

UN MODELO DE DEPOSITACIÓN DE PARTÍCULAS EN
MEDIOS POROSOS.

Por

MARCO A. RUIZ SERNA.

MAESTRIA EN INGENIERÍA QUÍMICA

Director.

Carlos A. Londoño G.

Msc. por Investigación.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

2009.

DEDICATORIA.

A Júnior y a Simón. ...

A Maria Victoria....

A toda mi gran familia....

Mil Gracias a Todos.....

AGRADECIMIENTOS.

- A los Profesores Colegas de Ingeniería de Petróleos.
- A los ingenieros de Petróleos: Diógenes Barreto, Diego Contreras, Richard Zabala.
- A los Compañeros Estudiantes de Maestría.

...Sin el aporte de todos ellos, no hubiera sido capaz.

TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
1. FLUJO DE PARTICULAS EN UN MEDIO POROSO.	1.
2. UNA REPRESENTACION DE LA DEPOSITACION DE PARTICULAS FINAS EN UN MEDIO POROSO.	5.
2.1 PRESENTACION DE LA ECUACION DE FLUJO.	5.
2.2 ECUACIONES PARA LAS CINETICAS DE PARTICULA.	7.
2.3 UNA PROPUESTA NUMERICA PARA SIMULAR LA DEPOSITACIÓN DE PARTICULA EN UN MEDIO POROSO.	9.
2.4 LA NECESIDAD DE DETERMINAR LAS CONSTANTES FENOMENOLOGICAS EN MODELO DE DEPOSITACION DE PARTICULAS.	12.
3. UN MODELO ESTADISTICO PROPUESTO PARA ESTIMAR PARAMETROS DE LA RESPUESTA DE UN MODELO DE DEPOSITACION DE PARTICULAS.	13.
3.1 TECNICAS DE REGRESION.	13.
3.2 MÉTODO DE MARQUARDT – LEVENBERG.	17.
3.3 UN ACOUPLE DEL MODELO DE ESTIMACION DE PARAMETROS - MARQUARDT LEVENBERG - CON EL MODELO DE DEPOSITACION DE PARTICULAS.	18.
4. SIMULACION EN LABORATORIO DE LA DEPOSITACION DE PARTICULAS EN UN MEDIO POROSO.	22.
5. UN MODELO DE DEPOSITACION DE PARTICULAS EN UN MEDIO POROSO.	27.
5.1. SIMULACION DEL FENOMENO DE DEPOSITACIÓN EN MEDIOS POROSOS CONSTRUIDOS CON ARENA.	27.

6.	CONCLUSIONES.	39.
7.	RECOMENDACIONES.	40.
8.	BIBLIOGRAFIA .	42.
9.	ANEXO 1. RESUMEN EJECUTIVO.	44.

LISTADO DE FIGURAS.

	Pagina.
Figura 1. Esquema de Fenómenos de Partícula en un Medio Poroso.	2.
Figura 2. Diagrama de Bloques del Algoritmo de Marquardt-Levenberg.	19.
Figura 3. Componentes Básicos del Montaje Experimental utilizado para Simular el Fenómeno de Depositación de Partículas en Laboratorio.	22
Figura 4. Comparación de la Respuesta de <i>Simulador Acoplado</i> para Depositación de Partículas con los Registros de Permeabilidad del laboratorio. Empaque R1.	30.
Figura 5. Comparación de la Respuesta de Simulador Acoplado para Distintos Fenómenos de Depositación con los Registros de Permeabilidad del laboratorio. Empaque R1.	30.
Figura 6. Pronostico del Deterioro de Permeabilidad para el Empaque R1 obtenido con el <i>Simulador Acoplado</i> .	31.
Figura 7. Comparación de la Respuesta de Simulador Acoplado para Depositación de partículas con los Registros de Permeabilidad del laboratorio. Empaque R2.	33.
Figura 8. Comparación de la Respuesta de <i>Simulador Acoplado para</i> Distintos Fenómenos de Depositación con los Registros de Permeabilidad del laboratorio. Empaque R2.	34.
Figura 9. Pronostico del Deterioro de Permeabilidad para el Empaque R2 obtenido con el Simulador Acoplado.	34.
Figura 10. Comparación de la Respuesta de <i>Simulador Acoplado</i> para Depositación de partículas con los Registros de Permeabilidad del laboratorio. Empaque R8.	37.
Figura 11. Comparación de la Respuesta de <i>Simulador Acoplado para</i> Distintos Fenómenos de Depositación con los Registros de Permeabilidad del laboratorio. Empaque R8.	37.
Figura 12. Pronostico del Deterioro de Permeabilidad para el Empaque R8 obtenido con el <i>Simulador Acoplado</i> .	38

LISTADO DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Condiciones Establecidas para las Pruebas de Depositación de Partículas.	25.
Tabla 2. Características de la Prueba en el Empaque R1.	28.
Tabla 3. Parámetros Estimados por el <i>Simulador Acoplado</i> para los fenómenos de depositación del Empaque de Arena 1.	29.
Tabla 4. Resultados obtenidos con el Simulador Acoplado para cada Mecanismo de Partícula Asumido. Empaque R1.	29.
Tabla 5. Características de la Prueba en el Empaque R2.	32.
Tabla 6. Parámetros Estimados por el <i>Simulador Acoplado</i> para los fenómenos de depositación del Empaque de Arena 2.	32.
Tabla 7. Resultados obtenidos con el Simulador Acoplado para cada Mecanismo de Partícula Asumido. Empaque R2.	33.
Tabla 8. Características de la Prueba en el Empaque R8.	35.
Tabla 9. Parámetros Estimados por el <i>Simulador Acoplado</i> para los fenómenos de depositación del Empaque de Arena 8.	36.
Tabla 10. Resultados obtenidos con el Simulador Acoplado para cada Mecanismo de Partícula Asumido. Empaque R8.	36.

NOMENCLATURA.

P	Presión del fluido al interior del medio poroso.
x	Distancia en la dirección de flujo.
K	Permeabilidad ó capacidad de flujo del medio.
ϕ	Porosidad del medio.
t	Tiempo de flujo.
μ	Viscosidad de la fase continua.
ρ_l	Densidad de la fase líquida.
ρ_p	Densidad de partícula.
v_l	Velocidad de la fase líquida.
v_p	Velocidad de partícula.
S_l	Saturación de la fase líquida.
S_p	Saturación de partícula.
$\overset{o}{S}$	Tasa de absorción líquida.
$\overset{o}{g}_p$	Fuentes y/o sumideros de partículas finas.
σ_p	Masa de partículas depositadas por unidad de volumen.
K_t	Valor límite inferior de permeabilidad (mayor daño por hinchamiento).
K_o	Permeabilidad inicial.
K_{sw}	Valor instantáneo de permeabilidad por hinchamiento.
ϕ_o	Porosidad inicial.
k_1	Constante fenomenológica por depositación superficial.
k_2	Constante fenomenológica por arrastre de partículas.
k_3	Constante fenomenológica por generación de partículas hinchables.
k_4	Constante fenomenológica por movilización de finos.
k_5	Constante fenomenológica por erosión de finos de la superficie.
k_6	Constante fenomenológica relación de permeabilidad por hinchamiento.
B	constante fenomenológica por absorción líquida.
A	rata constante.
2AB	constante fenomenológica por hinchamiento.
σ_p^*	Constante fenomenológica contenido potencial de partículas hinchables.

$\left(-\frac{\partial P}{\partial x}\right)_{cr}$	Gradiente de presión crítico por encima del cual se presenta arrastre.
$\left(-\frac{\partial P}{\partial x}\right)_{cr}^*$	Gradiente de presión crítico por encima del cual se presenta generación de finos.
$\frac{\partial \sigma_p}{\partial t}$	Rata neta de depositación de partículas.
$\frac{\partial \sigma_p^*}{\partial t}$	Rata de generación de partículas.
r_r	Tasa de retención.
r_e	Tasa de arrastre.
v	Flujo volumétrico de la solución.
C_p	Concentración de partícula en la solución.
$\left(-\frac{\partial P}{\partial x}\right)$	Gradiente de presión.
U	Variable de paso unitaria.
NTU	Unidades nefelométricas de turbidez.
x	Variable independiente.
y	Variable dependiente.
α, β, γ	Parámetros de regresión.
a, b	Estimadores de mínimos cuadrados de α y β de manera respectiva.
ε, e	Error aleatorio.
\bar{y} ó f	Modelo de regresión ajustado.
χ^2	Función error ó función objetivo.
$E(y)$	Modelo determinístico.
X	Matriz de variables independientes.
Y	Vector de variables dependientes.
n, m, k, i, j, r	Números enteros.
σ^2	Varianza.
σ	Desviación estándar.
$b^{(0)}$	Vector de valores iniciales para β .
$b_j^{(0)}$	Estimadores para β_j .
$\Delta b_k^{(0)}$	Corrección para $b_j^{(0)}$.
$f(x_i, b_j^{(0)})$	Modelo de regresión evaluado en el vector $b_j^{(0)}$.
$\left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_k}\right)_0$	Derivada de la función de regresión con respecto a cada parámetro, evaluada en $b_j^{(0)}$.
$E_i^{(0)}$	Diferencia entre la observación y_i y la función de regresión evaluada en el vector $b_j^{(0)}$.
$A_{k*k}^{(0)}$	Matriz de covarianza.

- $B_{k*1}^{(0)}$ Vector de parámetros desconocidos.
 $Z_{k*1}^{(0)}$ Vector de términos independientes.
 $a_{ij}, \Delta b_j^{(0)}, z_j$ Componentes del sistema matricial $A_{k*k}^{(0)}, B_{k*1}^{(0)}, Z_{k*1}^{(0)}$ de manera respectiva.
 $A_{k*k}^{(0)*}, B_{k*1}^{(0)*}, Z_{k*1}^{(0)*}$ sistema matricial escalado.
 $a_{ij}^*, \Delta b_j^{(0)*}, z_j^*$ Componentes del sistema matricial $A_{k*k}^{(0)*}, B_{k*1}^{(0)*}, Z_{k*1}^{(0)*}$ de manera respectiva.
 λ Numero menor que 1, pero mayor que cero.

RESUMEN.

Se desarrolla un modelo sistematizado en el cual se acopla una aproximación fenomenológica de flujo de partículas en medios porosos con un ajuste estadístico para simular los mecanismos de depositación de finos y su impacto sobre la capacidad de flujo de una roca productora de hidrocarburos.

Para configurar el modelo acoplado se desarrolla y se presenta una solución sistematizada para caracterizar el fenómeno de flujo de material sólido fino en medios porosos a partir de una aproximación euleriana del fenómeno y se acopla al desarrollo y solución de un modelo estadístico de regresión no lineal para la estimación de parámetros de cinéticas de depositación.

Al aplicar el modelo acoplado se presenta un pronóstico de los efectos del deterioro de la capacidad de flujo de un medio poroso debido al impacto producido por el flujo de partículas finas para las condiciones experimentales en laboratorio. Además, se incluye una propuesta de metodología de laboratorio y los montajes requeridos que permitan simular en laboratorio el fenómeno de flujo de partículas en medios porosos y generar los resultados experimentales necesarios para ajustar las respuestas del *Simulador Acoplado* a las condiciones de prueba en laboratorio.

Keywords: Flujo de finos en Medios Porosos, Fenómenos de Transporte en Medios Porosos, Procesos de Partícula en Medios Porosos, Transporte de Partículas en Medios Porosos, Medios de Daño de Formación, Suspensiones de Sólidos en Medios Porosos.

ABSTRACT.

In this work I present a systematized model that couple an phenomenological approach of flow of particles in porous media with a statistical adjustment to simulate the mechanisms of deposit of fines and the impact on the capacity of the flow in an oil and gas bearing formation.

The coupled model develops a systematized solution to characterize the phenomenon of flow of fines solid material in porous media based upon an eulerian approach of the phenomenon and is incorporated to the development and solution of a statistical model of no linear regression for the estimation of kinetic parameters of deposition.

The simulator presented in this study can be used to predict the variation of the capacity of flow of a porous media due to the impact produced by the flow of fines particles for the experimental conditions applied in laboratory. In addition, is included a description of experimental set-up and procedures primary to simulate in laboratory the phenomenon of flow of particles in porous media and generate the experimental necessary results to adjusted the answers of the coupled simulator to the conditions of test in laboratory.

Keywords: Fines Flow in Porous Media, Flow in Porous Media, Transport Phenomena in Porous Media, Particulate Processes in Porous Media, Particulate Transport in Porous Media, Formation Damage Models, Solid Suspension in Porous Media.

1. FLUJO DE PARTICULAS EN UN MEDIO POROSO.

Antes de llegar los fluidos producidos al fondo de un pozo productor de petróleo, estos viajan a través de la roca porosa y arrastran pequeñas partículas ó material fino que pueden alcanzar a salir al pozo en suspensión con los fluidos ó pueden depositar y formar acumulados en los poros ó gargantas de poros cerca de la zona circundante del fondo del pozo. La depositación de partículas produce una disminución gradual y continua de la capacidad de flujo de la roca conocida como permeabilidad y este deterioro se conoce como daño de formación.

El daño del formación se traduce en una caída de la tasa de producción de un pozo productor ó de tasa de inyección para un pozo inyector. En ambos casos se ocasiona pérdida de ingresos para la empresa operadora y aumento en los costos de producción debido a la necesidad de implementar trabajos remediales. El daño de formación representa un fenómeno indeseable y recurrente en la vida productiva de cualquier campo productor en particular.

En las operaciones cotidianas de la industria del petróleo se involucran prácticas de campo encaminadas a mitigar, inhibir ó remediar los efectos del daño de formación. Dichas acciones, por lo general, consisten en aplicaciones de tratamientos químicos a partir de los pozos productores con los cuales se puede controlar ó recuperar el daño de la roca producido por los depósitos mencionados. El desempeño de estos tratamientos ha sido probada en multiplicidad de aplicaciones de laboratorio y de campo y hoy están incorporadas como aplicaciones rutinarias de servicio de pozo.

El proceso de depositación y acumulación de partículas finas, al interior de un medio poroso, ha sido reconocido como un fenómeno dependiente de factores tales como: tamaño de finos en relación con el tamaño de poro, contenido – masa – de partículas finas y velocidad de flujo, entre otros y contempla:

- Depositación superficial. En este caso, los finos depositados tienen un tamaño lo suficiente menor con relación al tamaño de poro y no alcanzan a taponar el canal poroso que los aloja.
- Puenteo de Finos. En este caso, los finos de menor tamaño se depositan pero a diferencia del depositación superficial llegan a una restricción porosa en una cantidad – masa – tal que, juntos logran taponar el canal poroso.
- Taponamiento. En este caso los finos tienen un tamaño suficiente, – con relación al tamaño del canal –, para quedar atrapados en un canal poroso y producir, en el tiempo, el taponamiento completo de la restricción.
- Remoción de Partículas. Cuando se establece en el medio poroso, unas velocidades de flujo mayores que un valor limite, conocido como velocidad crítica, el fluido remueve partículas granuladas finas de las paredes del medio poroso y de los depósitos superficiales originados con anterioridad.

- Generación de Partículas por el Medio Poroso. El movimiento de un fluido en el medio poroso establece un esfuerzo de corte sobre la superficie de la roca dependiente de la velocidad que puede vencer las fuerzas de atracción superficiales y generar un desprendimiento continuo de material sólido. Además, la llegada de un nuevo fluido a la formación porosa productora permite un desequilibrio químico en el medio y el desalojo de material sólido fino de la roca hacia el fluido circundante. La Figura 1 esquematiza los diversos fenómenos de partícula

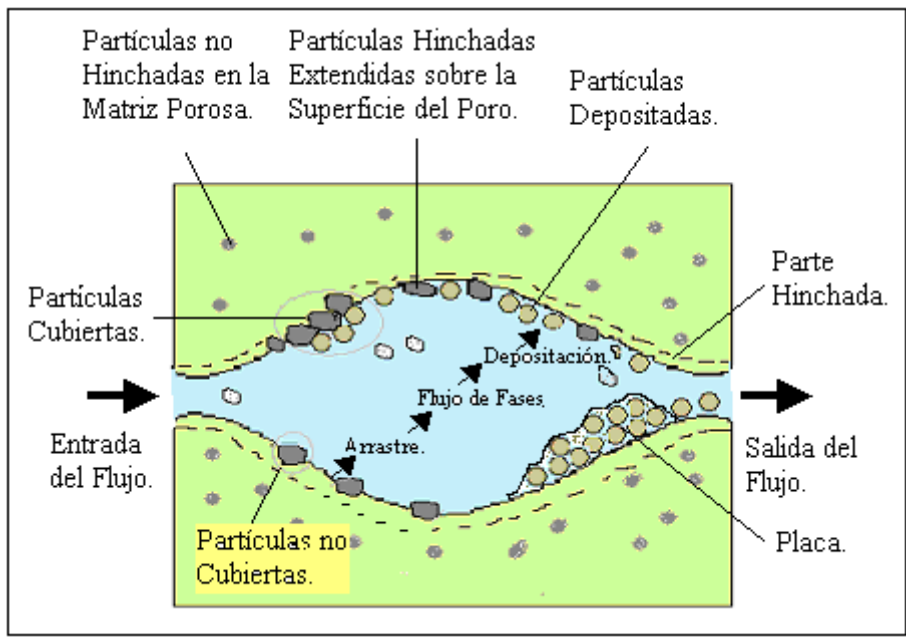


Figura 1. Esquema de Fenómenos de Partícula en un Medio Poroso.

La diversidad de fenómenos de partícula junto a la complejidad propia de describir la morfología de un medio poroso configuran un área de evidente interés y de notables desafíos para investigadores orientados a desarrollar una aproximación fenomenológica sobre la dinámica y comportamiento de flujo de las partículas finas en suspensión a través del medio poroso a partir de la cual se pueda simular el fenómeno de daño de formación por deposición de partículas en un medio poroso. Sin embargo, se pueden identificar dos familias de aproximaciones ó modelamientos.

APROXIMACIONES LAGRANGIANAS. En una representación Lagrangiana para el fenómeno de deposición de partículas finas en un medio poroso se identifican los siguientes elementos recurrentes.

- **Dinámica de la Partícula.** Se describe el movimiento de la partícula en un medio poroso tortuoso sometida a fuerzas de arrastre, gravedad y difusión través del medio fluido. Se descartan ó se incluyen la interacción interpartícula por colisiones de acuerdo al grado de dilución. La ecuación de movimiento de Newton para la partícula, en forma general, contempla:

$$m_p \frac{\partial u_p}{\partial t} = F_D + F_A + F_p + F_G + F_w$$

F_D : Fuerzas de arraste por exceso de esfuerzo de corte de acuerdo a la velocidad de la solución.

F_A : Fuerzas asociadas a masa ó concentración de las partículas en el fluido.

F_p : Fuerzas asociadas al gradiente de presión.

F_G : Fuerzas asociadas a efecto de gravedad por densidad de las partículas.

F_w : Fuerzas asociadas a la interacción de las partículas con las paredes del medio poroso.

- Una Representación de Red para el Medio Poroso. La representación del medio poroso a través de un sistema de red inicia con Fatt (1956), quien utiliza la analogía de tubos interconectados en uniones llamadas nodos y, a su vez, representan las gargantas del medio. Autores posteriores tales como Donaldson (1977), Sharma and Yortsos (1987), Houi and Lenormand (1986), Rege y Fogler (1988) evolucionan las representaciones de poros interconectados con propuestas de Red de forma de esferas empacadas, triangulares, hexagonales, arreglos aleatorios fijos y arreglos aleatorios dinámicos
- Flujo a Través de un Sistema de Red. Una vez configurada el sistema de red, se acopla el modelo de la dinámica de partícula y se resuelve el flujo a través de la red a partir de balance de presión y de caudal. Se puede estimar, así, una visión en el tiempo de las nuevas condiciones de contenidos de partícula, porosidad y permeabilidad del medio poroso.

APROXIMACIONES EULERIANA. Para una representación euleriana del fenómeno de depositación de partículas finas en un medio poroso se pueden identificar los siguientes contenidos.

- Dinámica de la Partícula. La partícula como elemento sólido no existe, carece de dinámica. Las partículas conforman una segunda fase fluyente, continua. El sólido particulado no interactúa por difusión en la fase líquida ni con sus vecinas por colisión.
- Distribución Porosa de los Canales de Flujo. El medio poroso exhibe una morfología de canales y/o gargantas de flujo con una función de distribución fija de tamaños, estimada ó inferida. En general esta característica de medio poroso permanece en el tiempo durante el fenómeno de depositación de partículas, pero, con parámetros variables.
- Ecuaciones de Cinética de Depositación y Remoción de Partículas. Los fenómenos de depositación y remoción de partículas se plantean en función de leyes construidas a partir del comportamiento observado de las partículas finas en estudios experimentales de laboratorio. Además, se expresan en función de parámetros cuya estimación implica conocer resultados de mediciones experimentales.

La aproximación Euleriana integra una representación diferencial para el flujo simultáneo de la solución líquido más partícula, una representación del medio poroso y leyes empíricas para los fenómenos de partículas esperados. El modelo construido informa los cambios observados en un modelo macro y a partir de las observaciones ó datos se valida ó corrigen los fenómenos de partícula simulados.

Se presenta, en este informe, la construcción un modelo sistematizado en el cual se acopla una aproximación fenomenológica de flujo de partículas en medios porosos con un ajuste estadístico para simular los mecanismos de depositación de finos y su impacto sobre la capacidad de flujo de una roca productora de hidrocarburos. Con el modelo se integra:

- Una solución sistematizada para caracterizar el fenómeno de flujo de material sólido fino en medios porosos a partir de una aproximación euleriana del fenómeno de depositación de partícula acoplada al desarrollo y solución de un modelo estadístico de regresión no lineal.
- La metodología de laboratorio y los montajes requeridos que permitan simular en laboratorio el fenómeno de flujo de partículas en medios porosos y generen los resultados experimentales necesarios para ajustar las respuestas del modelo matemático a las condiciones de prueba en laboratorio.
- Un pronóstico de los efectos del deterioro de la capacidad de flujo de un medio poroso debido a impacto del flujo de partículas finas para las condiciones experimentales en laboratorio.

2. UNA REPRESENTACION DE LA DEPOSITACION DE PARTICULAS FINAS EN UN MEDIO POROSO.

Para la representación de los fenómenos de partícula en un medio poroso se retoma el esquema semifenomenológico planteado por Faruk Civan en una serie de artículos publicados a partir de la década de los años 90. Esta aproximación está constituida por una ecuación diferencial parcial para flujo bifásico – fluido y partícula construida a partir de balances de masa tanto para el líquido como para la fase partícula, y ecuaciones de flujo para cada una de las fases fluidas en un medio poroso, fluido y partícula. En los balances, para cada fase, se consideran los fuentes y sumideros de acuerdo a los fenómenos de depositación y generación insitu de partículas y la absorción de la fase líquida en el medio poroso y se representan a partir de leyes experimentales.

En esta sección se presenta las relaciones matemáticas para la representación de la depositación de partículas en un medio poroso y se esquematiza el algoritmo numérico desarrollado, propuesto y aplicado para encontrar soluciones particulares a los distintos fenómenos de partícula simulados.

2.1 PRESENTACION DE LA ECUACION DE FLUJO.

Para la construcción del modelo matemático se tiene en cuenta:

- Flujo bifásico -líquido-partícula. La partícula forma una segunda fase continua.
- Flujo unidimensional, horizontal y sistema isotérmico.
- Medio poroso homogéneo e isotrópico.
- Las fases de flujo se consideran incompresibles.
- En la superficie del poro se presenta desprendimiento ó remoción in-situ de finos y en la garganta ocurre la captura y/o entrapamiento.

