

Estudio fluidodinámico en la inyección de nanopartículas de óxido de aluminio y de óxido de silicio para diferentes formas de poros en recobro mejorado aplicando dinámica de fluidos computacional (CFD)

Cindy Dayanna Pineda Bautista

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniera de Petróleos

Director

Germán González Silva

Ph.D. Ingeniería Química

Codirector

Natalia Prieto Jiménez

M.Sc. Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2019

*Dedico este trabajo a mi madre Ana Rosalba Bautista lo más importante de mi vida, a mi familia por su apoyo constante e incondicional y a mis amigos.*

### **Agradecimientos**

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander y a la escuela de Ingeniería de Petróleos, por mi educación integral y de calidad recibida durante mis años de formación.

Al Semillero de Nanotecnología, Modelado y Simulación Numérica Aplicada a la Industria del Petróleo perteneciente al Grupo de Modelamiento de Procesos de Hidrocarburos y al Grupo de Investigación de Energía y Medio Ambiente, y a todos sus miembros por brindarme los recursos y el apoyo para la realización de este trabajo.

Al profesor Germán González Silva, que deposito en mi la confianza, la motivación y el acompañamiento para realizar esta investigación.

A la profesora Natalia Jiménez, por el tiempo dedicado y el apoyo constante en todas las etapas de desarrollo del proyecto.

A mis compañeros de Universidad por tantas experiencias y momentos compartidos, en especial a Alejandro y Edna, los cuales me acompañaron y apoyaron durante todo este viaje y formamos grandes y duraderos lazos.

**Tabla de Contenido**

Introducción .....	8
1. Objetivos .....	15
1.1 Objetivo General .....	15
1.2 Objetivos Específicos .....	15
2. Revisión bibliográfica .....	16
2.1 Recobro Mejorado .....	16
2.2 Nanofluidos .....	22
2.3 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) .....	24
3. Modelos matemáticos .....	26
3.1 Estado transitorio .....	26
3.2 Modelo de flujo multifásico .....	27
3.3 Ecuaciones constitutivas .....	27
3.3.1. Ecuación de continuidad .....	27
3.3.2. Ecuación de conservación de cantidad de movimiento .....	28
3.3.3. Fracción volumétrica de la segunda fase .....	29
3.3.4. Velocidad relativa .....	29
3.4 Métodos numéricos .....	30
4. Metodología computacional .....	32
4.1 Identificación del problema .....	33

4.2 Pre-procesamiento .....	34
4.2.1 Geometría.....	34
4.2.2. Malla .....	37
4.2.3. Modelos matemáticos .....	44
4.2.4. Sustancias.....	44
4.2.5. Condiciones de frontera. ....	46
4.2.6. Condiciones del estado transitorio .....	46
4.3 Solver.....	46
4.4 Post-procesamiento.....	47
5. Análisis de resultados .....	47
5.1 Test de independencia de malla.....	48
5.2 Comparación del modelo.....	52
5.3 Análisis de la inyección del nanosílice.....	55
5.4 Análisis de la inyección de nanoaluminio .....	62
6. Conclusiones.....	70
7. Recomendaciones .....	71
Referencias bibliográficas.....	73

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Errores respecto a la porosidad de las diferentes placas.....	36
Tabla 2. Rango de valores de oblicuidad.....	40
Tabla 3. Valores de oblicuidad para las diferentes placas.....	41
Tabla 4. Rango de valores para la ortogonalidad.....	43
Tabla 5. Valores de ortogonalidad para las diferentes placas.....	43
Tabla 6. Propiedades de los fluidos utilizados en las simulaciones.....	45

## Lista de Figuras

<i>Figura 1.</i> Comportamiento de los factores de recuperación típicos en sus diferentes etapas de recobro..	17
<i>Figura 2.</i> Presión contra la eficiencia de recobro de los diversos mecanismos de empuje.....	18
<i>Figura 3.</i> Proceso típico de recobro secundario..	19
<i>Figura 4.</i> Efecto de la digitación viscosa conocida en inglés como viscous fingering..	21
<i>Figura 5.</i> Esquema general de un proceso de recobro mejorado.....	22
<i>Figura 6.</i> Vista microscópica de la distribuciones de saturaciones iniciales con diferentes morfologías de poros.....	24
<i>Figura 7.</i> Modelo de simulacion de flujo de nanofluidos.....	25
<i>Figura 8.</i> Conservación en un elemento discretizado.....	31
<i>Figura 9.</i> Diagrama de flujo de la metodología CFD.....	33
<i>Figura 10.</i> Vista del plano principal con las características generales de la geometría en la placa A.....	34
<i>Figura 11.</i> Configuraciones de grano utilizadas. A. Circulos en un arreglo rectangular. B.Circulos intercalados. C. Granos irregulares.....	36
<i>Figura 12.</i> Vista de los diferentes tipos de mallado dependiendo de la geometria de los granos que conforman la placa.....	38
<i>Figura 13.</i> Formas de las celdas con los diferentes valores de oblicuidad.....	39
<i>Figura 14.</i> Vectores usados para determinar el valor de la ortogonalidad.....	42
<i>Figura 15.</i> Lineas utilizadas en la geometria A para el test de mallas.....	49

<i>Figura 16.</i> Resultados de la presión a lo largo de las dos líneas seleccionadas de la geometría A. .....	50
<i>Figura 17.</i> Test de mallas para la geometría A.....	51
<i>Figura 18.</i> Test de malla para la geometría B. ....	52
<i>Figura 19.</i> Comparación de los resultados simulados de la inyección de nanosílice en las diferentes placas con los resultados experimentales. ....	53
<i>Figura 20.</i> Comparación de los resultados simulados de la inyección de nanoaluminio en las diferentes placas con los resultados experimentales.....	54
<i>Figura 21.</i> Contornos de fracción volumétrica de la inyección de nanosílice en la placa A.....	56
<i>Figura 22.</i> Contornos de Presión de la inyección de nanosílice en la placa A.....	57
<i>Figura 23.</i> Contornos de fracción volumétrica de la inyección de nanosílice en la placa B.....	59
<i>Figura 24.</i> Contornos de Presión de la inyección de nanosílice en la placa B.....	60
<i>Figura 25.</i> Contornos de fracción volumétrica de la inyección de nanosílice en la placa C.....	61
<i>Figura 26.</i> Contornos de Presión de la inyección de nanosílice en la placa C.....	62
<i>Figura 27.</i> Contornos de fracción volumétrica de la inyección de nanoaluminio en la placa A..	64
<i>Figura 28.</i> Contornos de Presión de la inyección de nanoaluminio en la placa A.....	65
<i>Figura 29.</i> Contornos de fracción volumétrica de la inyección de nanoaluminio en la placa B..	66
<i>Figura 30.</i> Contornos de Presión de la inyección de nanoaluminio en la placa B. ....	67
<i>Figura 31.</i> Contornos de fracción volumétrica de la inyección de nanoaluminio en la placa C..	68
<i>Figura 32.</i> Contornos de Presión de la inyección de nanoaluminio en la placa C.....	69

### Nomenclatura

<b>Símbolo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Unidad</b>
$\alpha$	Fracción volumétrica	
$\rho$	Densidad	<b><math>kg/m^3</math></b>
$u$	Velocidad	<b><math>m/s</math></b>
$\Gamma$	Tasa de generación de masa	
$\mu$	Viscosidad	<b><math>kg/m^3</math></b>
$p$	Presión	<b><math>Pa</math></b>
$\tau$	Tensor viscoso promedio	
$g$	Gravedad	<b><math>m/s^2</math></b>
$M$	Momento interfacial promedio	
VPI	Volúmenes Porosos Inyectados	
CFD	Dinámica de fluidos computacional	
$\theta$	Ángulo	

## Resumen

**TITULO:** ESTUDIO FLUIDODINÁMICO EN LA INYECCIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ALUMINIO Y DE ÓXIDO DE SILICIO PARA DIFERENTES FORMAS DE POROS EN RECOBRO MEJORADO APLICANDO DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD). \*

**AUTOR:** CINDY DAYANNA PINEDA BAUTISTA. \*\*

**PALABRAS CLAVE:** Nanofluidos, EOR, Nanotecnología, Óxido de sílice, Óxido de aluminio, Modelamiento CFD.

### DESCRIPCIÓN:

Las operaciones de recobro mejorado en la industria de los hidrocarburos ayudan a aumentar la vida productiva del yacimiento y elevar el porcentaje de aceite recuperado, pero por lo general son muy costosas y presentan desafíos técnicos por las duras condiciones de los yacimientos. La aplicación de nanotecnología en estos procesos ha mostrado ventajas, por lo tanto, en este trabajo se estudia el comportamiento fluido dinámico en la inyección de dos nanofluidos con partículas de óxido de sílice y óxido de aluminio en recobro mejorado utilizando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Se determinan las propiedades de los fluidos y las geometrías de grano a utilizar en el modelamiento computacional para recrear los procesos de inyección de los nanofluidos en medios porosos. El modelamiento matemático, las condiciones de frontera y las condiciones de operación general de la simulación son determinados en base a la literatura. Los resultados se comparan con los datos experimentales obtenidos de la inyección de nanofluidos en una placa porosa; y se determina por medio de los contornos de fracción volumétrica de las diferentes placas que para la misma geometría independiente del nanofluido utilizado, presenta una tendencia específica de canales de flujo, con diferencia en los valores finales de recobro hasta del 10%. El nanosílice en todas las geometrías presenta una digitación viscosa moderada, mientras que el nanoaluminio presenta, de manera general para todas las geometrías, un frente de inyección más estable y eficiente.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Germán González Silva. Ph.D. Ingeniero químico. Codirector: Natalia Prieto Jiménez. M.Sc. Ingeniera química.

### Abstract

**TITLE:** FLUID-DYNAMIC STUDY OF THE ENHANCED RECOVERY BY ALUMINUM OXIDE AND SILICA OXIDE NANOPARTICLES INJECTION THROUGH DIFFERENT PORE ARRAYS APPLYING CFD.\*

**AUTHOR:** CINDY DAYANNA PINEDA BAUTISTA.\*\*

**KEYWORDS:** Nanofluids, EOR, Nanotechnology, Silica oxide, Aluminum oxide, CFD.

### DESCRIPTION:

The Enhanced Oil Recovery (EOR) in the industry of the hydrocarbons, is the responsible of expand productive life of field and increase the oil recovery, but, in general, this operation is high cost and it has technical challenges on the reservoir. The application of nanotechnology on EOR shown be favorable, therefore, this investigation studies the fluid dynamics behavior in the injection of two nanofluids with particles of silica oxide and aluminum oxide on EOR using Computational Fluids Dynamics (CFD). The properties of the fluids and grain geometries to be used in computational modeling are determined to recreate the injection processes of the nanofluids. The mathematical modeling, the boundary conditions and the general operating conditions of the simulation are determined. The results are compared with the experimental data and analyze the contours of volumetric fraction of the different geometries and independent of the nanofluid used, presents a specific tendency of flow channels, and for this reason, they show final values of recovery with a difference of 10%. The nanosilica in all the geometries presents a moderate viscous fingering, while the nanoaluminium presents for all the geometries stable and efficient injection front.

---

\* Engineering thesis

\*\* Faculty of Physicalchemical Engineering. Petroleum Engineer School. Director: Germán González Silva. Ph.D. Chemical Engineering. Codirector: Natalia Prieto Jiménez. M.Sc. Chemical Engineering.

## Introducción

El factor de recobro de los yacimientos a nivel mundial por métodos de recobro primario y secundario está alrededor de un 30%, por lo tanto, es importante el estudio e implementación de nuevos métodos de recobro mejorado. La nanotecnología ha dado indicios de ser una alternativa que mejora las condiciones del yacimiento y del fluido para obtener un mayor factor de recobro.

Se han realizado numerosos estudios sobre la aplicación de la nanotecnología y el efecto que tiene sobre las propiedades del yacimiento, el crudo y el fluido desplazante, pero aún no son suficientes ya que hay gran cantidad de combinaciones posibles de nanofluidos, lo cual hace extensiva la investigación en este campo, una alternativa es la implementación de herramientas como CFD.

La Dinámica Computacional de Fluidos, (Computational Fluid Dynamics - CFD), es una herramienta que estudia el comportamiento fluido-dinámico de sistemas, se solucionan las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento, continuidad y energía, a través de métodos numéricos. Esta herramienta ha cobrado importancia en la industria de los hidrocarburos ya que nos permite el diseño de equipos, diagnóstico de procesos y estudio del comportamiento de los fluidos por medio de visualizaciones multidimensionales ahorrando tiempo y dinero en experimentación.

En el presente trabajo se implementa CFD para simular el comportamiento en un medio poroso de las nanopartículas de óxido de aluminio y óxido de silicio, combinadas con agua como fase dispersante, y la manera en que la morfología del medio puede afectar la eficiencia en la recuperación de petróleo.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Realizar el estudio 2D del comportamiento fluidodinámico de la inyección de dos nanofluidos para diferentes configuraciones de poros en recobro mejorado utilizando CFD.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Definir las propiedades fisicoquímicas de las nanopartículas y el fluido de inyección con datos reportados en la literatura.

Definir las morfologías bidimensionales de diferentes tipos de poros del yacimiento a ser analizados.

Estudiar el comportamiento fluidodinámico de los nanofluidos para cada tipo de poro en el yacimiento.

Determinar la influencia que tienen las nanopartículas en las propiedades reológicas del fluido base de inyección, a partir del modelamiento con CFD.

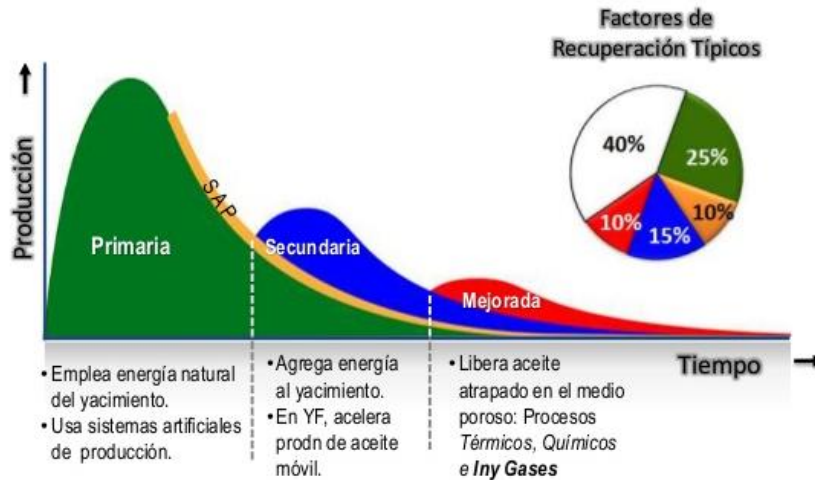
## 2. Revisión bibliográfica

En este capítulo se realiza una descripción de los diferentes métodos de recobro, se hace énfasis en la inyección de agua y su importancia en la industria de los hidrocarburos. Además, se describen las características de los nanofluidos, las ventajas y los diversos estudios que se han realizado en torno a las nanopartículas de interés. Por último, se menciona como herramientas computarizadas como CFD ayudan en el estudio y el desarrollo de procesos de inyección en medios porosos.

### 2.1 Recobro Mejorado

Un yacimiento pasa por varias etapas de producción durante su vida útil, la duración de cada una de ellas lo determina las características del yacimiento, la tasa de producción y los precios del crudo vigentes. En la figura 1 se muestran de manera general las etapas de producción de un yacimiento.

La producción de aceite asociada con la energía natural del yacimiento se denomina recobro primario y varía dependiendo del mecanismo que esté presente. En términos generales se clasifican como: Empuje de agua, empuje por gas en solución, empuje por capa de gas, drenaje gravitacional, expansión roca-fluido o una combinación de los anteriores. En la figura 2 se observan los mecanismos de empuje primario y cuál es el porcentaje de recobro promedio de cada uno (Paris de Ferrer, M, 2009).



*Figura 1.* Comportamiento de los factores de recuperación típicos en sus diferentes etapas de recobro. Adaptado de Global CCS Institute (2015).

Algunos yacimientos presentan acuíferos, los cuales proporcionan una fuente natural de energía que ayuda en la recuperación de aceite por medio del mecanismo de desplazamiento de fluidos ayudado de expansión de fluidos y drenaje gravitacional. Cuando el yacimiento no presenta un acuífero la producción primaria se da principalmente por el mecanismo de expansión de fluidos. Los fluidos en expansión pueden ser gas en solución, gas libre, agua o una combinación de los anteriores.

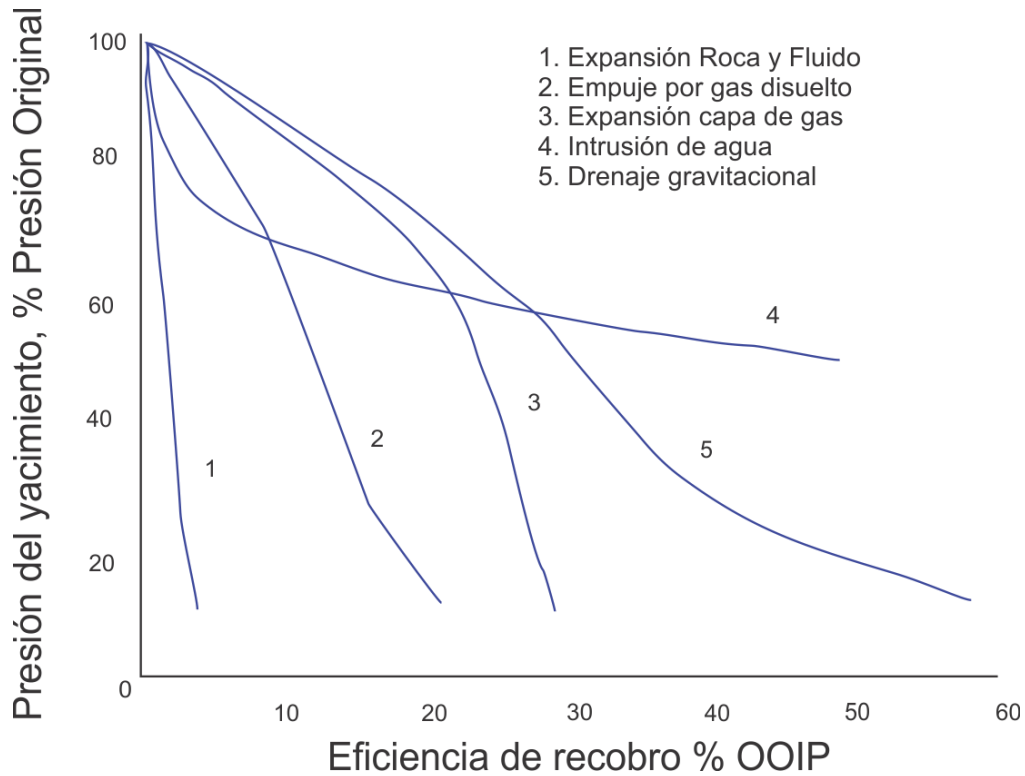


Figura 2. Presión contra la eficiencia de recobro de los diversos mecanismos de empuje.

