

**Síntesis y funcionalización de nanopartículas de SiO<sub>2</sub> y su efecto en el control de filtrado de lodos de perforación**

**Sergio Andrés Guerrero Quintero**

**Paola Andrea Velásquez Soler**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico**

**Directora**

**PhD. Zuly Himelda Calderón Carrillo**

**Doctora en Ingeniería Química**

**Co-directores**

**Ing. Jaime Alberto Loza Castillo**

**Ingeniero de Petróleos**

**MSc. Diego Armando Vargas Silva**

**Máster en Geofísica**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas**

**Escuela de Ingeniería Química**

**Bucaramanga**

**2020**

### Dedicatoria

*A Dios y a la Virgen de Torcoroma por brindarme todas las bendiciones que tengo y que tuve para culminar esta etapa.*

*A mis abuelos maternos, que en paz descansen, Pedro Quintero Ríos y Dilia Rosa Soto Rizo, este triunfo se los dedico con todo mi corazón y mi alma.*

*A mi papá Miguel Amid Guerrero Ascanio, mi mamá Esther Emilia Quintero Soto, mi hermano José Miguel Guerrero Quintero y a la señora Ana Mercedes Ramírez Ballesteros, sin el amor, la bendición, el respaldo y apoyo de ellos, nada de esto hubiera sido posible, gracias por todo.*

*A todos mis demás familiares y amigos por su constante apoyo y respaldo durante todo este proceso.*

***Sergio Andrés Guerrero Quintero***

### Dedicatoria

*A Dios porque sin todas sus bendiciones no estaría donde estoy ahora.*

*A mi mamá Carmen Soler por haber estado en todos los momentos tanto buenos como malos, apoyándome y creyendo en mí siempre, por ser el motor y la mayor motivación en mi vida.*

*A mi hermano Andrés Velásquez por motivarme a ser mejor día a día buscando continuamente ser un buen ejemplo para él.*

*A mi papá Nelson Velásquez por haber sido un apoyo y guía en mi proceso de vida.*

*A mis demás familiares porque de una u otra forma pusieron su granito de arena para poder estar donde estoy.*

*A mis amigos porque estuvieron ahí cuando decía que no podía más, porque con sus alegrías y logros me motivaban a hacer las cosas y siempre tenían algo bueno por aportar en mi crecimiento tanto personal como profesional, a todos, muchas gracias.*

***Paola Andrea Velásquez Soler***

### Agradecimientos

*A la Universidad Industrial de Santander así como a las escuelas de Ingeniería Química e Ingeniería de Petróleos por brindarnos los conocimientos a lo largo de la carrera.*

*A la doctora Zuly Calderón y al ingeniero Diego Vargas por brindarnos la oportunidad de trabajar con ellos en el grupo de estabilidad de pozos (GIEP), dándonos la confianza, siendo una guía en este proyecto y creyendo en nosotros.*

*Al Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) y en especial al ingeniero Jaime Loza por todo el conocimiento adquirido en el transcurso de este proceso.*

*A los laboratorios de Lodos y Cementos, Nanotecnología y Química de Producción del Instituto Colombiano del Petróleo por haber sido un apoyo en esta etapa tanto teórica como experimental, brindado todos sus conocimientos en el área.*

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	16
1. Objetivos .....	20
1.1 General .....	20
1.2 Específicos .....	20
2. Descripción metodológica .....	20
2.1 Descripción experimental de cada etapa .....	22
2.1.1 Investigación .....	22
2.1.2 Pruebas .....	23
2.1.3 Análisis .....	23
2.1.4 Resultados .....	23
2.2 Procedimiento para la síntesis y funcionalización de nanopartículas de sílice (SiO <sub>2</sub> ) con 3-aminopropiltriatoxisilano (APTES) .....	24
2.3 Procedimiento de activación de nanopartículas comerciales de sílice con hidróxido de amonio (NH <sub>4</sub> OH) .....	25
2.4 Procedimiento de funcionalización de nanopartículas de sílice SiO <sub>2</sub> con 3-aminopropiltriatoxisilano (APTES) .....	26
2.5 Formulación lodo base agua para perforación en overburden .....	27
2.6 Formulación lodo base agua para perforación en yacimiento .....	28

2.7 Experimentos .....	29
2.7.1 Lodos sin nanopartículas.....	30
2.7.2 Lodos con nanopartículas de SiO <sub>2</sub> comerciales sin funcionalizar. ....	30
2.7.3 Lodos con nanopartículas de SiO <sub>2</sub> comerciales funcionalizadas con APTES.....	31
3. Resultados .....	32
3.1 Caracterización de las nanopartículas comerciales de SiO <sub>2</sub> y funcionalizadas con APTES ..	32
3.1.1 Espectro Infrarrojo.....	32
3.1.2 Diámetro Hidrodinámico DLS.....	36
3.1.3 Potencial Zeta.....	37
3.2 Reología .....	37
3.2.1 Lodo para perforación en Overburden.....	37
3.2.2 Lodo para perforación en Yacimiento.....	41
3.3 Filtrados .....	44
3.3.1 Lodo para perforación en Overburden.....	44
3.3.2 Lodo para perforación en Yacimiento.....	49
4. Conclusiones .....	54
5.Recomendaciones .....	56
Referencias Bibliográficas .....	58
Apéndices.....	60

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
<i>Figura 1.</i> Diseño Experimental.....	22
<i>Figura 2.</i> Condiciones para prueba de control de Filtrado .....	30
<i>Figura 3.</i> Espectros FT-IR de SiO <sub>2</sub> y SiO <sub>2</sub> @APTES NP's .....	33
<i>Figura 4.</i> Espectro Infrarrojo de las nanopartículas de SiO <sub>2</sub> comerciales .....	34
<i>Figura 5.</i> Espectro Infrarrojo de las nanopartículas comerciales de SiO <sub>2</sub> funcionalizadas con APTES .....	35
<i>Figura 6.</i> Resultados de reología para lodo overburden con nanopartículas de SiO <sub>2</sub> comerciales .....	37
<i>Figura 7.</i> Gráfica de reología para lodo overburden con distintas concentraciones %p/v de nanopartículas de SiO <sub>2</sub> comerciales .....	38
<i>Figura 8.</i> Resultados de reología para lodo overburden con nanopartículas de SiO <sub>2</sub> funcionalizadas con APTES .....	39
<i>Figura 9.</i> Gráfica de reología para lodo overburden con distintas concentraciones %p/v de nanopartículas de SiO <sub>2</sub> funcionalizadas con APTES.....	40
<i>Figura 10.</i> Resultados de reología para lodo yacimiento con nanopartículas de SiO <sub>2</sub> comerciales .....	41
<i>Figura 11.</i> Gráfica de reología para lodo yacimiento con distintas concentraciones %p/v de nanopartículas de SiO <sub>2</sub> comerciales.....	41

<i>Figura 12.</i> Resultados de reología para lodo yacimiento con nanopartículas de SiO <sub>2</sub> funcionalizadas con APTES .....	42
<i>Figura 13.</i> Gráfica de reología para lodo yacimiento con distintas concentraciones %p/v de nanopartículas de SiO <sub>2</sub> funcionalizadas con APTES.....	43
<i>Figura 14.</i> Gráfica de filtrado API para lodo overburden con nanopartículas de SiO <sub>2</sub> comerciales .....	44
<i>Figura 15.</i> Gráfica de filtrado HPHT para lodo overburden con nanopartículas de SiO <sub>2</sub> comerciales .....	45
<i>Figura 16.</i> Gráfica de filtrado total PPT para lodo overburden con nanopartículas de SiO <sub>2</sub> comerciales .....	46
<i>Figura 17.</i> Gráfica de filtrado API para lodo overburden con nanopartículas de SiO <sub>2</sub> funcionalizadas con APTES .....	47
<i>Figura 18.</i> Gráfica de filtrado HPHT para lodo overburden con nanopartículas de SiO <sub>2</sub> funcionalizadas con APTES .....	47
<i>Figura 19.</i> Gráfica de filtrado total PPT para lodo overburden con nanopartículas de SiO <sub>2</sub> funcionalizadas con APTES .....	48
<i>Figura 20.</i> Gráfica de filtrado API para lodo yacimiento con nanopartículas de SiO <sub>2</sub> comerciales .....	49
<i>Figura 21.</i> Gráfica de filtrado HPHT para lodo yacimiento con nanopartículas de SiO <sub>2</sub> comerciales .....	50
<i>Figura 22.</i> Gráfica de filtrado total PPT para lodo yacimiento con nanopartículas de SiO <sub>2</sub> comerciales .....	50

---

*Figura 23.* Gráfica de filtrado API para lodo yacimiento con nanopartículas de SiO<sub>2</sub>  
funcionalizadas con APTES ..... 51

*Figura 24.* Gráfica de filtrado HPHT para lodo yacimiento con nanopartículas de SiO<sub>2</sub>  
funcionalizadas con APTES ..... 52

*Figura 25.* Gráfica de filtrado total para lodo yacimiento con nanopartículas de SiO<sub>2</sub>  
funcionalizadas con APTES ..... 52

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A Productos para preparación de nanopartículas de SiO <sub>2</sub> .....	60
Apéndice B Productos para preparación lodo base agua .....	61
Apéndice C Diámetro hidrodinámico (DLS) .....	64
Apéndice D. Fuerza de Geles.....	65
Apéndice E Modelo plástico de Bingham .....	67
Apéndice F Filtrados API, HPHT y PPT .....	69
Apéndice G Soporte experimentos .....	71

## Resumen

**TÍTULO:** SÍNTESIS Y FUNCIONALIZACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE SiO<sub>2</sub> Y SU EFECTO EN EL CONTROL DE FILTRADO DE LODOS DE PERFORACIÓN\*

**AUTORES:** SERGIO ANDRÉS GUERRERO QUINTERO, PAOLA ANDREA VELÁSQUEZ SOLER\*\*

**PALABRAS CLAVE:** NANOPARTÍCULAS DE SÍLICE (SiO<sub>2</sub>), FUNCIONALIZACIÓN, 3-AMINOPROPILTRIETOXISILANO (APTES), FLUIDOS DE PERFORACIÓN, CONTROL DE FILTRADO.

**DESCRIPCIÓN:** La implementación de nuevas tecnologías para el mejoramiento de las operaciones de perforación en la industria petrolera son inminentes, es por esto que se ha ido adaptando la nanotecnología como una de ellas. Estudios e investigaciones anteriores mencionan que las nanopartículas tienen un efecto en las propiedades de los fluidos de perforación, algunas veces han mejorado propiedades como la conductividad térmica del fluido, reducción de pérdidas de filtrado y de la torta; y otras las han empeorado.

Basados en el impacto de las nanopartículas en lodos de perforación analizados previamente, surgió la necesidad de investigar sobre el tema en cuyo caso el papel fundamental del investigador estuvo en implementar procedimientos experimentales que tuvieran como objetivo reducir el filtrado de los fluidos de perforación evaluando el aditamento de las nanopartículas por medio de pruebas como API, HPHT y PPT.