Al interior del medio poroso se presentan los siguientes mecanismos:

- Las partículas de tamaño mayor se atrapan en la garganta de poro y disminuyen la porosidad del medio, fenómeno de taponamiento.
- Las partículas tamaño menor pueden depositar sin taponar ó se pueden agrupar y taponar la garganta del poro, efecto de puenteo. Fenómenos de depositación superficial y puenteo de partículas.
- El medio poroso puede contener material arcilloso que absorbe la fase líquida y aumenta su volumen específico y produce reducción en la porosidad – permeabilidad del medio. Fenómeno de Hinchamiento de la formación por absorción de líquido.
- El medio poroso libera ó desprende material fino de la superficie del poro de acuerdo al esfuerzo de corte ejercido por el fluido sobre la superficie de la roca en virtud de su velocidad de flujo. Fenómeno de generación de partículas por el medio poroso.

Al plantear un balance de masa para la fase líquida en un elemento diferencial de un modelo poroso lineal horizontal se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho_l S_l) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_l u_l) + \dot{S} = 0 \quad (1)$$

En la ecuación (1), además de las variables porosidad, densidad líquida, saturación líquida y flujo volumétrico líquido se incluye la variable \dot{S} que representa la masa de líquido absorbida por el medio poroso por unidad de tiempo por unidad de volumen.

Al plantear un balance de masa para la fase partícula en un elemento diferencial de un modelo poroso lineal horizontal se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi S_p) + \frac{\partial}{\partial x}(f u_p) + (\dot{\sigma}_p + \dot{\sigma}_p^*) / \rho_p = 0 \quad (2)$$

En la ecuación (2), además de las variables porosidad, densidad de partícula, saturación de partícula y flujo volumétrico de partícula se incluyen las tasas ó velocidad de $\dot{\sigma}_p$ y $\dot{\sigma}_p^*$ que representan la masa de partículas depositadas y masa de partículas generadas por cada elemento diferencial de volumen del medio.

Al combinar la ecuación (1) y (2) para el supuesto de flujo bifásico en el medio y aplicar la ley de Darcy para el flujo de cada fase en un medio poroso, se obtiene la ecuación de flujo bifásico – líquido-partícula - en un medio poroso

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) = \frac{\dot{S}}{\rho_l} + \frac{1}{\rho_p} \frac{\partial}{\partial t} (\dot{\sigma}_p + \dot{\sigma}_p^*) + \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (3)$$

Con la ecuación (3) se relacionan los cambios en permeabilidad con respecto al tiempo y a la posición con las tasas de absorción líquida del medio poroso \dot{S} , tasa de depositación de partículas desde el fluido hacia el medio - $\dot{\sigma}_p$ - y con la tasa de generación de partículas finas desde el medio poroso hacia la solución fluida - $\dot{\sigma}_p^*$.

2.2. ECUACIONES PARA LAS CINÉTICAS DE PARTICULA.

Para buscar posibles soluciones numéricas a la ecuación (3) se requiere acudir a formas explícitas ó implícitas propuestas para las cinéticas de fenómenos de partículas asumidos.

- Rata de Absorción de Líquido por la Matriz Porosa.

Una forma de estimar la rata másica de absorción líquida por unidad de volumen por undiad de tiempo \dot{S} - desarrollada a partir de la segunda ley de difusión de Fick se puede simplificar y expresar como:

$$\dot{S} = \frac{B}{\sqrt{t}} \quad (4)$$

En la ecuación (4), el coeficiente B representa un conjunto de información referida a la capacidad de absorber líquido por el medio poroso. En su conjunto recoge propiedades tanto del medio como del tipo de solución. Pero, en la práctica su magnitud no se conoce y se estima a partir de información obtenida en simulaciones experimentales de los fenómenos de partícula en laboratorio.

- Cambios en Permeabilidad por Absorción Líquida. El volumen de líquido absorbido por la matriz porosa produce cambios en permeabilidad para los cuales se propone, en el modelo, la siguiente expresión.

$$\frac{K_{Sw}}{K_o} = k_6 + (1 - k_6) \exp(-2ABt^{1/2}); \quad (5)$$

En la ecuación (5), los coeficientes K_6 y AB recogen información del medio poroso relacionada con la tasa de absorción líquida y con la capacidad máxima de expansión volumétrica. Pero, en la práctica sus magnitudes no se conocen y se estima a partir de información obtenida en simulaciones experimentales de los fenómenos de partícula en laboratorio.

- Rata de Depositación de Partículas. La tasa neta de depositación de partículas se estima como la diferencia entre la tasa de retención y la tasa de arrastre de partículas presentes en el medio. La retención depende de la masa de partículas, densidad de partículas y porosidad del medio. El arrastre ó remoción de partículas tiene naturaleza hidrodinámica y resulta proporcional al exceso del esfuerzo de corte a partir de un nivel inferior límite, - gradiente crítico.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_p}{\partial t} &= k_1 v C_p \rho \phi - k_2 \sigma_p \left[\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) - \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr} \right] U \\ U &= 0, \text{ sí } \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) \leq \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr} \\ U &= 1, \text{ sí } \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) > \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr} \end{aligned} \quad (6)$$

En la expresión (6), el coeficiente de depositación K_1 y los coeficientes de de remoción K_2 y $\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_{cr}$ almacenan información relacionada con la mineralogía y tipo de roca y con el tipo de fluido. Pero, en la práctica sus magnitudes no se conocen y se estima a partir de información obtenida en simulaciones experimentales de los fenómenos de partícula en laboratorio.

- Ecuación de Generación de partículas. El medio poroso contiene material fino ó particulado adherido a las paredes del poro, potencial de liberarse, de acuerdo a los desequilibrios físico – químicos establecidos al interior del medio ó a la capacidad de arrastre de acuerdo a la hidrodinámica del fluido. Civan propone una ecuación para la estimación de la tasa de generación de finos en el medio, la cual asume la forma siguiente:

$$\frac{\partial \sigma_p^*}{\partial t} = -k_3 \sigma_p^* \left[1 - \frac{1}{\exp(k_4 t^{1/2})} \right] \frac{1}{\exp(k_5 \sigma_p)} \left[\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) - \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr}^* \right] U$$

$$U = 0, \text{ sí } \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) \leq \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr}^*$$

$$U = 1, \text{ sí } \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) > \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr}^* \quad (7)$$

La ecuación (7) plantea proporcionalidad entre la tasa de liberación de partículas tanto con el contenido de partículas desprendibles en la matriz, σ_p^* , como con el exceso de gradiente de presión sobre el gradiente crítico requerido para mover una partícula de la superficie porosa de la matriz, $\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_{cr}^*$. Pero, en la práctica, las magnitudes de estos coeficientes no se conocen y se estiman a partir de información obtenida en simulaciones experimentales de los fenómenos de partícula en laboratorio.

- Relación entre Porosidad y Permeabilidad. El modelo propone una relación de potencia típica para enlazar los cambios de porosidad con los cambios de permeabilidad en el medio con referencia a sus valores iniciales.

$$\frac{K}{K_o} = \left(\frac{\phi}{\phi_o} \right)^3 \quad (8)$$

- Relación de Porosidad. La porosidad resultante se relaciona con los cambios en porosidad de acuerdo a los fenómenos de depositación y de hinchamiento del medio por absorción líquida. Ecuación (9).

$$\phi = \phi_o - \phi_p - \phi_{sw}, \quad (9)$$

Constantes Fenomenológicas. Como se puede observar de la forma de las expresiones (4) hasta (7), el modelo utilizado para representar y simular los fenómenos de partícula en un medio poroso incluyen una serie de coeficientes ó parámetros desconocidos que se deben estimar al momento de encontrar una respuesta específica del modelo para una simulación cualquiera del ó los fenómenos de partícula. Una síntesis de los parámetros se lista a continuación.

- Parámetros Relacionados con la Depositación de Partículas.

$$k1, \quad k2, \quad \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr} \quad (10)$$

- Parámetros Relacionados con la Generación de Partículas.

$$k3, \quad k4, \quad k5 \quad \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr}^*, \quad \sigma_p^* \quad (11)$$

- Parámetros Relacionados con el Hinchamiento del Medio.

$$k6, \quad B, \quad 2AB \quad (12)$$

2.3. UNA PROPUESTA NUMERICA PARA SIMULAR LA DEPOSITACIÓN DE PARTICULAS EN UN MEDIO POROSO.

Para buscar solución numérica al planteamiento matemático representado en las expresiones (4) hasta la (7) se desarrolló el siguiente esquema de ecuaciones explícitas expandidas en diferencias finitas.

- Ecuación de Flujo. La expresión analítica (3) se expande en diferencias finitas y asume la siguiente forma:

$$T_{i-1/2}^{n+1} P_{i-1}^{n+1} - (T_{i-1/2}^{n+1} + T_{i-1/2}^{n+1}) P_i^{n+1} + T_{i+1/2}^{n+1} P_{i+1}^{n+1} = -(\Delta x)^2 f(t)^{n+1};$$

$$f(t) = \mu \left[\frac{\dot{S}}{\rho_l} + \frac{1}{\rho_p} \frac{\partial}{\partial t} (\sigma_p + \sigma_p^*) + \frac{\partial \phi}{\partial t} \right] \quad (13)$$

- Gradiente de Presión.

$$\left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_i = \left(-\frac{P_{i+1} - P_i}{\Delta x} \right) \quad (14)$$

- Velocidad de Flujo. La velocidad de acuerdo a la ley de Darcy se plantea:

$$v_i = -\frac{K_i}{\mu} \frac{(P_{i+1} - P_i)}{\Delta x} \quad (15)$$

- Ecuación de Depositación de Partículas.

Cantidad de Finos Depositados. De acuerdo a la expresión (6), se puede plantear:

$$\sigma_{pi}^{n+1} = \sigma_{pi}^n + \Delta t k_1 v C_{pi} \rho \phi_i^n - k_2 \sigma_{pi}^n \left[\left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_i^{n+1} - \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr} \right] U \quad (16)$$

Rata de Depositación de Finos.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \sigma_p}{\partial t} \right)_i^{n+1} &= k_1 v C_{pi} \rho \phi_i^n - k_2 \sigma_{pi}^n \left[\left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_i^{n+1} - \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr} \right] U \\ U = 0, \text{ sí} & \quad \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_i^{n+1} \leq \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr} \\ U = 1, \text{ sí} & \quad \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_i^{n+1} > \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr} \end{aligned} \quad (17)$$

- Ecuación de Generación de partículas. Se acuerdo a la expresión (7), se puede expandir:

Cantidad de Finos Generados.

$$\sigma_{pi}^{n+1*} = \sigma_{pi}^{n*} - \Delta t k_3 \sigma_p^* \left[1 - \frac{1}{\exp(k_4 t^{1/2})} \right] \frac{1}{\exp(k_5 \sigma_{pi}^n)} \left[\left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_i^{n+1} - \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr}^* \right] U \quad (18)$$

Rata de Generación de Finos.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \sigma_p^*}{\partial t} \right)_i^{n+1} &= -k_3 \sigma_p^* \left[1 - \frac{1}{\exp(k_4 t^{1/2})} \right] \frac{1}{\exp(k_5 \sigma_{pi}^n)} \left[\left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_i^{n+1} - \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr}^* \right] U \\ U = 0, \text{ sí} & \quad \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_i^{n+1} \leq \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr}^* \\ U = 1, \text{ sí} & \quad \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_i^{n+1} > \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr}^* \end{aligned} \quad (19)$$

- Cálculo de Porosidad. De acuerdo a la expresión (8), se puede expandir:

Daño en porosidad por hinchamiento.

$$\phi_{Sw} = \phi_o \left[1 - \left(\frac{K}{K_o}_{Sw} \right)^{1/3} \right] \quad (20)$$

Daño en porosidad por depositación superficial.

$$\phi_{pi} = \frac{\sigma_{pi}}{\rho_p} \quad (21)$$

Cálculo de Porosidad.

$$\phi_i = \phi_o - \phi_{pi} - \phi_{Sw} \quad (22)$$

- Cálculo de Permeabilidad.

$$K_i = K_o \left(\frac{\phi_i}{\phi_o} \right)^3 \quad (23)$$

- Ecuación de Concentración.

$$\phi_i^{n+1} \frac{(C_{pi}^{n+1} - C_{pi}^n)}{\Delta t} + (1 + C_{pi}^{n+1}) \frac{\partial \phi_i}{\partial t} + v_i^{n+1} \frac{(C_{pi+1}^{n+1} - C_{pi-1}^n)}{2\Delta x} = C_{pi}^{n+1} \frac{(v_{i+1}^{n+1} - v_{i-1}^{n+1})}{2\Delta x} \quad (24)$$

Se lista el procedimiento secuencial desarrollado y aplicado para resolver en forma simultánea el grupo de ecuaciones expandidas desde la expresión (13) hasta la (24) con lo cual se obtiene el valor de permeabilidad del medio poroso sometido a procesos de depositación de partículas.

- Defina los tiempos de impresión de resultados.
- Ingresar condiciones iniciales: Longitud, diámetro, densidad del líquido y de la partícula, viscosidad. Concentración inicial de finos en el medio, incrementos de tiempo.
- Defina las condiciones en los extremos: Caudal de inyección y presión a la salida.
- Definir la malla del modelo. Numero de bloques.
- Ingrese el valor inicial de las constantes.
- Defina las presiones iniciales para cada bloque, los depósitos de finos iniciales, porosidad inicial, permeabilidad inicial.
- Hallar los gradientes de presión para cada bloque, y la velocidad en cada bloque. Ecuación (14) y (15).
- Incrementar el tiempo.
- Hallar la tasa de depositación para cada bloque. Ecuación (17).

- Hallar los depósitos de finos en cada bloque. Ecuación (16).
- Hallar la tasa de generación de finos. Ecuación (19).
- Hallar la cantidad de finos generados. Ecuación (18).
- Hallar el daño de porosidad por hinchamiento. Ecuación (20).
- Hallar el daño de porosidad por depositación. Ecuación (21).
- Hallar porosidad para cada bloque. Ecuación (22).
- Hallar permeabilidad para cada bloque. Ecuación (23).
- Generar la matriz de distribución de presiones para cada bloque y resolver la matriz tridiagonal resultante para resolver las nuevas presiones resultantes en cada bloque. Ecuación (13).
- Encontrar el nuevo sistema de distribución de concentraciones, resolver la matriz tridiagonal resultante y obtener el nuevo perfil de distribución de concentraciones. Ecuación (24).
- Obtener la permeabilidad promedio del medio a partir de la permeabilidad obtenida para cada bloque de la malla y para los distintos tiempos.

2.4 LA NECESIDAD DE DETERMINAR LAS CONSTANTES FENOMENOLOGICAS EN EL MODELO DE DEPOSITACION DE PARTICULAS.

El modelo aplicado para representar el fenómeno de depositación de partículas en un medio poroso configura un sistema de ecuaciones diferenciales para las cuales se obtiene soluciones en términos de parámetros ó constantes fenomenológicas dependientes del medio poroso y de los fluidos contenidos. Estos coeficientes carecen de rutinas estándar de laboratorio para estimarlas. Estos coeficientes, para el mismo medio y para el mismo fluido utilizado, cambian con las distintas condiciones de caudal y/o gradiente de presión simulados en una prueba de desplazamiento.

Al estimar las constantes para un medio poroso, para unas características de fluido conocidas y para unas condiciones dinámicas de flujo establecidas se aplica el algoritmo numérico desarrollado y propuesto en las expresiones (13) hasta (24) para configurar un modelo sistematizado con el potencial de simular los fenómenos de depositación de partículas en un medio poroso. Con el simulador se tiene una herramienta que facilita interpretar, caracterizar y pronosticar los efectos de deterioro de la permeabilidad en un medio poroso.

Con el modelo simulador se tiene una herramienta de análisis para facilitar las decisiones de control de las condiciones de flujo en un pozo inyector ó productor en un campo de petróleo. Además se facilita un pronóstico en el tiempo para estudios de factibilidad económica de un proyecto ó intervención en un pozo dado.

En la siguiente sección se propone y se aplica un modelo estadístico para estimar los parámetros listados en las expresiones (10) hasta la (12) para lograr una simulación del fenómeno de depositación de partículas en un medio poroso dado. El modelo estadístico utiliza datos ó resultados obtenidos en simulaciones en el laboratorio del fenómeno de depositación sobre la muestra ó medio poroso de interés.

3. UN MODELO ESTADISTICO PROPUESTO PARA ESTIMAR PARAMETROS DE LA RESPUESTA DE UN MODELO DE DEPOSITACION DE PARTICULAS.

Para obtener una solución particular para el modelo de depositación de partículas descrito en la sección (2), se requiere estimar los parámetros participantes en las ecuaciones de cinética de depositación y generación de finos. Para estimar estos coeficientes se aplica alguna técnica numérica de análisis de respuestas observadas ó un modelo estadístico de búsqueda, ajuste y optimización que permita sincronizar los resultados de un modelo de simulación dado con los observados en laboratorio de la simulación física del fenómeno.

Un modelo estadístico de regresión no lineal se describe y se propone para sintonizar las respuestas del modelo de depositación de partículas con las observaciones obtenidas en ensayos de laboratorio a condiciones controladas del fenómeno de depositación. Con el modelo estadístico se desarrolla un procedimiento automático para optimizar la estimación de parámetros y obtener una simulación en el tiempo del fenómeno de depositación.

3.1 TECNICAS DE REGRESION.

Los modelos de regresión constituyen una de las técnicas estadísticas utilizadas para trazar la relación existente entre datos y se pueden agrupar en modelos de Regresión Lineal y modelos de Regresión No Lineal.

- Regresión Lineal Múltiple. Los modelos para el análisis de regresiones múltiples pueden ser aplicados para proponer relaciones más complejas que una línea recta entre múltiples variables. . La forma de un modelo de regresión múltiple está dada por la siguiente ecuación:

$$y = E(y) + \varepsilon \tag{25}$$

Donde, $E(y)$ está dada por:

$$E(y) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \tag{26}$$

El modelo planteado por la expresión (25) asume la forma:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \tag{27}$$

Donde, y corresponde a la variable dependiente, y $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$, corresponden a las variables independientes y pueden ser x_1, x_2, x^2 , $\text{Sen}(x)$ etc. $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ representan los parámetros desconocidos de la componente del modelo determinístico, $E(y)$, y el término ε , representa el error aleatorio, para el cual se asume:

- La media de ε tiene un valor cero, es decir, $E(\varepsilon) = 0$, esto implica que la media de y equivale a la componente determinística del modelo, es decir:

$$E(y) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k$$

- Para toda serie de variables independiente $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$, la varianza, σ^2 , de ε no cambia.
- La distribución de probabilidad de ε se comporta de manera normal.
- Los errores asociados con los valores de y , son independientes.

El modelo de regresión se puede resolver por la vía de los mínimos cuadrados en la cual se estiman los parámetros $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ que minimizan la función objetivo:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - (b_0 + b_1 x_{i1} + b_2 x_{i2} + \dots + b_k x_{ik}))^2 \quad (28)$$

Los parámetros estimados $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$ que minimizan χ^2 , se obtienen como solución del sistema de ecuaciones lineales simultáneo:

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial b_0} = 0, \frac{\partial \chi^2}{\partial b_1} = 0, \dots, \frac{\partial \chi^2}{\partial b_k} = 0 \quad (29)$$

Al desarrollar la expresión (29) se forma un sistema de ecuaciones lineales cuya escritura se simplifica al expresarlo en forma vectorial:

$$Xb = Y, \quad (30).$$

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ 1 & x_{31} & x_{32} & \cdots & x_{3k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix}$$

El vector b que contiene los estimadores de mínimos cuadrados de los coeficientes $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ del modelo lineal cuya solución se obtiene por la forma conocida:

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (31)$$

- Modelos de Regresión No Lineal. Se toman n experimentos, en los cuales se relaciona una variable dependiente y_i con m variables independientes x_i :

$$(y_i; x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (32)$$

Sea f un modelo general que contiene k parámetros. Para el experimento i el valor de y_i predicho por el modelo f se denota \bar{y}_i :

$$\bar{y}_i = f(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi}; \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k) = f_i \quad (33)$$

De acuerdo con la ecuación (33), existe un conjunto de valores de β que permite reproducir de manera adecuada el conjunto de valores y_i por parte del modelo matemático f_i , con el correspondiente error. Se puede proponer un modelo de regresión:

$$y_i = f_i + \varepsilon_i \quad (34)$$

De forma equivalente a la regresión lineal se postula una solución por mínimos cuadrados al minimizar la función error dada por:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (35)$$

En la expresión (35), \bar{y}_i , no representa una función lineal y se expande en serie de Taylor para aproximar una linealización.

$$\bar{y}_i(x_i; b_j^{(0)} + \Delta b_j^{(0)}) = f(x_i, b_j^{(0)}) + \left(\frac{\partial f}{\partial \beta_1} \right)_0 (\beta_1 - b_1^0) + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial \beta_k} \right)_0 (\beta_k - b_k^0) \quad (36)$$

$$\bar{y}_i(x_i; b_j^{(0)} + \Delta b_j^{(0)}) = f(x_i, b_j^{(0)}) + \sum_{j=1}^k \left(\frac{\partial f}{\partial \beta_j} \right)_0 * \Delta b_j^{(0)} \quad (37)$$

En la ecuación (37), $b^{(0)}$ contiene valores iniciales para β , así $b_j^{(0)}$ estimadores para β_j y $\Delta b_j^{(0)}$ reemplaza a $\beta_j - b_j^{(0)}$ como una corrección para $b_j^{(0)}$.

Los métodos de regresión no lineal parten de una aproximación inicial del conjunto de valores $b_j^{(0)}$ y corrigen en sucesivas iteraciones el valor $\Delta b_j^{(0)}$.