Adaptado de Paris de Ferrer (2009).

Al transcurrir un tiempo debido a la producción del pozo, la presión en el yacimiento comienza a decaer y llega a un punto en que el diferencial de presión no es suficiente para llevar los fluidos a superficie y se hace necesaria la implementación de sistemas de levantamiento artificial.

La recuperación por medio de sistemas de levantamiento artificial se considera como un recobro primario ya que no se realiza ninguna intervención a nivel de yacimiento. Los sistemas de levantamiento artificial funcionan principalmente disminuyendo la presión en fondo de pozo para aumentar el diferencial de presión y permitir que la energía sea suficiente para que lleguen los fluidos a superficie.

Algunos de estos mecanismos son: bombeo mecánico, bombeo electro sumergible, bombeo hidráulico tipo pistón y tipo jet, bombeo por cavidades progresivas y gas lift; algunas veces se combinan para aumentar su eficiencia.

El porcentaje de recuperación por medio del recobro primario varía dependiendo de los mecanismos de empuje y de las características del yacimiento y se encuentra alrededor del 10% al 15% del petróleo inicial en sitio (Salager, 2005).

El recobro primario llega a su final cuando alcanza su límite económico, es decir que la tasa de producción sea insuficiente para mantener el proyecto rentable o que produzca grandes volúmenes de agua y gas que aumenten el costo de separación y tratamiento. El porcentaje de recobro primario por lo general es bajo, por lo tanto, se recomienda iniciar tempranamente un recobro secundario en el pozo, que consiste en la inyección de componentes, pero sin alterar de alguna manera física o química los fluidos o la roca en el yacimiento (George J. Stosur, J. Roger Hite, Norman F. Carnahan, y Karl Miller, 2003). Los procesos de recuperación secundaria son: inyección de gas o inyección de agua como se muestra en la figura 3.



*Figura 3.* Proceso típico de recobro secundario. Adaptado de Lyons, Plisga, y Lorenz (2016).

Estos métodos buscan mantener el diferencial de presión y lo logran por medio de pozos inyectoros, que introducen los fluidos y una vez en el yacimiento desplazan o arrastran parte del crudo hacia los pozos productores.

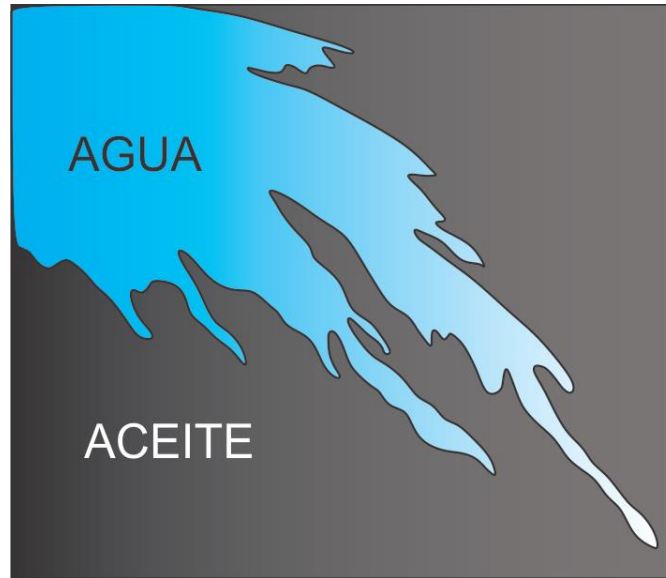
La más utilizada es la inyección de agua, pero hay que realizar estudios previos que comprueben la compatibilidad del agua a inyectar con el agua connata, ya que pueden reaccionar y presentar precipitaciones de inorgánicos, que ocasionan la reducción de porosidad y taponamiento en el yacimiento. La mojabilidad, la presión capilar y la permeabilidad son las propiedades más importantes que afectan la efectividad de la inyección de agua en el yacimiento.

Hay factores que son importantes a la hora del diseño de una operación de inyección de agua, como la distribución y espaciamiento entre pozos inyectoros y productores, las saturaciones presentes en el yacimiento y las diferentes eficiencias de barrido.

La relación de movilidad es la más importante ya que define la facilidad relativa con la cual los fluidos se moverán en el medio poroso y se define como:

$$M = \frac{\lambda_D}{\lambda_a} = \frac{\text{Movilidad de la fase desplazante}}{\text{Movilidad de la fase desplazada}} \quad (1)$$

La movilidad depende de la permeabilidad y de la viscosidad del agua y del petróleo, si esta relación es mayor a uno se presenta un fenómeno conocido como digitación viscosa el cual se observa en la figura 4, y produce que disminuya considerablemente la efectividad del barrido en el yacimiento.



*Figura 4.* Efecto de la digitación viscosa conocida en inglés como viscous fingering.  
Adaptado de Lyons et al. (2016).

El porcentaje de recuperación por medio del recobro secundario eleva el promedio de recuperación al 25% - 30% (Salager, 2005). Eso quiere decir que queda en el yacimiento aún, un gran porcentaje de crudo que puede ser recuperado. Los métodos de recobro mejorado buscan aumentar la eficiencia de desplazamiento mediante la reducción de fuerzas capilares utilizando solventes, la reducción de la viscosidad del crudo mediante el calentamiento o el aumento de la viscosidad del agua adicionando polímeros hidrosolubles (Salager, 2005). La figura 5 muestra un esquema general de un proceso de EOR y las técnicas más conocidas para el recobro mejorado son: recobro químico, inyección de gas o hidrocarburo y recobro térmico.

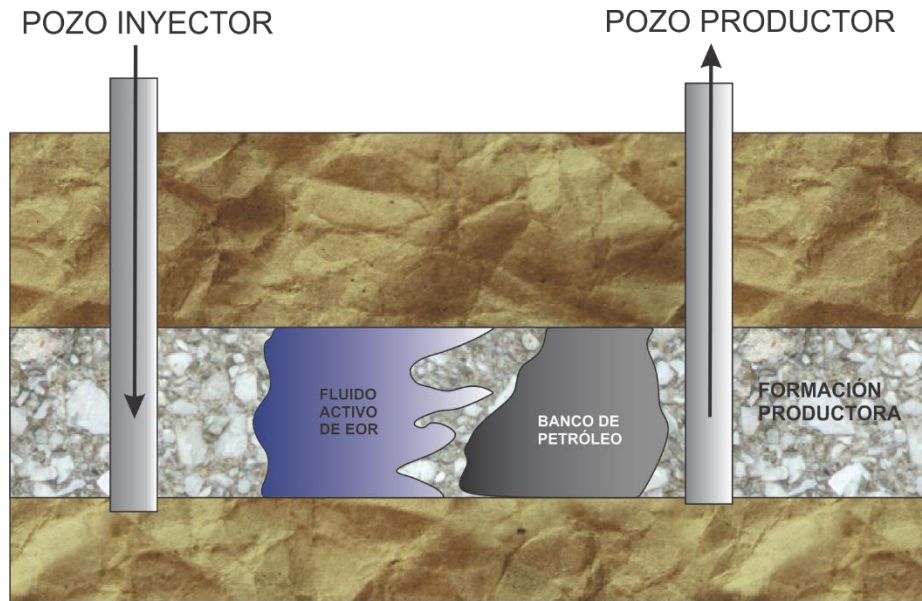


Figura 5. Esquema general de un proceso de recobro mejorado. Adaptado de Lyons et al. (2016).

## 2.2 Nanofluidos

Los nanofluidos están conformados por nanopartículas (partículas con un tamaño menor a 100 nanómetros) dispersas en un fluido base; las nanopartículas dependiendo de su forma y tamaño mejoran las propiedades ópticas, térmicas, eléctricas, magnéticas y reológicas del fluido (Suleimanov, Ismailov, y Veliyev, 2011). El descubrimiento y explotación de yacimientos no convencionales ha presentado desafíos en el campo de recobro mejorado debido a las condiciones especiales que presentan estos yacimientos. La inyección de *surfactante* aumenta la viscosidad del fluido desplazante lo cual proporciona más fuerza de empuje y mejora las cantidades de aceite recuperadas, pero presenta problemas al cambiar sus propiedades cuando se expone a condiciones extremas.

Las nanopartículas debido a su tamaño y forma permite que se puedan mover con facilidad a través de las gargantas de poro en el yacimiento, por lo tanto los nanofluidos pueden ser transportados a través de yacimientos con diversas permeabilidades, adicionalmente presentan poca retención en las paredes de los poros (Rodriguez Pin, E., Roberts, M., Yu, H., Huh, C., y Bryant, S. L., 2009).

Las ventajas de los nanofluidos han llevado a que se realicen diversos estudios y aplicaciones en el área de la medicina, la industria y la energía. En los últimos años la industria del petróleo ha volcado su interés a implementar la nanotecnología, y su aplicación abarca fluidos de perforación, fluidos de fracturamiento, nanoemulsiones, inhibidores de corrosión, control de migración de finos durante la producción, recobro mejorado, reducción de la viscosidad en crudos pesados, y la liberación de metano a partir de hidratos (Fakoya y Shah, 2017).

Una de las nanopartículas más estudiadas en la industria del petróleo es la de silicio, ya que actualmente es usada en procesos de cementación de pozos, estabilidad de emulsiones, fluidos de perforación, fluidos de fracturamiento y recobro mejorado. Algunas nanopartículas de sílice tienen la capacidad de alterar la humectabilidad de la roca (Onyekonwu y Ogolo, 2010). En aceites livianos los nanofluidos reducen la tensión interfacial, ángulo de contacto de fase de aceite y altera la mojabilidad (Li, S., Hendraningrat, L., y Torsaeter, O, 2013). Otra nanopartícula que se ha estudiado es la de aluminio que aumenta la viscosidad del fluido desplazante y ayuda a exceder las fuerzas capilares por medio del cambio en la humectabilidad y la tensión interfacial entre el aceite y el agua (Zaid, Radzi, Latiff, y Shafie, 2014).

El uso de nanopartículas en el área de recobro mejorado (EOR) contribuye al aumento de la eficiencia de desplazamiento y disminuye la saturación residual de aceite en el yacimiento, lo cual permite una mayor recuperación de aceite. Estudios variando condiciones de humectabilidad

y diferentes estructuras de porosidad han demostrado que la forma de los poros afecta la eficiencia de recuperación del aceite cuando se realiza inyección de polímeros, como se ilustra en la figura 6.

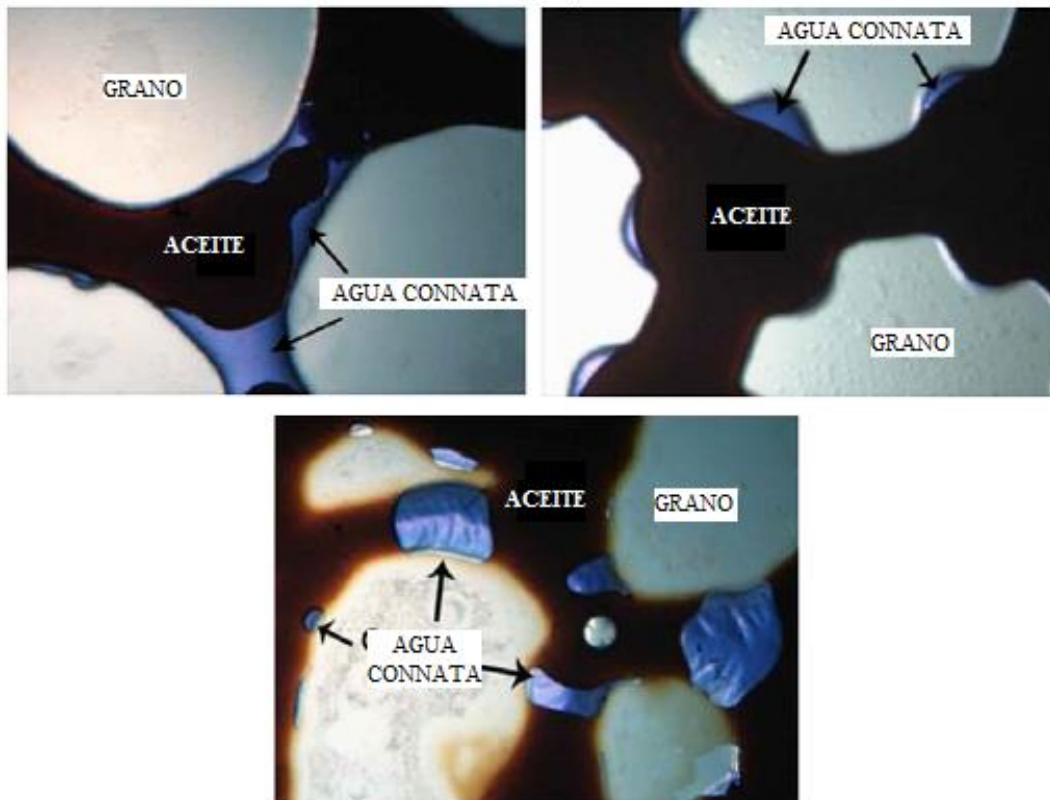


Figura 6. Vista microscópica de la distribuciones de saturaciones iniciales con diferentes morfologías de poros. Adaptado de Emami-Meybodi et al. (2011).

### 2.3 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

El desarrollo de la Dinámica de Fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD) comenzó en los años 50 con el desarrollo de la primera generación de computadoras, pero desde principios del siglo 20 se empezaron a desarrollar los métodos numéricos que permiten la

solución de ecuaciones diferenciales parciales en general. CFD recientemente ha adquirido gran importancia en diferentes industrias ya que por medio de la dinámica de fluidos y simulación térmica ayuda a predecir el comportamiento, rendimiento y ayuda a optimizar procesos (Chung, 2010).

La dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se utiliza cada vez más en la industria del petróleo y gas. Es empleada para la simulación y optimización de procesos y de equipos en refinería y estudiar el comportamiento de los fluidos y la termodinámica. En el ámbito de yacimientos los últimos años se han desarrollado diversos trabajos para estudiar el comportamiento fluidodinámico dentro de pequeñas muestras. La figura 7 nos demuestra un modelo muy simple de un *plug* para la inyección de nanofluidos.

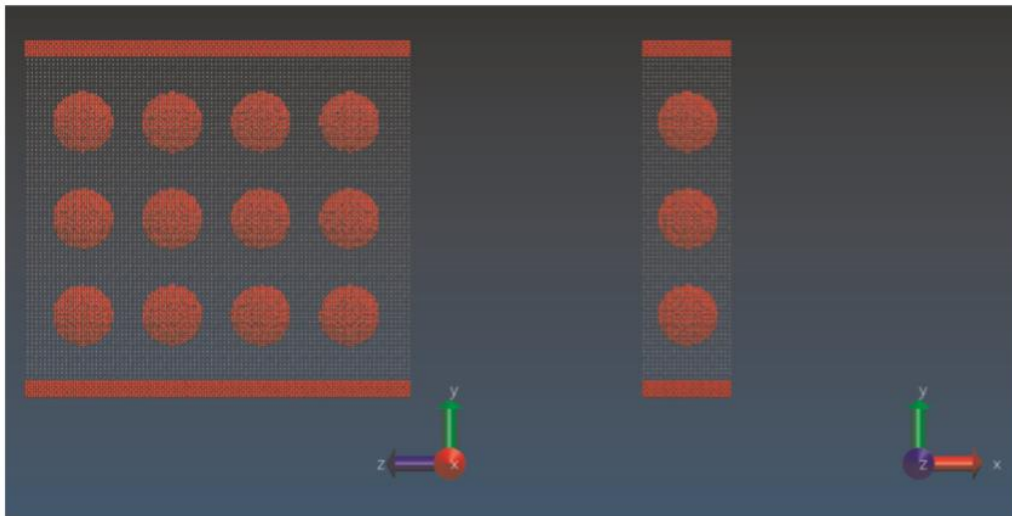


Figura 7. Modelo de simulación de flujo de nanofluidos. Adaptado de Cui, Shen, Yang, y Wu (2015).

### **3. Modelos matemáticos**

Los modelos matemáticos relacionan situaciones concretas las cuales podemos expresarlas de forma matemática a través de fórmulas y relaciones. La importancia de los modelos matemáticos radica en que cuando se aplica el modelo adecuado se puede recrear el fenómeno físico con precisión, por esta razón es importante el uso de herramientas computacionales como CFD, el cual nos permite resolver estas ecuaciones diferenciales parciales por medio de métodos numéricos para cada elemento del dominio (Chung, 2010).

En este capítulo se muestran las diferentes ecuaciones que conforman el modelo matemático y los métodos numéricos utilizados.

