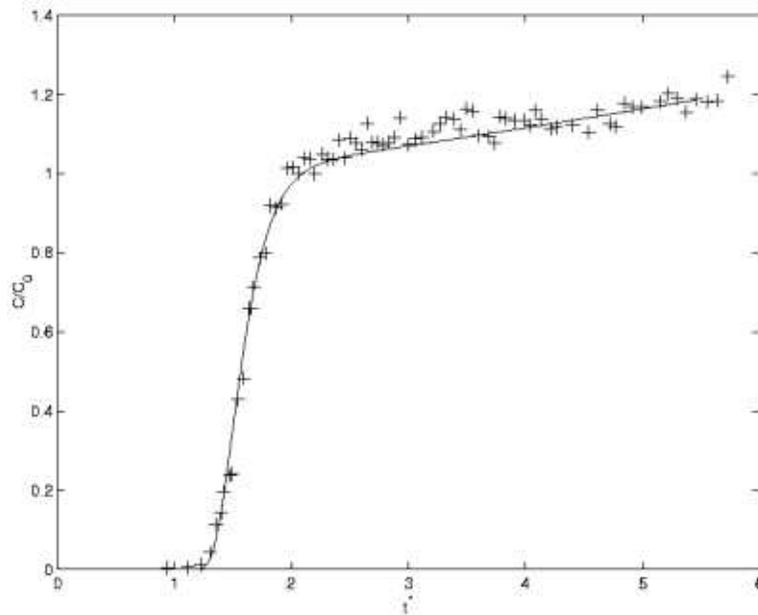


Figura 7: Evolución del perfil de concentración y datos experimentales para la cara 6 correspondientes a un caudal $Q = 0,375\text{ml}/\text{min}$, $\tilde{P}_e = 100$, $\lambda = 0,005$ y $m_\lambda = 1,3$. Las cruces corresponden a los datos experimentales y la línea llena a la solución numérica.

Como surge del análisis de las figuras presentadas, el término de retención dependiente del tiempo (lo que es equivalente a un término no lineal en la concentración) refleja las características principales de las curvas experimentales.

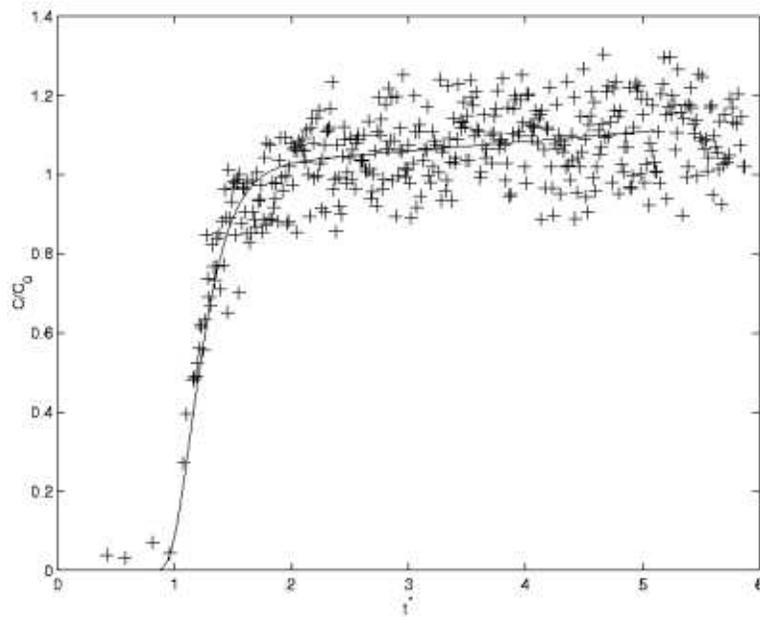


Figura 8: Evolución del perfil de concentración y datos experimentales para la cara 6 correspondientes a un caudal $Q = 0,25\text{ml}/\text{min}$, $\tilde{P}_e = 90$, $\lambda = ,005$ y $m_\lambda = 0,7$. Las cruces corresponden a los datos experimentales y la línea llena a la solución numérica.