La ecuación (35) se puede plantear para este caso de Regresión No Lineal:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left(y_i - f(x_i, b_j^{(0)}) - \sum_{j=1}^k \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_j} \right)_0 * \Delta b_j^{(0)} \right)^2 \quad (38)$$

Ahora, al derivar la ecuación (38) respecto a $\Delta b_j^{(0)}$ e igualar a cero:

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^n \left(y_i - f(x_i, b_j^{(0)}) - \sum_{j=1}^k \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_j} \right)_0 * \Delta b_j^{(0)} \right)^2}{\partial (\Delta b_j^{(0)})} = 0 \quad (39)$$

Por ejemplo, si se deriva con respecto a $\Delta b_1^{(0)}$ se tiene:

$$-2 \sum_{i=1}^n \left[y_i - f(x_i, b_j^{(0)}) - \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_1} \right)_0 \Delta b_1^{(0)} - \dots - \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_k} \right)_0 \Delta b_k^{(0)} \right] \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_1} \right)_0 = 0 \quad (40)$$

De igual manera se deriva (38) con respecto a cada corrección de $b_j^{(0)}$ hasta la última componente $\Delta b_k^{(0)}$:

$$-2 \sum_{i=1}^n \left[y_i - f(x_i, b_j^{(0)}) - \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_1} \right)_0 \Delta b_1^{(0)} - \dots - \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_k} \right)_0 \Delta b_k^{(0)} \right] \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_k} \right)_0 = 0 \quad (41)$$

Al reemplazar $E_i^{(0)}$ por su equivalente $y_i - f(x_i, b_j^{(0)})$, las ecuaciones (40) y (41) se pueden reescribir:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n \left[E_i^{(0)} - \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_1} \right)_0 \Delta b_1^{(0)} - \dots - \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_k} \right)_0 \Delta b_k^{(0)} \right] \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_1} \right)_0 = 0 \\ & \Delta b_1^{(0)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_1} \right)_0 \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_1} \right)_0 + \Delta b_2^{(0)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_2} \right)_0 \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_1} \right)_0 + \dots + \\ & + \Delta b_k^{(0)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_k} \right)_0 \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_1} \right)_0 = \sum_{i=1}^n E_i^{(0)} \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_1} \right)_0 \end{aligned} \quad (42)$$

$$\sum_{i=1}^n \left[E_i^{(0)} - \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_1} \right)_0 \Delta b_1^{(0)} - \dots - \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_k} \right)_0 \Delta b_k^{(0)} \right] \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_k} \right)_0 = 0$$

$$\begin{aligned} & \Delta b_1^{(0)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_1} \right)_0 \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_k} \right)_0 + \Delta b_2^{(0)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_2} \right)_0 \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_k} \right)_0 + \dots + \\ & + \Delta b_k^{(0)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_k} \right)_0 \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_k} \right)_0 = \sum_{i=1}^n E_i^{(0)} \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_k} \right)_0 \end{aligned} \quad (43)$$

El sistema de ecuaciones lineales puede ser escrito de manera matricial en la siguiente forma:

$$A_{k \times k}^{(0)} B_{k \times 1}^{(0)} = Z_{k \times 1}^{(0)} \quad (44)$$

Para las incógnitas son $\Delta b_1^{(0)}, \Delta b_2^{(0)}, \dots, \Delta b_k^{(0)}$ y donde:

$$\begin{aligned} A_{k \times k}^{(0)} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1k} \\ a_{12} & a_{22} & \dots & a_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{k1} & a_{k1} & \dots & a_{kk} \end{bmatrix} & a_{ij} &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_i} \right)_0 * \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_j} \right)_0 & B_{k \times 1}^{(0)} &= \begin{bmatrix} \Delta b_1^{(0)} \\ \Delta b_2^{(0)} \\ \dots \\ \Delta b_k^{(0)} \end{bmatrix} \\ \\ Z_{k \times 1}^{(0)} &= \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_k \end{bmatrix} & z_j &= \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, b_j^{(0)})) * \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_j} \right)_0 \end{aligned} \quad (45)$$

3.2 MÉTODO DE MARQUARDT – LEVENBERG.

Marquardt introduce una normalización a los vectores resultantes de la ecuación (44) con la desviación estándar de cada componente que evita dificultades operacionales derivadas del orden diferente de magnitud que, por lo general, presentan los parámetros de los modelos a ajustar y la dificultad de alcanzar siempre la convergencia. Los términos de la ecuación (44) se escalan:

$$A_{k \times k}^{(0)*} B_{k \times 1}^{(0)*} = Z_{k \times 1}^{(0)*} \quad (46)$$

$$\begin{aligned} A_{k \times k}^{(0)*} &= (a_{ij}^*) = \frac{a_{ij}}{\sqrt{a_{ij} a_{ii}}} , & B_{k \times 1}^{(0)*} &= (\Delta b_j^{(0)*}) = \frac{\Delta b_j^{(0)}}{\sqrt{a_{jj}}} , \\ Z_{k \times 1}^{(0)*} &= (z_j^*) = \frac{z_j}{\sqrt{a_{jj}}} \end{aligned}$$

Además, Marquardt demuestra que si a la matriz de coeficientes $A_{k^*k}^{(0)*}$ se le suma la matriz λI , dada por la expresión (47), con un número menor que 1, pero mayor a cero, se asegura la convergencia.

$$\lambda I = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda \end{bmatrix} \quad (47)$$

Marquardt propone un algoritmo iterativo esquematizado en la Figura 2 con el cual se logra una optimización de mínimos cuadrados que mejora las características del método de Gauss-Newton. El método Marquardt-Levenberg intenta reducir el valor de la función χ^2 -Chi – cuadrada- para un ajuste entre una serie de datos x_i -variable independiente -, y_i -variable dependiente- cada una de las cuales presenta desviación estándar individual y una función no lineal que depende de una serie de parámetros a -coeficientes. Cada iteración del programa arroja los mejores ajustes para el vector de parámetros y con éstos evalúa la función χ^2 en cada etapa.

El algoritmo requiere la función a ser ajustada, ya que en cada iteración también son calculados los valores ajustados de la variable dependiente $-y_{fit}$ - y son evaluadas las derivadas con respecto cada parámetro ajustado.

En la primera llamada del programa lamda $-\lambda$ - toma un valor menor que cero y se provee el sistema con una serie de parámetros iniciales supuestos $-a_{guess}$. Si en el paso siguiente la diferencia entre las χ^2 se vuelve más pequeña, lamda decrece en un factor de 10, en caso contrario, lamda crece en un factor de 10. Este proceso se desarrolla hasta que se logra la convergencia de χ^2 con la precisión deseada.

3.3 UN ACOUPLE DEL MODELO DE ESTIMACION DE PARAMETROS - MARQUARDT LEVENBERG - CON EL MODELO DE DEPOSITACION DE PARTICULAS.

Toda solución encontrada para el modelo de depositación de partículas en un medio poroso, ecuaciones (13) hasta (24), requiere estimar los coeficientes fenomenológicos, ecuaciones (10) hasta la (12) con los cuales, además, se caracteriza la naturaleza de los fenómenos de depositación al interior del medio.

Surge, entonces, la necesidad de simular, en laboratorio, el fenómeno de depositación para generar datos que permitan alimentar el modelo de regresión no lineal propuesto y junto con la técnica Marquard – Levenberg se logre optimizar la respuesta del modelo de depositación de partículas propuesto y estimar los coeficientes esperados. El procedimiento se compone:

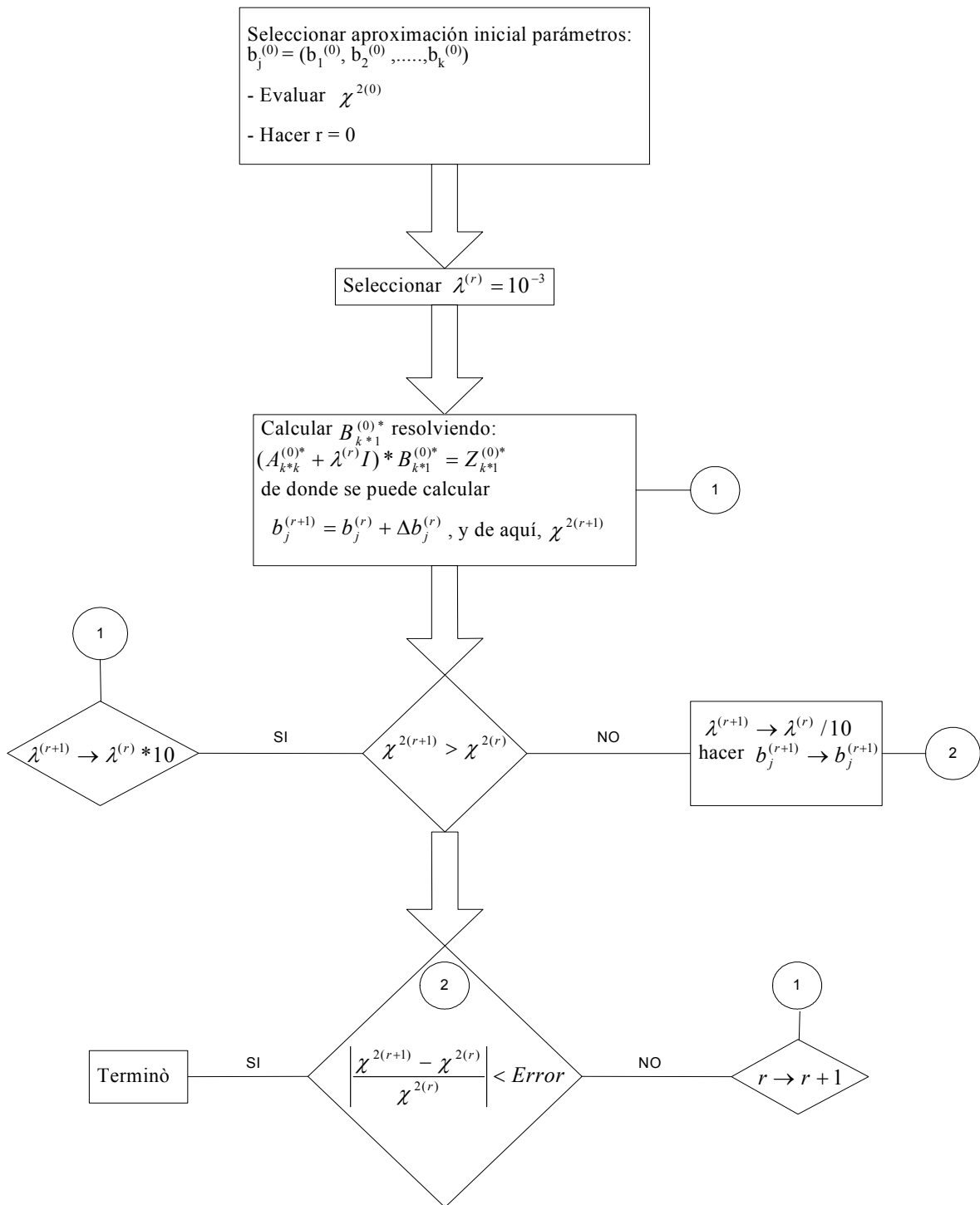


Figura 2. Diagrama de Bloques del Algoritmo de Marquardt-Levenberg.

- Simular, en laboratorio, el fenómeno de depositación de partículas y registrar resultados de permeabilidad medida a distintos tiempos acumulados de prueba. Es decir, asegurar datos de observaciones y_i para distintos valores de la variable regresora x_i .
- Aplicar el método de ajuste no lineal Marquardt - Levenberg para ajustar los resultados del modelo de depositación de partículas con los datos de laboratorio. El mejor ajuste, correspondiente a los estimadores de mínimos cuadrados del modelo de regresión, representa los mejores valores para los parámetros desconocidos.

Las técnicas de regresión no lineal permiten ajustar un modelo estadístico de regresión a los resultados de laboratorio, sin embargo, se evidencian dos problemas básicos al momento de querer ajustar las respuestas del modelo de depositación de partículas:

- Las técnicas de ajuste no lineal requieren una declaración explícita de la función de ajuste, función conocida f de la ecuación (33). En este caso, esta función no se tiene. En este caso la función f está representada por el grupo simultáneo de ecuaciones (13) hasta la (24). Al momento de querer evaluar la función f por el modelo de estimación estadístico se tiene que resolver el grupo de ecuaciones simultáneo completo.
- Al no contar con la función explícita f , se deduce que no se puede tener la forma de la derivada de la función respecto a los parámetros, tal como lo evidencia la ecuación (45). La matriz A de la ecuación (46) señala la necesidad de las derivadas f con respecto a cada coeficiente ó parámetro del modelo de depositación de partículas.

La falta de una forma explícita de la función a ajustar demanda una mayor complejidad computacional, debido a que se requiere evaluar las derivadas de forma numérica de acuerdo a la expresión (48):

$$\frac{\partial f(x, \beta)}{\partial \beta_1} = \frac{f(x, b_1 + \Delta b_1) - f(x, b)}{\Delta b_1} \quad (48)$$

Se necesita, entonces, evaluar el modelo de depositación para un parámetro b_i y luego invocar, de nuevo el modelo para un parámetro compuesto por $b_i + \Delta b_i$. Este proceso se repite para cada uno de los parámetros y para cada observación de laboratorio.

Metodología Propuesta para la Estimación de las Constantes ó Parámetros del Modelo de Depositación de Partículas.

- Diseñar pruebas de desplazamiento para simular, en laboratorio, los fenómenos de depositación de partículas.
- Registrar valores de Permeabilidad del medio poroso en función del tiempo..
- Asumir valores iniciales para cada una de las coeficientes del modelo de depositación de partículas de acuerdo al fenómeno simulado.

- Calcular los valores de permeabilidad del medio poroso a partir de la solución del modelo de depositación de partículas para los mismos tiempos de registro en laboratorio,
- Resolver el modelo estadístico no lineal de acuerdo al algoritmo Marquardt Levenberg y obtener los estimadores mínimos cuadrados para ajustar la respuesta del modelo de depositación de partículas con los resultados experimentales de la prueba en laboratorio.
- Una vez estimados los parámetros de las ecuaciones (13) hasta (24) se realizan pronósticos de la variación de permeabilidad del medio poroso estudiado en función el tiempo.
- Se tiene, ahora, un modelo de depositación de partículas acoplado a un modelo estadístico de regresión no lineal con el cual se puede simular los cambios en la permeabilidad de un medio poroso sometido a fenómenos de depositación.

4. SIMULACION EN LABORATORIO DE LA DEPOSITACION DE PARTICULAS EN UN MEDIO POROSO.

Se presenta, en este capítulo, una breve relación de la metodología de laboratorio diseñada y aplicada para lograr una simulación física del fenómeno de deposición de partículas en un medio poroso artificial creado con arena empacada y sometida a confinamiento por presión hidráulica.

Con el montaje presentado se generan los datos ó resultados de laboratorio necesarios para ajustar el *Simulador Acoplado* y pronosticar los resultados de daño de permeabilidad para tiempos posteriores a los empleados en la prueba experimental.

MONTAJE EXPERIMENTAL.

La Figura 3 esquematiza los componentes básicos del montaje experimental de laboratorio diseñado y aplicado para las pruebas de deposición de partículas.

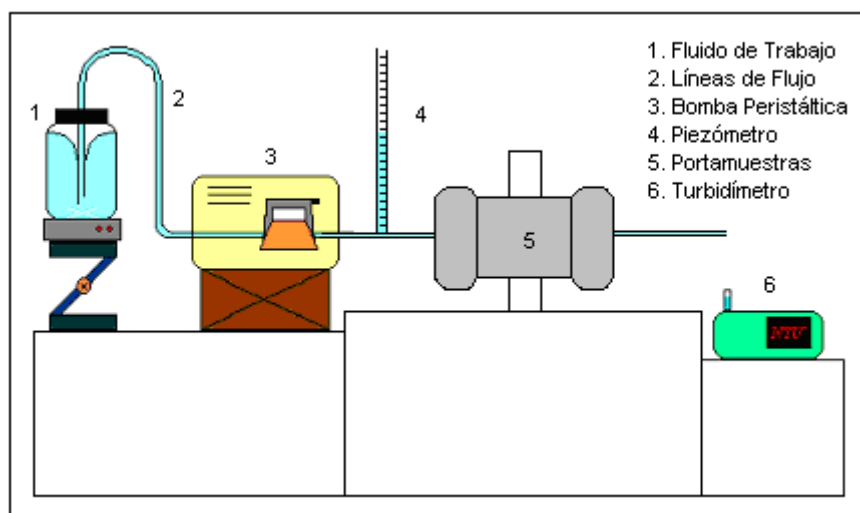


Figura 3. Componentes Básicos del Montaje Experimental utilizado para Simular el Fenómeno de Deposición de Partículas en Laboratorio.

Equipos y Materiales

- Arena Ottawa.
- Tamices.
- Mallas.
- Equipo de Análisis Petrofísicos Especiales.
- Fluido de Trabajo.
- Material triturado ó Finos.
- Bomba peristáltica.
- Piezómetro.
- Turbidímetro .
- Limpiador ultrasónico.
- Medidor de pH.
- Balanza analítica.
- Agua destilada.
- Ácido clorhídrico (HCl).
- Bomba hidráulica.

- Agitador magnético
- Manómetros
- Cronómetro
- Arcilla
- Sales

Procedimiento de Laboratorio.

Preparación de la Muestra. Procedimiento para el lavado y secado:

- Tamizar arena Ottawa de acuerdo al tamaño de arena seleccionado en el diseño de la prueba.
- Se dispone la arena para el lavado en el limpiador ultrasónico, durante un periodo de tiempo de aproximadamente 2 h, en frascos de vidrio, de forma tal que la arena quede totalmente cubierta por el fluido limpiador. Este fluido limpiador consiste fundamentalmente de agua destilada y alguna gotas de HCl.
- Lavar con agua destilada hasta el final de la limpieza, la cual se presenta cuando el agua del lavado se observa totalmente limpia y cuando esta solución tiene un pH neutro.
- Una vez se tiene la arena limpia se lleva al horno a temperatura cercana a 100°C durante un tiempo no inferior a 36h continuas.
- Enfriar la arena en el desecador.
- En el caso de núcleos consolidados el lavado se realiza en un equipo de Lavado de Muestras Extractor Soxhlet. El fluido usado para el lavado puede ser metanol, tolueno o una mezcla de estos dos. El secado se realiza de forma similar.

Procedimiento para elaboración de un empaque.

- En un beaker limpio y seco medir un volumen determinado de la arena o mezcla limpia -según diseño- y depositarla en la manga de caucho.
- Para dar soporte a la arena se debe poner una o dos mallas de tamaño inferior al de los granos al final y al comienzo del empaque.
- Se depositan pequeñas cantidades de arena, de modo que se logren acomodar los granos para que el empaque quede compacto. Si la prueba incluye de hinchamiento, agregar bolitas de arcilla al empaque.
- Para saturar el empaque se hace en un equipo de desplazamiento a caudal constante en posición vertical. Se toma el tiempo hasta que salga la primer gota. Se necesita una corrección por el volumen de los cabezotes del empaque. Con el tiempo y a la tasa establecida se determina el volumen poroso del empaque. Con el volumen total se obtiene la porosidad del empaque.

Preparación del Fluido de Inyección.

Se prepara salmuera de concentración conocida.

En un recipiente limpio y seco tomar un volumen conocido de agua destilada. Pesar una muestra de los finos seleccionados y agregar a la solución anterior.

Ajustar con la ayuda del turbidímetro a la concentración deseada. Llevar un registro de cantidad de finos agregados obtenemos la concentración en gr/cc.

Agitar y con ayuda del medidor de pH ajustar la solución a un pH aproximado de 7 con HCl.

Mezclar y ajustar hasta que la suspensión sea totalmente homogénea.

El fluido de trabajo también puede ser agua fresca. Por ejemplo, para pruebas de hinchamiento.

Preparación del equipo.

- Realizar el montaje de acuerdo a la Figura 3
- Preparar la bomba peristáltica con agua destilada y con un pH alrededor o muy parecido al fluido de trabajo.
- Cargar el fluido de trabajo en otro recipiente y mantenerlo agitado.
- Instalar líneas de inyección, manómetros, piezómetros y drenar completamente las líneas.
- Aplicar presión de confinamiento según diseño.

Mediciones para la Prueba de Depositación de Partículas.

- El equipo se monta en forma horizontal para justificar el uso de la ley de Darcy Lineal.
- Medir la permeabilidad absoluta al líquido para tomarla como permeabilidad base. Para la prueba de hinchamiento, se necesita determinar la permeabilidad con un fluido de alta concentración de sal para evitar hinchamiento.
- Realizar la medición anterior a diferentes caudales para observar el rango de aplicación de la ley de Darcy.
- Cambiar de solución e inyectar el fluido de trabajo a un caudal inicial que garantice flujo Darcy.
- Llevar un registro de caída de presión a través del medio - ΔP – en función del tiempo.
- Determinar la permeabilidad para cada tiempo de laboratorio de acuerdo al diseño de la prueba.

Las pruebas se realizan con el uso de la bomba peristáltica. Esta bomba presenta las siguientes ventajas:

- Se puede utilizar el volumen que se quiera de suspensión. Esto permite desplazar 500 o mas volúmenes porosos, los requeridos para ver estabilización del proceso de comportamiento de los finos en el medio poroso.
- La agitación se facilita ya que la suspensión está almacenada en un recipiente de vidrio.

Para las pruebas de desplazamiento en medios porosos consolidados se dispone de finos más pequeños a los que se emplean en empaques; se usan finos de al menos cinco micras de tamaño promedio. Se usa un Caolín Inglés de alta pureza, de un tamaño promedio al requerido. Las pruebas se realizan en núcleos de arena Berea y están diseñadas para evaluar depositación superficial y posible generación de partículas in-situ.

CONDICIONES DE LA PRUEBA.

Las condiciones y propiedades que se tienen en cuenta para las pruebas se listan en Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones Establecidas para las Pruebas de Depositación de Partículas.

ITEM	Nomenclatura	UNID.
CONDICIONES LABORATORIO		
ARENA	ARENA	
TURBIDEZ SOLUCIÓN	Turb.	NTU
DIAMETRO	d	cm.
LONGITUD DEL NÚCLEO	L	cm.
PRESIÓN DE CONFINAMIENTO	Pconf	psi
TIEMPO FINAL DE PRUEBA	T _f	seg.
TIPO DE SUSPENSIÓN	Tip. Susp.	
CONCENTRACION DEL FLUIDO INYECTADO	C _{pf}	gr/cc
CANTIDAD DE FINOS DEPOSITADOS INICIAL	C _f	gr
CONCENTRACION DE FINOS EN EL MEDIO	C _o	gr/cc
POROSIDAD INICIAL	φ _o	%
PERMEABILIDAD INICIAL	K _o	D
VISCOSIDAD FLUIDO INYECTADO	μ	cP
DENSIDAD DEL LIQUIDO	ρ _l	gr/cc
DENSIDAD DE PARTICULAS	ρ _p	gr/cc
TASA DE INYECCION (CTE)	q	cc/seg.
CONDICIONES SIMULADOR		
NUMERO DE BLOQUES	N _x	
INCREMENTO DE TIEMPO	Δt	seg.
PRESIÓN DE INYECCIÓN	P _{in}	atm
PRESIÓN EXTREMO PRODUCTOR	P _{out}	atm
PRESIÓN DE ARRANQUE DEL SIMULADOR	P _o	atm
MECANISMO DE DAÑO	Tip. Daño	
CONDICIONES DE INYECCIÓN	Cond. Iny.	

En la Tabla 1, también se muestran las condiciones de simulación requeridas por el modelo sistematizado para reproducir los datos experimentales. Además se muestran las unidades correspondientes a cada término o variable.

Preparación de Datos.

Antes de someter los resultados de laboratorio a los ajustes con el *Simulador Acoplado* se recomienda suavizarlos para facilitar la convergencia. Una forma de preparar los datos consiste en promediar los valores de permeabilidad registrados para intervalos de tiempo establecidos. Esta reducción se puede aplicar mediante la regla trapezoidal, la cual permite calcular una permeabilidad promedia para un rango de valores de permeabilidad registrados para un intervalo de tiempo dado. La regla trapezoidal presenta la siguiente forma:

$$K_{prom} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{nx} K_i - \frac{K_i}{2} - \frac{K_{nx}}{2} \right)}{(nx-1)}, \text{ con } i=1,2,\dots,nx \quad (49)$$

K_{prom} : Equivale a la permeabilidad promedio que se calcula mediante la regla trapezoidal en el intervalo de permeabilidades seleccionado.

$\sum_{i=1}^{nx} K_i$: Suma de todas las permeabilidades en el intervalo.

K_i : Primer valor de permeabilidad en el intervalo de datos de permeabilidad escogido.

K_{nx} : Valor final de permeabilidad en el intervalo de datos de permeabilidad escogido.

i : Datos

nx : Número final de datos correspondientes en el intervalo.