En el presente estudio se realizó la síntesis de las nanopartículas de sílice con su correspondiente funcionalización y se complementaron las nanopartículas con nanopartículas comerciales las cuales fueron adquiridas por el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), dichas nanopartículas pasaron por un proceso de activación para su posterior funcionalización. En la funcionalización de las nanopartículas se empleó el 3-aminopropiltriétoxosilano (APTES) y se controlaron parámetros del proceso como el tiempo de reacción y las cantidades. Cuando se tenían las nanopartículas funcionalizadas, estas fueron agregadas a la formulación de dos fluidos de perforación base agua los cuales difieren en su composición: el fluido overburden (bentonita + barita) empleado para perforar antes de la zona de interés y yacimiento (goma xántica + carbonatos) empleado en la zona de interés. Los resultados que se obtuvieron evidenciaron reducciones del volumen de filtrado respecto a los fluidos sin nanopartículas a concentraciones de 0.3% p/v de nanopartículas comerciales y funcionalizadas para el lodo overburden y 0.5% p/v de nanopartículas comerciales para el lodo yacimiento. Las nanopartículas funcionalizadas con APTES tuvieron un efecto negativo en el control de filtrado para el lodo yacimiento.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Directora: Zuly Himelda Calderón Carrillo, Ingeniera de petróleos, PhD en Ingeniería de petróleos. Co-directores: Jaime Alberto Loza Castillo, Ingeniero de petróleos (ECP). Diego Armando Vargas Silva, Ingeniero de petróleos, Máster en Geofísica

### Abstract

**TITLE:** SYNTHESIS AND FUNCTIONALIZATION OF SiO<sub>2</sub> NANOPARTICLES AND ITS EFFECT IN THE CONTROL OF DRILLING MUD FILTERING \*

**AUTHORS:** SERGIO ANDRÉS GUERRERO QUINTERO, PAOLA ANDREA VELÁSQUEZ SOLER\*\*

**KEYWORDS:** SILICA NANOPARTICLES (SiO<sub>2</sub>), FUNCTIONALIZATION, 3-AMINOPROPILTRIETOXISILANO (APTES), DRILLING FLUIDS, FILTER CONTROL.

**DESCRIPTION:** The implementation of new technologies for the improvement of drilling operations in the oil industry are imminent, which is why nanotechnology has been adapted as one of them. Previous studies and research mention that nanoparticles have an effect on the properties of drilling fluids, sometimes they have improved properties such as the thermal conductivity of the fluid, reducing losses of filtrate and cake; and others have made them worse. Based on the impact of nanoparticles in drilling muds previously analyzed, the need arose to investigate the issue in which case the fundamental role of the researcher was in implementing experimental procedures that aimed to reduce the filtration of drilling fluids by evaluating the attachment of nanoparticles through tests such as API, HPHT and PPT.

In the present study, the synthesis of the silica nanoparticles was performed with their corresponding functionalization and the nanoparticles were complemented with commercial nanoparticles which were acquired by the Colombian Petroleum Institute (ICP), these nanoparticles went through a process of activation for later functionalization. In the functionalization of the nanoparticles, 3-aminopropyltriethoxysilane (APTES) was used and process parameters such as reaction time and quantities were controlled. When the nanoparticles were functionalized, they were added to the formulation of two water-based drilling fluids which differ in their composition: the overburden fluid (bentonite + barite) used to drill before the area of interest and deposit (xanthic rubber + carbonates) used in the area of interest. The results obtained showed reductions in the volume of filtration with respect to fluids without nanoparticles at concentrations of 0.3% w / v commercial and functionalized nanoparticles for overburden mud and 0.5% w / v commercial nanoparticles for reservoir mud. The nanoparticles functionalized with APTES had a negative effect on the filtrate control for the reservoir mud.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Directora: Zuly Himelda Calderón Carrillo, Ingeniera de petróleo, PhD en Ingeniería de petróleo. Co-directores: Jaime Alberto Loza Castillo, Ingeniero de petróleo (ECP). Diego Armando Vargas Silva, Ingeniero de petróleo, Máster en Geofísica

## Introducción

Una de las grandes problemáticas que ocurre en la actualidad es el agotamiento de las reservas de combustibles fósiles que sirven para satisfacer el requerimiento energético a nivel mundial. Por esto, los trabajadores de los campos petroleros e investigadores del área han visto la necesidad de implementar nuevos métodos y estrategias en lo que se refiere al proceso de perforación. En esta etapa se emplea un fluido o lodo con funciones muy importantes como enfriar y lubricar la broca, prevenir derrumbes, transportar ripios, sellar formaciones, controlar influjos, dar estabilidad al pozo y evitar pérdidas de lodo. Si éste no cumple todas sus funciones se presentan graves problemas de inestabilidad que conllevan a tiempos no productivos (NPT). Para resarcir estos inconvenientes, los investigadores han buscado una opción bastante prometedora: la implementación de nanopartículas (NP's) en estos fluidos.

Existen varios tipos de fluidos de perforación como lodo a base de agua (WBM), lodo a base de aceite (OBM) y lodo a base de sintéticos (SBM), los cuales se han estado clasificando y utilizando en función de su comportamiento durante la operación de perforación; pero, se ha seleccionado como mejor opción el WBM entre los otros dos debido a que éstos tienen desventajas como: mayor costo, problemas ambientales, problemas de eliminación y problemas de salud y seguridad [1].

Actualmente, las compañías petroleras nacionales e internacionales desarrollan WBM que tengan componentes capaces de controlar el volumen filtrado, el aumento de tamaño de las arcillas, el mal transporte de ripios que a su vez puede generar puntos apretados y entrapamiento de la

broca, entre otros, ocasionando inestabilidad en el pozo junto con otros problemas adicionales. Además de lo descrito anteriormente, las empresas buscan fluidos de perforación que generen una torta de filtración para evitar la pérdida de fluido, con esto controlando el volumen de fluido filtrado y a su vez, estabilizando las condiciones del pozo [2].

La aparición de los problemas con el uso de estos fluidos es más probable en condiciones de alta presión y alta temperatura, debido a que a estas condiciones sufren cambios en sus propiedades físico-químicas propiciando daños a la formación [3]. De los aspectos más críticos que se deben controlar en la perforación de petróleo y gas está el mantener la estabilidad del pozo cuando el agua invade el esquistoso (zona arcillosa) ya que, debido a esto, se genera una hinchazón y desprendimiento del pozo, con lo cual se afectará la eficiencia de la perforación y el efecto de protección del yacimiento [4]. En busca de mejorar las propiedades de los fluidos de perforación se ha implementado la adición de nanopartículas que pueden mejorar tanto las propiedades reológicas, como mecánicas y térmicas de los mismos [5].

Teniendo en cuenta el uso de nanopartículas se estudió la aplicación de las de sílice (SiO<sub>2</sub>), puesto que una de sus propiedades más importantes es que es altamente adsorbente. Las nanopartículas han tenido un alto impacto en la industria petrolera ya que el tamaño de ellas oscila entre 20 y 100 nm (relación área superficial/volumen) favoreciendo así la transferencia de masa y energía.

Revisando un poco las investigaciones que se han realizado acerca de las NP's en los fluidos de perforación, se encuentra la de Sedaghatzadeh *et al.* [7] quienes estudiaron el impacto de la adición de nanotubos de carbono (CNT) en las propiedades térmicas y reológicas de un fluido de perforación. Sus resultados mostraron que la condición de CNT mejoró la conductividad térmica del fluido de perforación hasta un 31% con una temperatura del fluido de 53 °C. En otro estudio

se agregaron NP's de SiO<sub>2</sub> a fluidos de perforación variando sus tamaños entre 1 y 97 nm y sus concentraciones entre el 0.5 y 1 %p/p con respecto al fluido [8]. Por otra parte, cuando se agregan NP's en menor concentración con relación al lodo se reduce más el espesor de la torta y las pérdidas de filtrado que éste genera; además, estas NP's no generan un efecto o cambio adverso en la viscosidad, pH y densidad de los fluidos de perforación [9].

Hoelscher *et al.* [10] ilustraron que la muestra no se tapó/selló solo con salmuera, sino que cuando se implementó el uso de solo un 3% de nanosílica mostraron casi un cierre completo de la transmisión de presión a través de la muestra de lutitas. Las pruebas de penetración de presión en muestras de lutitas puras y microfacturadas con permeabilidades iniciales que oscilan entre 1 y 100.000 nD demostraron que la invasión de agua en las lutitas se puede contener completamente tapando las microfisuras y los poros de las lutitas con un fluido de perforación a base de agua adecuadamente diseñado que contenga las NP's apropiadas.

Betancur *et al.* [8] presentaron resultados de una reducción en las pérdidas de filtrado en un 23% y del espesor de la torta en un 70%, usando NP's de sílice; del mismo modo, Polanyi *et al.* [6] obtuvieron reducciones de 70 y 35% en el espesor de la torta y en la pérdida de filtrado, respectivamente con NP's de SiO<sub>2</sub>. Ambos resultados se dan gracias a la prueba de filtrado API (American Petroleum Institute) que consiste en que luego de la preparación del fluido de perforación, se agregan las cantidades de NP's a evaluar, y oscilan entre 10 y 10,000 mg/L con respecto al fluido de perforación. Esta prueba proporciona el tamaño a la cual se forma la torta y cuánto volumen se perdió en la circulación.

Yuanpeng *et al.* [3] probaron las capacidades de conexión de las NP's en una torta de filtro y encontraron que los WBM que contienen la superficie de las NP's de SiO<sub>2</sub> modificadas con PAMPS (PAMPS: 2-acrylamide-2-methylpropanesulfonic acid) generaron NP's híbridas (exhiben

una alta tolerancia a la sal, resistencia a la temperatura y compatibilidad con aditivos poliméricos en WBM) las cuales mostraron excelentes propiedades de obturación tanto a temperatura ambiente como a temperatura de 80 °C lo que demuestra que son agentes prometedores para perforar en formaciones de lutitas.

Hamid *et al.* [11] analizaron las NP's de SiO<sub>2</sub> junto con TiO<sub>2</sub> y su efecto en la estabilidad a la dispersión, conductividad eléctrica y viscosidad de los fluidos.

## 1. Objetivos

### 1.1 General

Evaluar el efecto sobre las pérdidas por filtrado que tiene el aditamento de nanopartículas de SiO<sub>2</sub> funcionalizadas en los lodos de perforación.

### 1.2 Específicos

- Realizar un método de síntesis para obtener nanopartículas de SiO<sub>2</sub>.
- Efectuar el método de funcionalización escogido a las nanopartículas de SiO<sub>2</sub>.
- Ejecutar pruebas de laboratorio basándose en las normas API (American Petroleum Institute) a los fluidos de perforación modificados con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> comerciales y funcionalizadas.

## 2. Descripción metodológica

Para la realización de este estudio se planteó un diseño experimental teniendo en cuenta el alcance que este podía tener en cuanto a uso de equipos y acompañamiento de personal capacitado. Adicionalmente, se emplearon los productos para la preparación de los fluidos de perforación base

agua provistos por una empresa prestadora de servicios petroleros que se llamó empresa A, por fines de confidencialidad. Se revisó dicho diseño y se encontró que el costo operacional para realizar la síntesis de NP's era muy alto, así como la cantidad que se requería de nanopartículas para agregar a los fluidos de perforación en lo que refiere al uso y disponibilidad de reactivos; por lo que se decidió emplear NP's comerciales de SiO<sub>2</sub> facilitadas por el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP); debido a esto, surge un nuevo proceso el cual consiste en activar las NP's comerciales para que puedan reaccionar, ya que son calcinadas para poder comercializarlas sólidas. El proceso se realiza empleando un hidróxido que se encarga de mantener el pH básico, esto debido a que el SiO<sub>2</sub> solo reacciona en medio básico, por lo que se puede definir que la activación en este estudio se resume en controlar el medio básico de la reacción utilizando un hidróxido. Luego de realizar el proceso de activación, se procede a hacer la funcionalización a las nanopartículas.

