

ESTIMACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE FLUIDO DE PERFORACIÓN Y FILTRADO DE LODO EN YACIMIENTOS NATURALMENTE FRACTURADOS MEDIANTE UN MODELO NUMÉRICO QUE ACOPLA EL PLANO DE FRACTURA Y LA ZONA PERMEABLE

Diego Vargas¹, Zuly Calderón¹

1: Universidad Industrial de Santander. diego.vargas4@correo.uis.edu.co, calderon@uis.edu.co

Palabras clave: Geomecánica, Pérdidas de lodo, Filtrado de lodo, Modelamiento numérico

ABSTRACT

Drilling mud losses through fractures and excessive mud seepage into permeable zones can become the most impactful problem while drilling naturally fractured formations, increasing Non Productive Time. Currently, the modeling of this phenomenon is done assuming impermeable fracture walls, which are not connected to the rock matrix or modelling the mud seepage in permeable zones independently, without being coupled, which does not adequately represent what that is observed in the field. For this reason, in this research a new algorithm is developed, which represents the phenomenon of lost circulation through fractured formations coupled to permeable zones, allowing quantification of loss rates not only instantaneous but also, when maintaining a constant rate of loss over time, generated by the connection of fractures with permeable zones or another fracture network. For achieving greater accuracy, variables such as fracture deformation are analyzed, which can alter its width; mud rheology, a fundamental piece of information to derive the flow velocity within the fracture, petrophysical characteristics of the formation to determine the flow velocity in permeable zones and finally the coupling between the fractured zone and the permeable matrix is performed, showing that when the walls of the fracture plane are permeable, the rate of fluid loss is maintained over time.

The proposed algorithm in this study allows estimating the fluid flow and fracture properties using finite differences, likewise, a linear relationship is assumed as a function of pressure to represent the fracture width, and the mud rheology by using power law. The implementation of this new model estimates the sludge loss phenomenon in a better way, allowing a improved understanding of the events reported in the field.

INTRODUCCIÓN

La perforación de pozos en yacimientos de hidrocarburos en zonas de baja presión, altamente permeables y naturalmente fracturadas, se ha convertido en un reto, ya que en este tipo de formaciones se pueden presentar dificultades técnicas y económicas relacionadas con altos tiempos no productivos (NPT). Múltiples estudios de NPT desarrollados a nivel mundial (Moazzeni *et al.* 2011, Marbun *et*

al. 2013; Emhanna 2019; Albattat y Hoteit 2021) y otros desarrollados en Colombia (Osorio 2018 y Ávila y Ramírez 2019), concluyen en dos aspectos importantes: en primer lugar, los NPT cuestan cientos de millones de dólares al año a las compañías petroleras y en segundo lugar, las principales causas de NPT son, las pérdidas de fluido a través de fracturas naturales conectadas por la broca y la pega de tubería. No obstante, la pega de tubería también puede generarse por el crecimiento de la torta de fluido, ocasionado por el excesivo filtrado, el cual genera daño a la formación, problema adicional, que se traduce en reducción de la permeabilidad de la formación y baja producción. En cuanto a filtrado de lodo, es necesario analizar dos grupos de investigaciones reportadas en la literatura, el primero hace referencia a estudios relacionadas con pruebas de laboratorio, desplazamiento de fluidos en muestras y daño a la formación; el segundo grupo hace referencia a modelos matemáticos planteados con el fin de modelar el filtrado y crecimiento de la torta de lodo, ya sea en coordenadas lineales (laboratorio) o en coordenadas radiales (datos de campo o modelos físicos), por ejemplo los trabajos publicados por Donaldson y Chernoglazov (1987); Civan y Engler (1994); Liu *et al.*, (1996); Parn-anurak y Engler (2005) y Shad *et al.* (2021) entre otros.

En lo relacionado con pérdidas de lodo a través de fracturas, en esta investigación, primero se analizaron trabajos aplicados en modelos físicos como el presentado por Majidi *et al.* (2010) y modelos planteados para datos de campo como los publicados por Lavrov y Tronvoll (2006); Xia *et al.* (2015); Xia, Jin y Chen (2015) y Vargas *et al.* (2020) entre otros. Posteriormente, luego de modelar los fenómenos de forma individual, se procede a acoplarlos en un solo algoritmo y validarlos con datos de campo. En el presente documento se evidencia el desarrollo del modelo para filtrado de lodo a través de formaciones permeables, con su respectiva validación mediante datos de laboratorio reportados en la literatura; también se incluye el desarrollo del modelo para flujo en fracturas y su validación con modelos reportados en la literatura, para finalmente, realizar el acople y su aplicación a datos de campo.

METODOLOGÍA DE FILTRADO EN ZONAS PERMEABLES

En esta investigación, para analizar el filtrado del lodo se tomaron como base los modelos propuestos por Liu *et al.* (1996) y Parn-anurak y Engler (2005) que fueron luego aplicados por los autores Windarto *et al.* (2011) para coordenadas lineales y Windarto *et al.* (2012) para coordenadas radiales.

Crecimiento de torta de lodo

Los modelos de filtración de torta de lodo se desarrollaron con base en una ecuación de balance de masa de deposición y erosión. Dicha información permite realizar estimación del daño a la formación, el cual dependerá de la invasión de filtrado, la invasión de sólidos, variación

de permeabilidad, la variación de presión entre pozo y yacimiento y finalmente el tiempo de exposición como propone el estudio de Parn-anurak y Engler (2005). Para el crecimiento de la torta se combinan las ecuaciones de depositación y erosión de masa, inicialmente se asume que no hay desplazamiento de partículas, solo se depositan en la cara de pozo cuyo valor de masa se puede relacionar con la ecuación 1.

$$m_c = V_c(1 - \phi_c)\rho_c \quad (1)$$

La ecuación 1 proviene de despejar la masa de la densidad de la torta ($\rho_c = m/V_c$) y multiplicarlo por el espacio correspondiente a la matriz ($1 - \phi_c$). El crecimiento de la torta dependerá de la tasa de depositación que está relacionada con la invasión de filtrado y de la tasa de erosión que está relacionada con una constante de erosión y la masa de la torta que ya se ha depositado.