#### **3.1 Estado transitorio**

En el actual trabajo se considera la simulación en estado transitorio ya que se desea ver el movimiento del fluido a través del medio poroso y este depende de un caudal que a su vez depende del tiempo. El estado transitorio a diferencia del estado estable tiene en cuenta el tiempo, ya que en el estado estable se considera el tiempo como infinito, en cambio el estado transitorio se resuelve cada paso de tiempo y el número de pasos lo define el autor de la simulación por lo cual es un tiempo finito.

### 3.2 Modelo de flujo multifásico

El modelo de flujo multifásico que maneja CFD, nos permite modelar diferentes regímenes de flujo conformados por líquido, gas y sólidos. Para el presente trabajo se utilizan varios fluidos, los cuales son crudos, nanofluidos en base acuosa los cuales se definen como un agua mejorada, y un pseudocomponente conformado por aceite y salmuera.

El modelo es el que permite modelar el comportamiento, en este caso se establece que se tiene velocidades diferentes para las fases y la fracción volumétrica de la fase dispersa supera el 10% del total de la mezcla el proceso se considera isotérmico.

### 3.3 Ecuaciones constitutivas

El modelo matemático permite resolver las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento, fracción volumétrica de la segunda fase y velocidad relativa, para la mezcla compuesta por n-fases (fluido o partículas). A continuación, se profundiza matemáticamente en cada uno de los principios fundamentales del modelo.

**3.3.1. Ecuación de continuidad:** La ecuación de continuidad para cada fase k se describe como (González S, 2012):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k) + \nabla(\alpha_k \rho_k u_k) = \Gamma_k \quad (2)$$

Se suman las n fases y obtenemos la ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k u_k) = \sum_{k=1}^n \Gamma_k \quad (3)$$

Donde podemos definir la densidad y la velocidad de la mezcla como:

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (4)$$

$$u_m = \frac{1}{\rho_m} \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k u_k \quad (5)$$

Y considerando que la masa total se conserva es decir no se tiene una tasa de generación de masa para todas las fases se obtiene que:

$$\sum_{k=1}^n \Gamma_k = 0 \quad (6)$$

Por lo tanto, la ecuación de continuidad para el modelo de mezcla se expresa como:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m u_m) = 0 \quad (7)$$

**3.3.2. Ecuación de conservación de cantidad de movimiento:** La ecuación de conservación de cantidad de movimiento para cada fase k se define como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k u_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k u_k u_k) = -\alpha_k \nabla p_k + \nabla [\alpha_k (\tau_k + \tau_{T_k})] + \alpha_k \rho_k g + M_k \quad (8)$$

Reemplazando la ecuación por la definición de densidad y velocidad de mezcla se tiene en cuenta que la viscosidad de la mezcla se expresa como:

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (9)$$

Por lo tanto, la ecuación de conservación de cantidad de movimiento para el modelo se expresa como:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_m u_m + \nabla \cdot (\rho_m u_m u_m) = -\nabla p_m + \nabla (\tau_m + \tau_{T_m}) + \nabla \tau_{D_m} + \rho_m g + M_m \quad (10)$$

**3.3.3. Fracción volumétrica de la segunda fase:** La ecuación de fracción volumétrica de la segunda fase p, se define como:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p) + \nabla (\alpha_p \rho_p u_m) = -\nabla (\alpha_p \rho_p u_{dr,p}) + \sum_{q=1}^n (\dot{m}_{qp} - m_{pq}) \quad (11)$$

**3.3.4. Velocidad relativa:** Se define como la velocidad relativa de la segunda fase respecto a la fase primaria y se expresa de la siguiente manera:

$$u_{pq} = u_p - u_q \quad (12)$$

La velocidad de difusión de una fase es causada por la diferencia de densidades, y resulta en fuerzas adicionales que son balanceadas debido a la fuerza de arrastre (Manninen, Taivassalo, y Kallio, 1996).

### **3.4 Métodos numéricos**

La Dinámica de Fluidos Computacional, es una herramienta que estudia el comportamiento fluidodinámico de sistemas, solucionando las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento, continuidad y energía, a través de diversos métodos numéricos.

Los métodos utilizados en CFD son a menudo, el método de diferencias finitas (FDM), método de elementos finitos (FEM) y método de volúmenes finitos (FVM). Para el presente trabajo se utiliza el método de volúmenes finitos para transformar las ecuaciones diferenciales parciales a un sistema algebraico de ecuaciones.

El método de volúmenes finitos consiste en dos pasos, primero la ecuación diferencial parcial es integrada y transformada en una ecuación de balance sobre un elemento; después los perfiles de interpolación son seleccionados para aproximar el comportamiento de las variables dentro del elemento y relacionar los valores de la superficie con los valores correspondientes en cada celda, de esta manera, se transforma una relación en una ecuación algebraica (Atul Sharma, 2016).

El método de discretización se obtiene integrando la ecuación de transporte. La forma general es descrita en la ecuación 13 y la figura 8, muestra de forma gráfica los términos de la ecuación de transporte (González S y Prieto J, 2012).

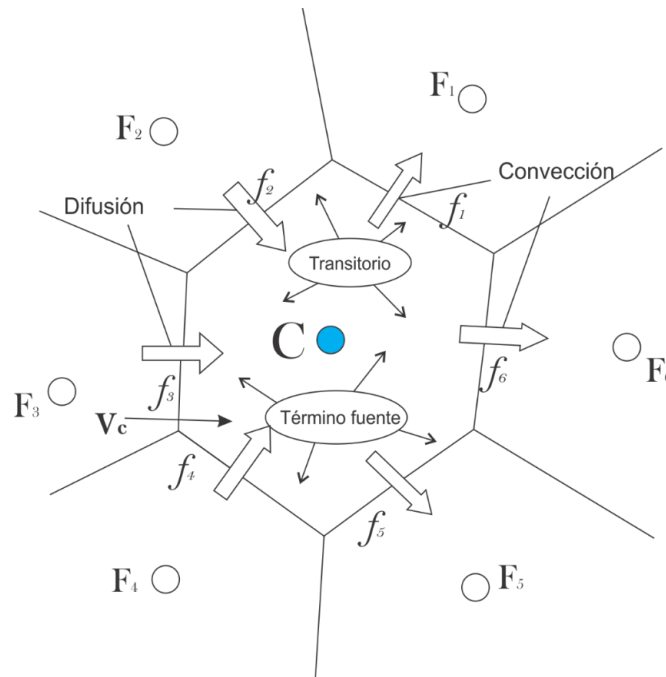


Figura 8. Conservación en un elemento discretizado. Adaptado de Moukalled, Mangani, y Darwish (2016).

Para la discretización del dominio, después que las ecuaciones se integran sobre los elementos, se aplica el teorema de Gauss, el cual convierte las integrales de volumen de los términos de convección y difusión en integrales de superficie las cuales se integran numéricamente mediante el uso de puntos de integración (Moukalled et al., 2016).

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}}_{\text{Término transitorio}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho v_{\phi})}_{\text{Término convectivo}} = \underbrace{\nabla \cdot (\Gamma^{\phi} \nabla \phi)}_{\text{Término de difusión}} + \underbrace{Q^{\phi}}_{\text{Término Fuente}} \quad (13)$$

La ecuación de transporte no estacionaria para un volumen  $V$  se muestra a continuación (Prieto Jiménez, 2011).

$$\int_v \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint \rho_{\phi} u \cdot dA = \oint \Gamma_{\phi} \nabla \phi \cdot dA + \int_v s_{\phi} dV \quad (14)$$

#### 4. Metodología computacional

Las simulaciones desarrolladas en CFD, tienen una metodología basada en cuatro etapas principales. La primera etapa consiste en la identificación del problema, la segunda en el pre-procesamiento lo cual incluye la creación de geometría, malla y modelos físicos, la tercera es el solver y depende de la complejidad del caso a estudiar y los resultados que se desean obtener y por último el post-procesamiento el cual consiste en analizar toda la información obtenida del solver. La figura 9 ilustra el proceso en que se basa la metodología.

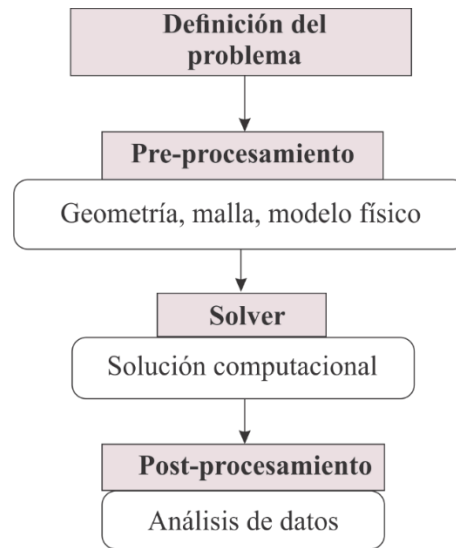


Figura 9. Diagrama de flujo de la metodología CFD. Adaptado de Jaimes Prada (2015).

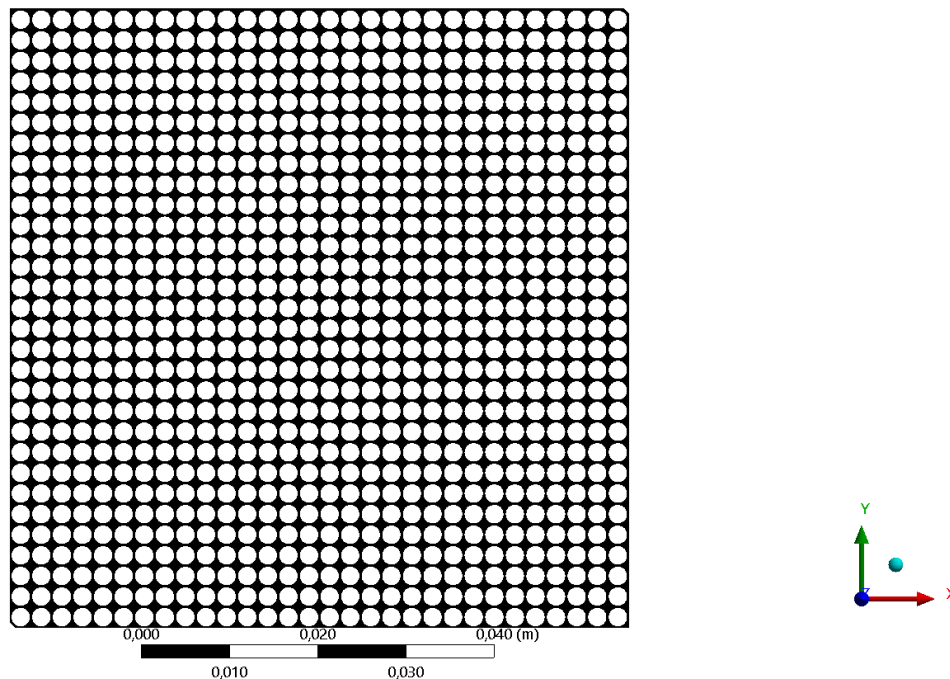
#### 4.1 Identificación del problema

El presente trabajo estudia el comportamiento fluidodinámico en la inyección de nanofluidos en un medio poroso, y como afecta la morfología del medio poroso la eficiencia de desplazamiento. Para tal fin se plantea el estudio en la inyección de dos nanofluidos que consisten en óxido de sílice y óxido de aluminio y tres morfologías diferentes las cuales son propuestas por Emami-Meybodi et al., (2011). En el caso de la inyección de óxido de sílice el medio poroso se encuentra saturado totalmente del crudo Azadegan (Maghzi, Mohammadi, Ghazanfari, Kharrat, y Masihi, 2012). En el caso de la inyección de óxido de aluminio el medio poroso se encuentra saturado con salmuera irreducible al 0,4 y el resto está lleno de crudo Arabian Heavy (Zaid et al., 2014). De esta manera se observa el comportamiento y las diferencias que implica tener diferentes morfologías y diferentes fluidos de inyección.

## 4.2 Pre-procesamiento

Es la primera fase de la simulación, que inicia con la creación de la geometría, con la cual definimos el dominio, posteriormente se realiza la discretización por medio de la malla. Finalmente se definen los modelos matemáticos, las propiedades de los fluidos, las condiciones de frontera y las condiciones del modelo transitorio.

**4.2.1 Geometría:** La creación de la geometría se realiza por medio de un programa de diseño, en el cual crea la placa de dimensiones 0,07x0,07 m (Mohammadi et al., 2013) y el modelamiento de los diferentes tipos de grano, en la figura 10, se observa la geometría de la placa con la configuración de poros A.

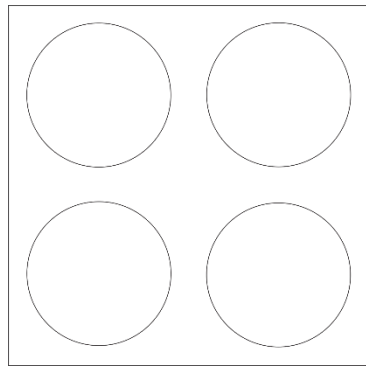


*Figura 10.* Vista del plano principal con las características generales de la geometría en la placa A.

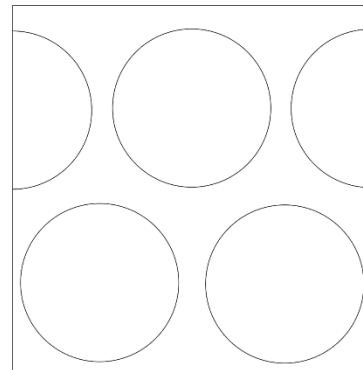
La construcción de la geometría se basa en un modelo antes implementado (Dezfully, Jafari, y Gharibshahi, 2015) y se utiliza para la inyección de los dos nanofluidos y cumple los siguientes parámetros:

- Todos los granos se encuentran totalmente dentro del dominio de la placa.
- El radio y la cantidad total de granos se definen con el propósito que todas las placas cuenten con una porosidad aproximada del 33%.
- El tamaño de entrada y salida de la placa se define en función al tamaño de grano.
- Al considerar una geometría en 2D no se define un espesor en la placa, sin embargo, el software asigna uno muy pequeño automáticamente para poder realizar el enmallado.

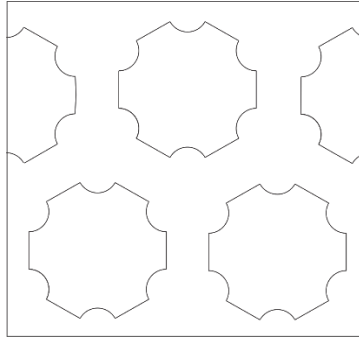
Las diferentes morfologías son presentadas por Emami-Meybodi et al., (2011), en este trabajo se trabaja con tres diferentes formas de poros las cuales se ilustran en la figura 11.



A



B



C

*Figura 11.* Configuraciones de grano utilizadas. A. Círculos en un arreglo rectangular. B. Círculos intercalados. C. Granos irregulares.

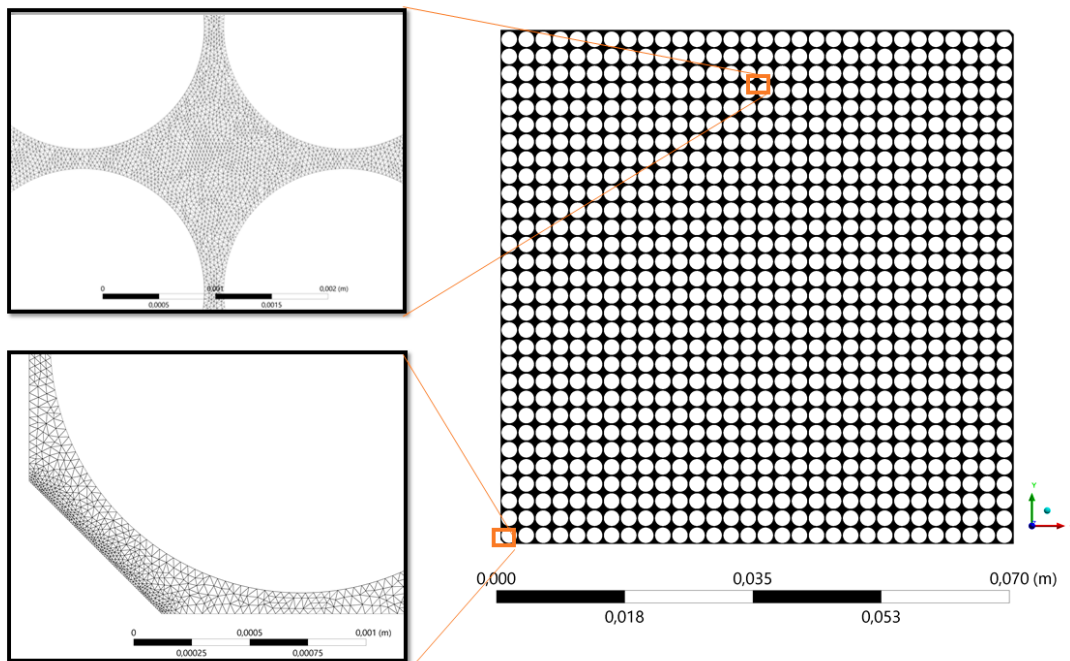
La distribución, el tamaño de grano y la cantidad de granos garantizan que las diferentes geometrías mantengan un rango de porosidad aceptable. En la Tabla 1 se encuentran los valores de error de las diferentes geometrías respecto al valor de la porosidad.

Tabla 1.