Con lo anterior, se planteó un diseño experimental, el cual se presenta a continuación:

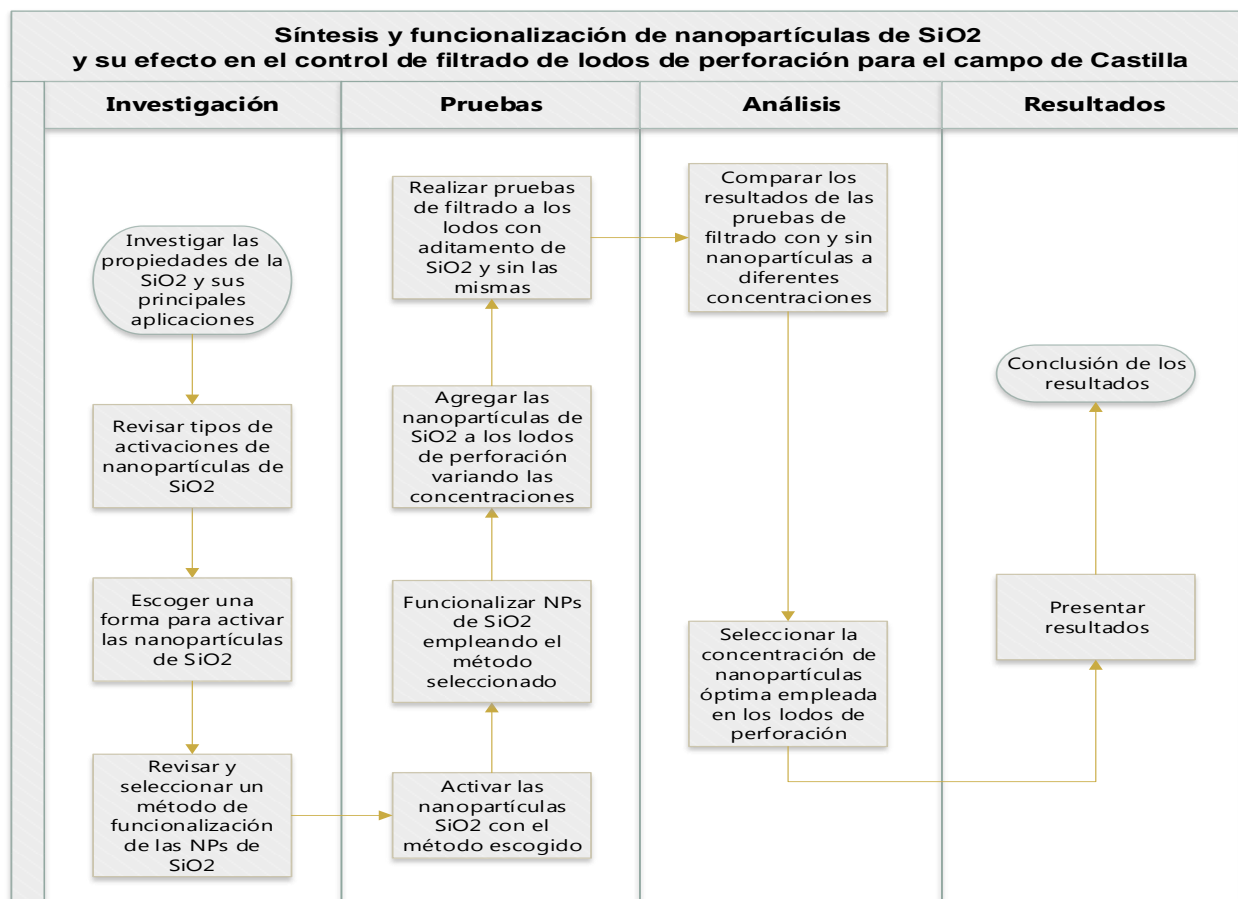


Figura 1. Diseño Experimental

## 2.1 Descripción experimental de cada etapa

**2.1.1 Investigación.** En el proceso de investigación se revisaron varios tipos de funcionalizaciones y activaciones para las NP's de SiO<sub>2</sub> realizadas en investigaciones encontradas en la literatura y estado del arte. Luego, se seleccionó emplear hidróxido de amonio (NH<sub>4</sub>OH) al 25% para la activación de las NP's con el objetivo de controlar el medio básico de la reacción y 3-aminopropiltriétoxissilano (APTES) al 99% para su funcionalización. Se decidió usar estos reactivos porque se disponía de ellos en el laboratorio en dónde se realizó la investigación y adicional, el hidróxido de amonio mantiene el pH básico de la reacción sin que haya una separación

del Hidróxido con el amonio, evitando así, que esto sea un factor que interfiera en mi reacción. El APTES fue seleccionado debido a que se buscaba modificar la carga negativa de las nanopartículas a carga positiva.

**2.1.2 Pruebas.** Se realizó un proceso de activación de las NP's comerciales en presencia de hidróxido de amonio (NH<sub>4</sub>OH) para su posterior funcionalización con 3-aminopropiltriétoxissilano (APTES) usando como solvente etanol al 99.5%. Seguido de esto, se prepararon los lodos blancos (lodo base agua overburden y yacimiento sin NP's) para realizarles las pruebas de control de filtrado (API, HPHT, PPT) y reología; luego se prepararon los lodos con aditamento de NP's funcionalizadas y sin funcionalizar variando sus concentraciones para comparar los resultados de las pruebas con los blancos previamente evaluados.

**2.1.3 Análisis.** Se compararon las pruebas realizadas a los lodos cuando se adicionaron las NP's con los blancos (lodos sin aditamento de NP's) para poder determinar una concentración óptima de SiO<sub>2</sub> que mejore el control de filtrado en los fluidos de perforación.

**2.1.4 Resultados.** Se presentaron los resultados en tablas y se procedió a realizar gráficos de dispersión para analizar los comportamientos reológicos de los fluidos de perforación base y modificados con NP's, asimismo, se realizan gráficos de barras para analizar el control de filtrado y prueba de reología que presentaron estos fluidos.

Finalmente, la propuesta será seleccionar las mejores condiciones experimentales encontradas en la literatura y el estado del arte para realizar la síntesis, activación y funcionalización de nanopartículas de SiO<sub>2</sub>, de igual forma ver qué efecto tendrán estas nanopartículas (comerciales

activadas y comerciales funcionalizadas) en la reología y el control de filtrado de los fluidos de perforación.

## **2.2 Procedimiento para la síntesis y funcionalización de nanopartículas de sílice (SiO<sub>2</sub>) con 3-aminopropiltriethoxisilano (APTES)**

En esta sección se explica el procedimiento que se realizó de síntesis y funcionalización de nanopartículas de sílice con grupo un grupo amino (TEOS/APTES) basados en estudios previos realizados en el Instituto Colombiano del petróleo.

- En un balón de laboratorio se adiciona una solución de 100 mL de etanol (EtOH) al 99.5% y 8 mL de tetraetilortosilicato (TEOS) al 98%; esta solución es puesta en una plancha de calentamiento a baño maría en aceite con una temperatura constante de 25 °C y agitación de 500 rpm durante 15 minutos.
- Seguido de esto, se mantiene la agitación y la temperatura constante para adicionar 16 mL gota a gota hidróxido de amonio (NH<sub>4</sub>OH) al 25% durante 2 horas.
- Terminado el proceso anterior, se regula la agitación a 300 rpm, se aumenta la temperatura a 75 °C y se adicionan 5 mL de 3-aminopropiltriethoxisilano (APTES) al 99%, se instala un sistema de reflujo y se deja durante 24 horas.
- Cumplidas las 24 horas, la solución es llevada a un proceso de centrifugación para retirar el material que no reaccionó o sobrenadante realizando lavados con etanol para purificar la muestra. Se realizan un total de 6 lavados en 6 viales plásticos de 40 mL para centrífuga a condiciones de 13.000 rpm y 8 °C durante 20 minutos.

- Con este procedimiento se obtienen alrededor de 2.7 gramos de nanopartículas de sílice funcionalizadas con el grupo amino. El tiempo necesario para realizar el protocolo anteriormente descrito es de 32 horas aproximadamente.

### **2.3 Procedimiento de activación de nanopartículas comerciales de sílice con hidróxido de amonio (NH<sub>4</sub>OH)**

En esta sección se explica la activación de las nanopartículas comerciales las cuales fueron empleadas para realizar el presente estudio. Este procedimiento fue realizado tanto para obtener las nanopartículas usadas en los blancos (lodos overburden y yacimiento con adición de nanopartículas sin funcionalizar) como para las nanopartículas funcionalizadas siendo necesario debido a que las nanopartículas comerciales son calcinadas para evitar que reaccionen previamente a su venta. El proceso se describe a continuación teniendo en cuenta que también fue tomado de estudios del Instituto Colombiano del Petróleo:

- En un ultrasonido, previamente es puesto un frasco de borosilicato de 500 mL al cual se le agregan 210 mL de Etanol (EtOH) al 99.5% junto con 4.2 gramos de nanopartículas comerciales. Después de adicionar las nanopartículas, se adicionan 28 mL de hidróxido de amonio (NH<sub>4</sub>OH) al 25% gota a gota. Este proceso es realizado en un ultrasonido para mantener agitación constante a una temperatura de 60 °C durante 2 horas.
- Seguido de esto, se retira el frasco de borosilicato del ultrasonido y se deja en reposo durante 8 horas.
- Cumplidas las 8 horas, es necesario extraer las nanopartículas de esta solución, para ello, es usada una centrífuga en la cual la solución con las nanopartículas comerciales activadas

son puestas en viales de plástico y son llevadas a un proceso de lavado y centrifugado. Este proceso se da en presencia de etanol retirando el sobrenadante (material que no reaccionó) en cada lavado a 13.000 rpm con 8 °C durante 20 minutos.

- Seguido de esto, las nanopartículas son llevadas en una bandeja a un horno con una temperatura constante de 65 °C durante 12 horas para que se evapore el etanol sobrante y queden las nanopartículas sólidas.

#### **2.4 Procedimiento de funcionalización de nanopartículas de sílice SiO<sub>2</sub> con 3-aminopropiltriethoxisilano (APTES)**

En esta sección se describe el proceso de adición del grupo amino por medio de un enlace covalente a las nanopartículas de Sílice comerciales cargando las nanopartículas positivamente. Este proceso se da después de la activación de las nanopartículas (proceso descrito anteriormente) con una variación descrita a continuación:

- Cumplidas las 2 horas del primer paso del procedimiento anterior en el ultrasonido, el frasco de borosilicato no es retirado, por el contrario, son adicionados 200 mL de etanol (EtOH) al 99.5%, luego se adicionan 3.36 mL de APTES gota a gota y se deja en agitación constante a temperatura de 60 °C durante 2 horas.
- Seguido de esto, el frasco es retirado del ultrasonido y dejado en reposo durante 12 horas. Luego se realiza el mismo procedimiento de lavado y centrifugado.
- Al finalizar los 8 lavados a 13.000 rpm con temperatura de 8 °C dentro de la centrífuga con duraciones de 20 minutos, la solución que queda es llevada al horno a una temperatura de 60 °C para poder obtener las nanopartículas sólidas.

Al comparar los 2 procesos se encuentra que en el proceso implementado se gasta más tiempo, pero, en cuanto a disponibilidad de reactivos (principalmente del TEOS), se toma la decisión de implementar el proceso de activación y funcionalización puesto que es más importante el factor de disponibilidad de reactivos que el factor del tiempo (4 horas de diferencia); todo esto haciendo claridad y énfasis en que no se tenía suficiente TEOS en el laboratorio; en cambio, sí se tenían suficientes nanopartículas de SiO<sub>2</sub> comerciales para implementar el proceso sin ningún riesgo de no obtener la cantidad de nanopartículas de SiO<sub>2</sub> funcionalizadas con APTES que se requerirían para cumplir con el diseño experimental a los fluidos de perforación planteado en uno de los objetivos específicos al iniciar con el estudio.

## **2.5 Formulación lodo base agua para perforación en overburden**

El fluido de perforación para overburden es el que se emplea al comienzo de la perforación, antes de la zona de interés, tiene una densidad de 12 lpg para el campo de Castilla y un pH que oscila entre 9 y 9.5.

A continuación, se describirá la preparación del lodo para overburden con el cual se tomó el blanco para las pruebas teniendo en cuenta la formulación determinada por la empresa prestadora de servicios llamada A, dicha formulación contiene bentonita y barita (todas las cantidades expuestas son aproximaciones debido a la confidencialidad del documento):

- Para preparar un barril se toman 350 mL de agua en un recipiente plástico los cuales son puestos con una agitación constante leve en el mixer para poder mantener la homogeneidad durante toda la preparación. Tener en cuenta que: en la hidratación influye el orden de la adición, entre producto y producto debe haber una agitación de 10 minutos, los productos

son agregados lentamente a la mezcla y en caso de que se formen aglomerados es necesario aumentar la velocidad del mixer.