5. UN MODELO DE DEPOSITACION DE PARTICULAS EN UN MEDIO POROSO.

Con la descripción del modelo de depositación de partículas del capítulo 2 y los desarrollos estadísticos y algorítmicos detallados en el capítulo 3 se logró configurar un modelo sistematizado en el cual se acopla una aproximación fenomenológica de flujo de partículas en medios porosos con un ajuste estadístico para simular los mecanismos de depositación de finos y su impacto sobre la capacidad de flujo de una roca productora de hidrocarburos. En adelante se denomina *Simulador Acoplado*.

Se logra desarrollar y presentar una solución sistematizada para caracterizar el fenómeno de flujo de material sólido fino en medios porosos a partir de una aproximación euleriana del fenómeno de depositación de partícula acoplada al desarrollo y solución de un modelo estadístico de regresión no lineal.

Se describe, en este capítulo, una relación de resultados obtenidos con los cuales se validan los alcances del modelo construido. Para cada prueba relacionada se tabulan las propiedades del medio poroso, propiedades de la solución utilizada e información adicional que requiere el simulador. En el capítulo 4 se lista un resumen del procedimiento de laboratorio diseñado para simular los fenómenos de depositación de partículas.

5.1. SIMULACION DEL FENOMENO DE DEPOSITACION EN MEDIOS POROSOS CONSTRUIDOS CON ARENA.

Dado la dificultad y el costo de diversas muestras de formaciones productoras de hidrocarburos, la mayoría de las simulaciones se realizaron con empaques de arena comprimidos a presión hidráulica. El capítulo 4 describe detalles del medio y las soluciones utilizadas en el estudio. Se utilizan como material fino CaCO_3 de un tamaño promedio de ocho micras y se preparan soluciones a distintos valores de NTU, unidades nefelométricas de turbidez. Las pruebas se realizan a caudal constante.

- Simulación de la Depositación de Partículas en el EMPAQUE R1. Las características de la prueba se detallan en la Tabla 2.

Se inyecta una suspensión de CaCO_3 en salmuera a una concentración de 900 NTU, en un empaque de arena Ottawa 50/60, el proceso se realiza a tasa constante y se espera depositación superficial. El procedimiento de simulación consiste:

- Registrar los valores de permeabilidad para tiempos dados.

- Simular la prueba con el *Simulador Acoplado* para el cual se asume sólo depositación (D) superficial. Estimar los parámetros fenomenológicos.

Tabla 2. Características de la Prueba en el Empaque R1.

ITEM	Nomenclatura	UNID.	Prueba R1
CONDICIONES LABORATORIO			
ARENA	ARENA		50/60
TURBIDEZ SOLUCIÓN	Turb.	NTU	900
DIAMETRO	d	cm.	
LONGITUD DEL NÚCLEO	L	cm.	7,38
PRESIÓN DE CONFINAMIENTO	Pconf	psi	
TIEMPO FINAL DE PRUEBA	T _f	seg.	10200
TIPO DE SUSPENSIÓN	Tip. Susp.		CaCO ₃
CONCENTRACION DEL FLUIDO INYECTADO	C _{pf}	gr/cc	0,0004585
CANTIDAD DE FINOS DEPOSITADOS INICIAL	C _f	gr	0
CONCENTRACION DE FINOS EN EL MEDIO	C _o	gr/cc	0
POROSIDAD INICIAL	φ _o	%	37
PERMEABILIDAD INICIAL	K _o	D	16,667
VISCOSIDAD FLUIDO INYECTADO	μ	cP	1
DENSIDAD DEL LIQUIDO	ρ _l	gr/cc	1
DENSIDAD DE PARTICULAS	ρ _p	gr/cc	2,48
TASA DE INYECCION (CTE)	q	cc/seg.	0,592
CONDICIONES SIMULADOR			
NUMERO DE BLOQUES	N _x		21
INCREMENTO DE TIEMPO	Δt	seg.	1
PRESIÓN DE INYECCIÓN	P _{in}	atm	-
PRESIÓN EXTREMO PRODUCTOR	P _{out}	atm	1
PRESIÓN DE ARRANQUE DEL SIMULADOR	P _o	atm	1,5
MECANISMO DE DAÑO	Tip. Daño		DS
CONDICIONES DE INYECCIÓN	Cond. Iny.		q cte

- Simular la prueba con el *Simulador Acoplado* para el cual se asume sólo generación (G) insitu de finos sin depositar. Estimar los parámetros fenomenológicos.
- Simular la prueba con el *Simulador Acoplado* para el cual se asume depositación e hinchamiento (D-H). Estimar los parámetros fenomenológicos.,
- Simular la prueba con el *Simulador Acoplado* para el cual se asume depositación y generación insitu de finos. (D-G). Estimar los parámetros fenomenológicos.
- Simular la prueba con el *Simulador Acoplado* para el cual se asume depositación, generación e hinchamiento. (D-G-H). Estimar los parámetros fenomenológicos.

La Tabla 3 lista los parámetros estimados para cada simulación de acuerdo a los fenómenos de depositación de partícula asumidos..

Tabla 3. Parámetros Estimados por el *Simulador Acoplado* para los fenómenos de depositación del Empaque de Arena 1.

CONSTANTES FENOMENOLÓGICAS	D	G	D - H	D - G	D - G - H
CTES. DEPOSITACION					
k ₁	0,27840	-	0,26645	0,30858	0,28548
k ₂	0,01438	-	0,01718	3,55029	2,54957
dP/dL) _{cr}	0,06425	-	0,07044	0,07686	0,08270
CTES. GENERACION					
k ₃	-	0,22459	-	0,00880	0,52593
k ₄	-	0,17060	-	0,21869	0,20745
k ₅	-	0,13000	-	-4,60528	0,00000
dP/dL) _{cr} *	-	0,78000	-	0,72046	0,57006
σ _P *	-	0,00000	-	0,00703	0,08091
CTES. HINCHAMIENTO					
k ₆	-	-	0,99058	-	1,11429
2AB	-	-	0,00003	-	0,00029
B	-	-	0,61924	-	0,66554

La Tabla 4 compara los resultados de la respuesta del *Simulador Acoplado* para los diferentes fenómenos de depositación asumidos en comparación con los registros de permeabilidad obtenidos en laboratorio. Se puede observar el error en porcentaje obtenido para cada mecanismo de partícula simulado.

Tabla 4. Resultados obtenidos con el Simulador Acoplado para cada Mecanismo de Partícula Asumido. Empaque R1.

TIEMPO	KLAB	DEPOS	Error	DEP-HINCH		DEP-GEN		DP-GEN-HIN	GENER		
0	16.667	16.666	0.0	16.6661	0.0	16.6659	0.0	16.624	0.3	16.667	0.0
600	15.699	15.6437	0.3	15.5651	0.8	15.6165	0.5	15.2789	2.7	16.667	6.2
1200	14.758	14.6805	0.5	14.6208	0.9	14.6223	0.9	14.3289	2.9	16.667	12.9
1800	13.855	13.7734	0.6	13.7303	0.9	13.6891	1.2	13.434	3.0	16.667	20.3
2400	12.991	12.9188	0.6	12.8903	0.8	12.8127	1.4	12.5913	3.1	16.667	28.3
3000	12.164	12.1158	0.4	12.098	0.5	11.9892	1.4	11.7975	3.0	16.667	37.0
3600	11.374	11.3617	0.1	11.355	0.2	11.2389	1.2	11.0507	2.8	16.667	46.5
4200	10.623	10.6531	0.3	10.6545	0.3	10.5302	0.9	10.3695	2.4	16.667	56.9
4800	9.921	9.9943	0.7	9.996	0.8	9.8571	0.6	9.7238	2.0	16.667	68.0
5400	9.322	9.3925	0.8	9.3862	0.7	9.2233	1.1	9.1212	2.2	16.667	78.8
6000	8.816	8.8558	0.5	8.8315	0.2	8.6711	1.6	8.5734	2.7	16.667	89.1
6600	8.398	8.3925	0.1	8.3375	0.7	8.284	1.4	8.0988	3.6	16.667	98.5
7200	8.051	8.0107	0.5	7.9094	1.8	7.992	0.7	7.7095	4.2	16.667	107.0
7800	7.771	7.718	0.7	7.5521	2.8	7.7753	0.1	7.4202	4.5	16.667	114.5
8400	7.556	7.5218	0.4	7.2704	3.8	7.6624	1.4	7.2388	4.2	16.667	120.6
9000	7.409	7.4132	0.1	7.068	4.6	7.692	3.8	6.9033	6.8	16.667	125.0
9600	7.334	7.3598	0.4	6.9482	5.3	7.5148	2.5	6.7801	7.6	16.667	127.3
10200	7.331	7.3358	0.1	6.904	5.8	7.5561	3.1	6.9739	4.9	16.667	127.3
Error			0.8	5.8	3.8	7.6	127.3				

La Figura 4 muestra los resultados de la respuesta del *Simulador Acoplado* para sólo depositación en comparación con los registros de permeabilidad obtenidos en laboratorio.

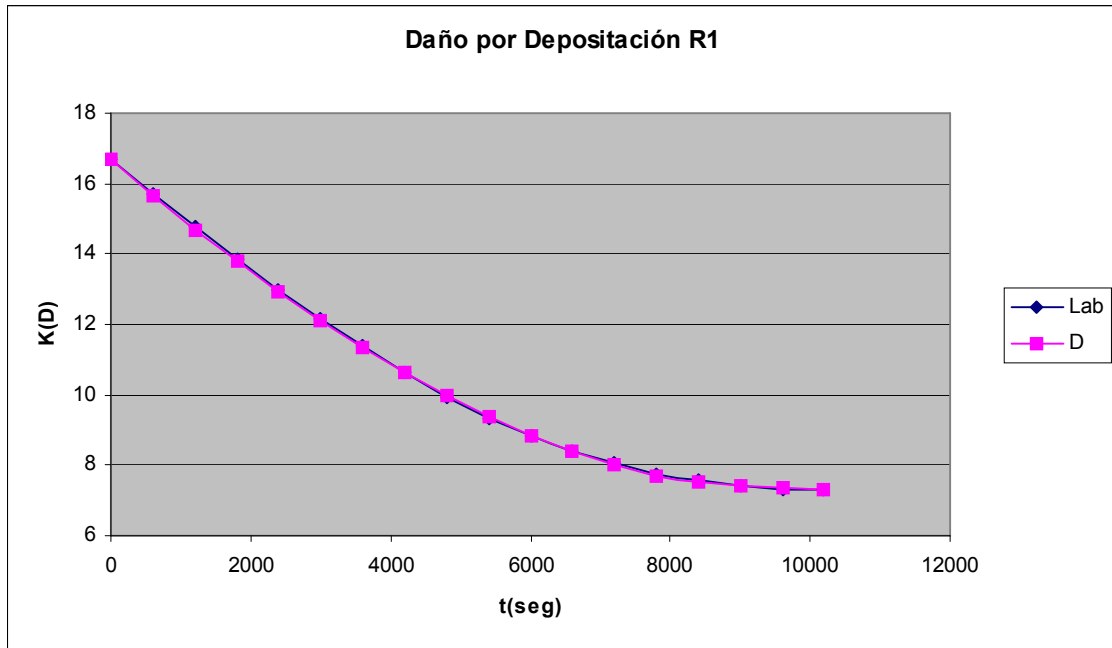


Figura 4. Comparación de la Respuesta de *Simulador Acoplado* para Depositación de Partículas con los Registros de Permeabilidad del laboratorio. Empaque R1.

La Figura 5 compara los resultados de la respuesta del *Simulador Acoplado* para los diferentes fenómenos de depositación asumidos en comparación con los registros de permeabilidad obtenidos en laboratorio.

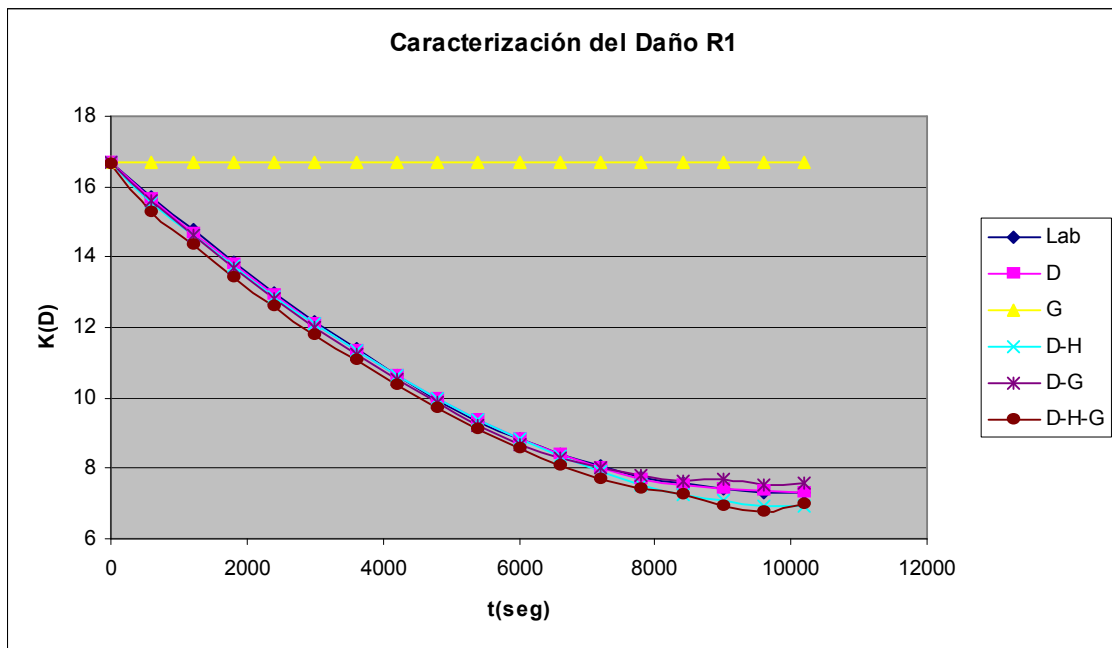


Figura 5. Comparación de la Respuesta de *Simulador Acoplado* para Distintos Fenómenos de Depositación con los Registros de Permeabilidad del laboratorio. Empaque R1

A partir del análisis de las respuestas del *Simulador Acoplado* se selecciona el Mecanismo de Deposición Superficial como el responsable del deterioro de permeabilidad del medio. En la Figura 6 se muestra una predicción del fenómeno de deposición de partículas en el medio para un tiempo total – 24 horas – mucho mayor que el tiempo que dura la prueba – dos horas y 50 minutos.

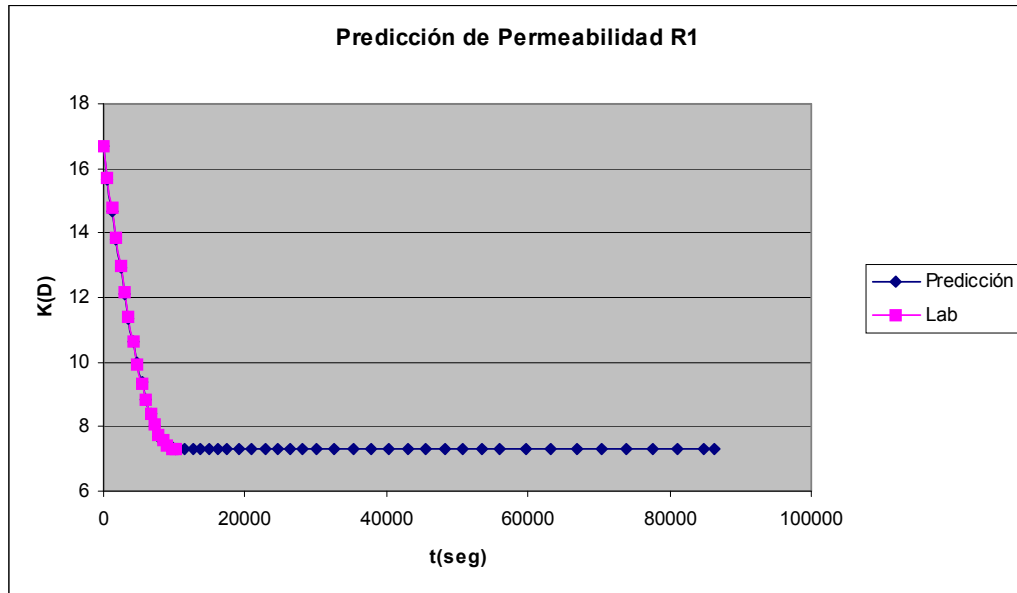


Figura 6. Pronóstico del Deterioro de Permeabilidad para el Empaque R1 obtenido con el *Simulador Acoplado*.

- Simulación de la Deposición de Partículas en el EMPAQUE R2.

Se inyecta una suspensión de CaCO₃ en salmuera a una concentración de 900 NTU, en un empaque de arena Ottawa 50/60, el proceso se realiza a tasa constante. La Tabla 5 lista las propiedades del empaque, del fluido y las condiciones de la prueba relacionados con el empaque.

La Tabla 6 lista los parámetros estimados para cada simulación de acuerdo a los fenómenos de deposición de partícula asumidos. La Tabla 7 compara los resultados de la respuesta del *Simulador Acoplado* para los diferentes fenómenos de deposición asumidos en comparación con los registros de permeabilidad obtenidos en laboratorio. Se puede observar el error en porcentaje obtenido para cada mecanismo de partícula simulado.

Tabla 5. Características de la Prueba en el Empaque R2.

ITEM	Nomenclatura	UNID.	Prueba R2
CONDICIONES LABORATORIO			
ARENA	ARENA		50/60
TURBIDEZ SOLUCIÓN	Turb.	NTU	900
DIAMETRO	d	cm.	
LONGITUD DEL NÚCLEO	L	cm.	7,435
PRESIÓN DE CONFINAMIENTO	Pconf	psi	
TIEMPO FINAL DE PRUEBA	T _f	seg.	10200
TIPO DE SUSPENSIÓN	Tip. Susp.		CaCO ₃
CONCENTRACION DEL FLUIDO INYECTADO	C _{pf}	gr/cc	0,0004585
CANTIDAD DE FINOS DEPOSITADOS INICIAL	C _f	gr	0
CONCENTRACION DE FINOS EN EL MEDIO	C _o	gr/cc	0
POROSIDAD INICIAL	φ _o	%	35,33
PERMEABILIDAD INICIAL	K _o	D	16,667
VISCOSIDAD FLUIDO INYECTADO	μ	cP	1
DENSIDAD DEL LIQUIDO	ρ _l	gr/cc	1
DENSIDAD DE PARTICULAS	ρ _p	gr/cc	2,48
TASA DE INYECCION (CTE)	q	cc/seg.	0,485
CONDICIONES SIMULADOR			
NUMERO DE BLOQUES	N _x		21
INCREMENTO DE TIEMPO	Δt	seg.	1,5
PRESIÓN DE INYECCIÓN	P _{in}	atm	-
PRESIÓN EXTREMO PRODUCTOR	P _{out}	atm	1
PRESIÓN DE ARRANQUE DEL SIMULADOR	P _o	atm	1,5
MECANISMO DE DAÑO	Tip. Daño		DS
CONDICIONES DE INYECCIÓN	Cond. Iny.		q cte

Tabla 6. Parámetros Estimados por el *Simulador Acoplado* para los fenómenos de depositación del Empaque de Arena 2.

CONSTANTES FENOMENOLÓGICAS	D	G	D - H	D - G	D - G - H
CTES. DEPOSITACION					
k ₁	0,33939	-	0,34303	0,32635	0,27448
k ₂	3,16518	-	1,60861	3,05048	3,22097
dP/dL) _{cr}	0,07047	-	0,07037	0,07053	0,06255
CTES. GENERACION					
k ₃	-	0,33392	-	0,78183	0,64599
k ₄	-	0,53500	-	0,44131	0,41807
k ₅	-	0,69266	-	0,37507	0,23404
dP/dL) _{cr} *	-	0,23000	-	0,35712	0,47714
σ _P *	-	0,00000	-	0,13053	0,11216
CTES. HINCHAMIENTO					
k ₆	-	-	0,5894	-	0,98378
2AB	-	-	-2E-04	-	0,05711
B	-	-	0,02183	-	0,05518

Tabla 7. Resultados obtenidos con el Simulador Acoplado para cada Mecanismo de Partícula Asumido. Empaque R2.

TIEMPO	KLAB	DEPOS	Error	DEP-HINCH(a5=0)		DEP-GEN	DP-GEN-HIN			GENER	
0	16.667	16.6652	0.011	16.6651	0.011	16.9882	1.927	16.637	0.180	16.667	0.000
600	15.757	15.7061	0.323	15.6856	0.453	16.1596	2.555	14.0208	11.019	16.667	5.775
1200	14.873	14.7883	0.571	14.7678	0.709	15.1672	1.976	13.1944	11.288	16.667	12.060
1800	14.025	13.923	0.729	13.9027	0.873	14.2329	1.481	12.4264	11.399	16.667	18.836
2400	13.212	13.1067	0.799	13.0867	0.951	13.3529	1.064	11.7047	11.411	16.667	26.148
3000	12.434	12.3362	0.789	12.3165	0.947	12.524	0.721	11.0241	11.341	16.667	34.041
3600	11.691	11.6085	0.704	11.5892	0.869	11.743	0.447	10.3813	11.201	16.667	42.565
4200	10.981	10.9404	0.372	10.9234	0.526	11.0212	0.364	9.7861	10.883	16.667	51.778
4800	10.305	10.2822	0.221	10.267	0.369	10.3478	0.415	9.2289	10.443	16.667	61.737
5400	9.661	9.6532	0.085	9.6455	0.165	9.7115	0.519	8.7069	9.880	16.667	72.511
6000	9.063	9.0795	0.188	9.0287	0.373	9.1105	0.530	8.2327	9.156	16.667	83.912
6600	8.550	8.5736	0.273	8.521	0.343	8.4673	0.971	7.9028	7.573	16.667	94.929
7200	8.119	8.1139	0.058	8.079	0.488	7.6511	5.758	7.7757	4.224	16.667	105.294
7800	7.750	7.7265	0.298	7.7016	0.619	7.0113	9.527	7.8232	0.950	16.667	115.069
8400	7.444	7.4353	0.118	7.4261	0.242	6.7488	9.340	7.7211	3.721	16.667	123.895
9000	7.194	7.2661	1.006	7.2248	0.432	7.0453	2.063	7.6141	5.844	16.667	131.689
9600	6.995	6.9963	0.013	6.87	1.793	6.9731	0.319	7.6496	9.352	16.667	138.257
10200	6.848	6.844	0.051	6.8446	0.042	6.798	0.723	7.7377	13.000	16.667	143.403
	Error		1.006		1.793		9.527		13.000		

La Figura 7 muestra los resultados de la respuesta del *Simulador Acoplado* para sólo depositación en comparación con los registros de permeabilidad obtenidos en laboratorio.