$$\text{Crecimiento de torta} = \text{Depositación de partículas} - \text{la erosión} \quad (2)$$

La tasa de depositación de las partículas de lodo, dada por la ecuación 3, la cual en la literatura presenta dos opciones y la tasa de erosión que se calcula por la ecuación 4 permiten analizar el crecimiento de la torta.

$$d_c = \text{opcion 1 } (k_d * C_{sol} * \phi) \quad \text{opcion 2 } (v_r * C_{sol} * \phi) \quad (3)$$

$$e_c = k_\tau * \rho * (1 - \phi) \quad (4)$$

Las constantes k_d y k_τ son descritas en el trabajo desarrollado por Corapcioglu *et al.*, (1987), quienes indican que basados en experimentos con suspensiones de látex (0,04 μm) filtradas a través de perlas de vidrio (diámetro 0,397 mm, porosidad 0,35, Ring (1983)) y una expresión de velocidad, se puede modelar la adhesión y la suspensión, determinando que $k_d = 6,5 * 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ y $k_\tau = 4,35 * 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. Posteriormente, Corapcioglu y Abboud, (1990) publican un trabajo donde implementan las constantes anteriores para analizar el crecimiento de la torta. Así mismo, Abboud y Corapcioglu, (1993) nuevamente utilizan las constantes con los datos de Willis y Tosun, (1980). En la ecuación 3, se decide en esta investigación que d_c sea representado por la opción dos ya que de lo contrario la torta crecería hasta el radio del pozo lo cual no ocurre en la realidad, esta opción es aplicada por Parn-anurak y Engler, (2005). Al restar los dos términos y multiplicarlos por el área y volumen según el caso, se obtiene la variación de la masa de la torta en el tiempo (ecuación 5).

$$\frac{\partial m}{\partial t} = v_r * C_{sol} * \phi * A - k_\tau * \rho * (1 - \phi) * V_c \quad (5)$$

Al realizar el análisis de unidades para ecuación 5, $\frac{\partial m}{\partial t}$ se verifica que son kg/s , la cual permite determinar la depositación de masa en la cara de pozo. Dentro de las variables de las que depende la ecuación, está v_r y C_{sol} las cuales deben ser determinadas por otras ecuaciones que también provienen de un balance de masa.

Velocidad de filtrado en la cara de pozo

Para determinar la velocidad de filtrado, primero es necesario calcular la variación de presión en la cara de pozo, debida a la presión de fondo que se espera sea mayor a la presión de poro, para que ocurra el movimiento de fluidos. Para representar este fenómeno se usa la ecuación 6.

$$\frac{1}{r} \frac{dp}{dr} + \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} = \frac{c_r * \mu * \phi}{k} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (6)$$

Luego de obtener la variación de presión, se determina la velocidad de flujo (Colmont y Pinoargote, (2015))

$$v_r = \frac{k_c(P_w - P_e)}{\mu * \ln\left(\frac{r_w}{r_w - xc}\right) * (r_w - xc)} \quad (7)$$

Variación de concentración de lodo en la cara de pozo

Para determinar el crecimiento de la torta de lodo es necesario analizar los cambios de concentración de partículas de lodo en la cara de pozo, ya que esta es directamente proporcional a la masa depositada. Para ello es necesario analizar los conceptos de transporte por advección y transporte por concentración de gradientes, descritos a continuación:

Transporte por advección: Los sólidos disueltos se transportan junto con el agua que fluye. Este proceso se llama transporte advectivo o advección. La cantidad de soluto que se transporta es función de su concentración en el agua y de la cantidad de agua que fluye, Fetter *et al.*, (2017):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = v_r * \frac{\partial C}{\partial r} \quad (8)$$

Transporte por concentración de gradientes: Un soluto en agua se moverá desde un área de mayor concentración hacia un área donde está menos concentrado. Este proceso se conoce como difusión molecular o difusión. La difusión ocurrirá siempre que exista un gradiente de concentración, incluso si el fluido no se mueve. La masa de fluido que se difunde es proporcional al gradiente de concentración, y se puede expresar como la primera ley de Fick. El coeficiente de difusión solo es aplicable en sistemas acuosos, Fetter *et al.* (2017). Cuando las concentraciones

cambian con el tiempo, la ecuación que lo representa es la siguiente.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} \quad (9)$$

Al aplicar los dos conceptos descritos anteriormente en un balance de masa, se llega a la siguiente ecuación.

$$-\frac{v_r}{\phi} * \frac{\partial c}{\partial r} + D \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{D}{r} \frac{\partial c}{\partial r} = * \frac{\partial(c)}{\partial t} \quad (10)$$

Teniendo en cuenta que, el coeficiente de difusión cambia para el caso de medios poroso, debe ser corregido, para ello se usará la correlación propuesta por Coutelieiris y Delgado (2012) $D = D_i * \phi^\epsilon$. El valor del exponente varía entre $\epsilon = 1.8 - 2$ para formaciones consolidadas. En cuanto a valores de D para posibles iones o cationes presentes en el agua, se recomienda la tabla de valores propuesta por Fetter *et al.* (2017).

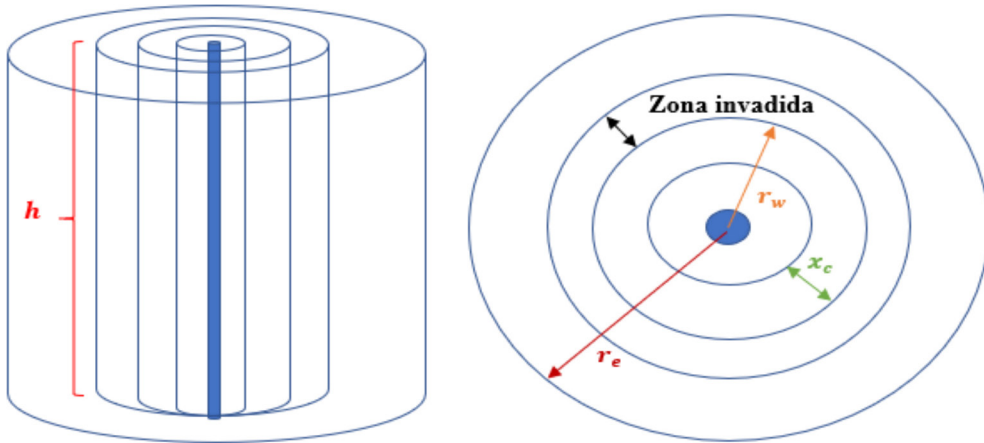


Figura 1. Vista lateral y superior de la geometría radial usada en el desarrollo del modelo a implementar.