- Luego se miden entre 7 y 15 lb/b de Bentonita.
- Seguido de esto, se miden entre 1 y 3 lb/b de controlador de filtrado tipo almidón.
- Después se miden entre 1 y 3 lb/b de Polianiónica Celulosa.
- Posteriormente se miden entre 0.1 y 0.5 lb/b de Goma Xántica.
- Finalmente se miden entre 210 y 250 lb/b de Barita y se adicionan a la mezcla, luego esta se deja 30 minutos en agitación.
- Se miden entre 0.2 y 1 lb/b de Hidróxido de Sodio y se adicionan a la mezcla.
- Al cumplir los 30 minutos, se retira el lodo del mixer, se mide su peso y se deja 16 horas en reposo para que se dé una buena hidratación de los polímeros.

## **2.6 Formulación lodo base agua para perforación en yacimiento**

El Fluido de perforación para yacimiento es el que se emplea en la formación productora o zona de interés, tiene una densidad de 9.5 lpg para el campo de Castilla y un pH que oscila entre 9 y 9.5.

A continuación, se describirá la preparación del lodo para yacimiento con el cual se tomó el blanco para las pruebas teniendo en cuenta la formulación determinada por la empresa prestadora de servicios llamada A, dicha formulación contiene carbonatos (todas las cantidades expuestas son aproximaciones debido a la confidencialidad del documento):

- Para preparar un barril se toman 350 mL de agua en un recipiente plástico los cuales son puestos con una agitación constante leve en el mixer para poder mantener la homogeneidad

durante toda la preparación. Tener en cuenta que: en la hidratación influye el orden de la adición, entre producto y producto debe haber una agitación de 10 minutos, los productos son agregados lentamente a la mezcla y en caso de que se formen aglomerados es necesario aumentar la velocidad del mixer.

- Luego se miden entre 3 y 6 lb/b de controlador de filtrado tipo Almidón.
- Seguido de esto, se miden entre 1 y 4 lb/b de Polianiónica Celulosa.
- Después se miden entre 1 y 5 lb/b de Goma Xántica.
- Posteriormente se miden los carbonatos de Calcio M200, M325 y M600 y se adicionan a la mezcla.
- Se miden entre 0.2 y 1 lb/b de Hidróxido de Sodio y se adicionan a la mezcla.
- Finalmente se deja 30 minutos en agitación.
- Al cumplir los 30 minutos, se retira el lodo del mixer, se mide su peso y se deja 16 horas en reposo para que se dé una buena hidratación de los carbonatos.

## 2.7 Experimentos

En el presente estudio se realizaron pruebas de reología y control de filtrado (API, HPHT y PPT) a los lodos base agua Overburden y Yacimiento. En la presente sección se especifica el paso a paso del proceso de experimentación que se llevó a cabo con los lodos, los estudios que se realizaron y las pruebas que se tuvieron en cuenta. En todos los experimentos se preparan un total de tres (3) barriles de lodo para poder realizar todas las pruebas en conjunto y optimizar el tiempo en el laboratorio.

En la prueba de reología se empleó el equipo FANN 35 y se revisaron parámetros como la viscosidad plástica, el yield point, el yield stress y la fuerza de geles.

En la prueba de filtrado se evaluaron las pruebas API con el equipo Filtro prensa FANN 300; la prueba HPHT con el equipo Filtro prensa FANN HT4700; y, finalmente, para la prueba PPT se empleó el equipo PPA. Para realizar los experimentos descritos es importante resaltar las condiciones de operación de los equipos que lo requieran mostradas en la tabla 1, además de que el tiempo de toma de datos es de treinta 30 minutos.

API	
Temperatura	No aplica
Presión	100 PSI
HPHT	
Temperatura	170 °F
Presión superior	600 PSI
Presión inferior	100 PSI
PPT	
Temperatura	170 °F
Presión superior	100 PSI
Presión inferior	1100 PSI

Figura 2. Condiciones para prueba de control de Filtrado

**2.7.1 Lodos sin nanopartículas.** Se realiza la preparación de tres (3) barriles de cada lodo sin nanopartículas (lodo overburden y lodo yacimiento) para poder tener un punto de comparación en las pruebas. Para ello, se toman las formulaciones de ambos lodos (descritas en los ítems 3.6. y 3.7.) y se realizan las pruebas de reología y control del filtrado (API, HPHT, PPT).

**2.7.2 Lodos con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> comerciales sin funcionalizar.** Para este experimento se preparan tres (3) barriles a la vez de cada lodo para poder realizarles las pruebas de reología y control de filtrado (API, HPHT y PPT) de la siguiente manera:

Se preparan en un recipiente plástico dos (2) barriles con agua usando la cantidad de productos que regularmente se adicionarían a tres (3) barriles debido a que, el tercer barril es preparado con las nanopartículas para su posterior adición. Es importante aclarar que a estos 2 barriles de agua no se les agregará el hidróxido de sodio ya que éste será adicionado junto con las nanopartículas en dispersión con agua.

Adicional a ello, en un vaso de precipitado plástico se prepara un barril con solo agua (350 mL), el cual es ubicado sobre una plancha de calentamiento a temperatura ambiente (25 °C) y con agitación magnética de 600 rpm. Seguido de esto, se agrega el Hidróxido de Sodio (NaOH), para luego adicionar la primera concentración de nanopartículas de Sílice sin funcionalizar (0.1% p/v equivalente a 0.35 lb/b pero como se están preparando 3 barriles, se añaden en realidad 1.05 lb/3b) a la solución de agua con Hidróxido de Sodio y se deja en agitación durante 15 minutos.

Cuando se terminan de adicionar los productos respectivos a cada lodo, se le añade lentamente la solución con nanopartículas y se deja en el mixer durante 30 minutos revisando que no se formen aglomerados. Terminado el tiempo anterior, se retira el lodo del mixer y se deja en reposo para que se hidrate durante 16 horas. Cumplidas las 16 horas, el lodo es puesto nuevamente en agitación durante treinta (30) minutos en el mixer para luego ser empleado en la realización de las pruebas.

Este procedimiento se repite para preparar las 6 concentraciones diferentes de nanopartículas por cada lodo: 0.1% p/v (0.35 lb/b), 0.2% p/v (0.7 lb/b), 0.3% p/v (1.05 lb/b), 0.4% p/v (1.4 lb/b), 0.5% p/v (1.75 lb/b) y 1% p/v (3.5 lb/b) en tres barriles cada una.

**2.7.3 Lodos con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> comerciales funcionalizadas con APTES.** Se realiza el mismo experimento anterior (ítem 3.8.2.) cambiando las nanopartículas sin funcionalizar

por nanopartículas funcionalizadas con 3-Aminopropiltrietoxisilano (APTES) y se mantienen las cantidades anteriores.

### 3. Resultados

#### 3.1 Caracterización de las nanopartículas comerciales de SiO<sub>2</sub> y funcionalizadas con APTES

**3.1.1 Espectro Infrarrojo.** La espectroscopia IR [12] es una herramienta para determinar la composición de un sólido (sedimento). Esta técnica en el modo de reflectancia total atenuada (MIR-ATR) permite la obtención de espectros IR directamente sobre muestras sólidas, lo cual es ideal para el análisis de muestras opacas y no cristalinas. Es una técnica comúnmente empleada para identificar la composición química de una muestra.

Los espectros IR se asimilan a una huella digital, la cual es única para cada compuesto. Cambios sutiles en la composición pueden identificarse fácilmente por esta técnica ya que cada banda está asociada con los grupos funcionales presentes en la muestra. Para la toma de los espectros IR se utilizó el equipo FT-IR Bruker alpha I.

A continuación, se describe una investigación en donde caracterizaron por la técnica de IR dos tipos de muestra: NP's de SiO<sub>2</sub> sintetizadas y NP's de SiO<sub>2</sub> funcionalizadas con APTES, el espectro IR se muestra a continuación con ambas señales en la misma figura:

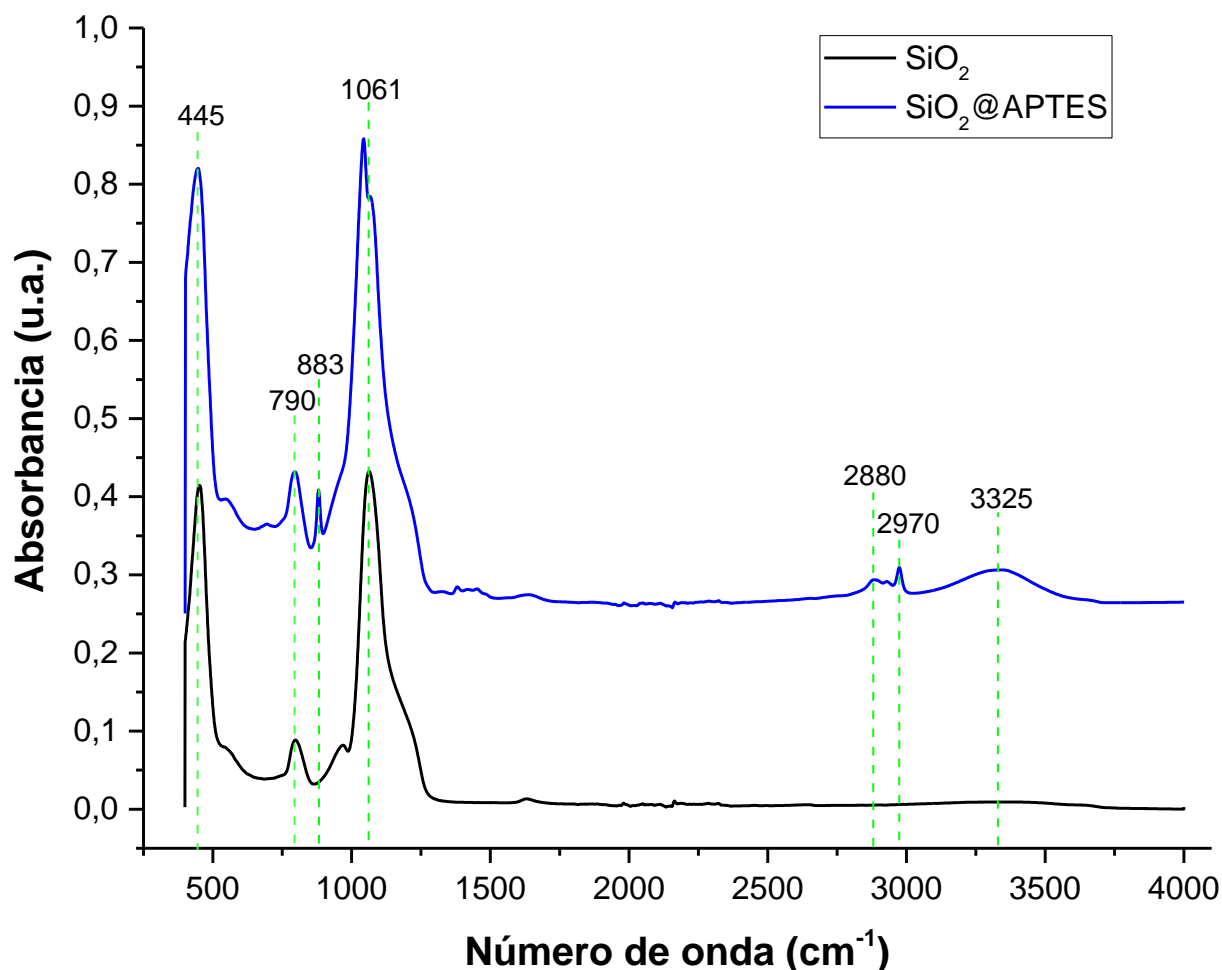


Figura 3. Espectros FT-IR de SiO<sub>2</sub> y SiO<sub>2</sub>@APTES NP's

En los dos espectros, se observan las señales típicas de las NP's SiO<sub>2</sub> que corresponden a los siguientes modos vibracionales: tensión de los enlaces Si-O-Si (1061 cm<sup>-1</sup>), flexión de los enlaces SiO-H (973 cm<sup>-1</sup>), flexión de los enlaces Si-O-Si (790 cm<sup>-1</sup>) y balanceo tipo tijera de los enlaces Si-O-Si (445 cm<sup>-1</sup>).