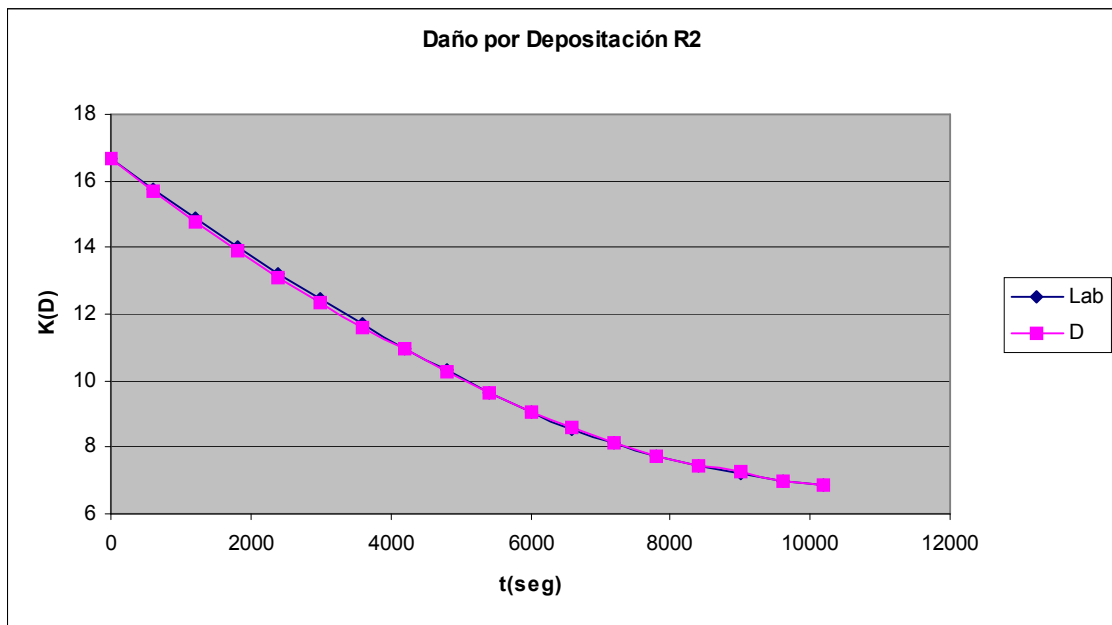


Figura 7. Comparación de la Respuesta de *Simulador Acoplado* para Depositación de partículas con los Registros de Permeabilidad del laboratorio. Empaque R2.

La Figura 8 compara los resultados de la respuesta del *Simulador Acoplado* para los diferentes fenómenos de depositación asumidos en comparación con los registros de permeabilidad obtenidos en laboratorio.

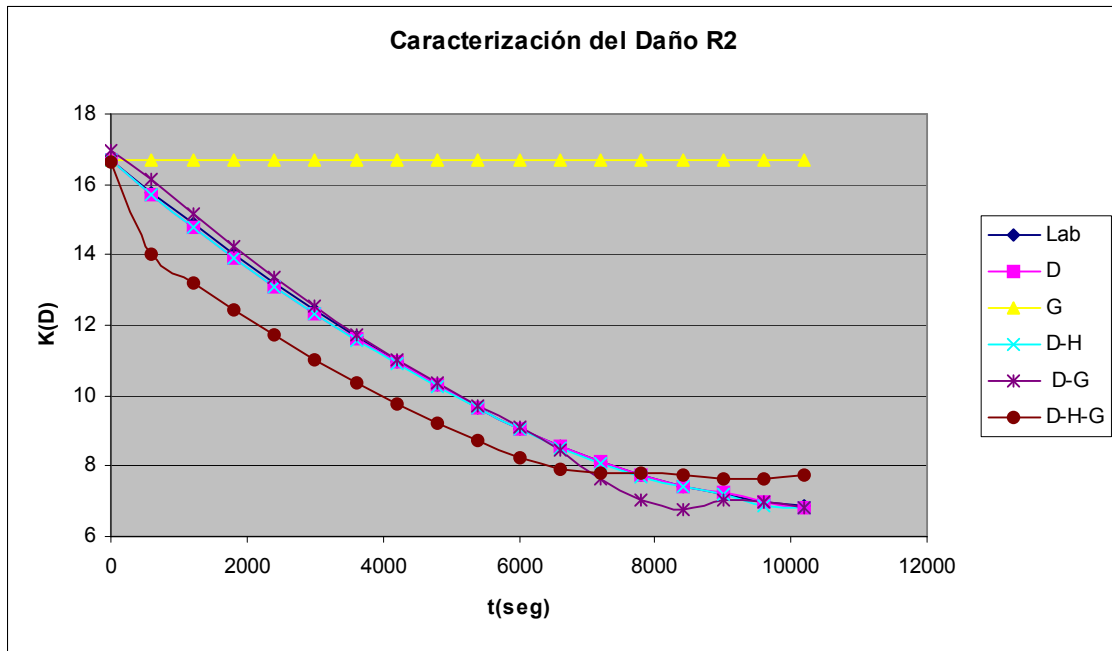


Figura 8. Comparación de la Respuesta de *Simulador Acoplado* para Distintos Fenómenos de Depositación con los Registros de Permeabilidad del laboratorio. Empaque R2

A partir del análisis de las respuestas del *Simulador Acoplado* se selecciona el Mecanismo de de Depositación Superficial como el responsable del deterioro de permeabilidad del medio. En la Figura 9 se muestra una predicción del fenómeno de depositación de partículas en el medio para un tiempo total – 24 horas – mucho mayor que el tiempo que dura la prueba – dos horas y 50 minutos.

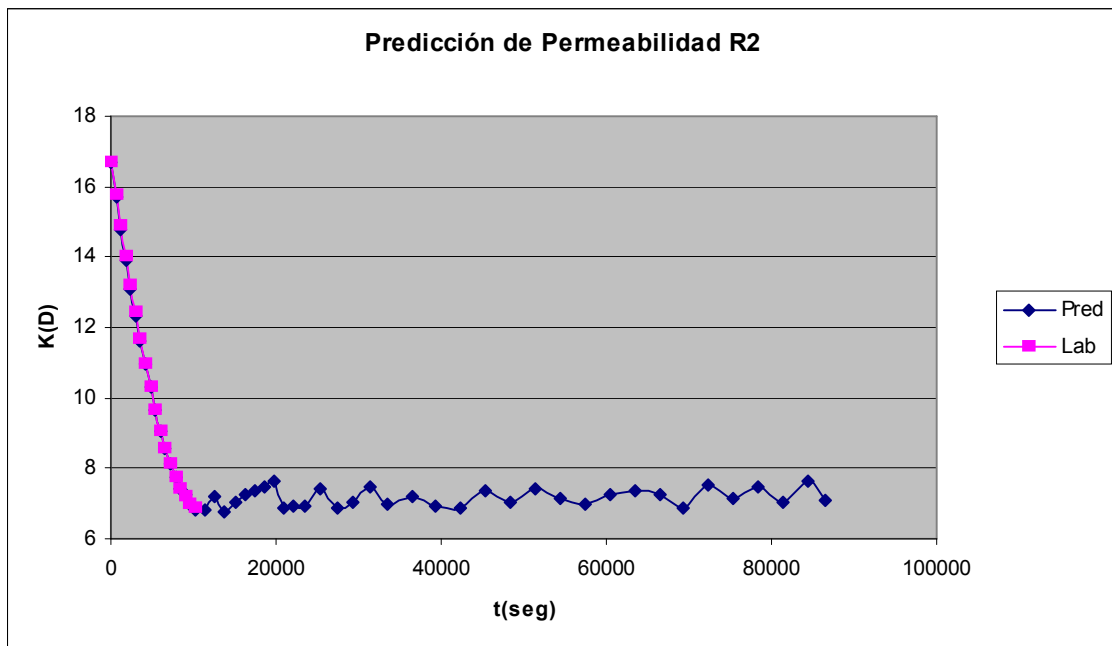


Figura 9. Pronóstico del Deterioro de Permeabilidad para el Empaque R2 obtenido con el *Simulador Acoplado*.

La predicción del daño para un día se observa en la Figura 9, y se construye para el fenómeno de depositación. Los resultados muestran que a partir de un daño inicial, la

permeabilidad fluctúa. Se postula que en el empaque los canales se taponan o bloquean y luego se genera un desbloqueo por efecto de arrastre del fluido que puede causar un aumento en permeabilidad.

- Simulación de la Depositación de Partículas en el EMPAQUE R8. Las características de la prueba se detallan en la Tabla 8.

Se inyecta una suspensión de CaCO₃ en salmuera a una concentración de 1500 NTU, en un empaque de arena Ottawa 10/20, el proceso se realiza a tasa constante. La Tabla 8 lista las propiedades del empaque, del fluido y las condiciones relacionados con esta prueba.

Tabla 8. Características de la Prueba en el Empaque R8.

ITEM	Nomenclatura	UNID.	Prueba R8
CONDICIONES LABORATORIO			
ARENA	ARENA		10/20
TURBIDEZ SOLUCIÓN	Turb.	NTU	1500
DIAMETRO	d	cm.	2,54
LONGITUD DEL NÚCLEO	L	cm.	7,38
PRESIÓN DE CONFINAMIENTO	Pconf	psi	1000
TIEMPO FINAL DE PRUEBA	T _f	seg.	19020
TIPO DE SUSPENSIÓN	Tip. Susp.		CaCO ₃
CONCENTRACION DEL FLUIDO INYECTADO	C _{pf}	gr/cc	0,0007585
CANTIDAD DE FINOS DEPOSITADOS INICIAL	C _f	gr	0
CONCENTRACION DE FINOS EN EL MEDIO	C _o	gr/cc	0
POROSIDAD INICIAL	φ _o	%	37,43
PERMEABILIDAD INICIAL	K _o	D	43,117
VISCOSIDAD FLUIDO INYECTADO	μ	cP	1
DENSIDAD DEL LIQUIDO	ρ _l	gr/cc	1
DENSIDAD DE PARTICULAS	ρ _p	gr/cc	2,48
TASA DE INYECCION (CTE)	q	cc/seg.	0,363
CONDICIONES SIMULADOR			
NUMERO DE BLOQUES	N _x		21
INCREMENTO DE TIEMPO	Δt	seg.	1
PRESIÓN DE INYECCIÓN	P _{in}	atm	-
PRESIÓN EXTREMO PRODUCTOR	P _{out}	atm	1
PRESIÓN DE ARRANQUE DEL SIMULADOR	P _o	atm	1,5
MECANISMO DE DAÑO	Tip. Daño		DS
CONDICIONES DE INYECCIÓN	Cond. Iny.		q cte

La Tabla 9 lista los parámetros estimados para cada simulación de acuerdo a los fenómenos de depositación de partícula asumidos.

Tabla 9. Parámetros Estimados por el *Simulador Acoplado* para los fenómenos de depositación del Empaque de Arena 8.

CONSTANTES FENOMENOLÓGICAS	D	D - H	D - G
CTES. DEPOSITACION			
k_1	0,20653	0,20675	0,21160
k_2	18,3883	18,3214	18,2044
$dP/dL)_{cr}$	0,01728	0,01696	0,01667
CTES. GENERACION			
k_3	-	-	0,00050
k_4	-	-	0,00045
k_5	-	-	0,53323
$dP/dL)_{cr}^*$	-	-	0,37312
σ_P^*	-	-	0,12985
CTES. HINCHAMIENTO			
k_6	-	0,90258	-
2AB	-	0,00399	-
B	-	0,00117	-

La Tabla 10 compara los resultados de la respuesta del *Simulador Acoplado* para los diferentes fenómenos de depositación asumidos en comparación con los registros de permeabilidad obtenidos en laboratorio. Se puede observar el error en porcentaje obtenido para cada mecanismo de partícula simulado.

Tabla 10. Resultados obtenidos con el Simulador Acoplado para cada Mecanismo de Partícula Asumido. Empaque R8.

TIEMPO(S)	KLAB (D)	DEPOS	Error	DEP-HINCH		DEP-GEN	
0	43.117	43.1158	0.003	43.099	0.042	43.1157	0.003
300	40.338	42.2176	4.659	41.9393	3.969	42.197	4.607
1320	35.075	38.3293	9.278	37.8083	7.793	38.2676	9.102
1860	32.338	36.407	12.583	35.8204	10.769	36.3267	12.334
2400	32.303	34.5735	7.027	33.9403	5.067	34.4766	6.727
2940	30.784	32.8247	6.629	32.1583	4.465	32.7129	6.266
3480	29.888	31.1569	4.246	30.4669	1.937	31.0319	3.828
4380	28.797	28.5618	0.818	27.8713	3.216	28.4466	1.218
5280	26.897	26.2098	2.554	25.5574	4.980	26.1236	2.875
6180	25.245	24.2454	3.958	23.6734	6.224	24.184	4.201
7620	23.782	22.1097	7.031	21.9919	7.526	22.4918	5.424
11040	22.346	20.8994	6.475	21.2341	4.977	21.5547	3.543
14940	20.976	21.0351	0.282	21.3497	1.782	21.7086	3.493
17340	20.982	20.9555	0.126	21.3885	1.937	21.7321	3.575
19020	20.431	21.0591	3.074	21.4077	4.780	21.738	6.397
Error			12.583	10.769		12.334	

La Figura 10 muestra los resultados de la respuesta del *Simulador Acoplado* para sólo depositación en comparación con los registros de permeabilidad obtenidos en laboratorio.

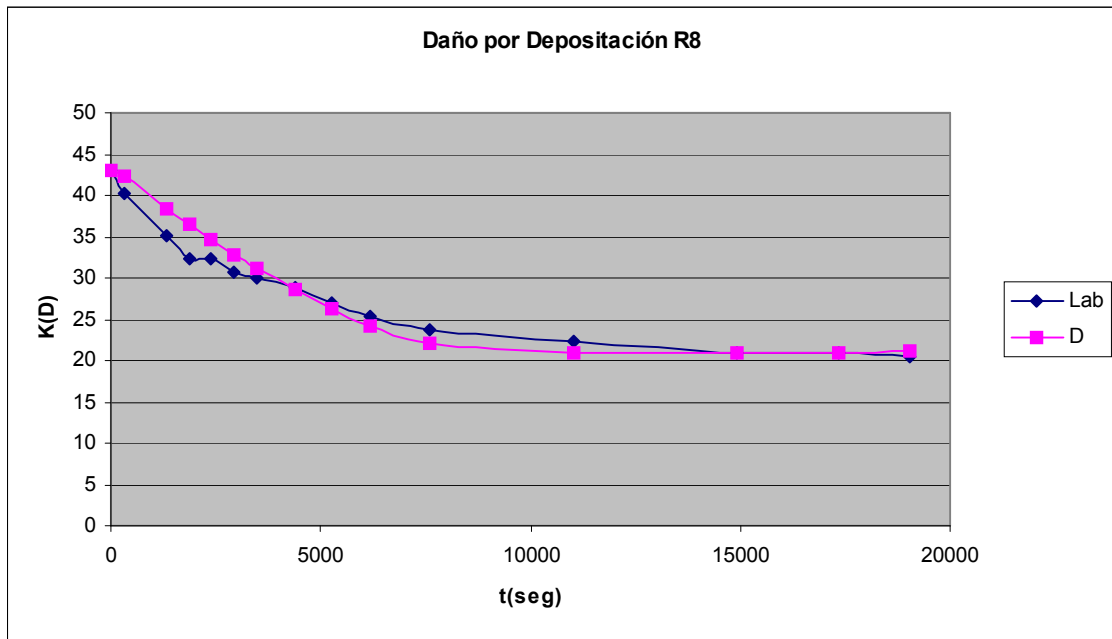


Figura 10. Comparación de la Respuesta de *Simulador Acoplado* para Depositación de partículas con los Registros de Permeabilidad del laboratorio. Empaque R8.

La Figura 11 compara los resultados de la respuesta del *Simulador Acoplado* para los diferentes fenómenos de depositación asumidos en comparación con los registros de permeabilidad obtenidos en laboratorio.

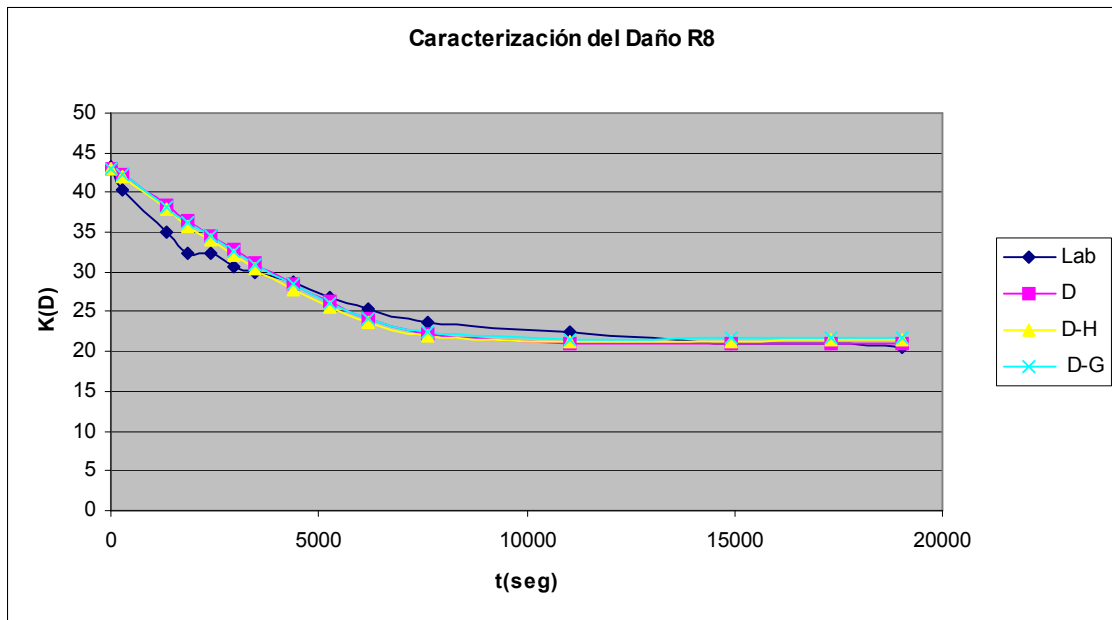


Figura 11. Comparación de la Respuesta de *Simulador Acoplado* para Distintos Fenómenos de Depositación con los Registros de Permeabilidad del laboratorio. Empaque R8.

A partir del análisis de las respuestas del *Simulador Acoplado* se selecciona el Mecanismo de Depositación Superficial como el responsable del deterioro de permeabilidad del medio.

En la Figura 12 se muestra una predicción del fenómeno de depositación de partículas en el medio para un tiempo total mayor que el tiempo que dura la prueba.

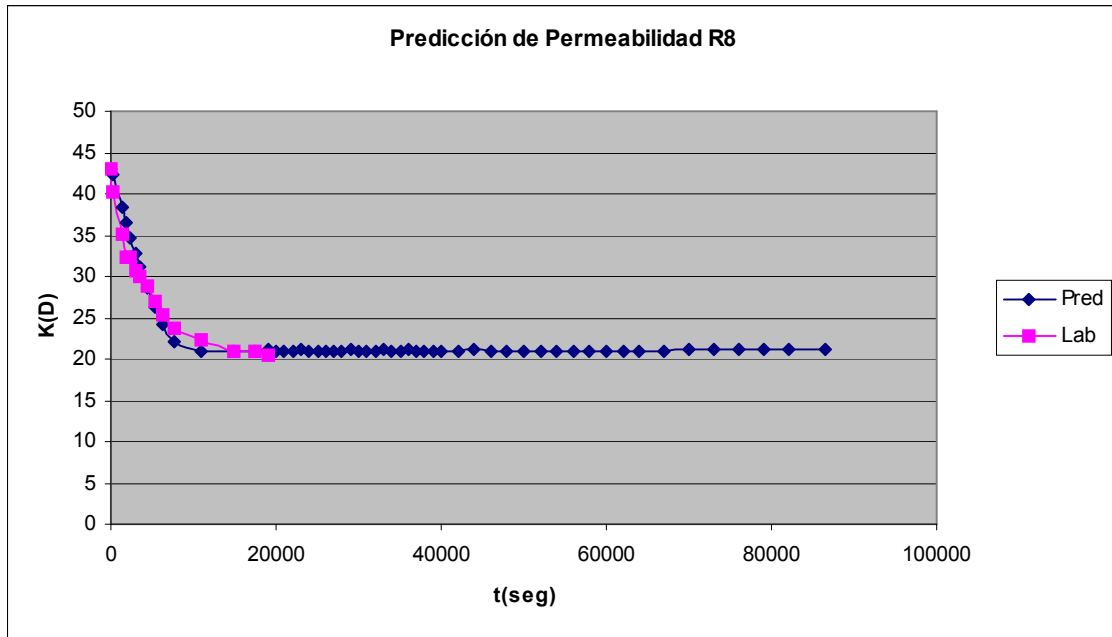


Figura 12. Pronóstico del Deterioro de Permeabilidad para el Empaque R8 obtenido con el *Simulador Acoplado*.

Se observa que a partir del tiempo de prueba, la permeabilidad alcanza un valor de equilibrio que se mantiene en el tiempo. Este equilibrio puede manifestar un equilibrio entre los fenómenos de depositación y arrastre de partículas al interior del medio poroso

6. CONCLUSIONES.

- Se construye un modelo sistematizado en el cual se acopla una aproximación fenomenológica de flujo de partículas en medios porosos con un ajuste estadístico para simular los mecanismos de depositación de finos y su impacto sobre la capacidad de flujo de una roca productora de hidrocarburos.
- Se desarrolla y presenta una solución sistematizada para caracterizar el fenómeno de flujo de material sólido fino en medios porosos a partir de una aproximación euleriana del fenómeno de depositación de partícula acoplada al desarrollo y solución de un modelo estadístico de regresión no lineal.
- Se presenta un pronóstico de los efectos del deterioro de la capacidad de flujo de un medio poroso debido al impacto producido por el flujo de partículas finas para las condiciones experimentales en laboratorio.
- Se presenta la metodología de laboratorio y los montajes requeridos que permitan simular en laboratorio el fenómeno de flujo de partículas en medios porosos y que permitan generar los resultados experimentales necesarios para ajustar las respuestas del *Simulador Acoplado*. a las condiciones de prueba en laboratorio.

▪ CUATRO (4) COMENTARIOS.

- Los Resultados de la Simulación y los Fenómenos de Depositación de la Partícula en los Medios Porosos Estudiados.

El informe final no incluye un análisis sobre la caracterización ó diagnóstico de los fenómenos de partícula observados, en laboratorio, y simulados con el *Simulador Acoplado*. Primero, porque los medios porosos utilizados para ajustar el *Simulador Acoplado* se construyen en forma artificial con arena limpia y en ellos se fluye una solución sucia. En este caso, se descartan fenómenos de hinchamiento por absorción líquida y se descarta fenómenos de generación interna de finos por aumento de esfuerzos de corte en función de la velocidad del fluido. Así, solo permanece como relevante el fenómeno de depositación de partículas desde el fluido hacia el medio poroso y así lo muestran los resultados del simulador en las pruebas listadas en el capítulo 5. Así, el análisis de los fenómenos de partícula, en forma adrede, no se incluye como objetivo específico del estudio.

- Un análisis Estadístico sobre los Valores Estimados de los Parámetros. A diferencia de lo que puede ocurrir al aplicar un modelo estadístico de regresión no lineal para estimar los parámetros de una función definida, en este caso, los coeficientes fenomenológicos estimados a partir de los resultados de laboratorio resultan dependientes del medio, del fluido y de las condiciones de la prueba. Para el mismo medio poroso y la misma solución fluida se obtienen estimativos distintos con la variación del caudal de flujo. A su vez, por la naturaleza iterativa del ajuste, los valores estimados resultan dependientes de los valores iniciales utilizados para iniciar el ciclo de iteración. Al modificar los valores

iniciales, se pueden estimar, para la misma prueba de laboratorio, una tripleta distinta de valores con la misma calidad de ajuste anterior. Se dificulta establecer una base estadística para correlacionar los estimativos obtenidos cada vez.