METODOLOGÍA DE PÉRDIDAS DE LODO A TRAVÉS DE FRACTURAS

Balance de masa para el plano de fractura en coordenadas radiales y lineales

Para estudiar las pérdidas de lodo a través de fracturas se implementa el modelo base propuesto por Lavrov y Tronvoll (2005) usado por Vargas *et al.* (2020).

$$\frac{1}{r} (v_r * w) + \frac{d}{dr} (v_r * w) = \frac{d(w)}{dt} \quad (11)$$

Para modelar el flujo a través del plano de fractura en coordenadas radiales se usa la ecuación 11. Para modelar fracturas verticales se recomienda usar la ecuación 11 pero en coordenadas lineales.

$$\frac{d}{dx}(v_x * w) + \frac{d}{dy}(v_y * w) = \frac{d(w)}{dt} \quad (12)$$

De igual manera, la ecuación 12 permite modelar el flujo en coordenadas lineales a través del plano de fractura. En los dos casos (ecuaciones 11 y 12) w es el ancho de fractura y v es la velocidad en cualquier dirección de acuerdo a la geometría de estudio v_x , v_y or v_r .

Velocidad de flujo en el plano de fractura

La velocidad en el plano de fractura depende de la reología y de un balance de momento según Di Federico (1998),

$$\tau_{zx} = z * \frac{\partial p}{\partial r} \quad (13)$$

Para la reología del lodo se analiza la Ley de Potencia, ecuación 14.

$$\tau_{zx} = -m \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} \right)^n \quad (14)$$

Igualando τ_{zx} e integrando, usando los límites $\pm W / 2$, se obtiene la ecuación 15 que se utiliza para la velocidad de fluido en el plano de fractura.

$$v = - \frac{nw^{\frac{n+1}{n}}}{(2n+1)2^{\frac{1}{n}} * m^{\frac{1}{n}}} \frac{\partial p^{\frac{1}{n}}}{\partial r} \quad (15)$$

La ecuación 15 es remplazada en la ecuación 11 o 12 para determinar el modelo que permite analizar la distribución de presión en la fractura. En la Figura 2 se observa un ejemplo de geometría de fractura horizontal.

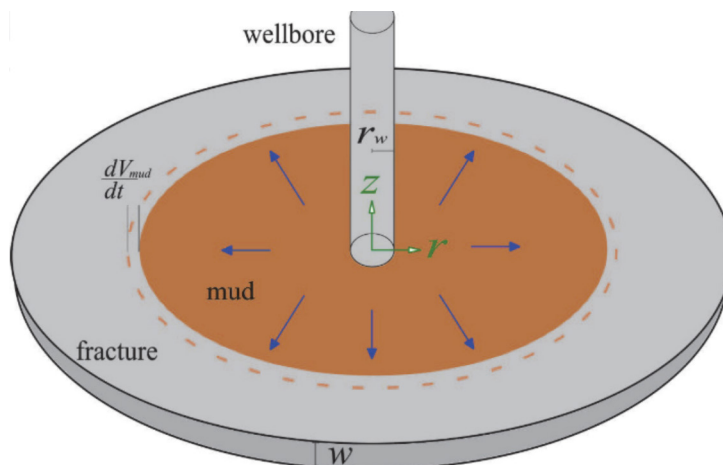


Figura 2. Ejemplo de geometría de fractura en coordenadas radiales Albattat y Hoteit, (2021).

RESULTADOS DEL MODELO PROPUESTO PARA FILTRADO

El modelo definido para el filtrado de lodo, crecimiento de la torta de lodo y cambios de concentración de las partículas de lodo, es aplicado a un ejemplo de laboratorio y campo reportados en la literatura. Para el caso de coordenadas lineales se toman los datos publicados por D.Jiao y M.Sharma, (1993). Los autores relacionan 3 tipos de fluidos con reologías diferentes (Figura 3).

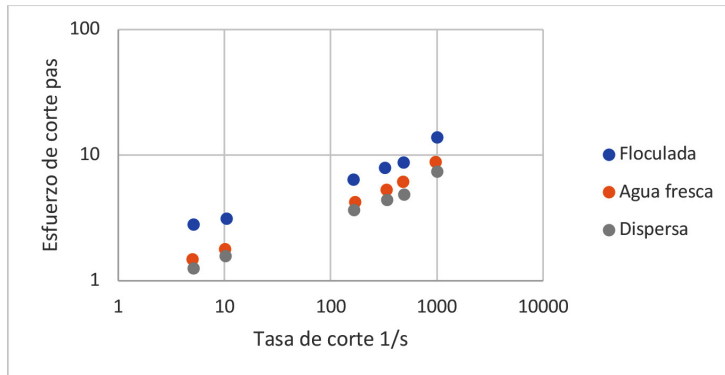


Figura 3. Tipos de fluidos analizados por el autor y sus reologías D.Jiao y M.Sharma, (1993)

Como método de validación, se usaron los datos reportados por D. Jiao y M. Sharma (1993), y se compararon las curvas de volumen acumulado reportado en laboratorio y el resultado de aplicar el modelo base, propuesto en esta investigación a las mismas condiciones. Los datos tomados del artículo se reportan en la tabla 1 y comparación de las curvas del volumen acumulado, estimado con el modelo propuesto y del artículo base, para lodo floculado y lodo disperso, se presentan en la Figura 4.