En el caso de las SiO<sub>2</sub>@APTES se logró evidenciar la funcionalización de las nanopartículas de SiO<sub>2</sub> con el reactivo APTES. Además de las bandas anteriormente mencionadas, se encontraron las siguientes señales asociadas a la presencia de los grupos amino y metileno de las moléculas de APTES: la banda ancha correspondiente a la tensión simétrica y asimétrica de los enlaces -NH<sub>2</sub>

alrededor de los 3325 cm<sup>-1</sup>, los modos vibracionales de tensión de los enlaces metileno –CH<sub>2</sub> (2880 y 2970 cm<sup>-1</sup>) y la señal correspondiente a las vibraciones de flexión de los enlaces –NH<sub>2</sub> (883 cm<sup>-1</sup>).

Después de obtener los resultados de infrarrojo para la presente investigación con la ayuda del equipo nombrado anteriormente, se muestra el espectro para las NP's de SiO<sub>2</sub> comerciales:

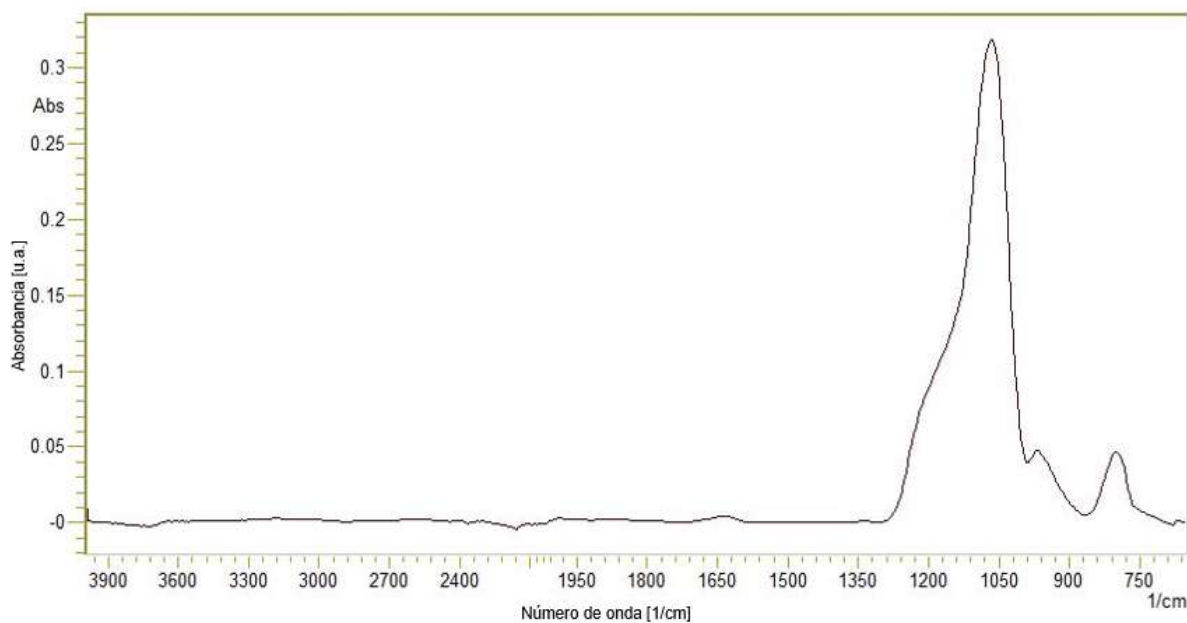


Figura 4. Espectro Infrarrojo de las nanopartículas de SiO<sub>2</sub> comerciales

En este espectro se observan 3 señales que corresponden según literatura a los siguientes modos vibracionales: la primera y más visible en 1061 cm<sup>-1</sup> que corresponde a la tensión en los enlaces Si-O-Si, prosigue la señal a 973 cm<sup>-1</sup> que corresponde a la flexión de los enlaces SiO-H y finalmente a 790 cm<sup>-1</sup> que corresponde a la flexión de los enlaces Si-O-Si, comparando este espectro con el de la investigación guía se puede deducir que el espectro corresponde a nanopartículas de SiO<sub>2</sub>.

Luego, se caracterizaron las nanopartículas de SiO<sub>2</sub> a las cuales se les realizó el protocolo de funcionalización con APTES, el espectro IR es mostrado a continuación:

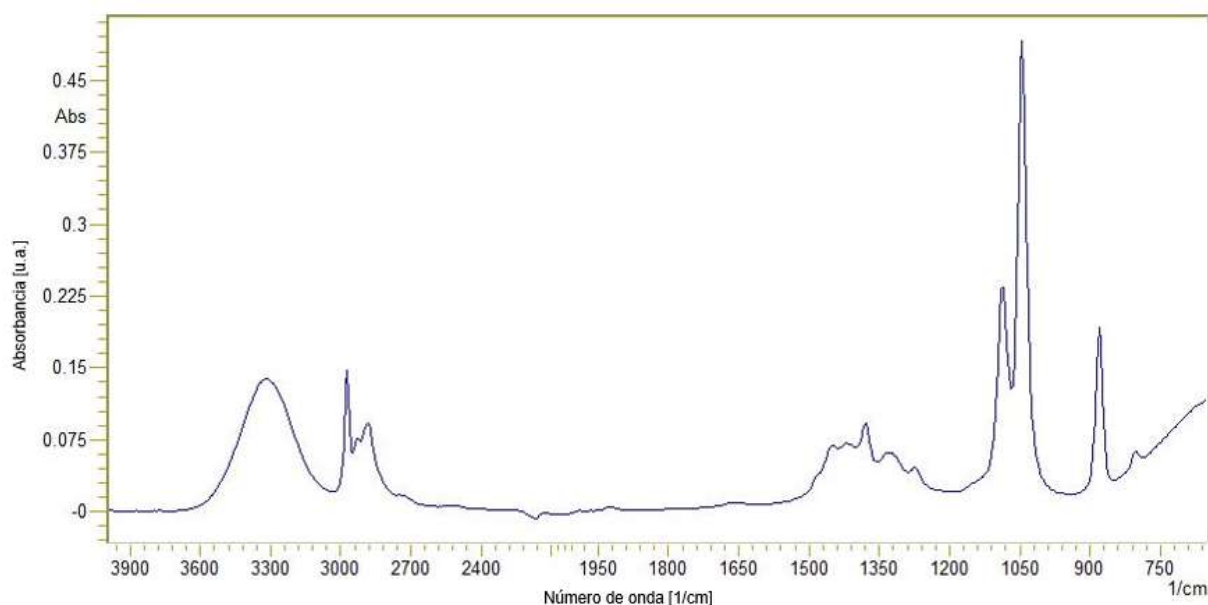


Figura 5. Espectro Infrarrojo de las nanopartículas comerciales de SiO<sub>2</sub> funcionalizadas con APTES

En este caso, se evidencia la misma señal a 1061 cm<sup>-1</sup> correspondiente a la tensión de los enlaces Si-O-Si, también se observa una señal en 790 cm<sup>-1</sup> que es la flexión de los enlaces Si-O-Si, por lo que se deduce que aún se encuentran las señales típicas de SiO<sub>2</sub>. Ahora, se evidencian unas señales adicionales que son la presencia de grupos amino y metileno del APTES, la banda ancha correspondiente a la tensión simétrica y asimétrica de los enlaces -NH<sub>2</sub> aproximadamente en 3300 cm<sup>-1</sup>; además, los modos vibracionales de tensión de los enlaces metileno -CH<sub>2</sub> (2880 Y 2970 cm<sup>-1</sup>, aproximadamente). Por lo que comparándolo con la investigación guía, y por su alta similitud entre espectros, se puede concluir que las nanopartículas de SiO<sub>2</sub> comerciales fueron funcionalizadas con APTES.

**3.1.2 Diámetro Hidrodinámico DLS.** La determinación de tamaño de partícula se realiza mediante la técnica de Análisis Dinámico de Luz Dispersa (DLS) siguiendo los procedimientos descritos en el estándar internacional ISO 22412 para análisis de tamaño de partícula por Dynamic Light Scattering (DLS). La técnica consiste en el monitoreo de la fluctuación de la intensidad de luz dispersada cuando pasa a través de la muestra, con lo cual es posible determinar la velocidad de difusión debido al movimiento Browniano (coeficiente de difusión) y posterior cuantificación del tamaño de partícula por medio de la ecuación de Stokes - Einstein.

El equipo empleado para tal fin es el ZETASIZER ZS90 de MALVERN. Para evaluar el tamaño de partícula de la formulación inicialmente se determina la concentración óptima para el análisis (10 – 100 kcps); para este fin es necesario realizar diluciones de la formulación hasta encontrar estabilidad en el tamaño de partícula. En el ANEXO C se encuentra la figura del tamaño de partícula de las nanopartículas comerciales de SiO<sub>2</sub> el cual fue de 157.2 nm.

Seguido de esto, se tomó el tamaño de partícula de las nanopartículas comerciales de SiO<sub>2</sub> funcionalizadas con APTES, el cual arrojó un valor de 271.7 nm (VER ANEXO C).

Ahora, se puede observar que este tamaño es más grande que el de las nanopartículas comerciales debido a la presencia de más reactivos como el APTES y el hidróxido de amonio, utilizados en el protocolo de funcionalización; además, se debe tener en cuenta que el tamaño de ambas nanopartículas (comerciales y funcionalizadas) es hidrodinámico, por lo que se forman aglomerados de partículas y debido a ello se muestran tamaños tan grandes para ser escala nanométrica, químicamente ocurre una condensación de APTES en la nanopartícula de SiO<sub>2</sub> y la forma de la nanopartícula es llamada core-shell, que quiere decir que se adhirió un recubrimiento de APTES, cabe aclarar que no se sabe hasta qué punto sea total, pero que si se analizan las dos técnicas de caracterización enunciadas hasta ahora (IR y DLS) simultáneamente y

complementarias la una de la otra, se puede concluir que las nanopartículas de SiO<sub>2</sub> comerciales quedaron funcionalizadas con APTES.

**3.1.3 Potencial Zeta.** Se realizaron las lecturas de los potenciales zeta de las nanopartículas comerciales y las nanopartículas comerciales funcionalizadas con APTES, ambos fueron leídos en el equipo nanosizer zs-90 de la empresa MALVERN.

El potencial zeta de las nanopartículas comerciales fue 19.2 mV y el de las nanopartículas comerciales funcionalizadas con APTES fue 10.2 mV. Se conoce por literatura que la zona de inestabilidad está comprendida en el rango entre -30 y +30 mV, por lo que ambos tipos de nanopartículas fueron inestables.

De este modo, se recomienda dispersar las NP's en un solvente más afín a ellas, o en este caso agregar un surfactante para facilitar su dispersión y que de esta forma exhiban valores de potencial z en la zona de estabilidad.

## 3.2 Reología

### 3.2.1 Lodo para perforación en Overburden.

RESULTADOS DE NANOPARTÍCULAS DE SiO <sub>2</sub> COMERCIALES EN LODO OVERBURDEN						
CONCENTRACIÓN	ESFUERZO DE CORTE [Lb/100 ft <sup>2</sup> ]					
[%p/v]	600 [rpm]	300 [rpm]	200 [rpm]	100 [rpm]	6 [rpm]	3 [rpm]
0	66	44	34	23	6	5
0,1	65	44	35	23	6	5
0,2	63	42	33	21	6	5
0,3	64	42	30	19	5	4
0,4	59	39	31	19	5	4
0,5	66	45	34	21	6	5
1	64	42	31	20	5	4

Figura 6. Resultados de reología para lodo overburden con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> comerciales

Se observa que los esfuerzos de corte disminuyen considerablemente a una concentración de nanopartículas comerciales de 0.4 %p/v, por lo cual se puede deducir que esta concentración es la que más afecta la reología para un lodo overburden; asimismo, empieza a ocurrir un cambio en la reología de forma general en el fluido a partir de una concentración de 0.3 %p/v. Finalmente, a una concentración de 0.5 %p/v se evidencia un aumento de los esfuerzos de corte con respecto a la tendencia de disminución que se venía presentando, y a 1 %p/v la reología vuelve y aumenta.