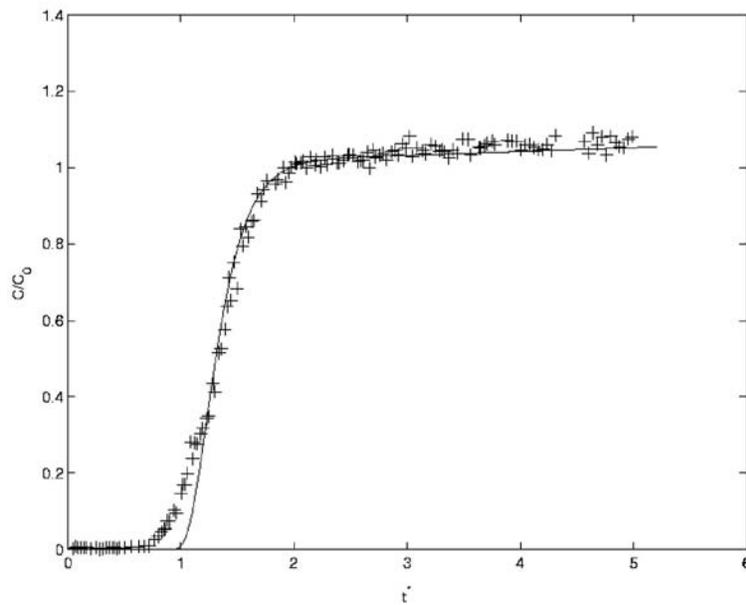


Figura 9: Evolución del perfil de concentración y datos experimentales para la cara 6 correspondientes a un caudal $Q = 0,075\text{ml}/\text{min}$, $\tilde{P}_e = 80$, $\lambda = ,005$ y $m_\lambda = 0,8$. Las cruces corresponden a los datos experimentales y la línea llena a la solución numérica.

5. CONCLUSIONES

Aplicamos el método de elementos finitos para resolver, en el caso unidimensional, la ecuación de convección-difusión-retención (ecuación (3)) con el objetivo de reproducir el comportamiento observado experimentalmente en trabajos previos². Los ajustes de la simulación numérica con los perfiles experimentales son muy buenos, habiendo sólo diferencias a bajos caudales y bajas concentraciones.

Un término no lineal de la forma $\lambda(t)C$ permite obtener perfiles de concentración que se alejan de la forma sigmoidea típica de la solución de la ecuación de convección-difusión presentando una zona de crecimiento más allá del valor esperado de saturación. Este comportamiento pone de manifiesto los procesos de retención y la interacción entre la matriz porosa y la solución de macromoléculas cuando una solución de polímero fluye a través de una estructura porosa.

REFERENCIAS

- [1] Sorbie K. S. *Polymer-Improved Oil Recovery*. Ed Blackie and Son, (1991).
- [2] M.V. D'Angelo, E. Fontana, R. Chertcoff, and M. Rosen. Retention phenomena in a non-newtonian fluid flows. *Phys. A*, **327**, 44–48 (2003).
- [3] K. Denys. *Flow of polymer solutions through porous media*. Tesis de Doctorado. Universidad de Delft, (2003).
- [4] T. Maldal, R. Gilje, E. and Kristensen, T. Karstad, A. Njordbotten, B.E.R. Scilling, and O. Vaikane. Evaluation and economical feasibility of polymer-assisted surfactant flooding for the gullfaks field norway. *S.P.E. Res. Eval. and Eng.*, **1**, 161–168 (1998).
- [5] K. Sorbie, A. Parker, and P.J. Clifford. Experimental and theoretical study of polymer flow in porous media. *SPE. Res. Eng.*, **2**, 281–304 (1987).
- [6] Y. Huang, K.S. Sorbie, and U. Herwiot-Wat. Scleroglucane behaviour in flow through porous media: Comparison of adsorption and in-situ rheology with xanthan. *S.P.E. 25173*, (1993).
- [7] J. Bear. *Dynamics of fluids in Porous Media*. American Elsevier, Environmental Science Series, (1972).
- [8] S. P. Gupta and Greenkorn R. A. Determination of dispersion and nonlinear adsorption parameters for flow in porous media. *Water Resources Research*, **10**, 839–846 (1974).
- [9] G. Drazer, R. Chertcoff, L. Bruno, and M. Rosen. Concentration dependence of diffusion-adsorption rate in activated carbon. *Chem.Eng.Sci.*, **54**, 4285–4291 (1999).
- [10] J. G. Dominguez and G. P. Willhite. Retention and flow characteristics of polymer solutions in porous media. *SPEJ*, pages 111–121 (1977).
- [11] R. B. Dawson, R. Lantz. Inaccessible pore volume in polymer flooding. *Soc. Pet. Eng. J.*, pages 448–452 (1972).
- [12] J. M. Maerker. Dependence of polymer retention on flow rate. *J. Pet. Tech.*, **25**, 1307–1308 (1973).