Tabla 1: Datos para validar el modelo

Variable	Valor	Unidad
Presión circulante	1000	psi
Diámetro	1	in
Longitud	8	in
Permeabilidad	0.102	μm^2
Porosidad	21.4	
Presión de confinamiento	1000	psi
Densidad	1.03	g/cm^3
Concentración de fluido inicial se asume similar a la densidad como se reporta en otras investigaciones	1.03	g/cm^3
Permeabilidad de la torta varía entre	$1e-5$ a $1e-7$	μm^2
*Coeficiente de dispersión	0.0063	cm^2/s
**Constante de erosión	$4.35e-4$	$1/s$

Fuente: D.Jiao y M.Sharma, (1993)
 * Donaldson & Chernoglazov, (1987)
 ** Corapcioglu et al., (1987)

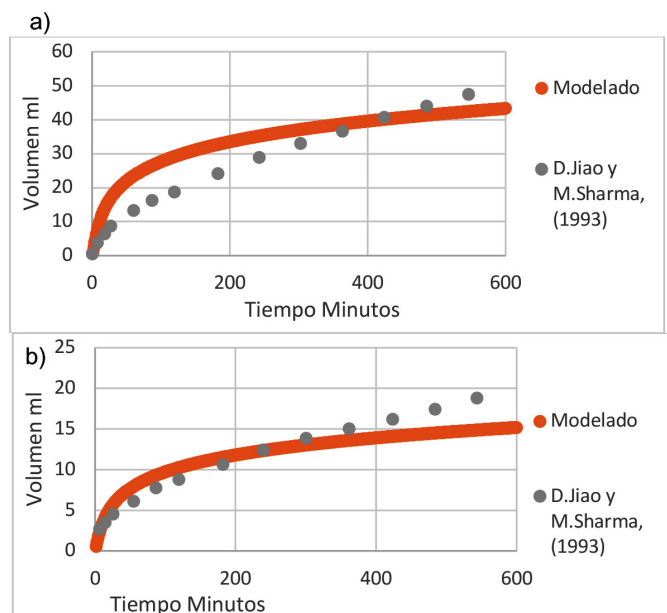


Figura 4. Comparación entre literatura y curva modelada D. Jiao y M. Sharma, (1993) para a) floculado y b) disperso.

Para el caso del lodo floculado, la torta de lodo presenta valores de permeabilidad más altos en comparación con el lodo disperso, lo anterior se debe al posicionamiento uniforme de las partículas. En la Figura 5 se observa el crecimiento de la torta de lodo en el tiempo, el cual no concuerda con lo reportado por el autor. D.Jiao y M.Sharma, (1993) reporta valores entre 2 y 3 mm pero por experiencias en laboratorio el espesor de la torta es alrededor de 1/32 de pulgada, que llevado a milímetros es alrededor de 0.78 mm por tanto se asume que valores que oscilen que 0.78 y 2 milímetros se consideran acertados en el estudio.

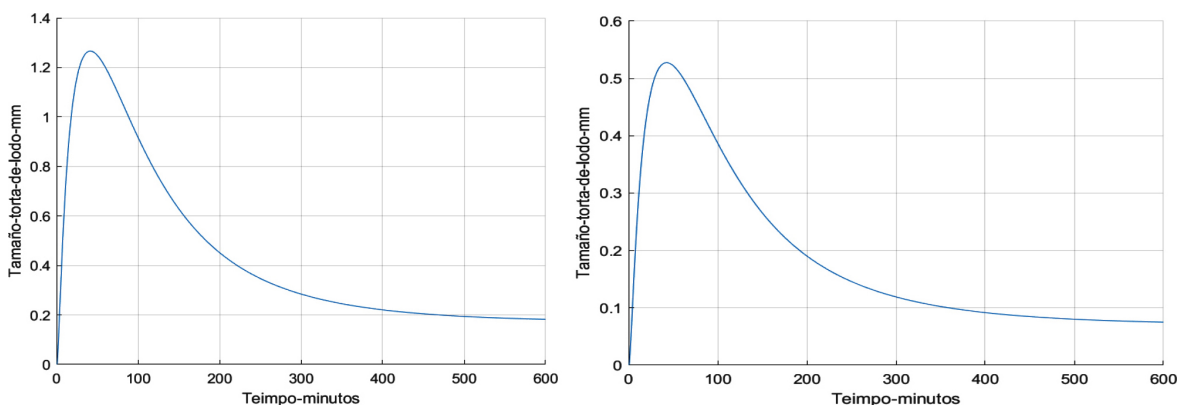


Figura 5. Crecimiento de la torta de lodo para a) floculado y b) disperso.

En la Figura 5 se evidencia que el lodo floculado genera una torta de mayor tamaño y que al incluir el término de erosión, se observa que el crecimiento de la torta alcanza un valor máximo y luego se reduce, las posibilidades de que crezca de nuevo la torta dependen de la velocidad de filtrado, la cual está sujeta a la corrección del daño causado en la muestra, lo cual se ve reflejado en la permeabilidad. Para complementar los datos del modelo, se asume que la torta tiene una densidad de 1.4 g/cm^3 , una porosidad de 0.1 y los valores de permeabilidad usados fueron $4\text{e-}10 \text{ cm}^2$ para disperso y $1\text{e-}9 \text{ cm}^2$ para floculado, los cuales disminuyen al cambiar la saturación debido a la invasión de filtrado. De la densidad de torta y porosidad de torta no se tienen datos reportados en la literatura, pero como el fluido usado solo tenía 40 gramos de bentonita por litro de agua, se espera que la torta tenga bajas densidades.

En cuanto a la aplicación en coordenadas radiales, se tomaron los datos usados en el artículo Hashemzadeh y Hajidavalloo (2016), quienes implementaron un enfoque diferente al planteado en este documento en lo relacionado con el crecimiento de la torta, pero manejaron múltiples escenarios validando su modelo analizando el impacto de cada variable, por tal motivo, se pretende comparar sus resultados con el nuevo enfoque propuesto. En la tabla 2 se enuncian los datos usados.