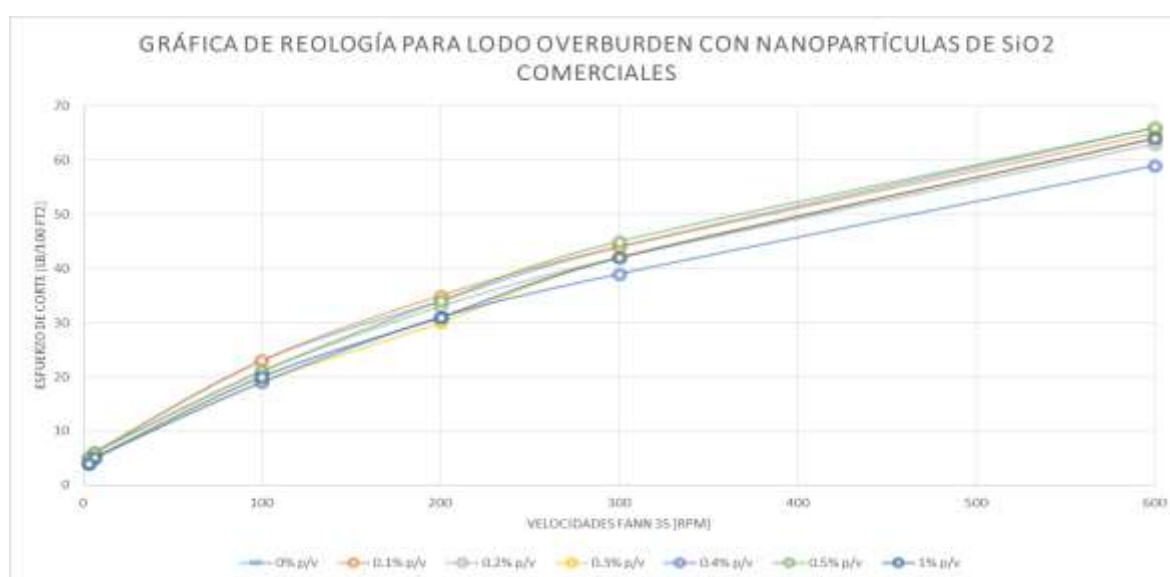


Figura 7. Gráfica de reología para lodo overburden con distintas concentraciones %p/v de nanopartículas de SiO<sub>2</sub> comerciales

En la gráfica anterior se evidencia una disminución considerable de la reología a una concentración de 0.4 %p/v, lo que conlleva a una disminución en la viscosidad del fluido. También se observa que a concentraciones de 0.1 y 0.2 %p/v no ocurren cambios considerables de reología, a concentración de 0.5 %p/v ocurre un aumento con respecto a la tendencia de disminución anterior y finalmente a 1 %p/v vuelve a hacer una disminución. En conclusión, se puede afirmar con las pruebas realizadas de reología que las nanopartículas de SiO<sub>2</sub> comerciales tuvieron efecto en la

reología del fluido de perforación para sección overburden. Si se analiza desde el punto de vista de las pruebas de filtrado, esto es favorable debido a que, en el mejor de los casos, el objetivo es que las nanopartículas no afecten de forma considerable la reología de los fluidos.

RESULTADOS DE NANOPARTÍCULAS DE SiO <sub>2</sub> FUNCIONALIZADAS EN LODO OVERBURDEN						
CONCENTRACIÓN	ESFUERZO DE CORTE [Lb/100 ft <sup>2</sup> ]					
[%p/v]	600 [rpm]	300 [rpm]	200 [rpm]	100 [rpm]	6 [rpm]	3 [rpm]
0	66	44	34	23	6	5
0,1	64	43	34	24	6	5
0,2	63	42	31	20	5	4
0,3	62	42	33	23	5	4
0,4	61	41	31	22	5	4
0,5	60	40	31	21	5	4
1	58	38	28	18	4	3

*Figura 8.* Resultados de reología para lodo overburden con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> funcionalizadas con APTES

Se observa que las nanopartículas funcionalizadas con APTES siempre disminuyeron la reología del fluido de perforación a medida que la concentración aumentaba, y esto podría presentarse porque según literatura las aminos se utilizan para inhibir las arcillas, lo que conlleva a una disminución de la viscosidad.

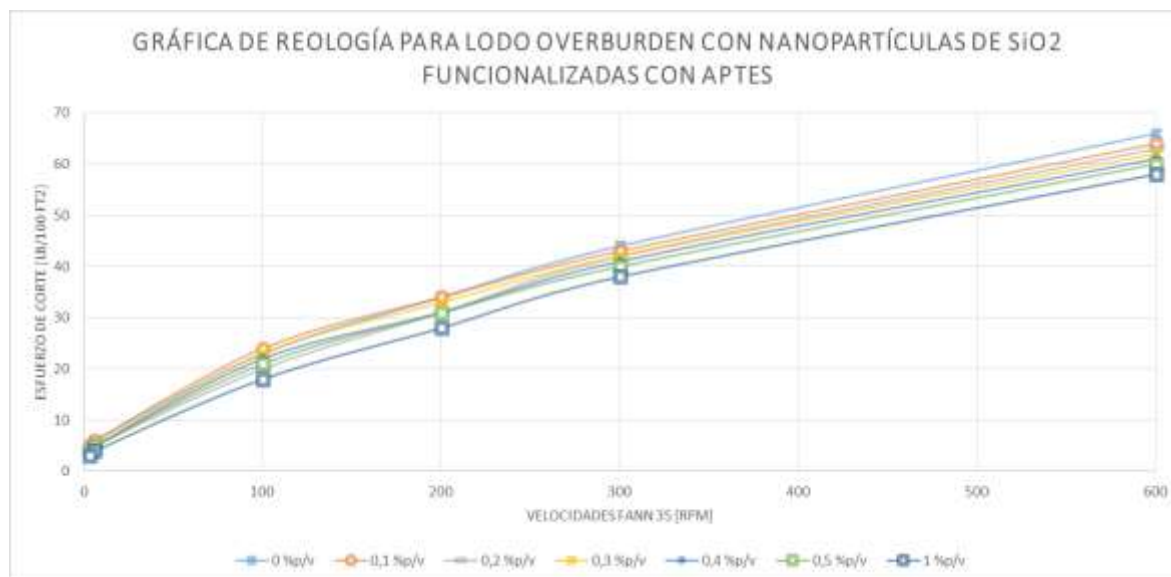


Figura 9. Gráfica de reología para lodo overburden con distintas concentraciones %p/v de nanopartículas de SiO<sub>2</sub> funcionalizadas con APTES

Se observa en la figura 6 un cambio significativo cuando la concentración de NP's supera un valor de concentración de 0.4% p/v, con esto, se encuentra que para las NP's funcionalizadas en el lodo base agua overburden es mejor emplear una concentración igual o inferior a 0.4% p/v, evitando con esto que la reología se vea afectada y así poder analizar de mejor forma los resultados de volúmenes filtrados. Lo anterior se deduce revisando las diferencias en los esfuerzos de corte ya que, por ejemplo, para una velocidad de 600 rpm a la cual el lodo inicial estaba en 66 lb/100ft<sup>2</sup>, a la concentración de 0.4% p/v ya había disminuido a un valor de 61 lb/100ft<sup>2</sup>. En cuanto a los esfuerzos de corte, se busca que estos no tengan una variación significativa al compararlos con el lodo base o lodo con concentración de 0% p/v de nanopartículas, teniendo en cuenta que estas son las especificaciones y/o propiedades que emplea la empresa A para perforar el campo con este fluido de perforación.

### 3.2.2 Lodo para perforación en Yacimiento.

RESULTADOS DE NANOPARTÍCULAS DE SiO <sub>2</sub> COMERCIALES EN LODO YACIMIENTO						
CONCENTRACIÓN	ESFUERZO DE CORTE [Lb/100 ft <sup>2</sup> ]					
[%p/v]	600 [rpm]	300 [rpm]	200 [rpm]	100 [rpm]	6 [rpm]	3 [rpm]
0	85	57	46	31	7	6
0,1	81	56	44	30	7	6
0,2	80	55	42	30	7	6
0,3	78	54	40	29	6	5
0,4	78	53	39	29	6	5
0,5	77	52	37	27	6	5
1	75	50	36	25	6	5

Figura 10. Resultados de reología para lodo yacimiento con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> comerciales

Las nanopartículas comerciales en el fluido sección yacimiento siempre disminuyeron el comportamiento reológico a medida que se aumentaban las cantidades agregadas a la formulación del lodo. Por lo que se concluye que las nanopartículas comerciales de SiO<sub>2</sub> disminuyeron la reología para ambos fluidos en los que se emplearon (overburden y yacimiento).

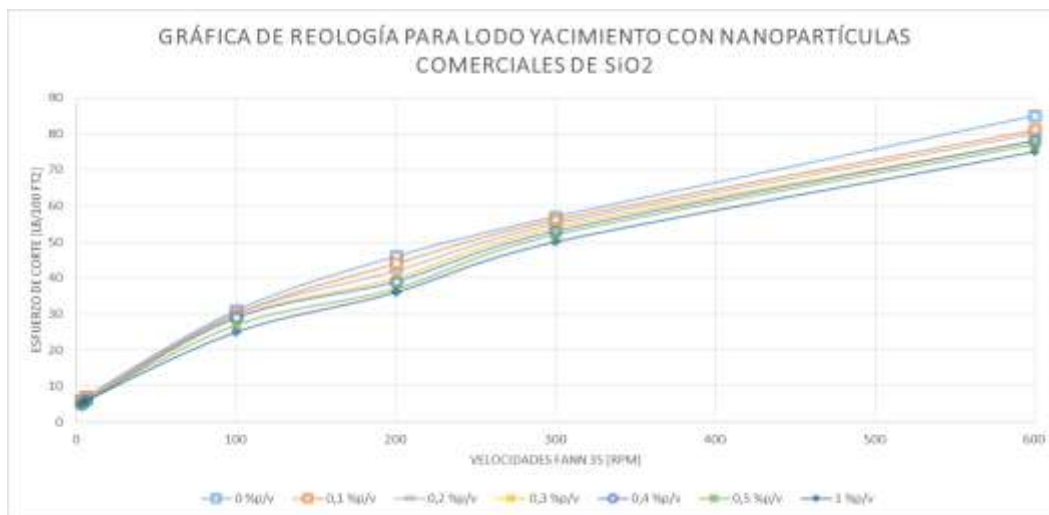


Figura 11. Gráfica de reología para lodo yacimiento con distintas concentraciones %p/v de nanopartículas de SiO<sub>2</sub> comerciales

En la figura 7, para un lodo base agua yacimiento, la agregación de NP's comerciales disminuyó el comportamiento reológico y por ende la viscosidad (VER ANEXO E). Se puede revisar este comportamiento comparando los esfuerzos de corte con cada velocidad aplicada, por ejemplo, a 600 rpm para el lodo de concentración 0% p/v (lodo base o blanco) el esfuerzo fue de 85 lb/100ft<sup>2</sup> y para este mismo a una concentración de 0.1% p/v ya había disminuido a 81 lb/100ft<sup>2</sup>.

RESULTADOS DE NANOPARTÍCULAS DE SiO <sub>2</sub> FUNCIONALIZADAS EN LODO YACIMIENTO						
CONCENTRACIÓN	ESFUERZO DE CORTE [Lb/100 ft <sup>2</sup> ]					
[%p/v]	600 [rpm]	300 [rpm]	200 [rpm]	100 [rpm]	6 [rpm]	3 [rpm]
0	85	57	46	31	7	6
0,1	78	53	40	29	6	5
0,2	73	50	39	27	6	5
0,3	65	45	34	23	6	5
0,4	54	36	28	19	5	4
0,5	44	30	24	16	5	4
1	51	34	28	20	6	5

*Figura 12.* Resultados de reología para lodo yacimiento con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> funcionalizadas con APTES

Se observa un comportamiento igual al de los casos anteriores (disminución de la reología) pero con la excepción de que el orden de disminución de cada uno de los datos fue mucho mayor, por lo que se puede concluir que las nanopartículas funcionalizadas fueron las que más afectaron el comportamiento del fluido de perforación, en este caso yacimiento. Además, algo curioso es que a una concentración de 1 %p/v vuelve y aumenta la reología del fluido y existe la posibilidad de que, si sigue aumentando la cantidad de nanopartículas funcionalizadas agregadas, se va a incurrir en un aumento en la viscosidad.