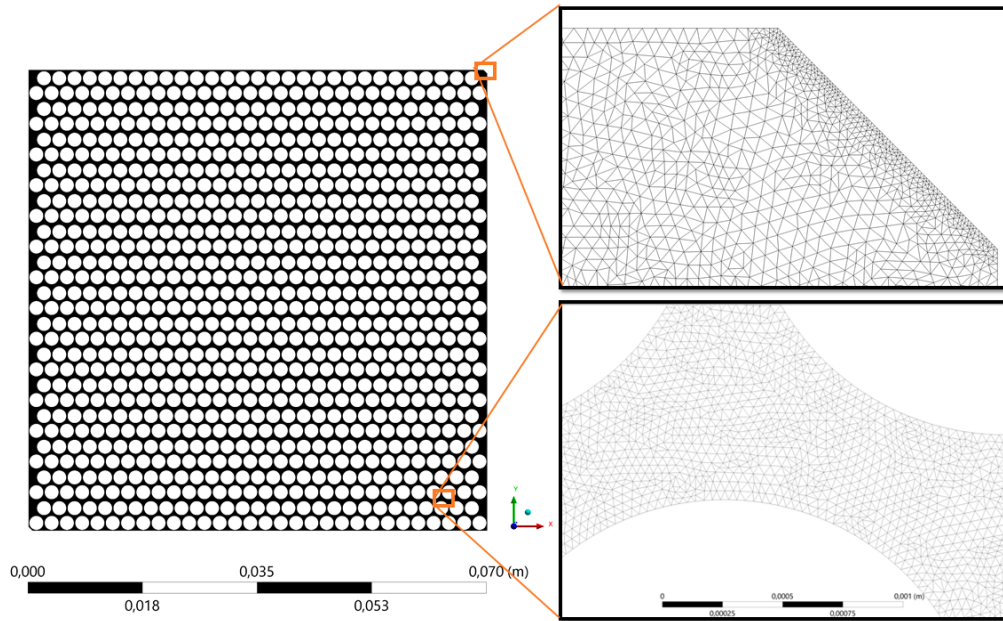
Errores respecto a la porosidad de las diferentes placas.

<b>Geometría</b>	<b>Porosidad [%]</b>	<b>Error absoluto</b>	<b>Error relativo [%]</b>
<b>A</b>	32,6	0,00940	0,94
<b>B</b>	34,1	0,03568	3,56
<b>C</b>	31,9	0,03135	3,13

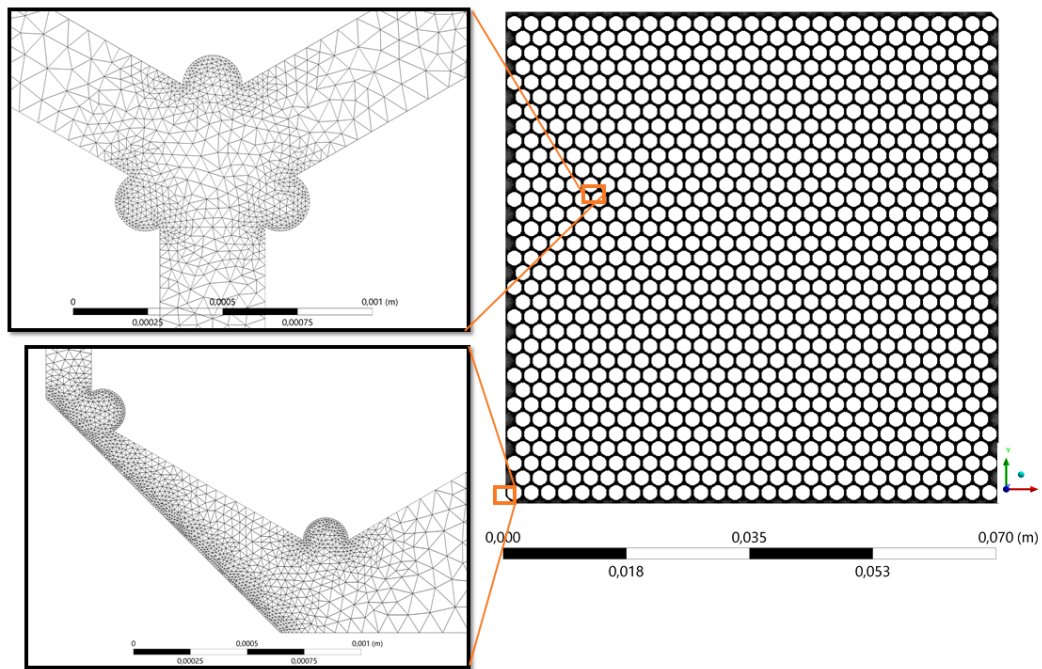
**4.2.2. Malla:** La creación de la malla se realiza por medio del programa Meshing, todas las geometrías utilizaron los mismos principios como discretizar el cuerpo por el método de todos los triángulos y se reducir el tamaño de las celdas en la salida y entrada de la placa. Al tratarse de una geometría que no es muy grande en su forma general, se manejan tamaño de mallas muy finos en general que van desde  $9,8 \times 10^{-6}$  hasta  $3,5 \times 10^{-5}$ . La figura 12 muestra el mallado en el interior de la placa y en las zonas de transición de la entrada y salida con el cuerpo de la placa.



A. Mallado en la salida de la placa A



B. Vista del mallado en el interior de la placa B



C. Vista del mallado en la entrada y la transición al interior de la placa C

Figura 12. Vista de los diferentes tipos de mallado dependiendo de la geometría de los granos que conforman la placa

Para garantizar la calidad de la malla se tienen varios parámetros a tener en cuenta como la calidad del elemento, cálculo del aspecto de radio para triángulos, radio jacobiano, factor *wrapping*, desviación paralela, ángulo máximo de la esquina, la oblicuidad y la ortogonalidad. En este caso se hará énfasis en los dos últimos.

**4.2.2.1. La oblicuidad:** Este parámetro determina que tan cerca esta cada celda de la forma ideal (triángulo equilátero o cuadrado equiangular). De acuerdo con la definición de oblicuidad, un valor de 0 indica una celda equilátera (mejor calidad) y un valor de 1 indica una celda completamente degenerada. La figura 13 muestra las formas más usadas de celdas y su configuración al tener un alto y bajo valor de oblicuidad. Las celdas con un valor de oblicuidad por encima de 1 no son válidas.

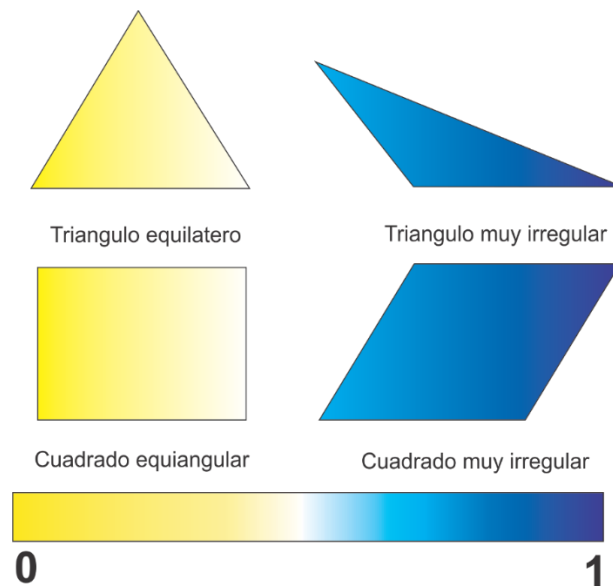


Figura 13. Formas de las celdas con los diferentes valores de oblicuidad. Adaptado de Moukalled, et al. (2016)

Para determinar el valor de la oblicuidad se utiliza el método basado en la desviación de un ángulo equilátero normalizado. Este método se aplica a todas las celdas y caras. La Tabla 2 muestra los valores posibles, de esta manera se obtiene una referencia para analizar este parámetro.

En el método de desviación de ángulo normalizado, la oblicuidad se define como

$$\text{máx} \left[ \frac{\theta_{\max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{\min}}{\theta_e} \right] \quad (15)$$

Dónde:

$\theta_{\max}$ = ángulo más grande en la celda

$\theta_{\min}$ = ángulo más pequeño en la celda

$\theta_e$ = ángulo para una celda equiangular (60 para un triángulo, 90 para un cuadrado)

Tabla 2.

Rango de valores de oblicuidad.

<b>Oblicuidad</b>	<b>Calidad</b>
<b>0,9 - 1</b>	Mala
<b>0,75 - 0,9</b>	Pobre
<b>0,5 - 0,75</b>	Razonable
<b>0,25 - 0,5</b>	Buena
<b>0 - 0,25</b>	Excelente

La oblicuidad de cada celda será el valor máximo calculado, pero considerando que la cantidad de celdas es muy elevada, el software muestra tres resultados; el valor promedio, el valor máximo y el valor mínimo de oblicuidad de todas las celdas. La Tabla 3 registra todos los tres valores de oblicuidad para cada geometría. Para analizar en detalle este parámetro el software permite conocer de manera gráfica el porcentaje de celdas que corresponde a cada valor de oblicuidad.

Tabla 3.

Valores de oblicuidad para las diferentes placas.

<b>Geometría</b>	<b>Número de elementos</b>	<b>Valor máximo de oblicuidad</b>	<b>Valor mínimo de oblicuidad</b>	<b>Valor promedio de oblicuidad</b>
<b>A</b>	2'810.668	0,721	$5,8106 \times 10^{-7}$	0,125
<b>B</b>	3'031.119	0,759	$5,8151 \times 10^{-9}$	0,116
<b>C</b>	3'263.113	0,767	$9,6022 \times 10^{-9}$	0,133

**4.2.2.2. Ortogonalidad:** La calidad de la ortogonalidad se calcula utilizando los diversos vectores que relacionan cada celda con las celdas adyacentes tal como se muestra en la figura 14.

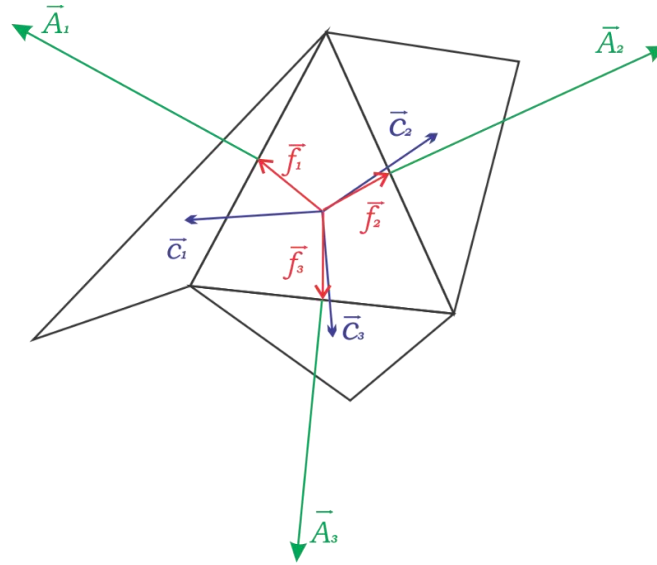


Figura 14. Vectores usados para determinar el valor de la ortogonalidad. Adaptado de Moukalled, et al. (2016).

Donde:

$\vec{A}_i$  = Vector normal de cara

$\vec{f}_i$  = Vector del centroide de la celda al centroide de la cara

$\vec{c}_i$  = Vector del centroide de la celda al centroide de la celda adyacente

Para la mayoría de las celdas la calidad reportada de ortogonalidad es el máximo de las cantidades anteriores calculadas para cada cara. La Tabla 4 enumera el rango de valores de ortogonalidad y la calidad de celda correspondiente. Al igual que con el parámetro de oblicuidad el programa arroja tres resultados de ortogonalidad para cada geometría, los cuales son reportados en la Tabla 5.

Tabla 4.

Rango de valores para la ortogonalidad.

<b>Ortogonalidad</b>	<b>Calidad</b>
<b>0 – 0,001</b>	Inaceptable
<b>0,001 – 0,14</b>	Mala
<b>0,15 – 0,20</b>	Aceptable
<b>0,20 – 0,69</b>	Buena
<b>0,70 – 0,95</b>	Muy bueno
<b>0,95 – 1</b>	Excelente

Tabla 5.

Valores de ortogonalidad para las diferentes placas.

<b>Geometría</b>	<b>Número de elementos</b>	<b>Valor máximo de ortogonalidad</b>	<b>Valor mínimo de ortogonalidad</b>	<b>Valor promedio de ortogonalidad</b>
<b>A</b>	2'810.668	1	0,529	0,922
<b>B</b>	3'031.119	1	0,471	0,929
<b>C</b>	3'263.113	1	0,444	0,918

El número total de elementos óptimos se determina mediante el test de independencia de malla el cual consiste en aumentar progresivamente el número de elementos y cuantificar una determinada variable en un mismo tiempo y lugar de la simulación hasta que el resultado se estabilice. En el capítulo 0 se muestran los resultados del test de malla para las placas.

**4.2.3. Modelos matemáticos:** El modelo matemático utilizado para estudiar el comportamiento fluidodinámico en un medio poroso es el flujo multifásico y las ecuaciones que lo constituyen se encuentran detalladamente en el capítulo 0 del presente trabajo.

**4.2.4. Sustancias:** Para recrear los modelos físicos se utilizaron cinco fluidos, que corresponden a dos crudos, dos nanofluidos y una salmuera, las propiedades de todos los fluidos utilizados están detallados en la Tabla 6.

En este trabajo se utilizan dos fluidos los cuales están compuestos por nanopartículas de sílice y aluminio al 4 y al 1 porcentaje en peso en base acuosa. Para calcular las propiedades de estos nanofluidos se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\rho_{nf} = \varphi \times \rho_p + (1 - \varphi) \times \rho_{bf} \quad (16)$$

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} \times \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_m}\right)^{-n\varphi_m} \quad (17)$$

La ecuación empírica para la obtención de la viscosidad de nanofluidos (Mahbubul, Saidur, y Amalina, 2012) nos permite utilizar cualquier fracción volumétrica de nanopartículas. Donde  $n$

es la viscosidad intrínseca, que normalmente se evalúa como una suspensión mono dispersa de esferas duras y tiene un valor de 2,5 y  $\phi_m$  es la fracción máxima de empaquetado de partículas, y varia de 0,495 a 0,54 bajo condiciones de reposo y toma un valor aproximado de 0,605 con altos caudales, en este trabajo se manejan caudales muy pequeños por lo tanto se tomara un valor de 0,5 para esta variable (Gharibshahi, Jafari, Haghtalab, y Karambeigi, 2015).

El crudo que se utiliza para el caso de Óxido de Sílice es el del campo Azadegan ubicado en el norte de Irán, y para el caso de Óxido de Aluminio se utiliza el crudo Arabian Heavy de Arabia Saudita y una salmuera (Francke y Thorade, 2010) los cuales se encuentra saturando el medio poroso inicialmente.

Tabla 6.

Propiedades de los fluidos utilizados en las simulaciones.

<b>Fluido</b>	<b>Densidad [Kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Viscosidad [kg/m-s]</b>
<i>Salmuera</i>	1150	0,0012
<i>Arabian Heavy</i>	887	0,041
<i>Óxido de Aluminio</i>	1007,1	0,00158
<i>Azadegan</i>	933	0,87
<i>Óxido de Sílice</i>	1020,8	0,001046

**4.2.5. Condiciones de frontera:** Las condiciones de frontera son definidas para la entrada, la salida y las paredes de la placa. En este caso para la entrada se tiene una condición de velocidad la cual se obtiene por medio del caudal utilizado en las pruebas experimentales, para el caso del óxido de sílice se tiene un caudal de  $0,0008 \text{ cm}^3/\text{min}$  y para el óxido de aluminio  $1 \text{ cm}^3/\text{min}$  para la salida se tiene una condición de presión, y para las paredes se utiliza la condición de no deslizamiento (*No slip*).

**4.2.6. Condiciones del estado transitorio:** El estado transitorio se definió a partir de los datos experimentales reportados en la literatura, ya que depende del caudal y del área porosa a inyectar, con respecto a estos dos parámetros podemos definir el tamaño y el número total de pasos.

En las simulaciones en estado transitorio se recomienda un tamaño de paso de  $0,001 \text{ s}$ , el cual se aplica en la inyección de óxido de aluminio, pero en la simulación de óxido de sílice debido al tiempo que tardaría en simular por el caudal tan pequeño, se ha aumentado el tamaño de paso a  $0,5 \text{ s}$ , el cual considerando el número total de iteraciones y de pasos da un resultado representativo.

### 4.3 Solver

La solución al modelo computacional se realiza por medio que da solución a las ecuaciones a través del método de los volúmenes finitos el cual se profundiza en la sección 3.3. El tiempo de

modelamiento varia ya que depende del número de iteraciones, el número de pasos, la complejidad del modelo, el tamaño de la malla entre otros.

Las simulaciones presentadas en este trabajo, tienen un tiempo de solución computacional aproximado de una semana cada una y se desarrollaron en un computador *HP ProDesk 600 G4 SFF con procesador Intel Core i7-8700 3,2GHz, con capacidad RAM de 8GB*, equipo perteneciente al Grupo de Modelamiento de Procesos de Hidrocarburos, adscrito a la escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander y al Grupo de Investigación de Energía y Medio Ambiente de Ingeniería Mecánica ; el cual desarrolla una amplia investigación acerca de la inyección de diferentes tipos de nanofluidos en medios porosos.

#### **4.4 Post-procesamiento**

Esta etapa permite la visualización de las variables de interés, para verificar el comportamiento fluidodinámico del sistema, el programa tiene herramientas que permiten crear graficas xy, líneas de flujo, contornos, tablas, animaciones y un reporte detallado de todo el proceso. En el capítulo 0 se encuentran los resultados de las simulaciones y su correspondiente análisis.