Tabla 2: Datos para validar el modelo radial

Variable	Valor	Unidad	Variable	Valor	Unidad
Presión	3	MP	Radio del pozo	0.127	m
Radio de interés	1	m	Radio de partícula	5	μm
Permeabilidad	9.8e-13	m ²	Radio efectivo de la partícula en la torta	0.5	μm
Porosidad	20	%	Exponente de la ley de potencia (n)	0.7	
Densidad del fluido	1345	kg/m ³	Índice de consistencia	0.1238	Pas*s ⁿ
Concentración inicial se asume similar a la densidad.	1000	kg/m ³	Fracción de volumen de sólidos en torta	0.6	
Permeabilidad de la tora	correlación	μm^2	Constante de decaimiento	0.005	1/s
*Coeficiente de dispersión	5e-9	m ² /s	Densidad de partícula	4500	kg/m ³
**Constante de erosión	4.35e-4	1/s			

Fuente: Hashemzadeh & Hajidavalloo, (2016), *Fetter et al., (2017)** Corapcioglu et al., (1987)

Además, debido al daño en la formación ocasionado por la invasión de medio poroso, la permeabilidad de la cara de pozo debe ser recalculada, para ello se usa la correlación de Fisher *et al.* (2000), la cual está en función de la fracción de sólidos en la torta de lodo y el radio de partícula. Para la constante de difusión se tomaron los datos de la tabla propuesta por Fetter *et al.* (2017). Al solucionar el modelo con diferencias finitas se obtienen los cambios de presión y concentración en función del radio, como se muestra en la Figura 6.

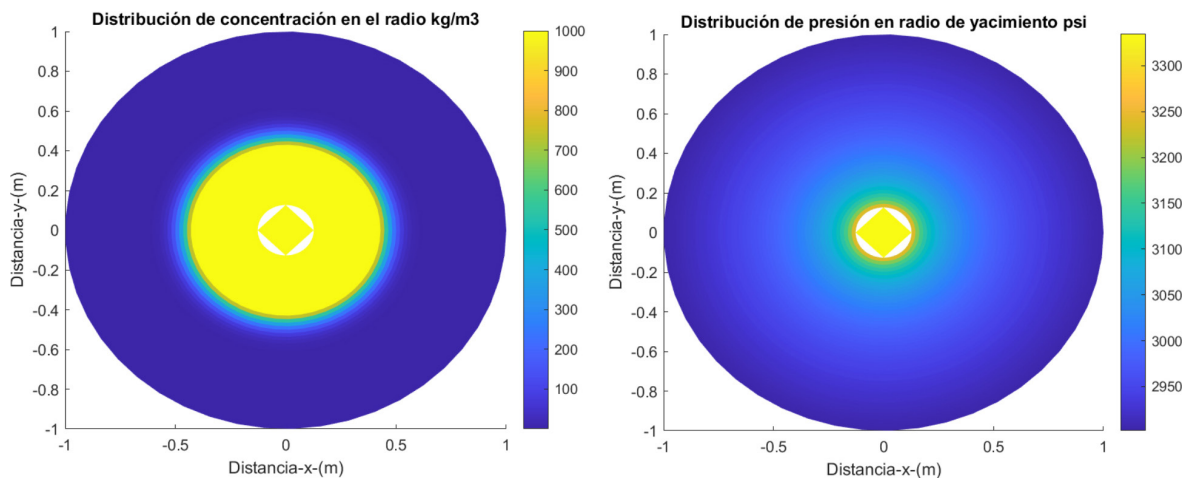


Figura 6. a) Distribución de concentración de invasión de filtrado b) Distribución de presión de poro

A manera de validación se compararon las curvas de caudal y crecimiento de la torta como se observa en la Figura 7 y 8.

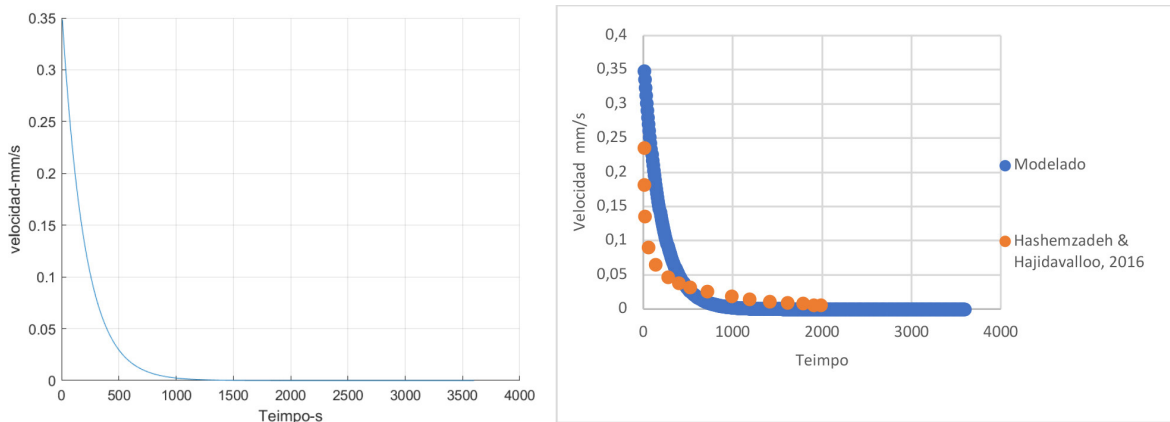


Figura 7. a) Velocidad de filtrado b) comparación de velocidad de filtrado con literatura.

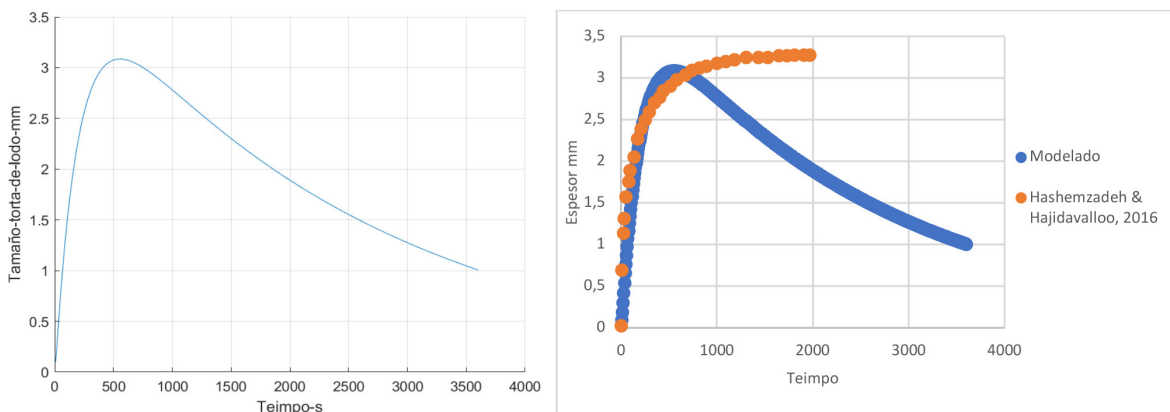


Figura 8. a) Crecimiento de la torta b) comparación del crecimiento de la torta con la literatura.