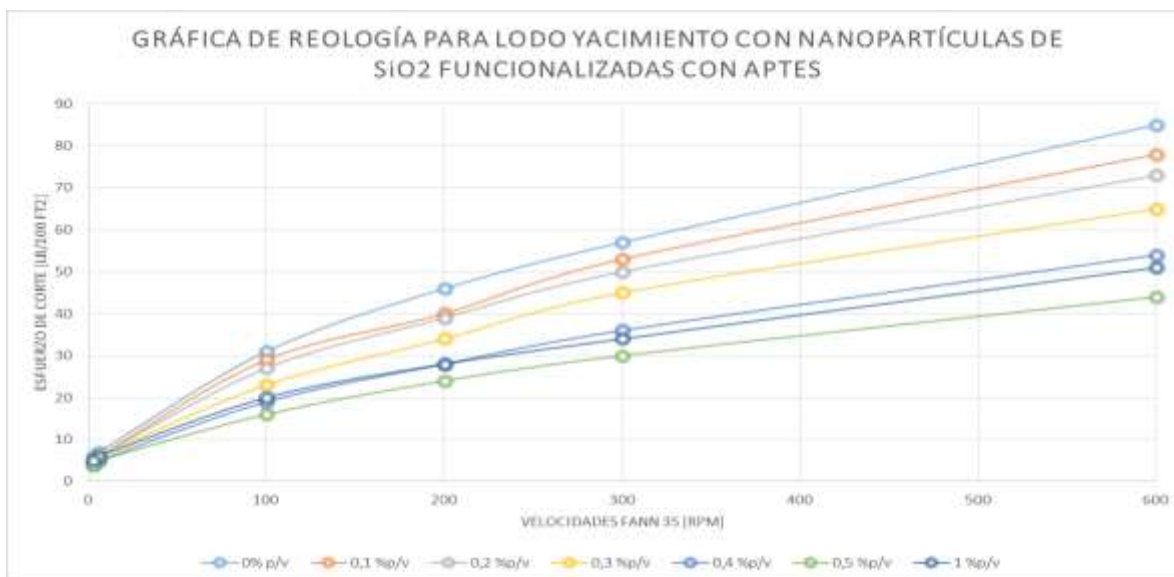


Figura 13. Gráfica de reología para lodo yacimiento con distintas concentraciones %p/v de nanopartículas de SiO<sub>2</sub> funcionalizadas con APTES

En la figura 8 se evidencia que con la agregación de NP's de sílice funcionalizadas con APTES al lodo yacimiento, el comportamiento reológico se ve gravemente afectado disminuyendo el esfuerzo de corte, perdiendo con esto, las propiedades iniciales del lodo referencia (0% p/v). Adicional, sí se revisa el ANEXO E, se encuentra que la viscosidad plástica, el yield point y el yield stress disminuyeron significativamente con todas las concentraciones aplicadas (todo esto se ve reflejado en la resistencia a fluir y la capacidad de suspender y transportar ripios). Por lo que se concluye que el APTES afecta la viscosidad del fluido de perforación sección overburden de forma negativa disminuyéndola en órdenes considerables, adicional, esta disminución también se podría presentar por la interacción química de las nanopartículas y los carbonatos que hacen parte de la formulación del lodo para yacimiento.

### 3.3 Filtrados

#### 3.3.1 Lodo para perforación en Overburden.

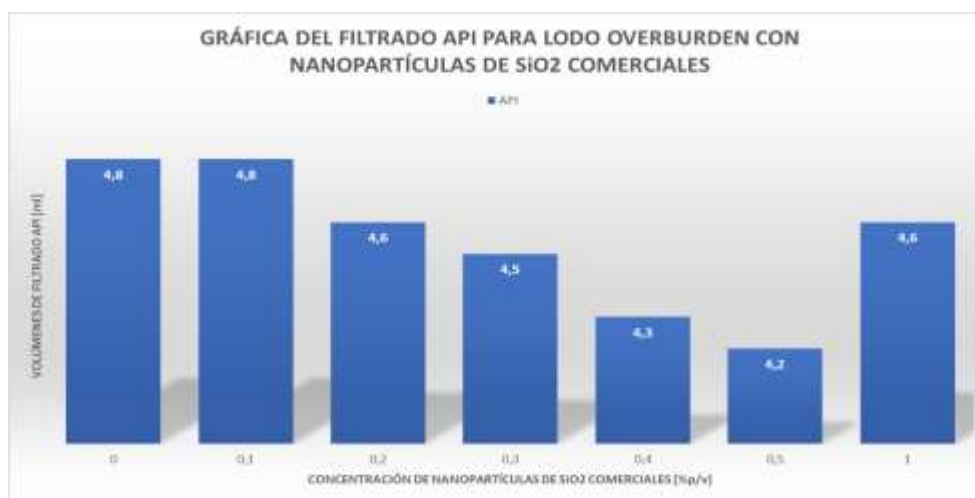


Figura 14. Gráfica de filtrado API para lodo overburden con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> comerciales

En la figura 9, las NP's comerciales de SiO<sub>2</sub> en el lodo overburden mostraron una mayor eficiencia en el control de filtrado API a una concentración de 0.5% p/v. También se puede observar que a partir de 0.2% p/v empieza a haber una disminución en el filtrado y que a concentración de 1% p/v ocurre un aumento de filtrado considerable en comparación a cómo se venía dando la tendencia de disminución. Con esto se concluye que la mejor concentración fue de 0.5 %p/v para obtener un menor filtrado API para NP's comerciales de sílice empleadas en el lodo overburden, adicional, se evidencia también con la reología que es óptimo usar concentraciones hasta 0.5% p/v según este estudio.

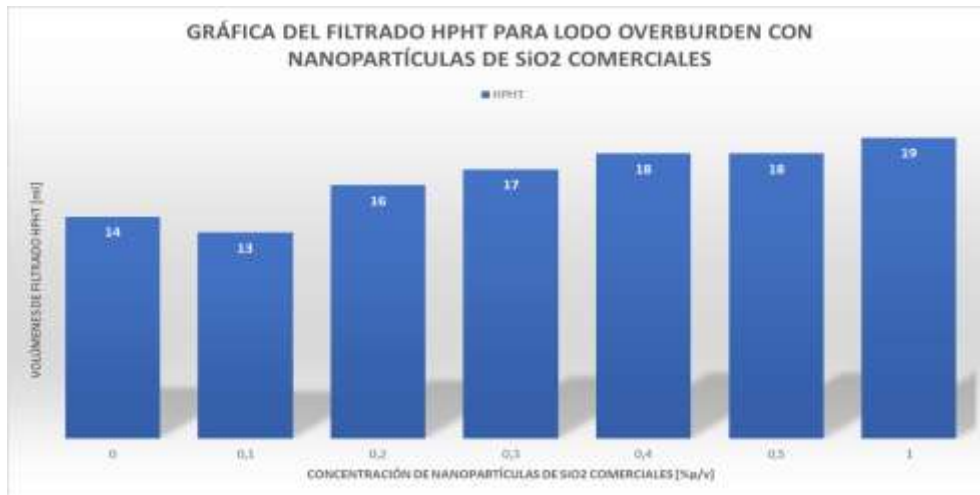


Figura 15. Gráfica de filtrado HPHT para lodo overburden con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> comerciales

En la figura 10, la prueba de filtrado HPHT mostró un comportamiento contrario al filtrado API puesto que estuvo en aumento, exceptuando la concentración de 0.1 %p/v para la cual, el filtrado fue el más bajo. Con esto se concluye que a concentraciones bajas de NP's de sílice comerciales para el lodo overburden, se obtiene un mejor cambio en cuanto al filtrado HPHT; adicional, también se observa que a diferencia de la prueba API, la HPHT emplea la temperatura y presión del campo (diferencial de 500 psi), por lo que se puede deducir que estos parámetros influyeron en la respuesta de las NP's.

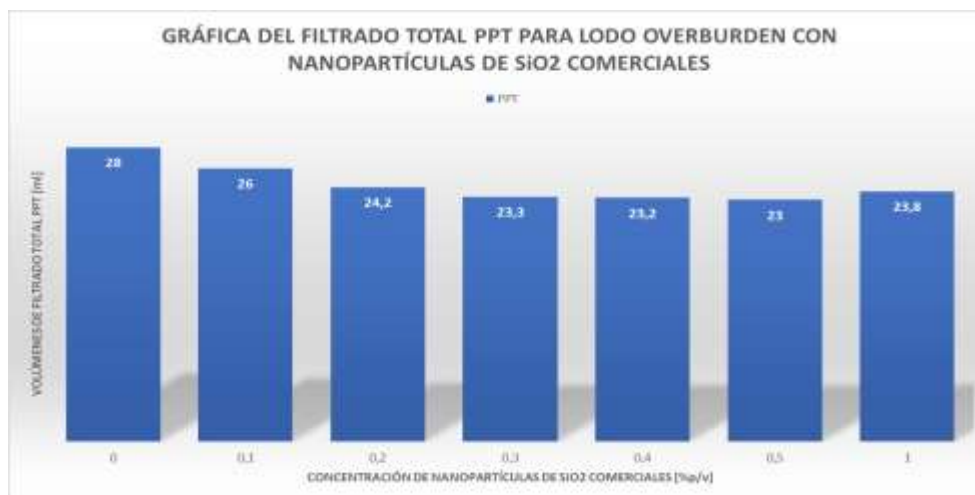


Figura 16. Gráfica de filtrado total PPT para lodo overburden con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> comerciales

En cuanto a la prueba PPT, la concentración que tuvo un menor filtrado fue la de 0.5 %p/v e igual que en la prueba API para una concentración de 1% p/v, el filtrado aumentó y se infiere que este aumento continúe a medida que se aumenta la concentración de NP's. Sin embargo, al revisar la influencia que tiene pasar de 23.3 ml a 23 ml comparado con el costo de subir la concentración de 0.3 a 0.5% p/v, se concluye que la concentración óptima costo/beneficio es la de 0.3% p/v. Con esto se concluye que la presión también es un factor importante y relevante para las NP's de sílice comerciales teniendo en cuenta la disminución del filtrado cuando fue sometida a un diferencial de presión de 1000psi.



Figura 17. Gráfica de filtrado API para lodo overburden con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> funcionalizadas con APTES

En la figura 12 de filtrado API, la concentración de NP's funcionalizadas que tuvo un menor filtrado fue la de 0.3% p/v, después de ese valor se da una tendencia al aumento del volumen filtrado. Por lo que se puede inferir que las NP's funcionalizadas tienen una mayor eficiencia para el filtrado API en lodo overburden a concentraciones entre 0.2 y 0.4% p/v.