### **5. Análisis de resultados**

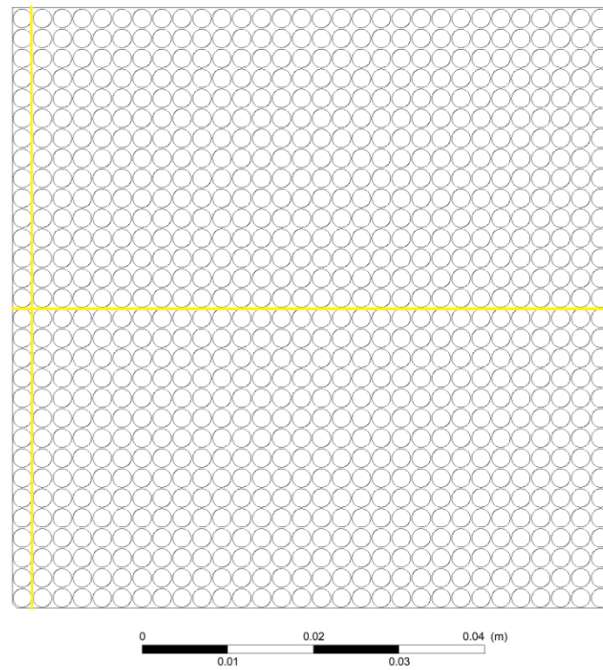
En el presente capítulo se presentan los resultados de las simulaciones y el análisis a las diferencias de configuraciones y como afecta el flujo en el medio poroso. *En primer lugar se*

*realizó un test de mallas, el cual nos permite saber la densidad de malla adecuada, para que la simulación sea representativa. Luego se compara los resultados de las simulaciones con los resultados experimentales, y se analiza la variación en el comportamiento fluidodinámico al variar la configuración de los poros.*

### **5.1 Test de independencia de malla**

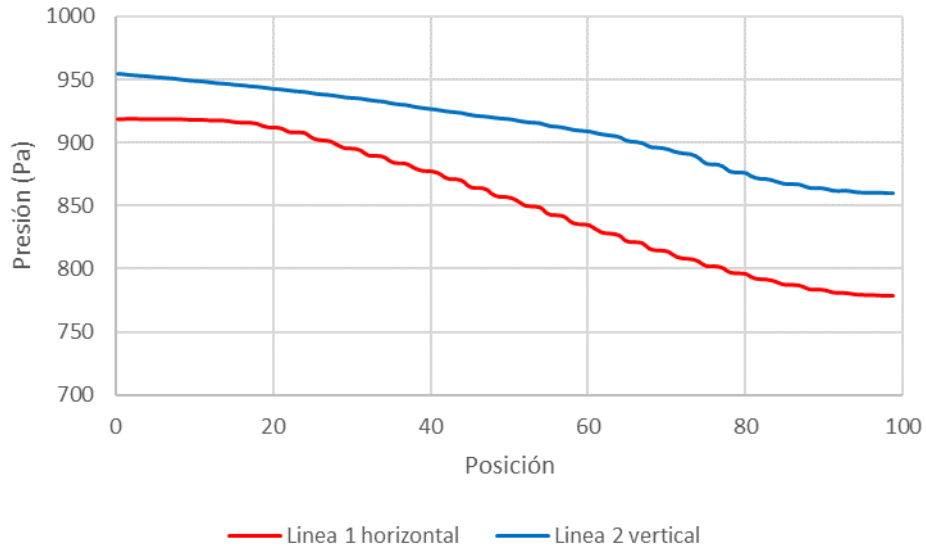
Se realiza el test de malla se seleccionan dos líneas dentro de la geometría y se toman los datos de presión sobre esta línea a un determinado tiempo. El test se inicia con pocos números de elementos, y *crece a razón de 1,5* hasta que los datos de presión presenten una estabilización y sean independientes de la cantidad de elementos, se considera que a mayor número de elementos se requiere mayor costo computacional, se determina el tamaño de malla el cual no comprometa la calidad de los resultados, pero tampoco requiera tiempo computacional excesivo.

Para la geometría A, se trazan dos cortes como se muestran en la Figura 15 la línea 1 se ubica en la mitad de la placa de manera horizontal, y la línea 2 se encuentra de manera vertical cerca al margen izquierdo de la placa, se procede a simular un intervalo de tiempo el cual permite crear una gráfica de la variable de preferencia en función de la posición.



*Figura 15.* Líneas utilizadas en la geometría A para el test de mallas.

Por el tipo de comportamiento continuo que presenta la presión se selecciona esa variable para graficar como se muestra en la figura 16, posteriormente se elige un punto en la distribución de la placa en donde se observa el valor, de esta manera se realiza el mismo procedimiento para cada malla creada, y se comparan los resultados.



*Figura 16.* Resultados de la presión a lo largo de las dos líneas seleccionadas de la geometría A.

La figura 17, presenta una tendencia de estabilización a partir de los 2,5 millones de elementos para las dos líneas estudiadas, se determina que la malla que contiene 2'810.668 elementos será utilizada para la simulación.

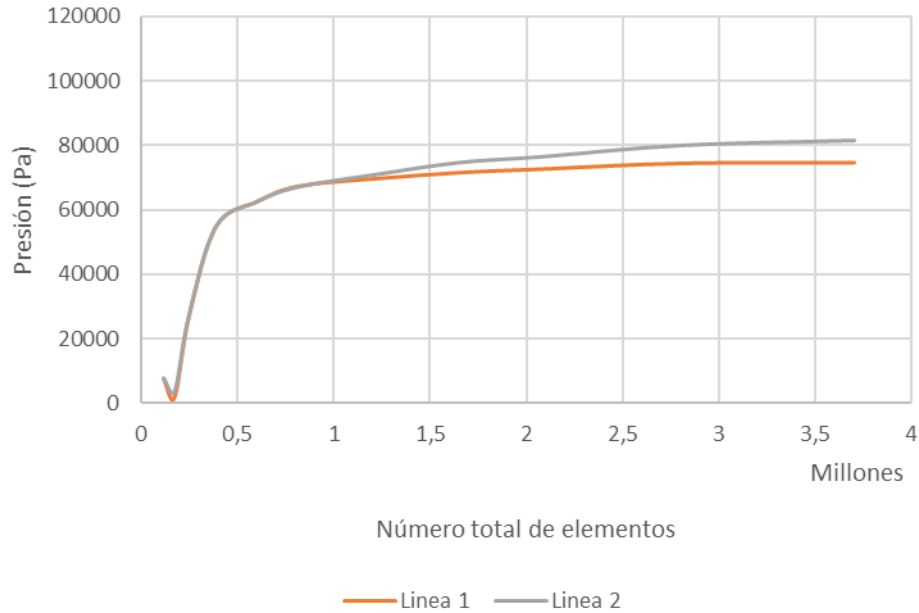


Figura 17. Test de mallas para la geometría A.

Para la geometría B, se realiza el mismo procedimiento y los resultados están representados en la figura 18, en donde se observa que la tendencia a la estabilización aparece después de los 2,5 millones de elementos, por lo tanto se selecciona la malla que contiene 3'031.119 millones de elementos. Debido a que las placas tienen las mismas características geométricas se determina que para la geometría C, se aplica el mismo rango para la estabilización por lo tanto se utiliza una malla que contiene 3'263.113 millones de elementos.

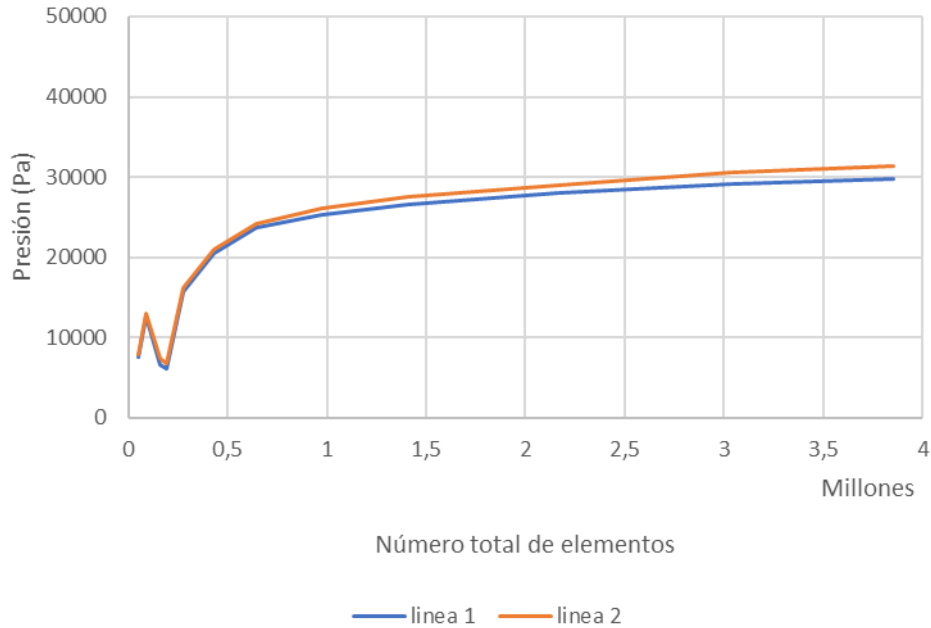


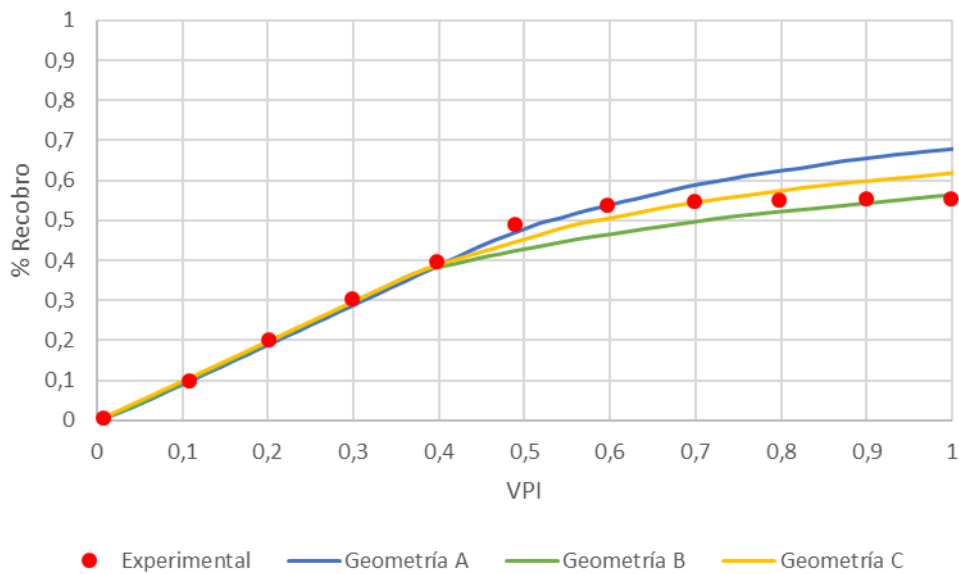
Figura 18. Test de malla para la geometría B.

Los resultados del test de mallas revelan que por encima de los dos millones quinientos mil elementos (2'500.000) se tiende a estabilizar el resultado de la presión, y aunque la tendencia no sea totalmente horizontal en las mallas más grandes, el gasto computacional del enmallado de este tamaño supera las 24 horas, y aumentar la cantidad de elementos en la malla para estabilizarla hace inviable y poco práctico este proceso.

## 5.2 Comparación del modelo

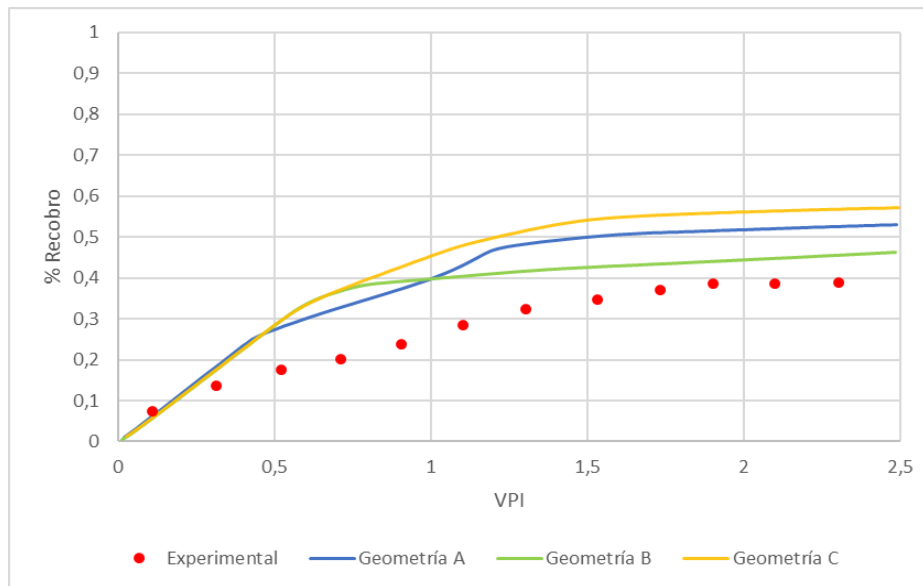
Para comprobar los resultados del modelo, se compara con los datos experimentales (Maghzi et al., 2012) , las variables a estudiar son los volúmenes porosos inyectados y el recobro final reportado.

En la figura 19 se muestran los datos experimentales de la inyección de *nanosílíce al 4% en peso*, el cual alcanza un recobro del 56%, mientras que los resultados de las simulaciones dan un factor de recobro entre el 56 y 67%, se tiene un porcentaje de error máximo relativo del 19%. El comportamiento de los tres modelos tiene similitud con la tendencia de los datos experimentales, en los primeros volúmenes porosos inyectados los datos coinciden, esto significa que todo el nanofluido que se inyecta y presenta un arrastre eficiente del crudo, sin embargo, a partir de ese punto los modelos simulados empiezan a presentar cierta desviación lo cual indica que por la salida de la placa ya se comienza a producir el nanofluido. A partir de la tendencia y los errores obtenidos en el factor de recobro, el modelo simulado que más coincide con las características morfológicas de los poros utilizados en el laboratorio es la geometría B.



*Figura 19.* Comparación de los resultados simulados de la inyección de nanosílíce en las diferentes placas con los resultados experimentales.

En la Figura 20 se muestran los resultados experimentales de la *inyección de óxido de aluminio al 1%* en peso con un medio inicialmente saturado con 0,4% de agua irreducible, el cual alcanza un 40% en el factor de recobro; los resultados de las simulaciones dan valores de recobro entre 46 y 56%, se obtiene un error relativo máximo del 42%. En este caso se inyectan 2,5 volúmenes porosos, la morfología que presenta mayor afinidad con los datos es la geometría A, debido a que presentan tres líneas de tendencias con diferentes inclinaciones, sin embargo, los tiempos en los que ocurre este cambio difieren, por lo tanto vemos una diferencia significativa en el factor de recobro final. La geometría B es la más cercana al valor de recobro final esperado y en esta morfología se observa el típico comportamiento esperado para las operaciones de inyección de agua para recobro mejorado en un campo.



*Figura 20.* Comparación de los resultados simulados de la inyección de nanoaluminio en las diferentes placas con los resultados experimentales.

Los errores presentados en la inyección del óxido de aluminio se podrían atribuir al hecho que las propiedades del nanofluido fueron obtenidas a partir de correlaciones y que se desconocen las características exactas de la muestra en la cual se realizó el estudio en el laboratorio, por lo tanto, se utiliza la misma geometría de la inyección del nanosílice ya que se menciona que fueron creadas por el mismo método.

### **5.3 Análisis de la inyección del nanosílice**

En esta sección se analizan los contornos de fracción volumétrica y presión para determinados volúmenes porosos, y como es el comportamiento a través del tiempo. Estos resultados pertenecen a las simulaciones de inyección de nanosílice con las tres geometrías de estudio.

En la figura 21 se observa el comportamiento de la inyección del óxido de silicio en la geometría A, al principio se identifica que se crean tres canales de flujo principales, al transcurrir el tiempo se identifican por lo menos seis *fingering*, de los cuales solo un se encuentra en producción, al final se aprecia que presenta un buen arrastre al inicio del recorrido y una digitación viscosa moderada.

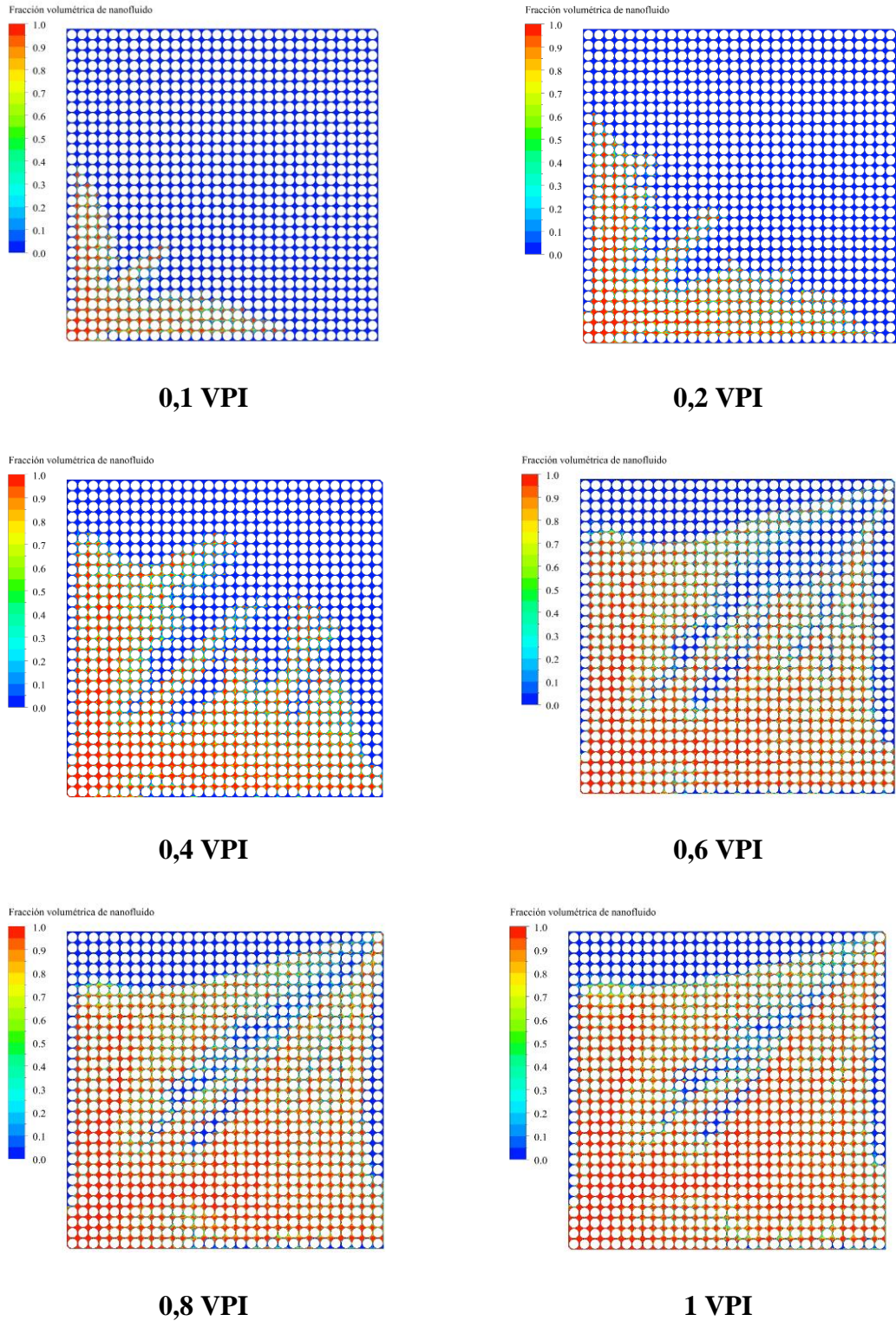


Figura 21. Contornos de fracción volumétrica de la inyección de nanosílice en la placa A.