En la Figura 8 se observa que según la literatura, la torta de lodo crece hasta un valor y luego se mantiene constante, pero al revisar investigaciones previas, se habla de una constante de erosión la cual depende de la masa depositada y la capacidad de las partículas de mantenerse unidas, por tanto, cuando la torta de lodo llega a valores de permeabilidad muy bajos, la velocidad de filtrado baja a un valor mínimo y el crecimiento de la torta se detiene pero la erosión continua, por tanto el tamaño de la torta puede disminuir como se muestra en el presente estudio.

RESULTADOS DEL MODELO PROPUESTO FLUJO EN FRACTURAS

Al combinar las ecuaciones 15, 11 y 6 es posible analizar el flujo a través de formaciones fracturadas asumiendo que las paredes de fractura son permeables. Con este modelo y los datos usados por Vargas *et al.* (2020) se procede a estimar el valor de la tasa de pérdidas de lodo a través de fracturas para diferentes geometrías horizontal y vertical y el comportamiento de las curvas con paredes permeables e impermeables como se observa en las figuras 9 y 10.

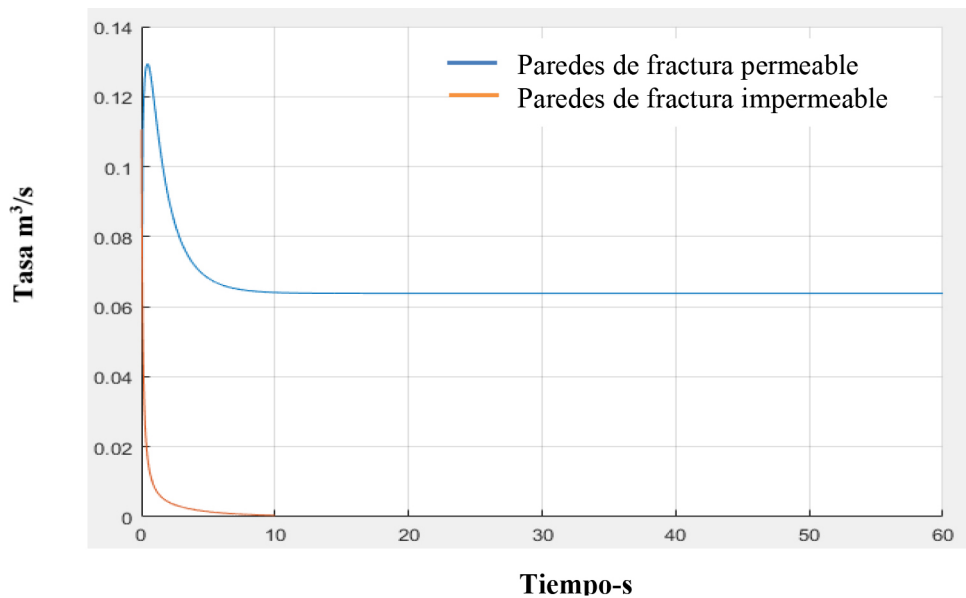


Figura 8. Tasa de pérdidas de lodo a través de fractura con paredes permeables e impermeables.

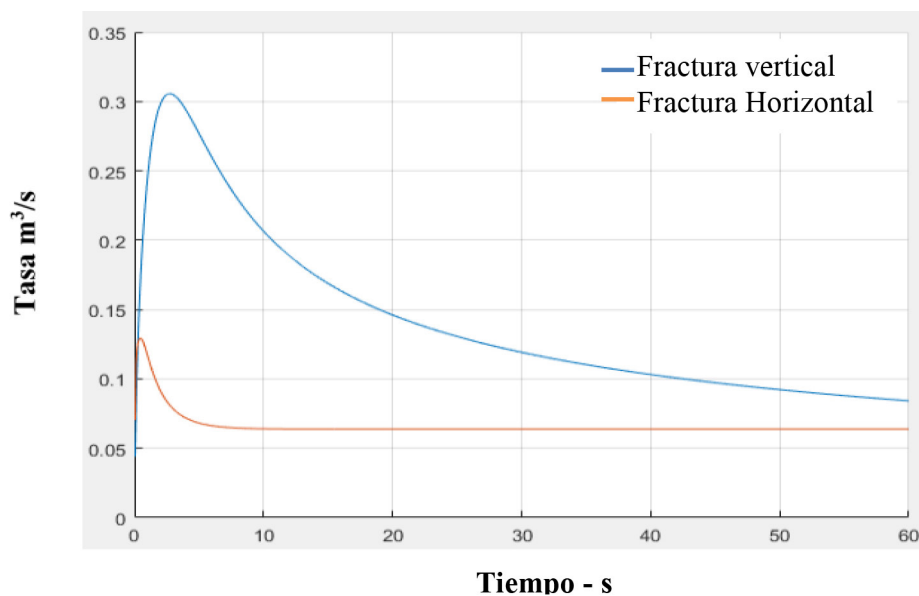


Figura 9. Tasa de pérdidas de lodo a través de fractura horizontal y vertical.

Al combinar los modelos de filtrado y flujo en fracturas es posible estimar la distribución de presión en fractura y yacimiento como se observa en la Figura 11.