- La Fuerza del Modelo Acoplado. En este estudio se logra desarrollar una solución sistematizada para un modelo de depositación de partículas en función de una serie de parámetros desconocidos. A su vez, se plantea y se resuelve un modelo estadístico de regresión no lineal cuya componente determinística lo configura el modelo diferencial completo de depositación de partículas. Se cuenta entonces con una solución sistematizada para simular los fenómenos de depositación para un medio poroso dado, una solución fluída dada, unas condiciones de flujo simuladas en laboratorio dadas y con el cual se pueden presentar pronósticos en el tiempo del impacto de los fenómenos de partículas ajustados a la respuesta, en laboratorio, del fenómeno simulado.
- La Etapa Siguierte. Continúa un estudio, no incluido, en el cual se simulen las condiciones de flujo de campo en un medio poroso real sometido al flujo de una solución real y se ajuste la respuesta de laboratorio a partir del *Simulador Acoplado* tanto para pronosticar el deterioro en el tiempo de la permeabilidad como para postular los mecanismos prevalecientes de depositación de partículas en el medio a esas condiciones controladas.

7. RECOMENDACIONES.

Algunas recomendaciones orientadas al avance futuro de presente estudio.

- Valores Iniciales para los Coeficientes del Modelo de Depositación de Partículas. La convergencia del *Modelo Acoplado* resulta dependiente de los valores iniciales definidos para los coeficientes fenomenológicos. Se requiere simular distintas pruebas de depositación para sensibilizar al analista en la selección de dichos valores.
- Diseñar las Pruebas de Depositación a las Condiciones de Flujo en Campo. Para fortalecer la aplicación del *Modelo Acoplado* a condiciones de Campo se requiere mediar, previo, un estudio escalado de las condiciones de caudal en un campo Productor de Hidrocarburos en Colombia.
- Una solución en Coordenadas Radiales al Modelo de Depositación de Partículas. Se recomienda acoplar el modelo estadístico de regresión a la solución del modelo de depositación en coordenadas radiales.
- Otras Técnicas de Estimación de los Coeficientes. Revisar otras técnicas de optimización de los coeficientes fenomenológicos distintas a los modelos estadísticos de regresión no lineal.

8. BIBLIOGRAFIA.

CIVAN, F., 2007. Formation Damage Mechanisms and Their Phenomenological Modeling. And Overview. U. of Oklahoma. Paper SPE 107857.

CIVAN, F., 1996 A Multi-Purpose Formation Damage Model. SPE 31101, 1996.

CIVAN, F.; KNAPP, R., OHEN, H., 1989. Alteration of Permeability by Fine Particle Processes. Journal of Petroleum Science and Engineering, 3 65–79. 1989.

CHAUVETEAU G., NABZAR L., COSTE J., 1998. Physics and Modeling of Permeability Damage Induced by Particle Deposition. SPE 39463, Institut Francais du Petrole, France.

FATT I., 1956, The Network Model of Porous Media I. Petroleum Transactions, AIME, 207, 144 - 159.

FOUNTI M., KLIPFEL A., 1998. Experimental and computational investigations of nearly dense two – phase sudden expansions flows. Experimental Thermal and Fluid Science 17 (1998) 27 – 36.

FLORES, F., RINCON, L., 1996. Procedimientos de Ensayo, Manual de Laboratorio de Análisis Petrofísicos Especiales. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Minas. 1996.

GRUESBECK, C., COLLINS, R., 1982. Entrainment and Deposition of Fine Particles in Porous Media. SPEJ, 12 847-856, 1982.

IMDAKM A., MUHAMMAD S., 1991. Computer Simulation Of Particle Transport Processes in Flow Trough Porous Media. Chemical Engineering Science 46 (8) (1991), 1977 - 1993.

LIU X., CIVAN F., 1995. Formation Damage by Fines Migration Including Effects of Filter Cake, Pore Compressibility, and Non – Darcy Flow – A Modeling Approach to Scaling From Core to Field. SPE 28980.

LUN C.K.K. , 2000. Numerical simulation of dilute turbulent gas – solid flows. International Journal of Multiphase Flow. 26 (2000), 1707 – 1736.

MAGNICO P., 2003. Hidrodinamic and transport properties of packed beds in small tube – to – sphere diameter ratio: pore scale simulation using an Eulerian and Lagrangian approach. Chemical Engineering Science 58 (2003), 5005 – 5024.

MARIOS A., IOANNIS C. 1993. Network Modelling of Pore Structure and Transport Properties of Porous Media. Chemical Engineering Science 48 (5) (1993), 951 - 972.

MILLÁN, E., CIVAN, F., 1992 Characterization of Formation Damage by Particle Processes. Journal Canadian Petroleum Technology, (31) (3). 27-33, 1992

RUIZ M., 2003. Análisis Estadístico para la Determinación de las Constantes Fenomenológicas en el Modelo de Faruk Civan para Daño de Formaciones Petrolíferas. Universidad Nacional de Medellín, Facultad de Ciencias. 2003.

RUIZ M., BARRETO D., CONTRERAS D., ZABALA R., 2004. Construcción de un Modelo para Caracterizar Daño por Procesos de Partícula en Formaciones Productoras. Revista Energética. Instituto de Energía, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Medellín. 12, 35 – 44, 2004.

SBRIZZAI F., FARALDI P., SOLDATI A., 2005. Appraisal of Three – dimensional numerical simulation for sub-micron particle deposition in a micoro – porous ceramic filter. Chemical Engineering Science 60 (2005), 6551 – 6563.

SIQUEIRA A., BONET J., SHECAIRA F., 2003. A 3D Network Model of Rock Permeability Impairment Due to Suspended Particles in Injection Water. SPE 82232.

SOO H., RADKE J., 1985. Flow of Dilute, Stable Liquid and Solid Dispersions in Underground Porous Media. Aiche Journal 31 (11) 1926 – 1928.

REGE S., FOGLER H., 1987. Network Model For Straining Dominated Particle Entrapment in Porous Media. Chemical Engineering Science 42 (7) (1987), 1553 - 1564.

REGE S., FOGLER H., 1988. A Network Model for Deep Bed Filtration of Solid Particles and Emulsion Drops.. Aiche Journal 34 (11) 1761 – 1772.

VITTHAL S., SHARMA M., 1988. A One – Dimensional Formation Damage Simulator for Damage Due to Fines Migration. SPE 17146.

ANEXO 1.

RESUMEN EJECUTIVO.

UN MODELO DE DEPOSITACIÓN DE PARTÍCULAS EN MEDIOS POROSOS.

Por. Marco A. Ruiz Serna.

Se desarrolla un modelo sistematizado en el cual se acopla una aproximación fenomenológica de flujo de partículas en medios porosos con un ajuste estadístico para simular los mecanismos de depositación de finos y su impacto sobre la capacidad de flujo de una roca productora de hidrocarburos.

Para configurar el modelo acoplado se desarrolla y se presenta una solución sistematizada para caracterizar el fenómeno de flujo de material sólido fino en medios porosos a partir de una aproximación euleriana del fenómeno y se acopla al desarrollo y solución de un modelo estadístico de regresión no lineal para la estimación de parámetros de cinéticas de depositación.

Al aplicar el modelo acoplado se presenta un pronóstico de los efectos del deterioro de la capacidad de flujo de un medio poroso debido al impacto producido por el flujo de partículas finas para las condiciones experimentales en laboratorio. Además, se incluye una propuesta de metodología de laboratorio y los montajes requeridos que permitan simular en laboratorio el fenómeno de flujo de partículas en medios porosos y generar los resultados experimentales necesarios para ajustar las respuestas del *Simulador Acoplado* a las condiciones de prueba en laboratorio.

Keywords: Flujo de finos en Medios Porosos, Fenómenos de Transporte en Medios Porosos, Procesos de Partícula en Medios Porosos, Transporte de Partículas en Medios Porosos, Medelos de Daño de Formación, Suspensiones de Sólidos en Medios Porosos.

2. FLUJO DE PARTICULAS EN UN MEDIO POROSO.

Antes de llegar los fluidos producidos al fondo de un pozo productor de petróleo, estos viajan a través de la roca porosa y arrastran pequeñas partículas ó material fino que pueden alcanzar a salir al pozo en suspensión con los fluidos ó pueden depositar y formar acumulados en los poros ó gargantas de poros cerca de la zona circundante del fondo del pozo. La depositación de partículas produce una disminución gradual y continua de la capacidad de flujo de la roca conocida como permeabilidad y este deterioro se conoce como daño de formación.

El daño del formación se traduce en una caída de la tasa de producción de un pozo productor ó de tasa de inyección para un pozo inyector. En ambos casos se ocasiona pérdida de ingresos para la empresa operadora y aumento en los costos de producción debido a la necesidad de implementar trabajos remediales. El daño de formación representa un fenómeno indeseable y recurrente en la vida productiva de cualquier campo productor en particular.

En las operaciones cotidianas de la industria del petróleo se involucran prácticas de campo encaminadas a mitigar, inhibir ó remediar los efectos del daño de formación. Dichas acciones, por lo general, consisten en aplicaciones de tratamientos químicos a partir de los pozos productores con los cuales se puede controlar ó recuperar el daño de la roca producido por los depósitos mencionados. El desempeño de estos tratamientos ha sido probada en multiplicidad de aplicaciones de laboratorio y de campo y hoy están incorporadas como aplicaciones rutinarias de servicio de pozo.

El proceso de depositación y acumulación de partículas finas, al interior de un medio poroso, ha sido reconocido como un fenómeno dependiente de factores tales como: tamaño de finos en relación con el tamaño de poro, contenido – masa – de partículas finas y velocidad de flujo, entre otros y contempla:

- Depositación superficial. En este caso, los finos depositados tienen un tamaño lo suficiente menor con relación al tamaño de poro y no alcanzan a taponar el canal poroso que los aloja.
- Puenteo de Finos. En este caso, los finos de menor tamaño se depositan pero a diferencia del depositación superficial llegan a una restricción porosa en una cantidad – masa – tal que, juntos logran taponar el canal poroso.
- Taponamiento. En este caso los finos tienen un tamaño suficiente, – con relación al tamaño del canal -, para quedar atrapados en un canal poroso y producir, en el tiempo, el taponamiento completo de la restricción.
- Remoción de Partículas. Cuando se establece en el medio poroso, unas velocidades de flujo mayores que un valor limite, conocido como velocidad crítica, el fluido remueve partículas granuladas finas de las paredes del medio poroso y de los depósitos superficiales originados con anterioridad.
- Generación de Partículas por el Medio Poroso. El movimiento de un fluido en el medio poroso establece un esfuerzo de corte sobre la superficie de la roca dependiente de la velocidad que puede vencer las fuerzas de atracción superficiales y generar un desprendimiento continuo de material sólido. Además, la llegada de un nuevo fluido a la formación porosa productora permite un desequilibrio químico en el medio y el desalojo

de material sólido fino de la roca hacia el fluido circundante. La Figura 1 esquematiza los diversos fenómenos de partícula

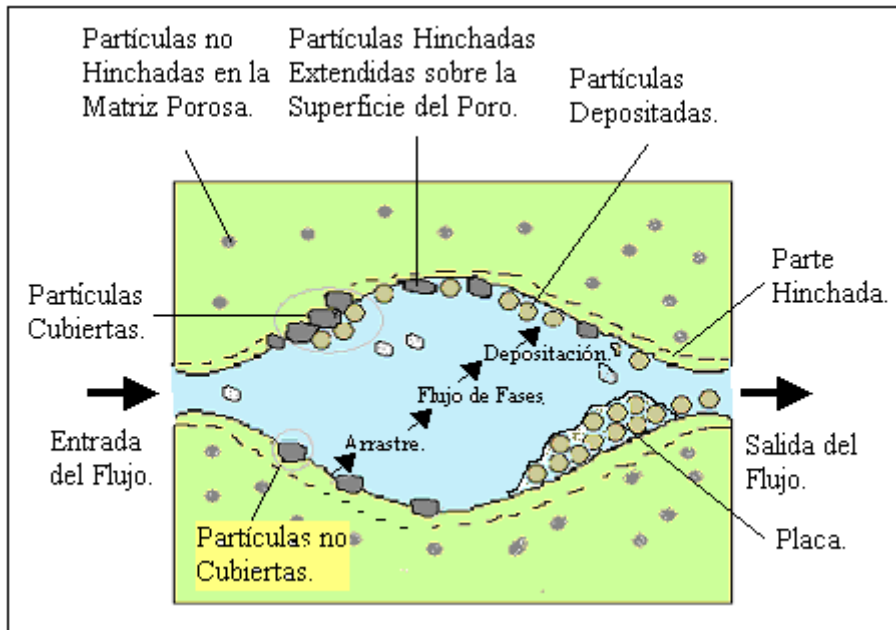


Figura 1. Esquema de Fenómenos de Partícula en un Medio Poroso.

La diversidad de fenómenos de partícula junto a la complejidad propia de describir la morfología de un medio poroso configuran un área de evidente interés y de notables desafíos para investigadores orientados a desarrollar una aproximación fenomenológica sobre la dinámica y comportamiento de flujo de las partículas finas en suspensión a través del medio poroso a partir de la cual se pueda simular el fenómeno de daño de formación por depositación de partículas en un medio poroso. Sin embargo, se pueden identificar dos familias de aproximaciones ó modelamientos.

APROXIMACIONES LAGRANGIANAS. En una representación Lagrangiana para el fenómeno de depositación de partículas finas en un medio poroso se identifican los siguientes elementos recurrentes.

- Dinámica de la Partícula. Se describe el movimiento de la partícula en un medio poroso tortuoso sometida a fuerzas de arrastre, gravedad y difusión través del medio fluido. Se descartan ó se incluyen la interacción interpartícula por colisiones de acuerdo al grado de dilución. La ecuación de movimiento de Newton para la partícula, en forma general, contempla:

$$m_p \frac{\partial u_p}{\partial t} = F_D + F_A + F_p + F_G + F_W$$

F_D : Fuerzas de arraste por exceso de esfuerzo de corte de acuerdo a la velocidad de la solución.

F_A : Fuerzas asociadas a masa ó concentración de las partículas en el fluido.

F_p : Fuerzas asociadas al gradiente de presión.

F_G : Fuerzas asociadas a efecto de gravedad por densidad de las partículas.

F_w : Fuerzas asociadas a la interacción de las partículas con las paredes del medio poroso.

- Una Representación de Red para el Medio Poroso. La representación del medio poroso a través de un sistema de red inicia con Fatt (1956), quien utiliza la analogía de tubos interconectados en uniones llamadas nodos y, a su vez, representan las gargantas del medio. Autores posteriores tales como Donaldson (1977), Sharma and Yortsos (1987), Houi and Lenormand (1986), Rege y Fogler (1988) evolucionan las representaciones de poros interconectados con propuestas de Red de forma de esferas empaçadas, triangulares, hexagonales, arreglos aleatorios fijos y arreglos aleatorios dinámicos
- Flujo a Través de un Sistema de Red. Una vez configurada el sistema de red, se acopla el modelo de la dinámica de partícula y se resuelve el flujo a través de la red a partir de balance de presión y de caudal. Se puede estimar, así, una visión en el tiempo de las nuevas condiciones de contenidos de partícula, porosidad y permeabilidad del medio poroso.

APROXIMACIONES EULERIANA. Para una representación euleriana del fenómeno de depositación de partículas finas en un medio poroso se pueden identificar los siguientes contenidos.

- Dinámica de la Partícula. La partícula como elemento sólido no existe, carece de dinámica. Las partículas conforman una segunda fase fluyente, continua. El sólido particulado no interactúa por difusión en la fase líquida ni con sus vecinas por colisión.
- Distribución Porosa de los Canales de Flujo. El medio poroso exhibe una morfología de canales y/o gargantas de flujo con una función de distribución fija de tamaños, estimada ó inferida. En general esta característica de medio poroso permanece en el tiempo durante el fenómeno de depositación de partículas, pero, con parámetros variables.
- Ecuaciones de Cinética de Depositación y Remoción de Partículas. Los fenómenos de depositación y remoción de partículas se plantean en función de leyes construidas a partir del comportamiento observado de las partículas finas en estudios experimentales de laboratorio. Además, se expresan en función de parámetros cuya estimación implica conocer resultados de mediciones experimentales.

La aproximación Euleriana integra una representación diferencial para el flujo simultáneo de la solución líquido más partícula, una representación del medio poroso y leyes empíricas para los fenómenos de partículas esperados. El modelo construido informa los cambios

observados en un modelo macro y a partir de las observaciones ó datos se valida ó corrigen los fenómenos de partícula simulados.

Se presenta, en este informe, la construcción un modelo sistematizado en el cual se acopla una aproximación fenomenológica de flujo de partículas en medios porosos con un ajuste estadístico para simular los mecanismos de depositación de finos y su impacto sobre la capacidad de flujo de una roca productora de hidrocarburos. Con el modelo se integra:

- Una solución sistematizada para caracterizar el fenómeno de flujo de material sólido fino en medios porosos a partir de una aproximación euleriana del fenómeno de depositación de partícula acoplada al desarrollo y solución de un modelo estadístico de regresión no lineal.
- La metodología de laboratorio y los montajes requeridos que permitan simular en laboratorio el fenómeno de flujo de partículas en medios porosos y generen los resultados experimentales necesarios para ajustar las respuestas del modelo matemático a las condiciones de prueba en laboratorio.
- Un pronóstico de los efectos del deterioro de la capacidad de flujo de un medio poroso debido a impacto del flujo de partículas finas para las condiciones experimentales en laboratorio.

2. UNA REPRESENTACION DE LA DEPOSITACION DE PARTICULAS FINAS EN UN MEDIO POROSO.

Para la representación de los fenómenos de partícula en un medio poroso se retoma el esquema semifenomenológico planteado por Faruk Civan en una serie de artículos publicados a partir de la década de los años 90. Esta aproximación está constituida por una ecuación diferencial parcial para flujo bifásico – fluido y partícula construida a partir de balances de masa tanto para el líquido como para la fase partícula, y ecuaciones de flujo para cada una de las fases fluidas en un medio poroso, fluido y partícula. En los balances, para cada fase, se consideran los fuentes y sumideros de acuerdo a los fenómenos de depositación y generación insitu de partículas y la absorción de la fase líquida en el medio poroso y se representan a partir de leyes experimentales.

2.1 PRESENTACION DE LA ECUACION DE FLUJO.

Para la construcción del modelo matemático se tiene en cuenta:

- Flujo bifásico -líquido-partícula. La partícula forma una segunda fase continua.
- Flujo unidimensional, horizontal y sistema isotérmico.
- Medio poroso homogéneo e isotrópico.
- Las fases de flujo se consideran incompresibles.
- En la superficie del poro se presenta desprendimiento ó remoción in-situ de finos y en la garganta ocurre la captura y/o entrapamiento.

Al interior del medio poroso se presentan los siguientes mecanismos:

- Las partículas de tamaño mayor se atrapan en la garganta de poro y disminuyen la porosidad del medio, fenómeno de taponamiento.
- Las partículas tamaño menor pueden depositar sin taponar ó se pueden agrupar y taponar la garganta del poro, efecto de puenteo. Fenómenos de depositación superficial y puenteo de partículas.
- El medio poroso puede contener material arcilloso que absorbe la fase líquida y aumenta su volumen específico y produce reducción en la porosidad – permeabilidad del medio. Fenómeno de Hinchamiento de la formación por absorción de líquido.
- El medio poroso libera ó desprende material fino de la superficie del poro de acuerdo al esfuerzo de corte ejercido por el fluido sobre la superficie de la roca en virtud de su velocidad de flujo. Fenómeno de generación de partículas por el medio poroso.

Al plantear un balance de masa para la fase líquida en un elemento diferencial de un modelo poroso lineal horizontal se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho_l S_l) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_l u_l) + \dot{S} = 0 \quad (1)$$

En la ecuación (1), además de las variables porosidad, densidad líquida, saturación líquida y flujo volumétrico líquido se incluye la variable \dot{S} que representa la masa de líquido absorbida por el medio poroso por unidad de tiempo por unidad de volumen.

Al plantear un balance de masa para la fase partícula en un elemento diferencial de un modelo poroso lineal horizontal se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi S_p) + \frac{\partial}{\partial x}(f u_p) + (\dot{\sigma}_p + \dot{\sigma}_p^*) / \rho_p = 0 \quad (2)$$

En la ecuación (2), además de las variables porosidad, densidad de partícula, saturación de partícula y flujo volumétrico de partícula se incluyen las tasas ó velocidad de $\dot{\sigma}_p$ y $\dot{\sigma}_p^*$ que representan la masa de partículas depositadas y masa de partículas generadas por cada elemento diferencial de volumen del medio.

Al combinar la ecuación (1) y (2) para el supuesto de flujo bifásico en el medio y aplicar la ley de Darcy para el flujo de cada fase en un medio poroso, se obtiene la ecuación de flujo bifásico – líquido-partícula - en un medio poroso

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) = \frac{\dot{S}}{\rho_l} + \frac{1}{\rho_p} \frac{\partial}{\partial t} (\sigma_p + \sigma_p^*) + \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (3)$$

Con la ecuación (3) se relacionan los cambios en permeabilidad con respecto al tiempo y a la posición con las tasas de absorción líquida del medio poroso \dot{S} , tasa de depositación de partículas desde el fluido hacia el medio - σ_p - y con la tasa de generación de partículas finas desde el medio poroso hacia la solución fluida - $\dot{\sigma}_p$.

2.2. ECUACIONES PARA LAS CINÉTICAS DE PARTICULA.

Para buscar posibles soluciones numéricas a la ecuación (3) se requiere acudir a formas explícitas ó implícitas propuestas para las cinéticas de fenómenos de partículas asumidos.

- Rata de Absorción de Líquido por la Matriz Porosa.

Una forma de estimar la rata másica de absorción líquida por unidad de volumen por undiad de tiempo - \dot{S} - desarrollada a partir de la segunda ley de difusión de Fick se puede simplificar y expresar como:

$$\dot{S} = \frac{B}{\sqrt{t}}; \quad (4)$$

En la ecuación (4), el coeficiente B representa un conjunto de información referida a la capacidad de absorber líquido por el medio poroso. En su conjunto recoge propiedades tanto del medio como del tipo de solución. Pero, en la práctica su magnitud no se conoce y se estima a partir de información obtenida en simulaciones experimentales de los fenómenos de partícula en laboratorio.

- Cambios en Permeabilidad por Absorción Líquida. El volumen de líquido absorbido por la matriz porosa produce cambios en permeabilidad para los cuales se propone, en el modelo, la siguiente expresión.

$$\frac{K_{Sw}}{K_o} = k_6 + (1 - k_6) \exp(-2ABt^{1/2}); \quad (5)$$

En la ecuación (5), los coeficientes K_6 y AB recogen información del medio poroso relacionada con la tasa de absorción líquida y con la capacidad máxima de expansión volumétrica. Pero, en la práctica sus magnitudes no se conocen y se estima a partir de información obtenida en simulaciones experimentales de los fenómenos de partícula en laboratorio.

- Rata de Depositación de Partículas. La tasa neta de depositación de partículas se estima como la diferencia entre la tasa de retención y la tasa de arrastre de partículas presentes en el medio. La retención depende de la masa de partículas, densidad de partículas y porosidad del medio. El arrastre ó remoción de partículas tiene naturaleza hidrodinámica y resulta proporcional al exceso del esfuerzo de corte a partir de un nivel inferior límite, - gradiente crítico.

$$\frac{\partial \sigma_p}{\partial t} = k_1 v C_p \rho \phi - k_2 \sigma_p \left[\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) - \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr} \right] U$$

$$U = 0, \text{ sí } \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) \leq \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr}$$

$$U = 1, \text{ sí } \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) > \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr} \quad (6)$$

En la expresión (6), el coeficiente de depositación K_1 y los coeficientes de de remoción K_2 y $\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr}$ almacenan información relacionada con la mineralogía y tipo de roca y con el tipo de fluido. Pero, en la práctica sus magnitudes no se conocen y se estima a partir de información obtenida en simulaciones experimentales de los fenómenos de partícula en laboratorio.