La figura 22 presenta la presión máxima del sistema cerca a la entrada de la placa y es de 1100 Pa, mientras que la presión mínima se observa en la salida, todo está crea el diferencial de presión para poder movilizar el fluido inyectado, al transcurrir el tiempo se observa que la presión en todos los puntos de la placa empieza a caer, hasta llegar a menos de 110 Pa en toda la placa.

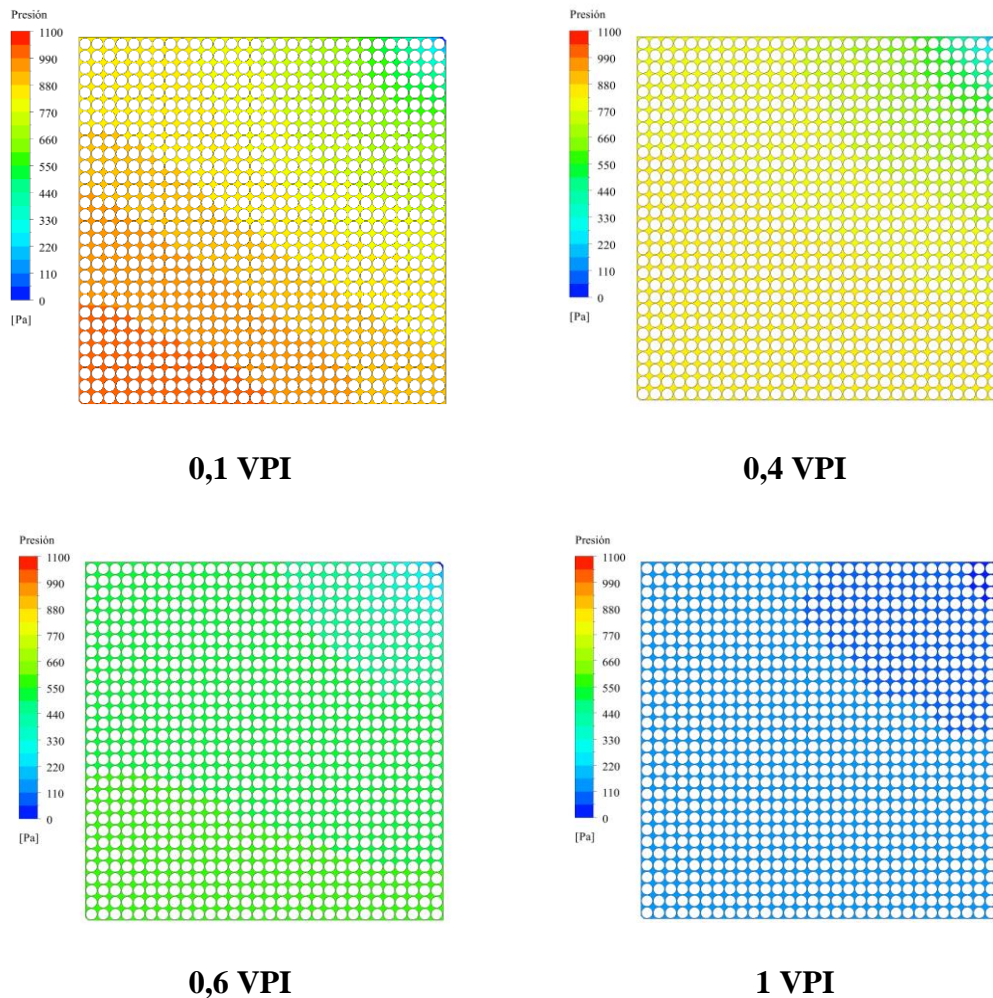
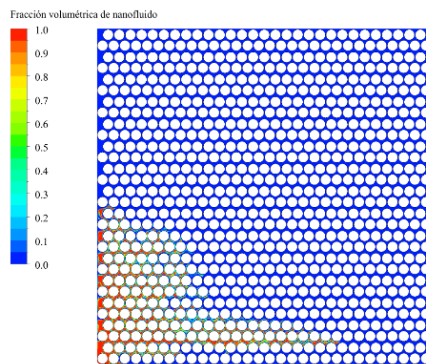
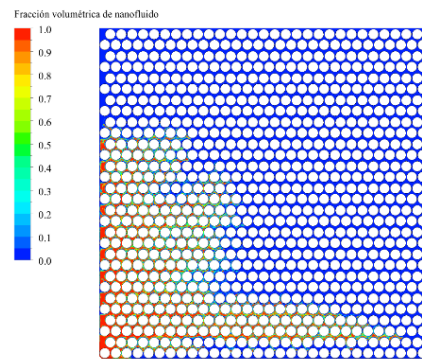
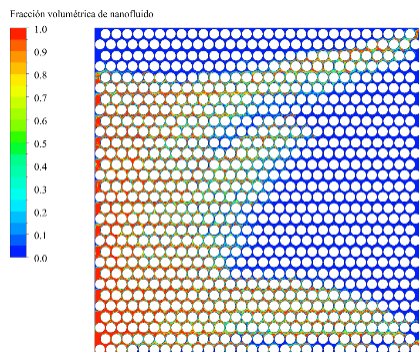
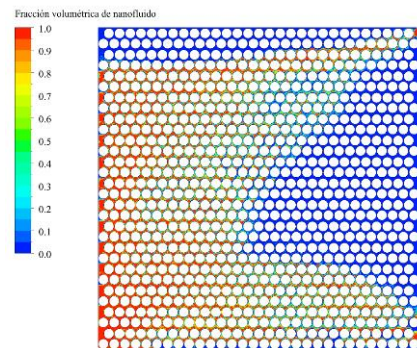
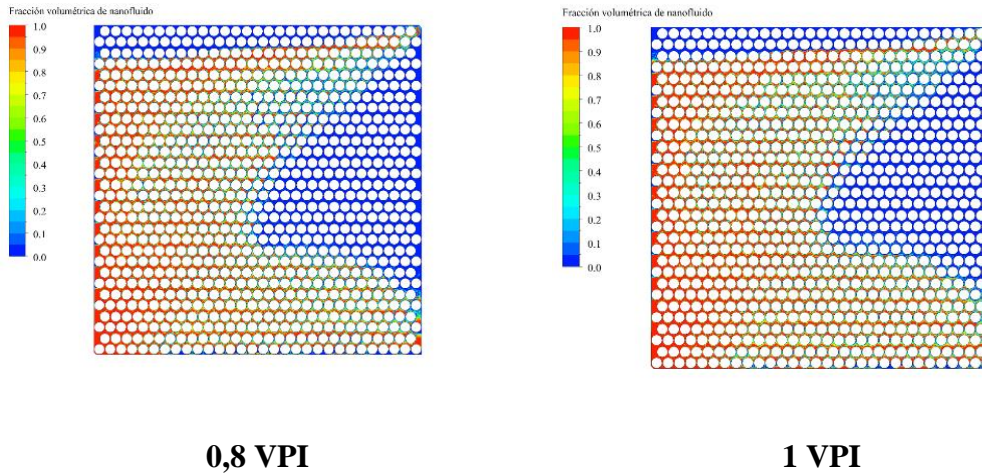


Figura 22. Contornos de Presión de la inyección de nanosílíce en la placa A.

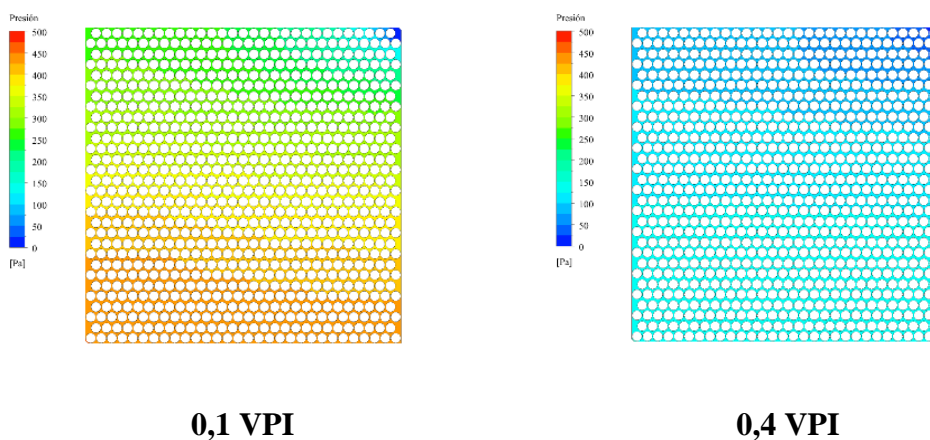
En la figura 23, en los primeros VPI se observa un frente relativamente estable, excepto un pequeño dedo que recorre paralelamente el límite inferior de la placa, al transcurrir la inyección se evidencia de manera más precisa que hay tres líneas de flujo principales, al final el primer canal de flujo que se formó en la parte inferior se acumuló, y los otros dos se unen para ser un frente de arrastre más grande y estable, este tipo de geometrías crean canales de flujo muy bien definidos, el problema es la dirección que pueden tomar es incierta.

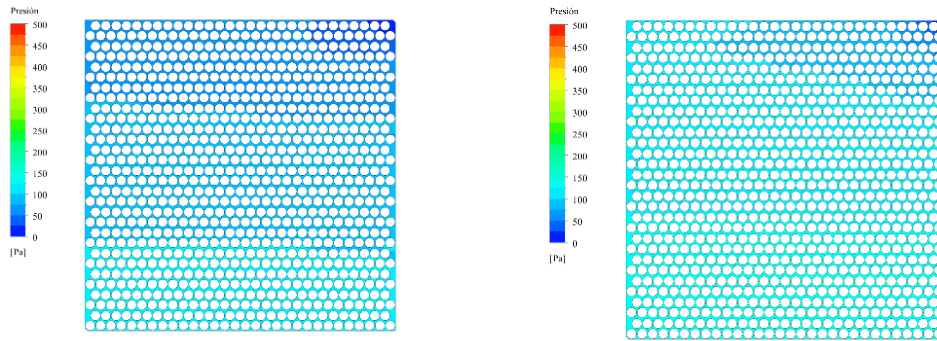
**0,1 VPI****0,2 VPI****0,4 VPI****0,6 VPI**



*Figura 23.* Contornos de fracción volumétrica de la inyección de nanosílice en la placa B.

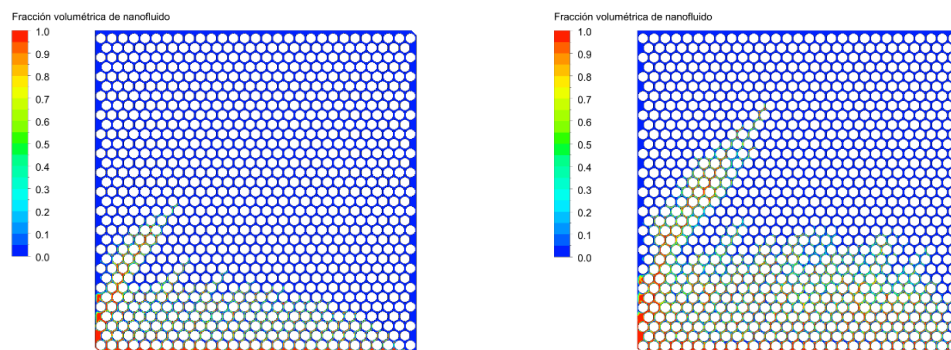
En la figura 24 se observa que en los primeros volúmenes inyectados se observa una presión máxima de 500 Pa y se ubican cerca a la entrada de la placa, pero al poco tiempo cae drásticamente y conserva valores por debajo de los 150 Pa después de los 0,4 volúmenes porosos inyectados.

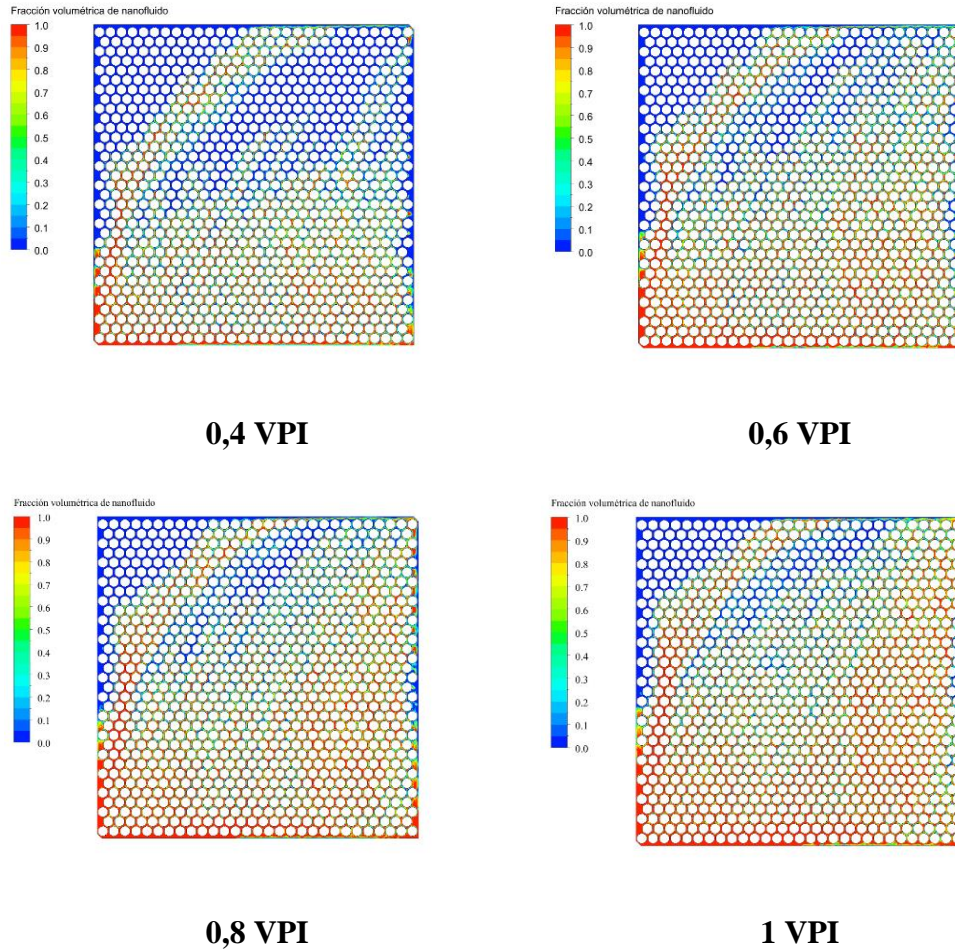


**0,6 VPI****1 VPI**

*Figura 24.* Contornos de Presión de la inyección de nanosílice en la placa B.

En la figura 25, se observa una preferencia al desplazamiento horizontal bastante fuerte, y hasta que el fluido llega a la frontera derecha de la placa y llena totalmente ese espacio empieza a formar un frente de barrido más o menos estable con presencia de digitación viscosa moderada, y al final presenta acumulación de nanofluido en una esquina inferior, y en la esquina contraria se encuentra la mayor parte del crudo residual el cual no tuvo contacto con el nanofluido.

**0,1 VPI****0,2 VPI**



*Figura 25.* Contornos de fracción volumétrica de la inyección de nanosílice en la placa C.

En la figura 26, se observa la geometría C, la máxima presión en el sistema es de 600 Pa, los cuales se presentan al inicio de la inyección de manera horizontal en la parte inferior de la placa, y disminuye de manera constante en toda la placa en el transcurso del proceso de inyección hasta presentar valores por debajo de los 60 Pa al finalizar.