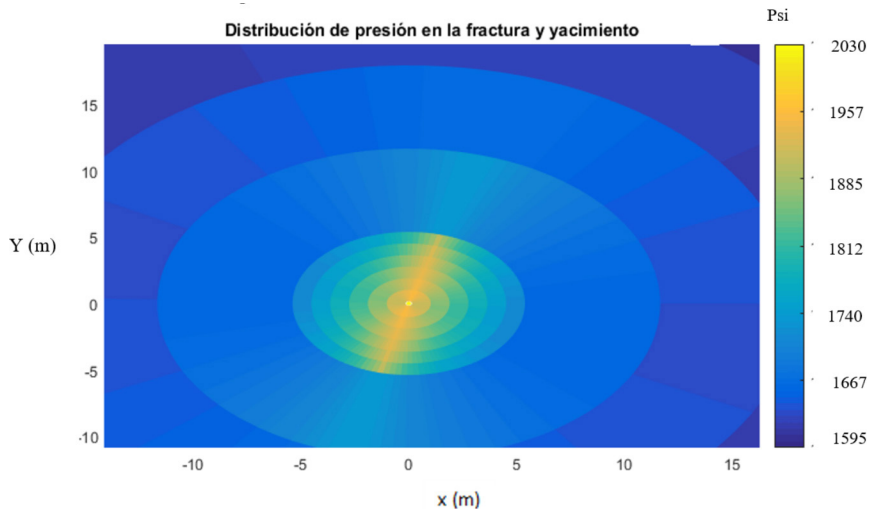


Figura 11. Distribución de presión en pozo y fractura.

Luego de modelar una sola fractura se procede a modelar múltiples fracturas presentes en el pozo y se comparan con los datos de volumen acumulado registrado en campo, para ello se usan los datos del trabajo publicado por Vargas *et al.* (2020). Los resultados se observan en la Figura 12.

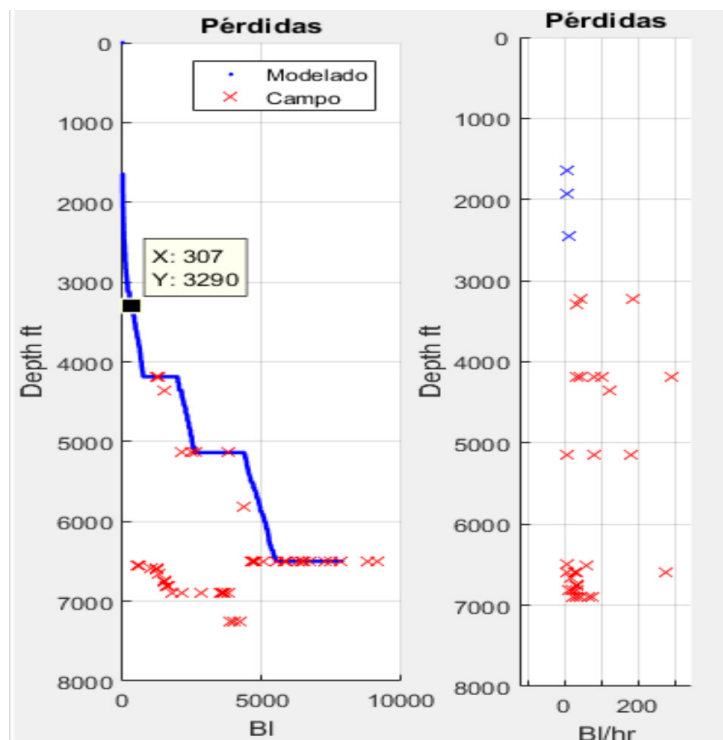


Figura 12. Comparación entre la tasa de pérdidas modelada y registrada en campo.

En la Figura 12 se observa que la curva azul, la cual representa el volumen acumulado modelado mediante la propuesta, concuerda con los puntos rojos que corresponde a los volúmenes acumulados reportados en campo, mostrando que el modelo caracteriza correctamente las pérdidas de lodo en campo, el siguiente paso sería tratar de predecir y prevenir este problema mediante mejores formulaciones de lodo.

CONCLUSIONES

- Para analizar el crecimiento de la torta es necesario estudiar varios modelos como la ley de continuidad, ley de Darcy y modelo de convección dispersión. Al acoplarlos y analizar el crecimiento y erosión de la torta, es posible predecir un posible tamaño de torta de lodo, lo cual es importante para definir su calidad y evitar pegas de tubería.
- El modelo propuesto indica que la torta de lodo no permanece constante en el tiempo si no que luego de alcanzar su valor máximo tiende a disminuir por erosión, ya que su crecimiento se ve limitado por la tasa de filtrado baja, causada por la baja permeabilidad de la torta ya formada (Fig. 8).
- Al acoplar la tasa de pérdidas de lodo en fracturas y zonas permeables se observa que la tasa de pérdidas tiende a un valor constante lo cual representa de mejor manera lo que ocurre en campo.
- El modelo propuesto caracteriza los datos reportados en campo ya que el flujo se dará durante el tiempo que la formación este expuesta al lodo y no en los primeros segundos como indican algunos modelos (Fig. 12).