- Ecuación de Generación de partículas. El medio poroso contiene material fino ó particulado adherido a las paredes del poro, potencial de liberarse, de acuerdo a los desequilibrios físico – químicos establecidos al interior del medio ó a la capacidad de arrastre de acuerdo a la hidrodinámica del fluido. Civan propone una ecuación para la estimación de la tasa de generación de finos en el medio, la cual asume la forma siguiente:

$$\frac{\partial \sigma_p^*}{\partial t} = -k_3 \sigma_p^* \left[1 - \frac{1}{\exp(k_4 t^{1/2})} \right] \frac{1}{\exp(k_5 \sigma_p)} \left[\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) - \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr}^* \right] U$$

$$U = 0, \text{ sí } \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) \leq \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr}^*$$

$$U = 1, \text{ sí } \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) > \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr}^* \quad (7)$$

La ecuación (7) plantea proporcionalidad entre la tasa de liberación de partículas tanto con el contenido de partículas desprendibles en la matriz, σ_p^* , como con el exceso de gradiente de presión sobre el gradiente crítico requerido para mover una partícula de la superficie porosa de la matriz, $\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr}^*$. Pero, en la práctica, las magnitudes de estos coeficientes no se conocen y se estiman a partir de información obtenida en simulaciones experimentales de los fenómenos de partícula en laboratorio.

- Relación entre Porosidad y Permeabilidad. El modelo propone una relación de potencia típica para enlazar los cambios de porosidad con los cambios de permeabilidad en el medio con referencia a sus valores iniciales.

$$\frac{K}{K_o} = \left(\frac{\phi}{\phi_o} \right)^3 \quad (8)$$

- Relación de Porosidad. La porosidad resultante se relaciona con los cambios en porosidad de acuerdo a los fenómenos de depositación y de hinchamiento del medio por absorción líquida. Ecuación (9).

$$\phi = \phi_o - \phi_p - \phi_{sw}, \quad (9)$$

Constantes Fenomenológicas. Como se puede observar de la forma de las expresiones (4) hasta (7), el modelo utilizado para representar y simular los fenómenos de partícula en un medio poroso incluyen una serie de coeficientes ó parámetros desconocidos que se deben estimar al momento de encontrar una respuesta específica del modelo para una simulación cualquiera del ó los fenómenos de partícula. Una síntesis de los parámetros se lista a continuación.

- Parámetros Relacionados con la Depositación de Partículas.

$$k1, \quad k2, \quad \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr} \quad (10)$$

- Parámetros Relacionados con la Generación de Partículas.

$$k3, \quad k4, \quad k5 \quad \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr}^*, \quad \sigma_p^* \quad (11)$$

- Parámetros Relacionados con el Hinchamiento del Medio.

$$k6, \quad B, \quad 2AB \quad (12)$$

2.3. UNA PROPUESTA NUMERICA PARA SIMULAR LA DEPOSITACIÓN DE PARTICULAS EN UN MEDIO POROSO.

Para buscar solución numérica al planteamiento matemático representado en las expresiones (4) hasta la (7) se desarrolló el siguiente esquema de ecuaciones explícitas expandidas en diferencias finitas.

- Ecuación de Flujo. La expresión analítica (3) se expande en diferencias finitas y asume la siguiente forma:

$$T_{i-1/2}^{n+1} P_{i-1}^{n+1} - (T_{i-1/2}^{n+1} + T_{i+1/2}^{n+1}) P_i^{n+1} + T_{i+1/2}^{n+1} P_{i+1}^{n+1} = -(\Delta x)^2 f(t)^{n+1};$$

$$f(t) = \mu \left[\frac{\dot{S}}{\rho_l} + \frac{1}{\rho_p} \frac{\partial}{\partial t} (\sigma_p + \sigma_p^*) + \frac{\partial \phi}{\partial t} \right] \quad (13)$$

- Gradiente de Presión.

$$\left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_i = \left(-\frac{P_{i+1} - P_i}{\Delta x} \right) \quad (14)$$

- Velocidad de Flujo. La velocidad de acuerdo a la ley de Darcy se plantea:

$$v_i = -\frac{K_i}{\mu} \frac{(P_{i+1} - P_i)}{\Delta x} \quad (15)$$

- Ecuación de Depositación de Partículas.

Cantidad de Finos Depositados. De acuerdo a la expresión (6), se puede plantear:

$$\sigma_{pi}^{n+1} = \sigma_{pi}^n + \Delta t k_1 v C_{pi} \rho \phi_i^n - k_2 \sigma_{pi}^n \left[\left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_i^{n+1} - \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr} \right] \cup \quad (16)$$

Rata de Depositación de Finos.

$$\left(\frac{\partial \sigma_p}{\partial t} \right)_i^{n+1} = k_1 v C_{pi} \rho \phi_i^n - k_2 \sigma_{pi}^n \left[\left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_i^{n+1} - \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr} \right] \cup$$

$$\cup = 0, \text{ sí} \quad \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_i^{n+1} \leq \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr}$$

$$\cup = 1, \text{ sí} \quad \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_i^{n+1} > \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr} \quad (17)$$

- Ecuación de Generación de partículas. Se acuerdo a la expresión (7), se puede expandir:

Cantidad de Finos Generados.

$$\sigma_{pi}^{n+1*} = \sigma_{pi}^{n*} - \Delta t k_3 \sigma_p^* \left[1 - \frac{1}{\exp(k_4 t^{1/2})} \right] \frac{1}{\exp(k_5 \sigma_{pi}^n)} \left[\left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_i^{n+1} - \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr}^* \right] \cup \quad (18)$$

Rata de Generación de Finos.

$$\left(\frac{\partial \sigma_p^*}{\partial t} \right)_i^{n+1} = -k_3 \sigma_p^* \left[1 - \frac{1}{\exp(k_4 t^{1/2})} \right] \frac{1}{\exp(k_5 \sigma_{pi}^n)} \left[\left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_i^{n+1} - \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr}^* \right] \cup$$

$$\begin{aligned}
U = 0, \text{ sí} & \quad \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_i^{n+1} \leq \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr}^* \\
U = 1, \text{ sí} & \quad \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_i^{n+1} > \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cr}^*
\end{aligned} \tag{19}$$

- Cálculo de Porosidad. De acuerdo a la expresión (8), se puede expandir:

Daño en porosidad por hinchamiento.

$$\phi_{Sw} = \phi_o \left[1 - \left(\frac{K}{K_o} \right)_{Sw}^{1/3} \right] \tag{20}$$

Daño en porosidad por depositación superficial.

$$\phi_{pi} = \frac{\sigma_{pi}}{\rho_p} \tag{21}$$

Cálculo de Porosidad.

$$\phi_i = \phi_o - \phi_{pi} - \phi_{Sw} \tag{22}$$

- Cálculo de Permeabilidad.

$$K_i = K_o \left(\frac{\phi_i}{\phi_o} \right)^3 \tag{23}$$

- Ecuación de Concentración.

$$\phi_i^{n+1} \frac{(C_{pi}^{n+1} - C_{pi}^n)}{\Delta t} + (1 + C_{pi}^{n+1}) \frac{\partial \phi_i}{\partial t} + v_i^{n+1} \frac{(C_{pi+1}^{n+1} - C_{pi-1}^n)}{2\Delta x} = C_{pi}^{n+1} \frac{(v_{i+1}^{n+1} - v_{i-1}^{n+1})}{2\Delta x} \tag{24}$$

Se lista el procedimiento secuencial desarrollado y aplicado para resolver en forma simultánea el grupo de ecuaciones expandidas desde la expresión (13) hasta la (24) con lo cual se obtiene el valor de permeabilidad del medio poroso sometido a procesos de depositación de partículas.

- Defina los tiempos de impresión de resultados.
- Ingresar condiciones iniciales: Longitud, diámetro, densidad del líquido y de la partícula, viscosidad. Concentración inicial de finos en el medio, incrementos de tiempo.
- Defina las condiciones en los extremos: Caudal de inyección y presión a la salida.
- Definir la malla del modelo. Numero de bloques.
- Ingrese el valor inicial de las constantes.

- Defina las presiones iniciales para cada bloque, los depósitos de finos iniciales, porosidad inicial, permeabilidad inicial.
- Hallar los gradientes de presión para cada bloque, y la velocidad en cada bloque. Ecuación (14) y (15).
- Incrementar el tiempo.
- Hallar la tasa de depositación para cada bloque. Ecuación (17).
- Hallar los depósitos de finos en cada bloque. Ecuación (16).
- Hallar la tasa de generación de finos. Ecuación (19).
- Hallar la cantidad de finos generados. Ecuación (18).
- Hallar el daño de porosidad por hinchamiento. Ecuación (20).
- Hallar el daño de porosidad por depositación. Ecuación (21).
- Hallar porosidad para cada bloque. Ecuación (22).
- Hallar permeabilidad para cada bloque. Ecuación (23).
- Generar la matriz de distribución de presiones para cada bloque y resolver la matriz tridiagonal resultante para resolver las nuevas presiones resultantes en cada bloque. Ecuación (13).
- Encontrar el nuevo sistema de distribución de concentraciones, resolver la matriz tridiagonal resultante y obtener el nuevo perfil de distribución de concentraciones. Ecuación (24).
- Obtener la permeabilidad promedio del medio a partir de la permeabilidad obtenida para cada bloque de la malla y para los distintos tiempos.

2.4 LA NECESIDAD DE DETERMINAR LAS CONSTANTES FENOMENOLOGICAS EN EL MODELO DE DEPOSITACION DE PARTICULAS.

El modelo aplicado para representar el fenómeno de depositación de partículas en un medio poroso configura un sistema de ecuaciones diferenciales para las cuales se obtiene soluciones en términos de parámetros ó constantes fenomenológicas dependientes del medio poroso y de los fluidos contenidos. Estos coeficientes carecen de rutinas estándar de laboratorio para estimarlas. Estos coeficientes, para el mismo medio y para el mismo fluido utilizado, cambian con las distintas condiciones de caudal y/o gradiente de presión simulados en una prueba de desplazamiento.

Al estimar las constantes para un medio poroso, para unas características de fluido conocidas y para unas condiciones dinámicas de flujo establecidas se aplica el algoritmo numérico desarrollado y propuesto en las expresiones (13) hasta (24) para configurar un modelo sistematizado con el potencial de simular los fenómenos de depositación de partículas en un medio poroso. Con el simulador se tiene una herramienta que facilita interpretar, caracterizar y pronosticar los efectos de deterioro de la permeabilidad en un medio poroso.

Con el modelo simulador se tiene una herramienta de análisis para facilitar las decisiones de control de las condiciones de flujo en un pozo inyector ó productor en un campo de petróleo. Además se facilita un pronóstico en el tiempo para estudios de factibilidad económica de un proyecto ó intervención en un pozo dado.

3. UN MODELO ESTADISTICO PROPUESTO PARA ESTIMAR PARAMETROS DE LA RESPUESTA DE UN MODELO DE DEPOSITACION DE PARTICULAS.

Para obtener una solución particular para el modelo de depositación de partículas descrito en la sección (2), se requiere estimar los parámetros participantes en las ecuaciones de cinética de depositación y generación de finos. Para estimar estos coeficientes se aplica alguna técnica numérica de análisis de respuestas observadas ó un modelo estadístico de búsqueda, ajuste y optimización que permita sincronizar los resultados de un modelo de simulación dado con los observados en laboratorio de la simulación física del fenómeno.

Un modelo estadístico de regresión no lineal se describe y se propone para sintonizar las respuestas del modelo de depositación de partículas con las observaciones obtenidas en ensayos de laboratorio a condiciones controladas del fenómeno de depositación. Con el modelo estadístico se desarrolla un procedimiento automático para optimizar la estimación de parámetros y obtener una simulación en el tiempo del fenómeno de depositación.

3.1 TECNICAS DE REGRESION.

Los modelos de regresión constituyen una de las técnicas estadísticas utilizadas para trazar la relación existente entre datos y se pueden agrupar en modelos de Regresión Lineal y modelos de Regresión No Lineal.

- Regresión Lineal Múltiple. Los modelos para el análisis de regresiones múltiples pueden ser aplicados para proponer relaciones más complejas que una línea recta entre múltiples variables. . La forma de un modelo de regresión múltiple está dada por la siguiente ecuación:

$$y = E(y) + \varepsilon \quad (25)$$

Donde, $E(y)$ está dada por:

$$E(y) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (26)$$

El modelo planteado por la expresión (25) asume la forma:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (27)$$

Donde, y corresponde a la variable dependiente, y $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$, corresponden a las variables independientes y pueden ser $x_1, x_2, x^2, \text{Sen}(x)$ etc. $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ representan los parámetros desconocidos de la componente del modelo determinístico, $E(y)$, y el término ε , representa el error aleatorio, para el cual se asume:

- La media de ε tiene un valor cero, es decir, $E(\varepsilon) = 0$, esto implica que la media de y equivale a la componente determinística del modelo, es decir:
- $E(y) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k$
- Para toda serie de variables independiente $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$, la varianza, σ^2 , de ε no cambia.
- La distribución de probabilidad de ε se comporta de manera normal.
- Los errores asociados con los valores de y , son independientes.

El modelo de regresión se puede resolver por la vía de los mínimos cuadrados en la cual se estiman los parámetros $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ que minimizan la función objetivo:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - (b_0 + b_1 x_{i1} + b_2 x_{i2} + \dots + b_k x_{ik}))^2 \quad (28)$$

Los parámetros estimados $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$ que minimizan χ^2 , se obtienen como solución del sistema de ecuaciones lineales simultáneo:

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial b_0} = 0, \frac{\partial \chi^2}{\partial b_1} = 0, \dots, \frac{\partial \chi^2}{\partial b_k} = 0 \quad (29)$$

Al desarrollar la expresión (29) se forma un sistema de ecuaciones lineales cuya escritura se simplifica al expresarlo en forma vectorial:

$$Xb = Y, \quad (30).$$

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ 1 & x_{31} & x_{32} & \dots & x_{3k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix}$$

El vector b que contiene los estimadores de mínimos cuadrados de los coeficientes $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ del modelo lineal cuya solución se obtiene por la forma conocida:

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (31)$$

- Modelos de Regresión No Lineal. Se toman n experimentos, en los cuales se relaciona una variable dependiente y_i con m variables independientes x_i :

$$(y_i; x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{mi}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (32)$$

Sea f un modelo general que contiene k parámetros. Para el experimento i el valor de y_i predicho por el modelo f se denota \bar{y}_i :

$$\bar{y}_i = f(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi}; \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k) = f_i \quad (33)$$

De acuerdo con la ecuación (33), existe un conjunto de valores de β que permite reproducir de manera adecuada el conjunto de valores y_i por parte del modelo matemático f_i , con el correspondiente error. Se puede proponer un modelo de regresión:

$$y_i = f_i + \varepsilon_i \quad (34)$$

De forma equivalente a la regresión lineal se postula una solución por mínimos cuadrados al minimizar la función error dada por:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (35)$$

En la expresión (35), \bar{y}_i , no representa una función lineal y se expande en serie de Taylor para aproximar una linealización.

El sistema de ecuaciones lineales puede ser escrito de manera matricial en la siguiente forma:

$$A_{k \times k}^{(0)} B_{k \times 1}^{(0)} = Z_{k \times 1}^{(0)} \quad (44)$$

Para las incógnitas son $\Delta b_1^{(0)}, \Delta b_2^{(0)}, \dots, \Delta b_k^{(0)}$ y donde:

$$A_{k \times k}^{(0)} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1k} \\ a_{12} & a_{22} & \dots & a_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{k1} & a_{k1} & \dots & a_{kk} \end{bmatrix} \quad a_{ij} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_i} \right)_0 * \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_j} \right)_0 \quad B_{k \times 1}^{(0)} = \begin{bmatrix} \Delta b_1^{(0)} \\ \Delta b_2^{(0)} \\ \dots \\ \Delta b_k^{(0)} \end{bmatrix}$$

$$Z_{k \times 1}^{(0)} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_k \end{bmatrix} \quad z_j = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, b_j^{(0)})) * \left(\frac{\partial f_i}{\partial \beta_j} \right)_0 \quad (45)$$

3.2 MÉTODO DE MARQUARDT – LEVENBERG.

Marquardt introduce una normalización a los vectores resultantes de la ecuación (44) con la desviación estándar de cada componente que evita dificultades operacionales derivadas del orden diferente de magnitud que, por lo general, presentan los parámetros de los modelos a ajustar y la dificultad de alcanzar siempre la convergencia. Los términos de la ecuación (44) se escalan:

$$A_{k*k}^{(0)*} B_{k*1}^{(0)*} = Z_{k*1}^{(0)*} \quad (46)$$

$$A_{k*k}^{(0)*} = (a_{ij}^*) = \frac{a_{ij}}{\sqrt{a_{ij} a_{ii}}}, \quad B_{k*1}^{(0)*} = (\Delta b_j^{(0)*}) = \frac{\Delta b_j^{(0)}}{\sqrt{a_{jj}}},$$

$$Z_{k*1}^{(0)*} = (z_j^*) = \frac{z_j}{\sqrt{a_{jj}^*}}$$

Además, Marquardt demuestra que si a la matriz de coeficientes $A_{k*k}^{(0)*}$ se le suma la matriz λI , dada por la expresión (47), con un número menor que 1, pero mayor a cero, se asegura la convergencia.

$$\lambda I = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda \end{bmatrix} \quad (47)$$

Marquardt propone un algoritmo iterativo esquematizado en la Figura 2 con el cual se logra una optimización de mínimos cuadrados que mejora las características del método de Gauss-Newton. El método Marquardt-Levenberg intenta reducir el valor de la función χ^2 -Chi – cuadrada- para un ajuste entre una serie de datos x_i -variable independiente -, y_i -variable dependiente- cada una de las cuales presenta desviación estándar individual y una función no lineal que depende de una serie de parámetros a -coeficientes. Cada iteración del programa arroja los mejores ajustes para el vector de parámetros y con éstos evalúa la función χ^2 en cada etapa.

El algoritmo requiere la función a ser ajustada, ya que en cada iteración también son calculados los valores ajustados de la variable dependiente y_{fit} y son evaluadas las derivadas con respecto cada parámetro ajustado.

En la primera llamada del programa lamda λ - toma un valor menor que cero y se provee el sistema con una serie de parámetros iniciales supuestos a_{guess} . Si en el paso siguiente la diferencia entre las χ^2 se vuelve más pequeña, lamda decrece en un factor de 10, en caso contrario, lamda crece en un factor de 10. Este proceso se desarrolla hasta que se logra la convergencia de χ^2 con la precisión deseada.

3.3 UN ACOUPLE DEL MODELO DE ESTIMACION DE PARAMETROS - MARQUARDT LEVENBERG - CON EL MODELO DE DEPOSITACION DE PARTICULAS.

Toda solución encontrada para el modelo de depositación de partículas en un medio poroso, ecuaciones (13) hasta (24), requiere estimar los coeficientes fenomenológicos, ecuaciones (10) hasta la (12) con los cuales, además, se caracteriza la naturaleza de los fenómenos de depositación al interior del medio.

Surge, entonces, la necesidad de simular, en laboratorio, el fenómeno de depositación para generar datos que permitan alimentar el modelo de regresión no lineal propuesto y junto con la técnica Marquard - Levenberg se logre optimizar la respuesta del modelo de depositación de partículas propuesto y estimar los coeficientes esperados. El procedimiento se compone:

- Simular, en laboratorio, el fenómeno de depositación de partículas y registrar resultados de permeabilidad medida a distintos tiempos acumulados de prueba. Es decir, asegurar datos de observaciones y_i para distintos valores de la variable regresora x_i .
- Aplicar el método de ajuste no lineal Marquardt - Levenberg para ajustar los resultados del modelo de depositación de partículas con los datos de laboratorio. El mejor ajuste, correspondiente a los estimadores de mínimos cuadrados del modelo de regresión, representa los mejores valores para los parámetros desconocidos.

Las técnicas de regresión no lineal permiten ajustar un modelo estadístico de regresión a los resultados de laboratorio, sin embargo, se evidencian dos problemas básicos al momento de querer ajustar las respuestas del modelo de depositación de partículas:

- Las técnicas de ajuste no lineal requieren una declaración explícita de la función de ajuste, función conocida f de la ecuación (33). En este caso, esta función no se tiene. En este caso la función f está representada por el grupo simultáneo de ecuaciones (13) hasta la (24). Al momento de querer evaluar la función f por el modelo de estimación estadístico se tiene que resolver el grupo de ecuaciones simultáneo completo.
- Al no contar con la función explícita f , se deduce que no se puede tener la forma de la derivada de la función respecto a los parámetros, tal como lo evidencia la ecuación (45). La matriz A de la ecuación (46) señala la necesidad de las derivadas f con respecto a cada coeficiente ó parámetro del modelo de depositación de partículas.

La falta de una forma explícita de la función a ajustar demanda una mayor complejidad computacional, debido a que se requiere evaluar las derivadas de forma numérica de acuerdo a la expresión (48):

$$\frac{\partial f(x, \beta)}{\partial \beta_1} = \frac{f(x, b_1 + \Delta b_1) - f(x, b)}{\Delta b_1} \quad (48)$$

Se necesita, entonces, evaluar el modelo de depositación para un parámetro b_i y luego invocar, de nuevo el modelo para un parámetro compuesto por $b_i + \Delta b_i$. Este proceso se repite para cada uno de los parámetros y para cada observación de laboratorio.

Metodología Propuesta para la Estimación de las Constantes ó Parámetros del Modelo de Depositación de Partículas.

- Diseñar pruebas de desplazamiento para simular, en laboratorio, los fenómenos de depositación de partículas.
- Registrar valores de Permeabilidad del medio poroso en función del tiempo..
- Asumir valores iniciales para cada una de las coeficientes del modelo de depositación de partículas de acuerdo al fenómeno simulado.
- Calcular los valores de permeabilidad del medio poroso a partir de la solución del modelo de depositación de partículas para los mismos tiempos de registro en laboratorio,
- Resolver el modelo estadístico no lineal de acuerdo al algoritmo Marquardt Levenberg y obtener los estimadores mínimos cuadrados para ajustar la respuesta del modelo de depositación de partículas con los resultados experimentales de la prueba en laboratorio.
- Una vez estimados los parámetros de las ecuaciones (13) hasta (24) se realizan pronósticos de la variación de permeabilidad del medio poroso estudiado en función el tiempo.
- Se tiene, ahora, un modelo de depositación de partículas acoplado a un modelo estadístico de regresión no lineal con el cual se puede simular los cambios en la permeabilidad de un medio poroso sometido a fenómenos de depositación.

4. UN MODELO DE DEPOSITACION DE PARTICULAS EN UN MEDIO POROSO.

Con la descripción del modelo de depositación de partículas del capítulo 2 y los desarrollos estadísticos y algorítmicos detallados en el capítulo 3 se logró configurar un modelo sistematizado en el cual se acopla una aproximación fenomenológica de flujo de partículas en medios porosos con un ajuste estadístico para simular los mecanismos de depositación de finos y su impacto sobre la capacidad de flujo de una roca productora de hidrocarburos. En adelante se denomina *Simulador Acoplado*.

Se logra desarrollar y presentar una solución sistematizada para caracterizar el fenómeno de flujo de material sólido fino en medios porosos a partir de una aproximación euleriana del fenómeno de depositación de partícula acoplada al desarrollo y solución de un modelo estadístico de regresión no lineal.