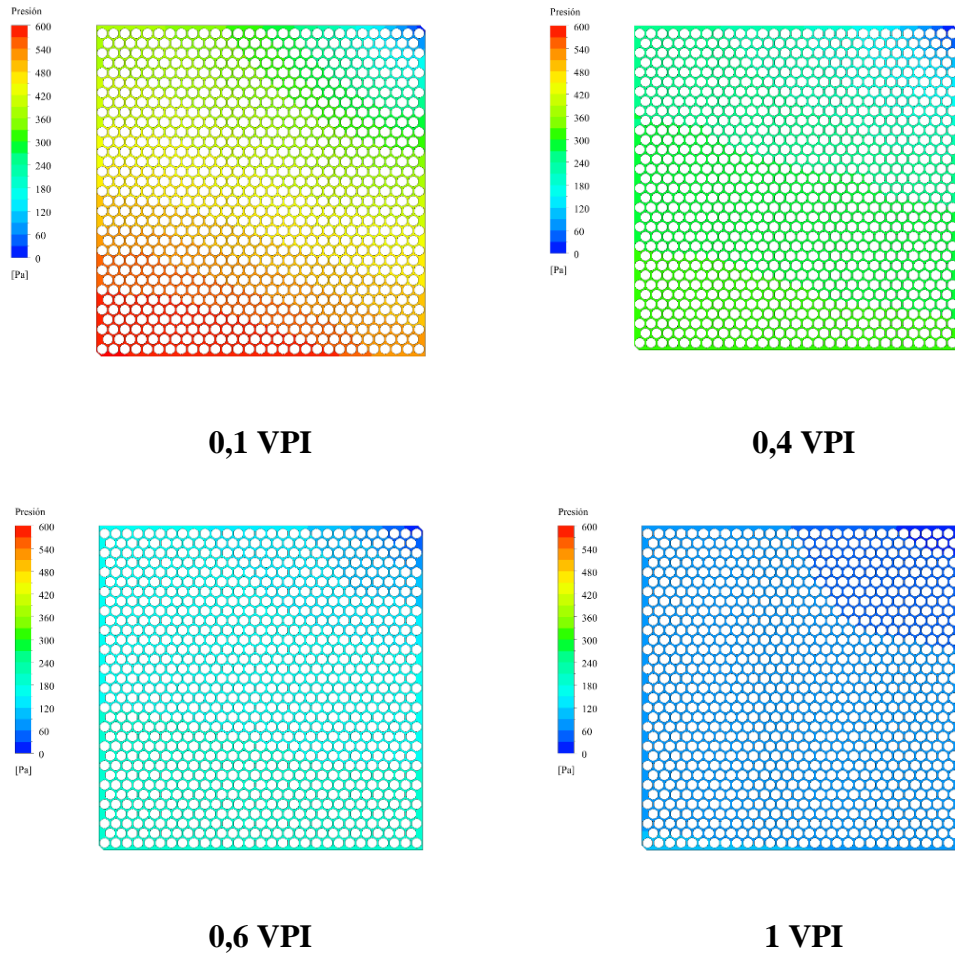


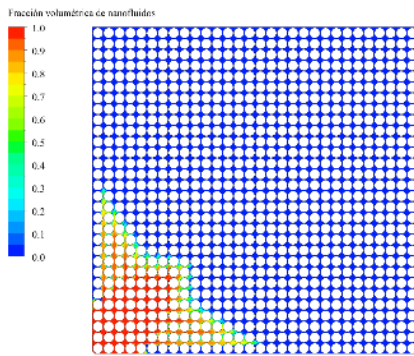
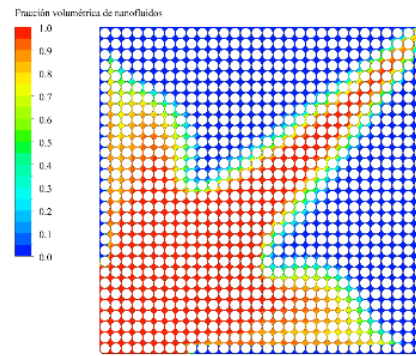
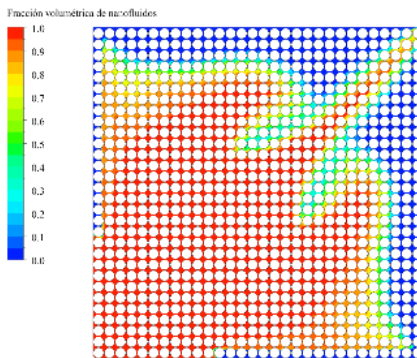
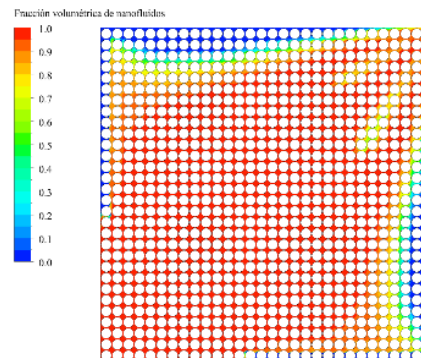
Figura 26. Contornos de Presión de la inyección de nanoslice en la placa C.

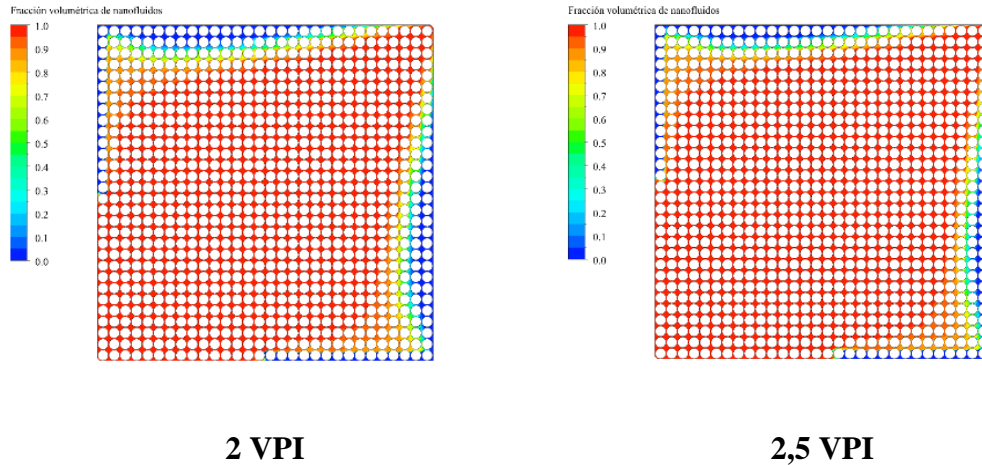
#### 5.4 Análisis de la inyección de nanoaluminio

En esta sección se analizan los contornos de fracción volumétrica y presión para determinados volúmenes porosos, y como es el comportamiento a través del tiempo. Estos resultados pertenecen a las simulaciones de inyección de nanoaluminio con las tres geometrías de estudio.

Al comienzo del proceso en la geometría A, como se muestra en la figura 27, se presenta un frente de inyección estable, al avanzar las simulaciones se presenta un canal de flujo preferencial

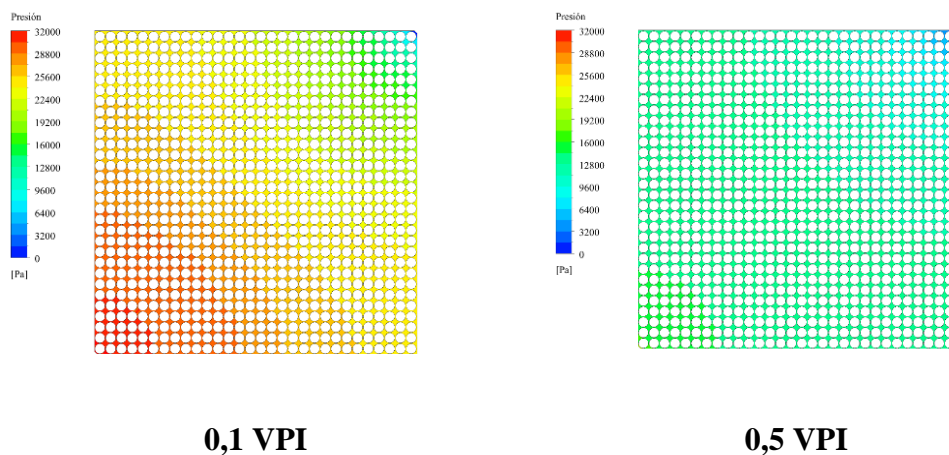
central el cual es el primero en llegar a la salida de la placa, sin embargo el frente del nanofluido presenta un buen arrastre y poca digitación viscosa, al finalizar se observa que el arrastre del crudo fue bastante eficiente.

**0,1 VPI****0,5 VPI****1 VPI****1,5 VPI**



*Figura 27.* Contornos de fracción volumétrica de la inyección de nanoaluminio en la placa A.

La presión máxima de la placa A, se localiza cerca a la entrada de la placa y tiene valores cercanos a los 32000 Pa, en la figura 28 se observa que a los 0,5 volúmenes porosos inyectados se presentan valores alrededor de los 15000 Pa, ósea disminuyo casi a la mitad respecto al valor inicial que se presentaba cerca a la entrada con solo una diferencia de 0,4 VPI, y por ultimo vemos que a pesar que transcurre un VPI entre las últimas imágenes no hay ningún cambio significativo ya que las dos contienen valores de presión por debajo de 600 *Pa*.



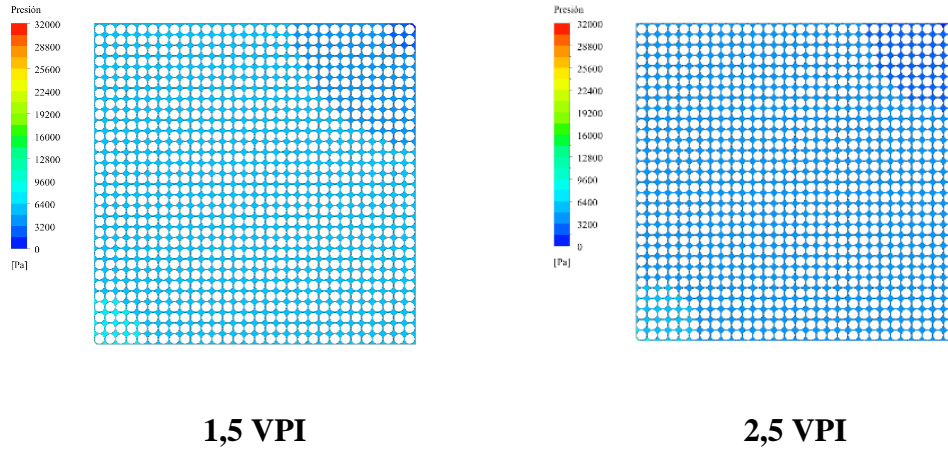
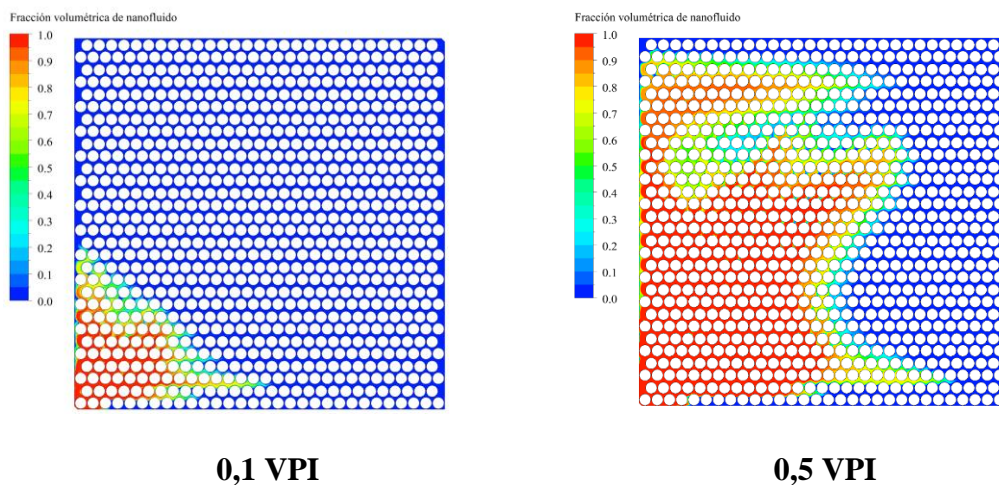
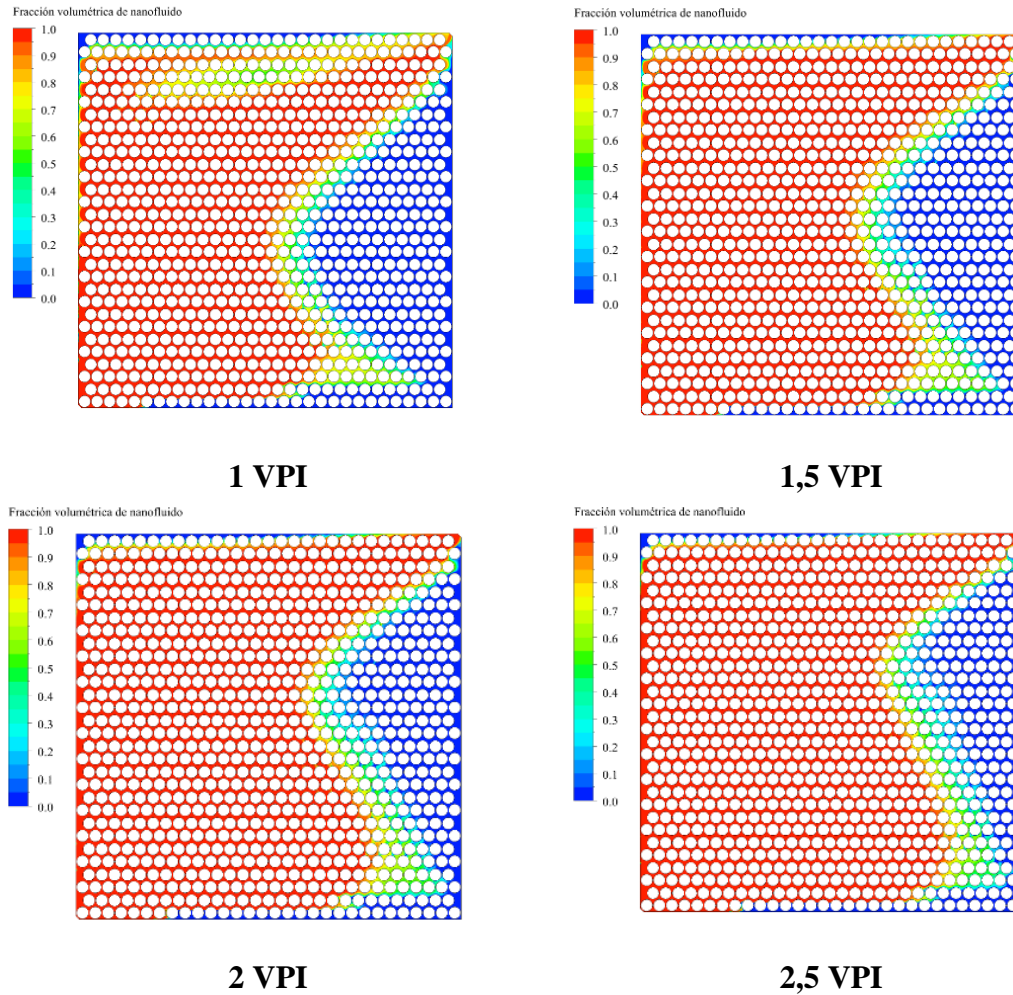


Figura 28. Contornos de Presión de la inyección de nanoaluminio en la placa A.

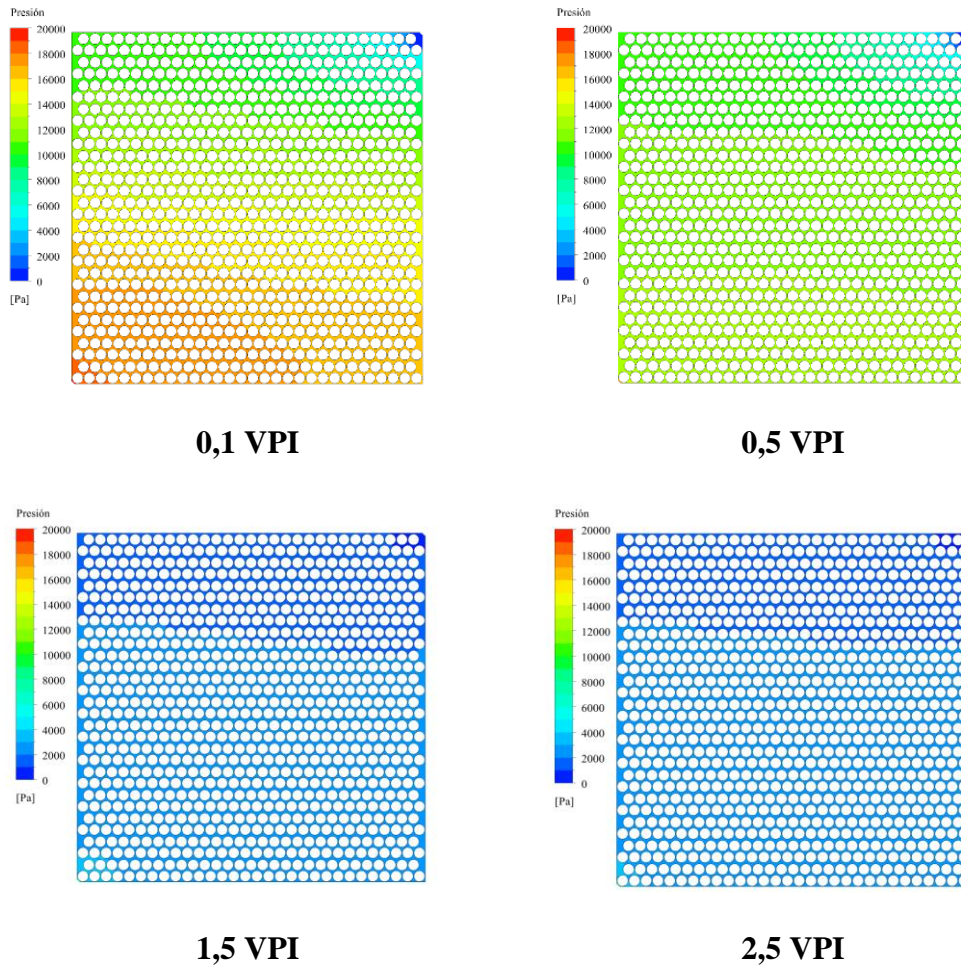
La figura 29 muestra la geometría B, al iniciar la inyección presenta un pequeño canal de flujo preferencial horizontal cerca al borde inferior de la placa y dos más grandes hacia la parte interna de la placa, al transcurrir la simulación se presentan dos frentes notorios el cual finalmente se observa que a pesar que presentan un barrido efectivo y poca digitación viscosa, hay una zona en la parte derecha de la placa a la cual no llega el nanofluido.