NOMENCLATURA

x_c = espesor de la torta en metros m

C_{sol} = Concentración de sólidos en la cara de pozo Kg/m^3

ϕ_c = Porosidad de la torta fracción

ρ_c = Densidad de la torta Kg/m^3

k_d = Constante de depositación $1/s$

k_τ = Constante de erosión $1/s$

Cr = Compresibilidad de la roca $1/pas$

μ = Viscosidad en $pas*s$

k = Permeabilidad m^2

ϕ = Porosidad adimensional en fracción

P = Presión en pascales pas

Δr = Radio en metros m

Δt = Tiempo en segundos s

D = Coeficiente de difusión $\frac{m^2}{s}$

C = Concentración del soluto $\frac{kg}{m^3}$

v_r = Velocidad radial $\frac{m}{s}$

AGRADECIMIENTOS

Los autores de esta investigación agradecen al Grupo de Investigación de Estabilidad de Pozo de la Universidad Industrial de Santander y al profesor Arlex Chaves de la escuela de Ingeniería Química por sus indicaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Abboud, N. M., y Corapcioglu, M. Y., 1993. Effect of Mud Penetration on Borehole Skin Properties. 29(8), 2941–2950. <https://doi.org/10.1029/93WR00979>
- Albattat, R., y Hoteit, H., 2021. Modeling Lost-Circulation into Fractured Formation in Rock Drilling Operations. Intechopen, i(tourism), 24. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.95805>
- Civan, F., y Engler, T., 1994. Drilling mud filtrate invasion-improved model and solution. Journal of Petroleum Science and Engineering, 11(3), 183–193. [https://doi.org/10.1016/0920-4105\(94\)90039-6](https://doi.org/10.1016/0920-4105(94)90039-6)
- Colmont, G., y Pinoargote, C., 2015. Flujo en medios porosos. <https://incyt.upse.edu.ec/libros/index.php/upse/catalog/download/16/7/126-1?inline=1>
- Corapcioglu, M. Y., y Abboud, N. M., 1990. Cake filtration with particle penetration at the cake surface. SPE Reservoir Engineering (Society of Petroleum Engineers), 5(3), 317–326. <https://doi.org/10.2118/19021-PA>
- Corapcioglu, M. Y., Abboud, N. M., y Haridas, A., 1987. Governing Equations for Particle Transport in Porous Media. Advances in Transport Phenomena in Porous Media, 269–342. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-94-009-3625-6_8
- Coutelieris, F., y Delgado, J., 2012. Advanced Structured Materials: Transport Processes in Porous Media (Vol. 20). <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-642-27910-2.pdf>
- D.Jiao, y M.Sharma, M., 1993. Mechanism of cake buildup in crossflow filtration of colloidal suspensions. <https://doi.org/https://doi.org/10.1006/jcis.1994.1060>
- Di Federico, V., 1998. Non-Newtonian flow in a variable aperture fracture. Transport in Porous Media, 30(1), 75–86. <https://doi.org/10.1023/a:1006512822518>
- Donaldson, E. C., y Chernoglazov, V., 1987. Charac-

- terization of drilling mud fluid invasion. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1(1), 3–13. [https://doi.org/10.1016/0920-4105\(87\)90010-6](https://doi.org/10.1016/0920-4105(87)90010-6)
- Emhanna, S., 2019. Analysis of Non-Productive Time (NPT) in Drilling Operations- A Case Study of the Ghadames Basin. January.
- Fetter, C. W., Thomas Boving, y Kreamer, D., 2017. Contaminant hydrogeology. In *Contaminant hydrogeology*. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90162-p](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90162-p)
- Fisher, K. A., Wakeman, R. J., Chiu, T. W., y Meuric, O. F. J., 2000. Numerical modelling of cake formation and fluid loss from non-Newtonian muds during drilling using eccentric/concentric drill strings with/without rotation. *Chemical Engineering Research and Design*, 78(5), 707–714. <https://doi.org/10.1205/026387600527888>
- Hashemzadeh, S. M., y Hajidavalloo, E., 2016. Numerical investigation of filter cake formation during concentric/eccentric drilling. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 145, 161–167. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.03.024>
- Lavrov, A., y Tronvoll, J., 2005. Mechanics of borehole ballooning in naturally-fractured formations. *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, MEOS, Proceedings*, 1, 1417–1423. <https://doi.org/10.2523/93747-ms>
- Lavrov, A., y Tronvoll, J., 2006. Numerical Analysis of Radial Flow in a Natural Fracture: Applications in Drilling Performance and Reservoir Characterization. *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, MEOS, Proceedings*.
- Liu, X., Indiana, U., Civan, F., y Oklahoma, U., 1996. Formation Damage and Filter Cake Buildup in Laboratory Core Tests : Modeling and Model-Assisted Analysis. March.
- Majidi, R., Miska, S. Z., Ahmed, R., Yu, M., y Thompson, L. G., 2010. Radial flow of yield-power-law fluids: Numerical analysis, experimental study and the application for drilling fluid losses in fractured formations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 70(3–4), 334–343. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2009.12.005>
- Marbun, B., Aristya, R., Pinem, R. H., Ramli, B. S., y Gadi, K. B., 2013. EVALUATION OF NON PRODUCTIVE TIME OF GEOTHERMAL DRILLING OPERATIONS – CASE STUDY IN INDONESIA. <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2013/Marbun4.pdf>
- Moazzeni, A. R., Nabaei, M., Ghadami, S., y Branch, I. A. U., 2011. SPE 142799 Non Productive Time Reduction Through a Deep Rig Time Analysis, Case Study. <https://doi.org/https://doi.org/10.2118/142799-MS>
- Parn-anurak, S., y Engler, T. W., 2005. Modeling of fluid filtration and near-wellbore damage along a horizontal well. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 46(3), 149–160. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2004.12.003>
- Shad, S., Salmanpour, S., Zamani, H., y Zivar, D., 2021. Dynamic analysis of mud loss during overbalanced drilling operation: An experimental study. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196(September 2020), 107984. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107984>
- Vargas, D. A., Calderón, Z. H., y Mateus, D. C., 2020. Assessment of the drilling fluid losses phenomenon in naturally-fractured reservoir by numerical modeling that couples fracture plane and permeable zone. *ISRM 8th International Symposium Geomechanics, ISG 2019, May*, 978–981.
- Willis, M. S., y Tosun, I., 1980. A rigorous cake filtration theory. *Chemical Engineering Science*, 35(12),

- 2427–2438. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(80\)85055-X](https://doi.org/10.1016/0009-2509(80)85055-X)
- Windarto, Gunawan, A. Y., Sukarno, P., y Soewono, E., 2011. Modeling of mud filtrate invasion and damage zone formation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 77(3–4), 359–364. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2011.04.011>
- Windarto, Gunawan, A. Y., Sukarno, P., y Soewono, E., 2012. Modelling of formation damage due to mud filtrate invasion in a radial flow system. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 100, 99–105. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.11.003>
- Xia, Y., Jin, Y., y Chen, M., 2015. Comprehensive methodology for detecting fracture aperture in naturally fractured formations using mud loss data. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 135, 515–530. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.10.017>
- Xia, Y., Jin, Y., Chen, M., Chen, K. P., Lin, B. T., y Hou, B., 2015. Hydrodynamic modeling of mud loss controlled by the coupling of discrete fracture and matrix. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 129, 254–267. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.07.026>