Se describe, en este capítulo, una relación de resultados obtenidos con los cuales se validan los alcances del modelo construido. Para cada prueba relacionada se tabulan las propiedades del medio poroso, propiedades de la solución utilizada e información adicional que requiere el simulador.

4.1. SIMULACION DEL FENOMENO DE DEPOSITACION EN MEDIOS POROSOS CONSTRUIDOS CON ARENA.

Dado la dificultad y el costo de diversas muestras de formaciones productoras de hidrocarburos, la mayoría de las simulaciones se realizaron con empaques de arena comprimidos a presión hidráulica.

- Simulación de la Deposición de Partículas en el EMPAQUE R1. Las características de la prueba se detallan en la Tabla 2.

Se inyecta una suspensión de CaCO₃ en salmuera a una concentración de 900 NTU, en un empaque de arena Ottawa 50/60, el proceso se realiza a tasa constante y se espera depositación superficial. El procedimiento de simulación consiste:

- Registrar los valores de permeabilidad para tiempos dados.
- Simular la prueba con el *Simulador Acoplado* para el cual se asume sólo depositación (D) superficial. Estimar los parámetros fenomenológicos.

Tabla 2. Características de la Prueba en el Empaque R1.

ITEM	Nomenclatura	UNID.	Prueba R1
CONDICIONES LABORATORIO			
ARENA	ARENA		50/60
TURBIDEZ SOLUCIÓN	Turb.	NTU	900
DIAMETRO	d	cm.	
LONGITUD DEL NÚCLEO	L	cm.	7,38
PRESIÓN DE CONFINAMIENTO	Pconf	psi	
TIEMPO FINAL DE PRUEBA	T _f	seg.	10200
TIPO DE SUSPENSIÓN	Tip. Susp.		CaCO ₃
CONCENTRACION DEL FLUIDO INYECTADO	C _{pf}	gr/cc	0,0004585
CANTIDAD DE FINOS DEPOSITADOS INICIAL	C _f	gr	0
CONCENTRACION DE FINOS EN EL MEDIO	C _o	gr/cc	0
POROSIDAD INICIAL	φ _o	%	37
PERMEABILIDAD INICIAL	K _o	D	16,667
VISCOSIDAD FLUIDO INYECTADO	μ	cP	1
DENSIDAD DEL LIQUIDO	ρ _l	gr/cc	1
DENSIDAD DE PARTICULAS	ρ _p	gr/cc	2,48
TASA DE INYECCION (CTE)	q	cc/seg.	0,592
CONDICIONES SIMULADOR			
NUMERO DE BLOQUES	N _x		21
INCREMENTO DE TIEMPO	Δt	seg.	1
PRESIÓN DE INYECCIÓN	P _{in}	atm	-
PRESIÓN EXTREMO PRODUCTOR	P _{out}	atm	1
PRESIÓN DE ARRANQUE DEL SIMULADOR	P _o	atm	1,5
MECANISMO DE DAÑO	Tip. Daño		DS
CONDICIONES DE INYECCIÓN	Cond. Iny.		q cte

- Simular la prueba con el *Simulador Acoplado* para el cual se asume sólo generación (G) insitu de finos sin depositar. Estimar los parámetros fenomenológicos.
- Simular la prueba con el *Simulador Acoplado* para el cual se asume depositación e hinchamiento (D-H). Estimar los parámetros fenomenológicos.,
- Simular la prueba con el *Simulador Acoplado* para el cual se asume depositación y generación insitu de finos. (D-G). Estimar los parámetros fenomenológicos.
- Simular la prueba con el *Simulador Acoplado* para el cual se asume depositación, generación e hinchamiento. (D-G-H). Estimar los parámetros fenomenológicos.

La Tabla 3 lista los parámetros estimados para cada simulación de acuerdo a los fenómenos de depositación de partícula asumidos..

Tabla 3. Parámetros Estimados por el *Simulador Acoplado* para los fenómenos de depositación del Empaque de Arena 1.

CONSTANTES FENOMENOLÓGICAS	D	G	D - H	D - G	D - G - H
CTES. DEPOSITACION					
k_1	0,27840	-	0,26645	0,30858	0,28548
k_2	0,01438	-	0,01718	3,55029	2,54957
$dP/dL)_{cr}$	0,06425	-	0,07044	0,07686	0,08270
CTES. GENERACION					
k_3	-	0,22459	-	0,00880	0,52593
k_4	-	0,17060	-	0,21869	0,20745
k_5	-	0,13000	-	-4,60528	0,00000
$dP/dL)_{cr}^*$	-	0,78000	-	0,72046	0,57006
σ_P^*	-	0,00000	-	0,00703	0,08091
CTES. HINCHAMIENTO					
k_6	-	-	0,99058	-	1,11429
2AB	-	-	0,00003	-	0,00029
B	-	-	0,61924	-	0,66554

La Tabla 4 compara los resultados de la respuesta del *Simulador Acoplado* para los diferentes fenómenos de depositación asumidos en comparación con los registros de permeabilidad obtenidos en laboratorio. Se puede observar el error en porcentaje obtenido para cada mecanismo de partícula simulado.

Tabla 4. Resultados obtenidos con el Simulador Acoplado para cada Mecanismo de Partícula Asumido. Empaque R1.

TIEMPO	KLAB	DEPOS	Error	DEP-HINCH		DEP-GEN		DP-GEN-HIN		GENER	
0	16.667	16.666	0.0	16.6661	0.0	16.6659	0.0	16.624	0.3	16.667	0.0
600	15.699	15.6437	0.3	15.5651	0.8	15.6165	0.5	15.2789	2.7	16.667	6.2
1200	14.758	14.6805	0.5	14.6208	0.9	14.6223	0.9	14.3289	2.9	16.667	12.9
1800	13.855	13.7734	0.6	13.7303	0.9	13.6891	1.2	13.434	3.0	16.667	20.3
2400	12.991	12.9188	0.6	12.8903	0.8	12.8127	1.4	12.5913	3.1	16.667	28.3
3000	12.164	12.1158	0.4	12.098	0.5	11.9892	1.4	11.7975	3.0	16.667	37.0
3600	11.374	11.3617	0.1	11.355	0.2	11.2389	1.2	11.0507	2.8	16.667	46.5
4200	10.623	10.6531	0.3	10.6545	0.3	10.5302	0.9	10.3695	2.4	16.667	56.9
4800	9.921	9.9943	0.7	9.996	0.8	9.8571	0.6	9.7238	2.0	16.667	68.0
5400	9.322	9.3925	0.8	9.3862	0.7	9.2233	1.1	9.1212	2.2	16.667	78.8
6000	8.816	8.8558	0.5	8.8315	0.2	8.6711	1.6	8.5734	2.7	16.667	89.1
6600	8.398	8.3925	0.1	8.3375	0.7	8.284	1.4	8.0988	3.6	16.667	98.5
7200	8.051	8.0107	0.5	7.9094	1.8	7.992	0.7	7.7095	4.2	16.667	107.0
7800	7.771	7.718	0.7	7.5521	2.8	7.7753	0.1	7.4202	4.5	16.667	114.5
8400	7.556	7.5218	0.4	7.2704	3.8	7.6624	1.4	7.2388	4.2	16.667	120.6
9000	7.409	7.4132	0.1	7.068	4.6	7.692	3.8	6.9033	6.8	16.667	125.0
9600	7.334	7.3598	0.4	6.9482	5.3	7.5148	2.5	6.7801	7.6	16.667	127.3
10200	7.331	7.3358	0.1	6.904	5.8	7.5561	3.1	6.9739	4.9	16.667	127.3
Error			0.8	5.8		3.8		7.6		127.3	

La Figura 4 muestra los resultados de la respuesta del *Simulador Acoplado* para sólo depositación en comparación con los registros de permeabilidad obtenidos en laboratorio.

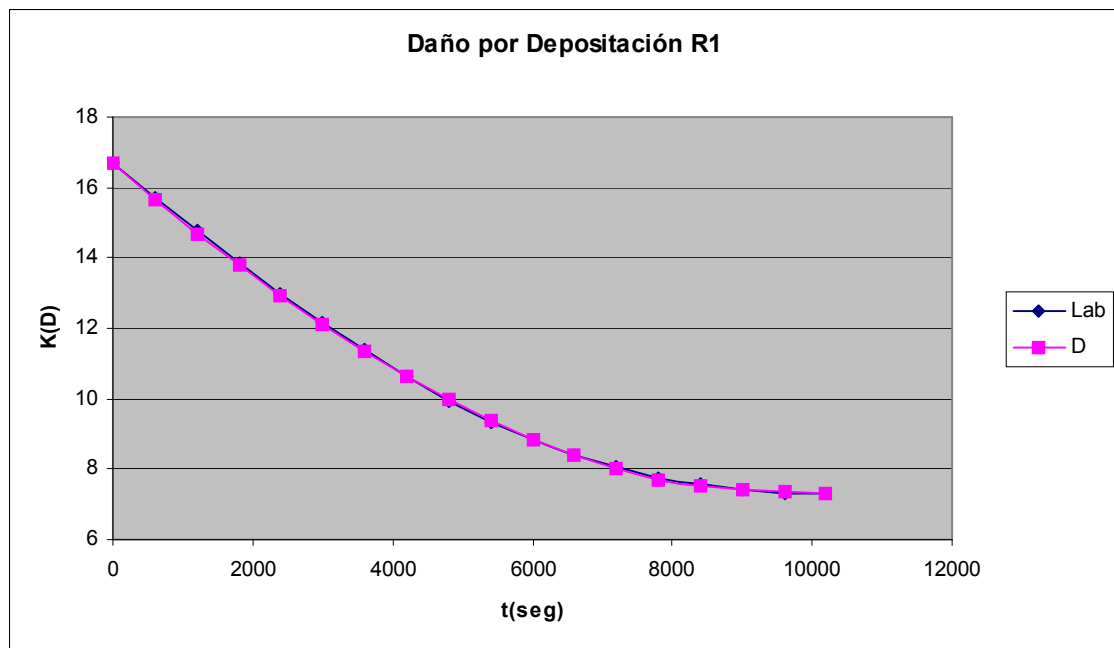


Figura 4. Comparación de la Respuesta de *Simulador Acoplado* para Depositación de Partículas con los Registros de Permeabilidad del laboratorio. Empaque R1.

La Figura 5 compara los resultados de la respuesta del *Simulador Acoplado* para los diferentes fenómenos de depositación asumidos en comparación con los registros de permeabilidad obtenidos en laboratorio.

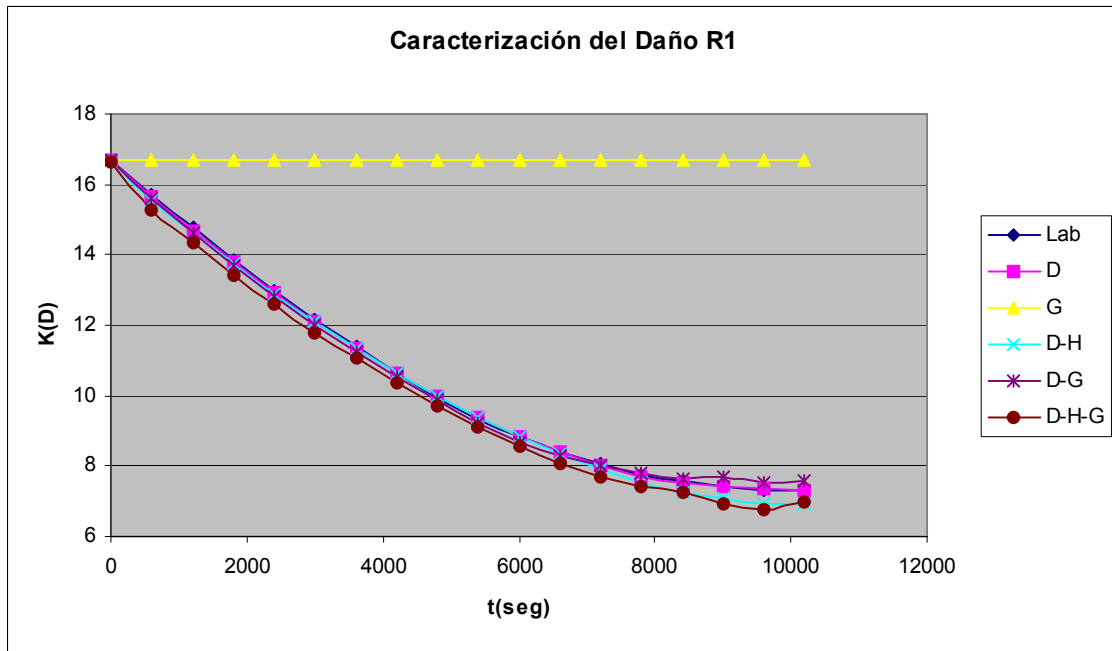


Figura 5. Comparación de la Respuesta de *Simulador Acoplado para* Distintos Fenómenos de Depositación con los Registros de Permeabilidad del laboratorio. Empaque R1

A partir del análisis de las respuestas del *Simulador Acoplado* se selecciona el Mecanismo de de Depositación Superficial como el responsable del deterioro de permeabilidad del medio. En la Figura 6 se muestra una predicción del fenómeno de depositación de partículas en el medio para un tiempo total – 24 horas – mucho mayor que el tiempo que dura la prueba – dos horas y 50 minutos.

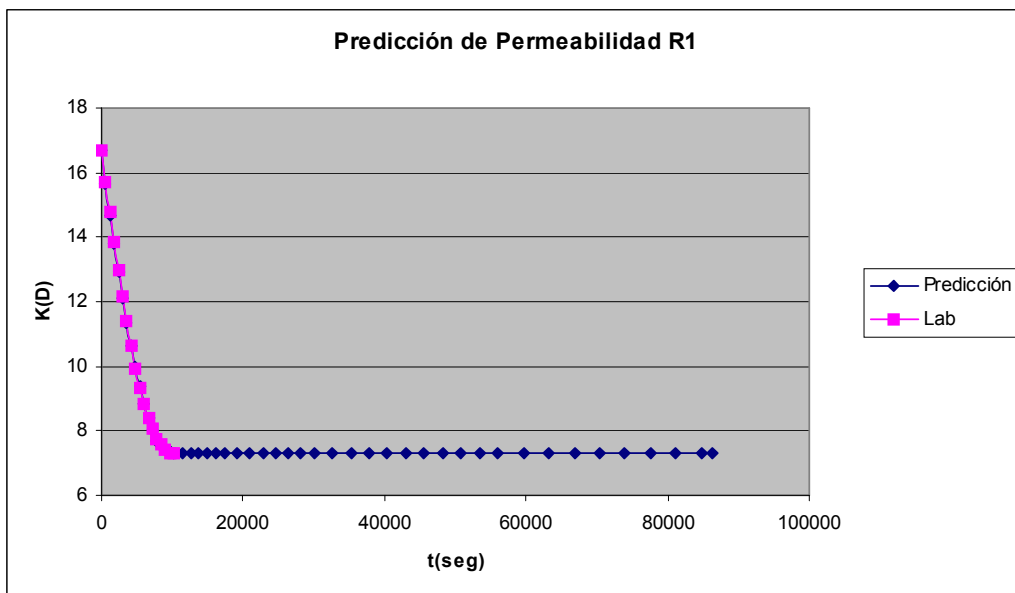


Figura 6. Pronóstico del Deterioro de Permeabilidad para el Empaque R1 obtenido con el *Simulador Acoplado*.

CONCLUSIONES.

- Se construye un modelo sistematizado en el cual se acopla una aproximación fenomenológica de flujo de partículas en medios porosos con un ajuste estadístico para simular los mecanismos de depositación de finos y su impacto sobre la capacidad de flujo de una roca productora de hidrocarburos.
- Se desarrolla y presenta una solución sistematizada para caracterizar el fenómeno de flujo de material sólido fino en medios porosos a partir de una aproximación euleriana del fenómeno de depositación de partícula acoplada al desarrollo y solución de un modelo estadístico de regresión no lineal.
- Se presenta un pronóstico de los efectos del deterioro de la capacidad de flujo de un medio poroso debido al impacto producido por el flujo de partículas finas para las condiciones experimentales en laboratorio.
- Se presenta la metodología de laboratorio y los montajes requeridos que permitan simular en laboratorio el fenómeno de flujo de partículas en medios porosos y que permitan generar los resultados experimentales necesarios para ajustar las respuestas del *Simulador Acoplado*. a las condiciones de prueba en laboratorio.

▪ CUATRO (4) COMENTARIOS.

- Los Resultados de la Simulación y los Fenómenos de Depositación de la Partícula en los Medios Porosos Estudiados.

El informe final no incluye un análisis sobre la caracterización ó diagnóstico de los fenómenos de partícula observados, en laboratorio, y simulados con el *Simulador Acoplado*. Primero, porque los medios porosos utilizados para ajustar el *Simulador Acoplado* se construyen en forma artificial con arena limpia y en ellos se fluye una solución sucia. En este caso, se descartan fenómenos de hinchamiento por absorción líquida y se descarta fenómenos de generación interna de finos por aumento de esfuerzos de corte en función de la velocidad del fluido. Así, solo permanece como relevante el fenómeno de depositación de partículas desde el fluido hacia el medio poroso y así lo muestran los resultados del simulador en las pruebas listadas en el capítulo 5. Así, el análisis de los fenómenos de partícula, en forma adrede, no se incluye como objetivo específico del estudio.

- Un análisis Estadístico sobre los Valores Estimados de los Parámetros. A diferencia de lo que puede ocurrir al aplicar un modelo estadístico de regresión no lineal para estimar los parámetros de una función definida, en este caso, los coeficientes fenomenológicos estimados a partir de los resultados de laboratorio resultan dependientes del medio, del fluido y de las condiciones de la prueba. Para el mismo medio poroso y la misma solución fluida se obtienen estimativos distintos con la variación del caudal de flujo. A su vez, por la naturaleza iterativa del ajuste, los valores estimados resultan dependientes de los valores iniciales utilizados para iniciar el ciclo de iteración. Al modificar los valores

iniciales, se pueden estimar, para la misma prueba de laboratorio, una tripleta distinta de valores con la misma calidad de ajuste anterior. Se dificulta establecer una base estadística para correlacionar los estimativos obtenidos cada vez.

- La Fuerza del Modelo Acoplado. En este estudio se logra desarrollar una solución sistematizada para un modelo de depositación de partículas en función de una serie de parámetros desconocidos. A su vez, se plantea y se resuelve un modelo estadístico de regresión no lineal cuya componente determinística lo configura el modelo diferencial completo de depositación de partículas. Se cuenta entonces con una solución sistematizada para simular los fenómenos de depositación para un medio poroso dado, una solución fluída dada, unas condiciones de flujo simuladas en laboratorio dadas y con el cual se pueden presentar pronósticos en el tiempo del impacto de los fenómenos de partículas ajustados a la respuesta, en laboratorio, del fenómeno simulado.
- La Etapa Siguiente. Continúa un estudio, no incluido, en el cual se simulen las condiciones de flujo de campo en un medio poroso real sometido al flujo de una solución real y se ajuste la respuesta de laboratorio a partir del *Simulador Acoplado* tanto para pronosticar el deterioro en el tiempo de la permeabilidad como para postular los mecanismos prevaletientes de depositación de partículas en el medio a esas condiciones controladas.

5. BIBLIOGRAFIA.

CIVAN, F., 2007. Formation Damage Mechanisms and Their Phenomenological Modeling. And Overview. U. of Oklahoma. Paper SPE 107857.

CIVAN, F., 1996 A Multi-Purpose Formation Damage Model. SPE 31101, 1996.

CIVAN, F.; KNAPP, R., OHEN, H., 1989. Alteration of Permeability by Fine Particle Processes. Journal of Petroleum Science and Engineering, 3 65–79. 1989.

CHAUVETEAU G., NABZAR L., COSTE J., 1998. Physics and Modeling of Permeability Damage Induced by Particle Deposition. SPE 39463, Institut Francais du Petrole, France.

FATT I., 1956, The Network Model of Porous Media I. Petroleum Transactions, AIME, 207, 144 - 159.

FOUNTI M., KLIPFEL A., 1998. Experimental and computational investigations of nearly dense two - phase sudden expansions flows. Experimental Thermal and Fluid Science 17 (1998) 27 – 36.

FLORES, F., RINCON, L., 1996. Procedimientos de Ensayo, Manual de Laboratorio de Análisis Petrofísicos Especiales. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Minas. 1996.

GRUESBECK, C., COLLINS, R., 1982. Entrainment and Deposition of Fine Particles in Porous Media. SPEJ, 12 847-856, 1982.

- IMDAKM A., MUHAMMAD S., 1991. Computer Simulation Of Particle Transport Processes in Flow Trough Porous Media. *Chemical Engineering Science* 46 (8) (1991), 1977 - 1993.
- LIU X., CIVAN F., 1995. Formation Damage by Fines Migration Including Effects of Filter Cake, Pore Compressibility, and Non - Darcy Flow - A Modeling Approach to Scaling From Core to Field. SPE 28980.
- LUN C.K.K. , 2000. Numerical simulation of dilute turbulent gas - solid flows. *International Journal of Multiphase Flow*. 26 (2000), 1707 - 1736.
- MAGNICO P., 2003. Hydrodynamic and transport properties of packed beds in small tube - to - sphere diameter ratio: pore scale simulation using an Eulerian and Lagrangian approach. *Chemical Engineering Science* 58 (2003), 5005 - 5024.
- MARIOS A., IOANNIS C. 1993. Network Modelling of Pore Structure and Transport Properties of Porous Media. *Chemical Engineering Science* 48 (5) (1993), 951 - 972.
- MILLÁN, E., CIVAN, F., 1992 Characterization of Formation Damage by Particle Processes. *Journal Canadian Petroleum Technology*, (31) (3). 27-33, 1992
- RUIZ M., 2003. Análisis Estadístico para la Determinación de las Constantes Fenomenológicas en el Modelo de Faruk Civan para Daño de Formaciones Petrolíferas. Universidad Nacional de Medellín, Facultad de Ciencias. 2003.
- RUIZ M., BARRETO D., CONTRERAS D., ZABALA R., 2004. Construcción de un Modelo para Caracterizar Daño por Procesos de Partícula en Formaciones Productoras. *Revista Energética. Instituto de Energía, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Medellín*. 12, 35 - 44, 2004.
- SBRIZZAI F., FARALDI P., SOLDATI A., 2005. Appraisal of Three - dimensional numerical simulation for sub-micron particle deposition in a micoro - porous ceramic filter. *Chemical Engineering Science* 60 (2005), 6551 - 6563.
- SIQUEIRA A., BONET J., SHECAIRA F., 2003. A 3D Network Model of Rock Permeability Impairment Due to Suspended Particles in Injection Water. SPE 82232.
- SOO H., RADKE J., 1985. Flow of Dilute, Stable Liquid and Solid Dispersions in Underground Porous Media. *Aiche Journal* 31 (11) 1926 - 1928.
- REGE S., FOGLER H., 1987. Network Model For Straining Dominated Particle Entrapment in Porous Media. *Chemical Engineering Science* 42 (7) (1987), 1553 - 1564.
- REGE S., FOGLER H., 1988. A Network Model for Deep Bed Filtration of Solid Particles and Emulsion Drops.. *Aiche Journal* 34 (11) 1761 - 1772.
- VITTHAL S., SHARMA M., 1988. A One - Dimensional Formation Damage Simulator for Damage Due to Fines Migration. SPE 17146.