*Figura 29.* Contornos de fracción volumétrica de la inyección de nanoaluminio en la placa B.

En la figura 30 se observa que la placa B, presenta inicialmente una presión máxima de 20000 Pa y tiene una tendencia horizontal, a los 0,5 VPI maneja valores por debajo de los 12000 Pa y finalmente después de 1 VPI cae la presión por debajo de los 4000 Pa y mantiene estos valores hasta el final de la simulación.



*Figura 30.* Contornos de Presión de la inyección de nanoaluminio en la placa B.

La figura 31 se muestran los diferentes VPI de la geometría C, inicialmente presenta una fuerte tendencia de flujo horizontal, el cual tiempo después en la simulación se observa que aparece acumulación en la parte inferior de la placa sin embargo el otro frente que se forma va de forma diagonal directo a la salida, al transcurrir el tiempo la acumulación presentada en la parte inferior aumenta significativamente llega a la salida y se une con el otro frente, y solo un poco de crudo residual se encuentra en la esquina superior izquierda, esta geometría y este nanofluido presenta mejor eficiencia de barrido.

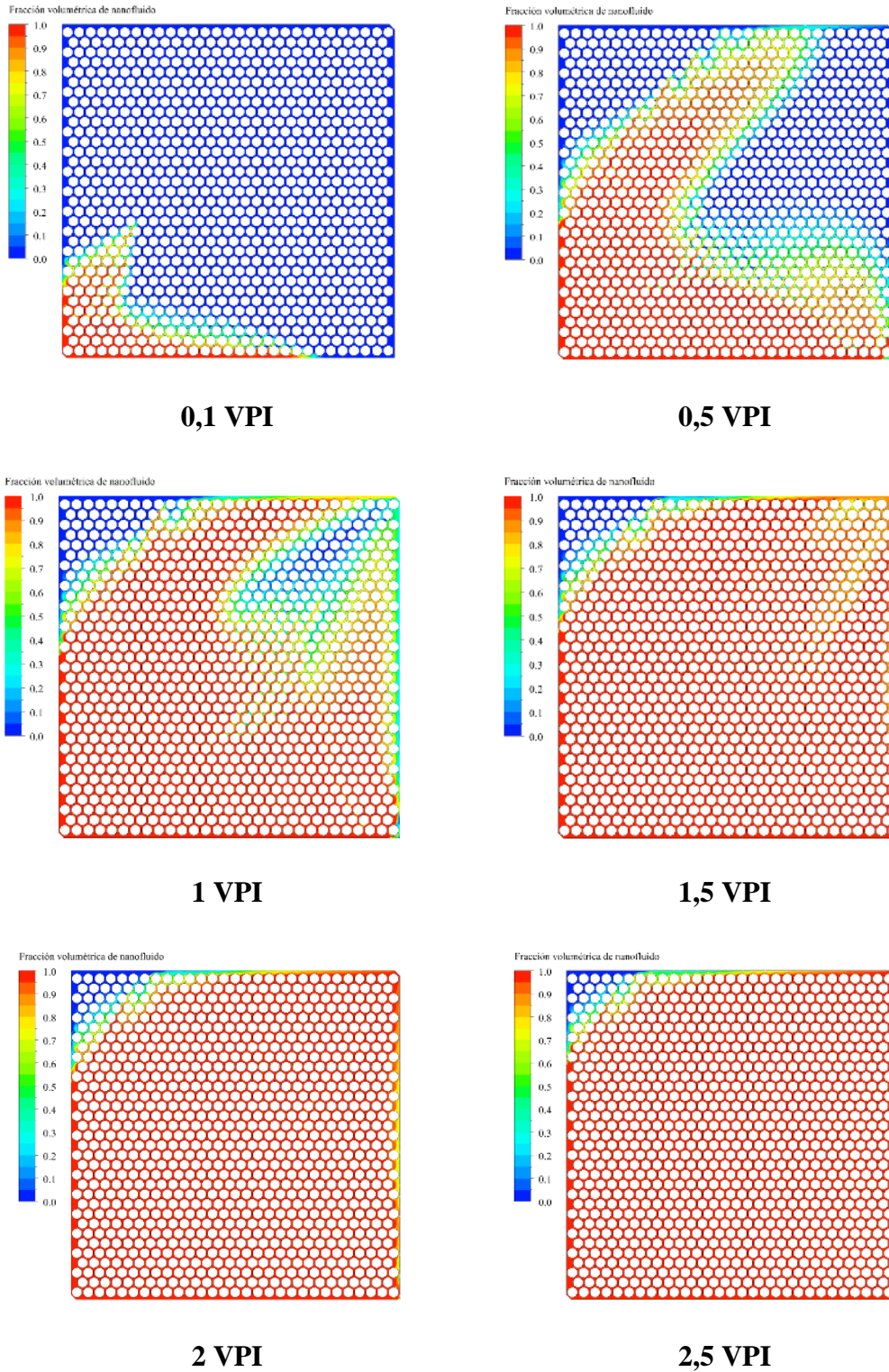


Figura 31. Contornos de fracción volumétrica de la inyección de nanoaluminio en la placa C.

La figura 32, nos enseña la geometría C y presenta una presión máxima de 20000 Pa la cual tiene comportamiento radial, al transcurrir solo 0,5 VPI la presión disminuye casi a la mitad e indica presiones por debajo de los 12000 Pa, al final de la simulación muestra valores por debajo de los 6000 *Pa*.

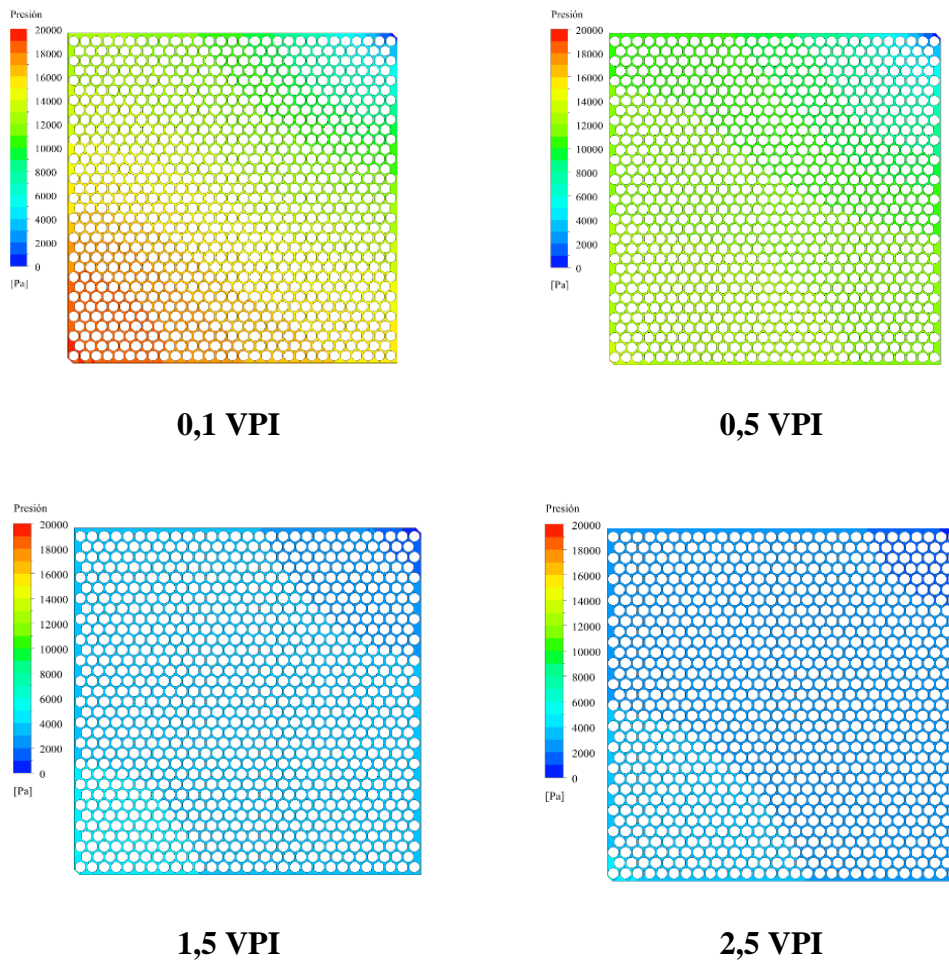


Figura 32. Contornos de Presión de la inyección de nanoaluminio en la placa C.

## 6. Conclusiones

Con base a la literatura encontrada y a las condiciones de los modelos físicos se determina que existen correlaciones para determinar propiedades de los nanofluidos más no exactas y esto es una fuente de error importante al momento de modelar y evaluar la interacción de los fluidos. Siempre hay que tener en cuenta las concentraciones a las cuales se modela el fluido, ya que afecta sus propiedades.

Existen infinitas formas de poro, se idealizo el modelo con una geometría y una distribución de granos sencilla reportada en la literatura. Las geometrías de la placa A y B, cuentan con la misma forma de grano y una distribución rectangular y escalada, de esta manera, aunque la forma del grano es la misma, la configuración del poro varia. La placa C, cuenta con la misma distribución de la placa B, pero con una forma de grano y de poro distinta. De esta manera se pueden relacionar todas las geometrías.

Al analizar los resultados se evidencia una tendencia clara para cada tipo de geometría, para la placa A al ingresar el fluido se dirige directamente a la salida de la placa, por lo tanto, queda más o menos la misma cantidad de crudo en la pared superior y derecha de la placa. Para la placa B, al ingresar el fluido se evidencia una tendencia de avance horizontal mayor que el avance vertical, al finalizar queda crudo en menor cantidad en la parte superior de la placa que en la parte del lado derecho. Para la placa C, al ingresar en fluido a la placa se percibe un avance horizontal predominante, mientras que el avance vertical es casi nulo, al seguir el proceso de inyección se presenta acumulación en la parte inferior de la placa y posteriormente empieza el

desplazamiento vertical del fluido que se inyecta y del fluido que se acumuló, al finalizar el proceso solo encontramos crudo residual en la parte superior izquierda de la placa.

Para los dos nanofluidos de inyección la geometría B presenta valores finales de recobro más bajos pero también los más cercanos a los reportados en los modelos físicos experimentales. Para la inyección de nanosílice la geometría A es la que presenta mayor factor de recobro, mientras que para la inyección de nanoaluminio la geometría C obtiene mejores valores.

Respecto al nanosílice los contornos evidencian que se presenta de manera general una digitación viscosa de moderada a alta, dependiendo de los volúmenes porosos inyectados, las presiones al iniciar son medianas y disminuyen casi al 10% del valor inicial al finalizar el proceso de inyección.

El nanoaluminio presenta contornos más estables y definidos, por lo tanto, se observa baja digitación viscosa en general, y presentan mayores presiones al iniciar el proceso, pero descienden rápidamente a los pocos volúmenes porosos inyectados, de esta manera en más de la mitad del proceso de inyección se tienen bajas presiones respecto a las iniciales.

## **7. Recomendaciones**

Ampliación de la variedad de nanofluidos y geometrías de poro, para el análisis y estudio más detallado del comportamiento fluidodinámico.

Estudio fluidodinámico de nanofluidos implementando diversos patrones de inyección.

Estudio fluidodinámico en la inyección de nanofluidos en 3D con la creación de geometrías apoyadas por imágenes de resonancia.

Estudio de la influencia y análisis de sensibilidad de las propiedades de los nanofluidos en los procesos de inyección para recobro mejorado.

**Referencias Bibliográficas**

- Atul Sharma. (2016). Introduction to Computational Fluid Dynamics: Development, Application and Analysis. Recuperado de Wiley.com website: <https://www.wiley.com/en-us/Introduction+to+Computational+Fluid+Dynamics%3A+Development%2C+Application+and+Analysis-p-9781119002994>
- Chung, T. J. (2010). *Computational fluid dynamics* (2nd ed). Cambridge ; New York: Cambridge University Press.
- Cui, W., Shen, Z., Yang, J., & Wu, S. (2015). Molecular dynamics simulation on flow behaviors of nanofluids confined in nanochannel. *Case Studies in Thermal Engineering*, 5, 114-121. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2015.03.007>
- Dezfully, M., Jafari, A., & Gharibshahi, R. (2015). CFD Simulation of Enhanced Oil Recovery Using Nanosilica/Supercritical CO<sub>2</sub>. *Advanced Materials Research*, 1104, 81-86. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1104.81>
- Emami-Meybodi, H., Kharrat, R., & Araghi, M. N. (2011). Experimental studying of pore morphology and wettability effects on microscopic and macroscopic displacement efficiency of polymer flooding. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 78(2), 347-363. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2011.07.004>

- Fakoya, F., & Shah, S. (2017). Emergence of nanotechnology in the oil and gas industry: Emphasis on the application of silica nanoparticles. *Petroleum*, 3, 391-405. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2017.03.001>
- Francke, H., & Thorade, M. (2010). Density and viscosity of brine: An overview from a process engineers perspective. *Geochemistry*, 70, 23-32. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2010.05.015>
- George J. Stosur, J. Roger Hite, Norman F. Carnahan, & Karl Miller. (2003). The Alphabet Soup of IOR, EOR and AOR: Effective Communication Requires a Definition of Terms. Recuperado de <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-84908-MS>
- Gharibshahi, R., Jafari, A., Haghtalab, A., & Karambeigi, M. S. (2015). Application of CFD to evaluate the pore morphology effect on nanofluid flooding for enhanced oil recovery. *RSC Advances*, 5(37), 28938-28949. <https://doi.org/10.1039/C4RA15452E>
- Global CCS Institute. (2015). *PEMEXs EOR strategy for co2 injection*. Technology. Recuperado de <https://www.slideshare.net/globalccs/pemexs-eor-strategy-for-co2-injection>
- González S, G. (2012). The Importance of 3D Mesh Generation for Large Eddy Simulation of Gas–solid Turbulent Flows in a Fluidized Beds. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/324616057\\_The\\_Importance\\_of\\_3D\\_Mesh\\_Ge](https://www.researchgate.net/publication/324616057_The_Importance_of_3D_Mesh_Ge)

neration\_for\_Large\_Eddy\_Simulation\_of\_Gas-  
solid\_Turbulent\_Flows\_in\_a\_Fluidized\_Beds

González S, G., & Prieto J, N. (2012). Fluid Dynamics of Gas—Solid Fluidized Beds.  
Recuperado de  
[https://www.researchgate.net/publication/221927969\\_Fluid\\_Dynamics\\_of\\_Gas\\_-  
\\_Solid\\_Fluidized\\_Beds](https://www.researchgate.net/publication/221927969_Fluid_Dynamics_of_Gas_-_Solid_Fluidized_Beds)

Jaimes Prada, R. (2015). *Obtenção de correlações de Nusselt em reatores de tanque agitado através da fluidodinâmica computacional (CFD) = Obtaining Nusselt equations for stirred tank reactors with the use of computational fluid dynamics (CFD)*. Recuperado de <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/265987>

Li, S., Hendraningrat, L., & Torsaeter, O. (2013, marzo 26). Improved Oil Recovery by Hydrophilic Silica Nanoparticles Suspension: 2-Phase Flow Experimental Studies. International Petroleum Technology Conference. Recuperado de <https://www.onepetro.org/conference-paper/IPTC-16707-MS>

Lyons, W. C., Plisga, G. J., & Lorenz, M. D. (Eds.). (2016). Chapter 5—Reservoir Engineering. En *Standard Handbook of Petroleum and Natural Gas Engineering (Third Edition)* (pp. 5-1). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-383846-9.00005-9>

- Maghzi, A., Mohammadi, S., Ghazanfari, M. H., Kharrat, R., & Masihi, M. (2012). Monitoring wettability alteration by silica nanoparticles during water flooding to heavy oils in five-spot systems: A pore-level investigation. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 40, 168-176. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.03.004>
- Mahbubul, I. M., Saidur, R., & Amalina, M. A. (2012). Latest developments on the viscosity of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(4), 874-885. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.10.021>
- Manninen, M., Taivassalo, V., & Kallio, S. (1996). On the mixture model for multiphase flow. *Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 288*. 67p.
- Mohammadi, S., Maghzi, A., Ghazanfari, M. H., Masihi, M., Mohebbi, A., & Kharrat, R. (2013). On the Control of Glass Micro-model Characteristics Developed by Laser Technology. *Energy Sources Part A Recovery Utilization and Environmental Effects*, 35. <https://doi.org/10.1080/15567036.2010.516325>
- Moukalled, F., Mangani, L., & Darwish, M. (2016). *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16874-6>

Onyekonwu, M. O., & Ogolo, N. A. (2010, enero 1). *Investigating the Use of Nanoparticles in Enhancing Oil Recovery*. Presentado en Nigeria Annual International Conference and Exhibition. <https://doi.org/10.2118/140744-MS>

Paris de Ferrer, M. (2009). *Fundamentos de ingeniería de yacimientos*. M aracaibo, Venezuela. Astro Dala.

Prieto Jiménez, N. (2011). *Simulação da combustão de coque em regeneradores FCC usando fluidodinâmica computacional*. Recuperado de <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/266866>

Rodriguez Pin, E., Roberts, M., Yu, H., Huh, C., & Bryant, S. L. (2009, enero 1). Enhanced Migration of Surface-Treated Nanoparticles in Sedimentary Rocks. Society of Petroleum Engineers.

Salager, J.-L. (2005). Recuperación mejorada del petróleo. *ULA.[S357-C]*. Recuperado de <http://www.oilproduction.net/cms3/files/S357C.pdf>

Suleimanov, B. A., Ismailov, F. S., & Veliyev, E. F. (2011). Nanofluid for enhanced oil recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 78(2), 431-437. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2011.06.014>

Zaid, H. M., Radzi, N. S. A., Latiff, N. R. A., & Shafie, A. (2014). Effect of morphology of aluminium oxide nanoparticles on viscosity and interfacial tension (IFT) and the recovery efficiency in enhanced oil recovery (EOR). *AIP Conference Proceedings*, 1621(1), 705-710. <https://doi.org/10.1063/1.4898545>