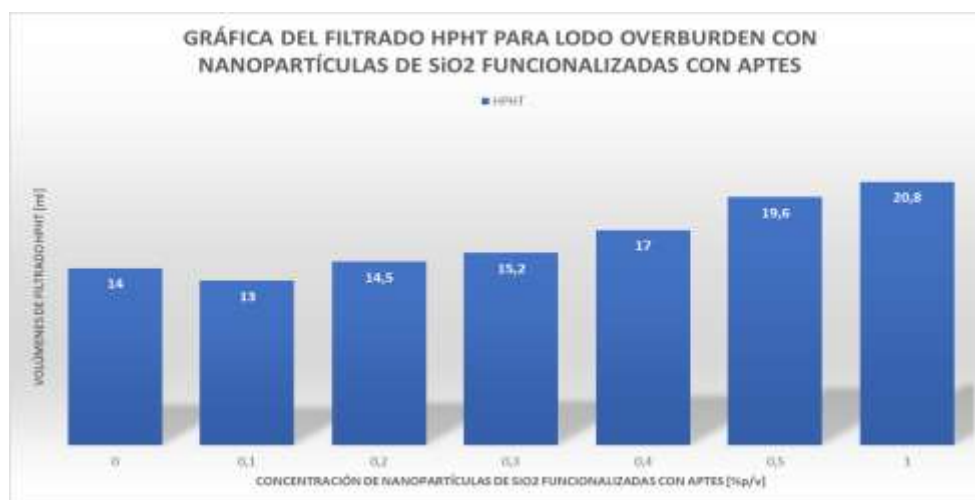


Figura 18. Gráfica de filtrado HPHT para lodo overburden con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> funcionalizadas con APTES

En la figura 13, para la prueba HPHT, el menor volumen filtrado fue a la concentración de 0.1%, luego de ese valor se presenta un incremento que perdura con el aumento de las concentraciones. Con esto se puede confirmar que la temperatura y la presión afectan considerablemente el comportamiento de las NP's comerciales y funcionalizadas para los resultados de las pruebas de filtrado puesto que se mantiene la misma tendencia para el lodo overburden (ver figura 9).



Figura 19. Gráfica de filtrado total PPT para lodo overburden con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> funcionalizadas con APTES

De esta gráfica se puede deducir que la concentración con la que se obtuvo un menor filtrado fue la de 0.3% p/v, luego de ésta, el filtrado estuvo en aumento. Analizando esta concentración en los demás filtrados para overburden se puede concluir que es la concentración óptima tanto para las NP's comerciales como las funcionalizadas, además, el filtrado PPT disminuyó considerablemente respecto al blanco a esta concentración.

### 3.3.2 Lodo para perforación en Yacimiento.

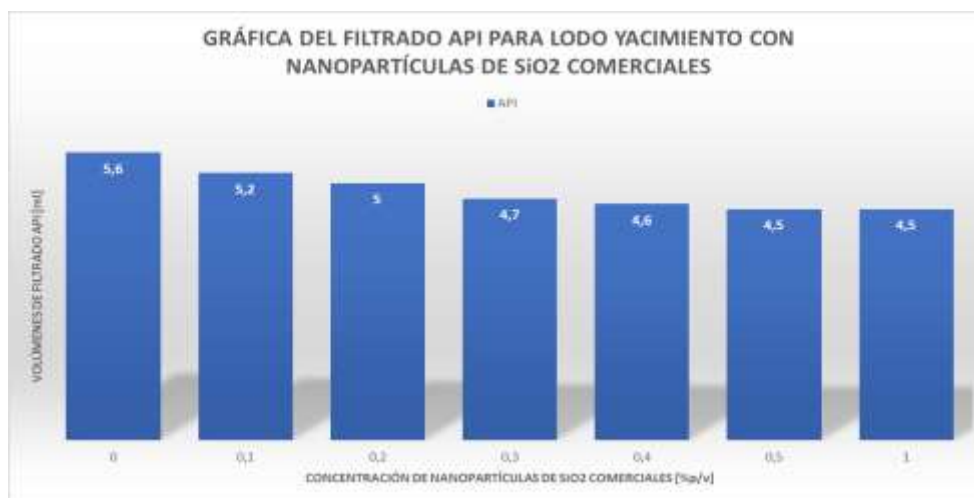


Figura 20. Gráfica de filtrado API para lodo yacimiento con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> comerciales

En la figura 15 se puede deducir del filtrado API en yacimiento que a medida que se aumenta la concentración de NP's comerciales el filtrado disminuye, obteniéndose los valores más bajos en 0.5 y 1% p/v, seleccionando con ello la concentración de 0.5% p/v por costos. Y se concluye con esto que las nanopartículas comerciales tuvieron un buen comportamiento en el fluido de perforación sección overburden.

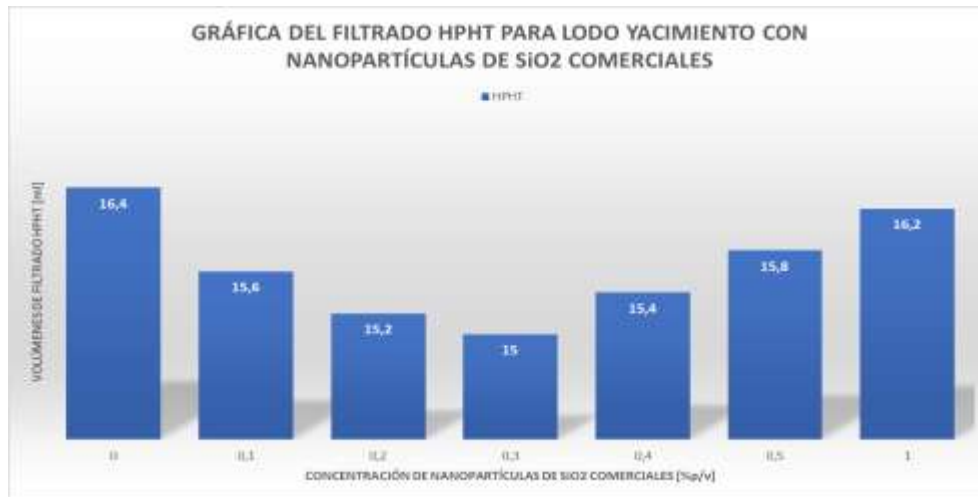


Figura 21. Gráfica de filtrado HPHT para lodo yacimiento con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> comerciales

La figura 16 muestra que la concentración que obtuvo un menor filtrado fue 0.3% p/v; concluyendo con esto que las NP's comerciales para lodo yacimiento tienen un mejor efecto a concentraciones bajas para la prueba HPHT ya que después de esta concentración, la tendencia estuvo en aumento.

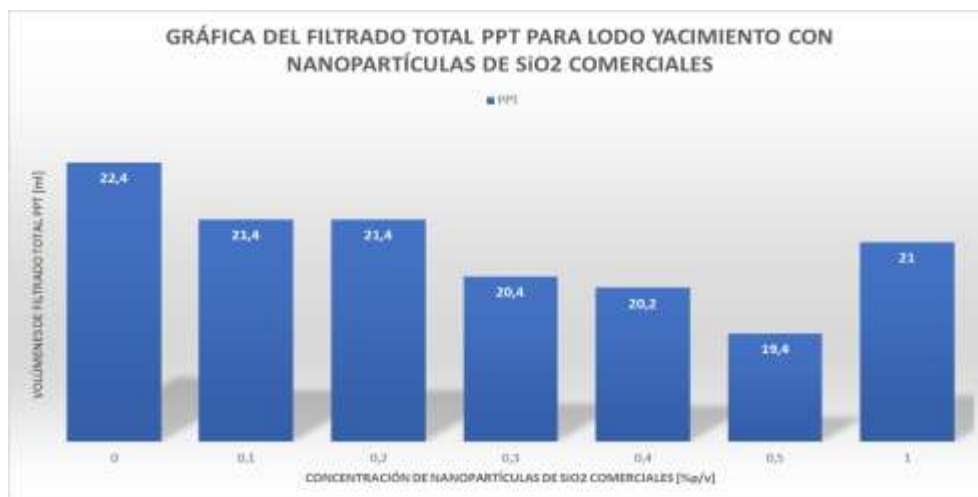


Figura 22. Gráfica de filtrado total PPT para lodo yacimiento con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> comerciales

La figura 17 de la prueba PPT muestra un menor filtrado a una concentración de 0.5% p/v de NP's comerciales en lodo yacimiento. Con esto se concluye que la concentración óptima de NP's comerciales para lodo yacimiento es de 0.5% p/v.



Figura 23. Gráfica de filtrado API para lodo yacimiento con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> funcionalizadas con APTES

La figura 18 evidencia que las concentraciones que tuvieron un menor filtrado API fueron las de 0.2 y 0.3% p/v, escogiendo la de 0.2% p/v por economía. Después de estas concentraciones el filtrado tuvo tendencia al aumento.

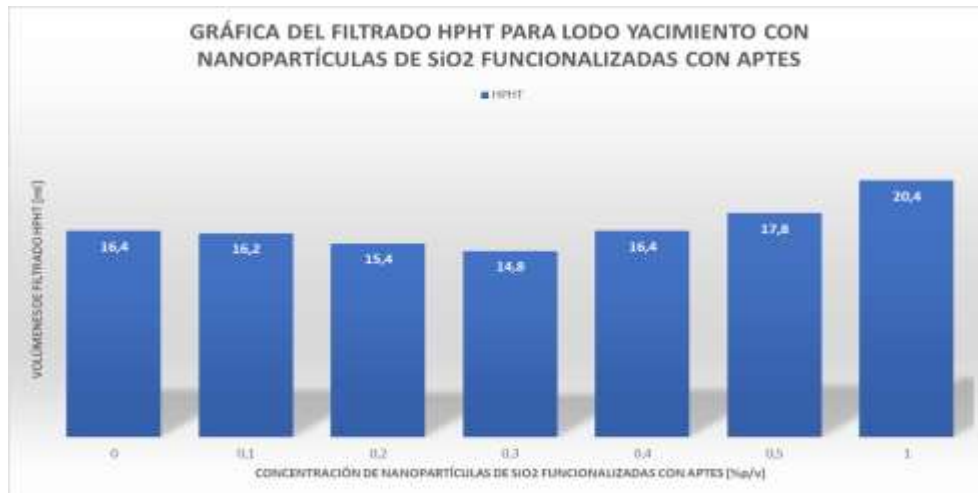


Figura 24. Gráfica de filtrado HPHT para lodo yacimiento con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> funcionalizadas con APTES

En la figura 19 para la prueba HPHT se vio un menor filtrado a una concentración de NP's funcionalizadas en lodo yacimiento de 0.3% p/v; luego de esto, el filtrado tuvo tendencia al aumento.

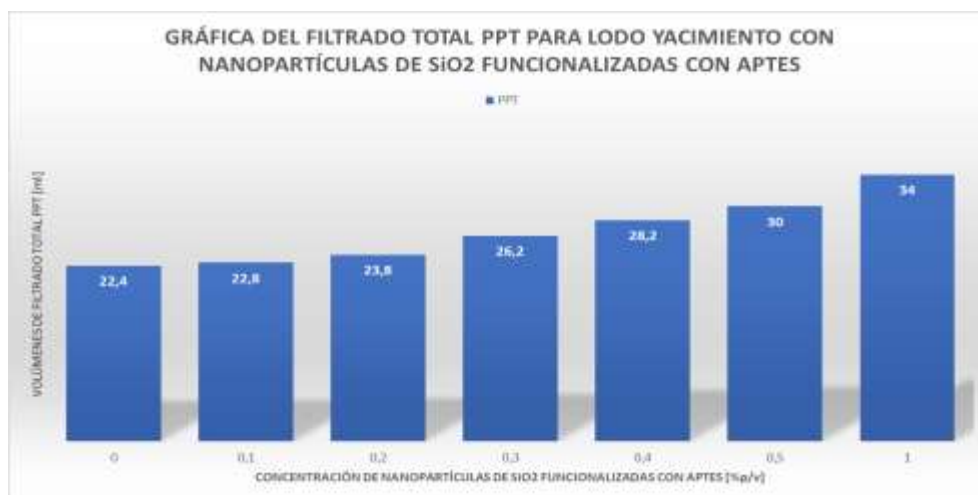


Figura 25. Gráfica de filtrado total para lodo yacimiento con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> funcionalizadas con APTES

En la gráfica de PPT se evidencia una tendencia al aumento con la adición de las nanopartículas funcionalizadas de sílice en el lodo yacimiento.

Para concluir, el mal comportamiento que tuvieron las nanopartículas funcionalizadas en el fluido sección yacimiento, se pudo presentar debido a la interacción de estas con algunos componentes adicionales en la formulación del lodo, cómo lo son los carbonatos.

#### 4. Conclusiones

Con el presente estudio se encontró que las nanopartículas tuvieron efectos tanto positivos como negativos en los lodos de perforación dependiendo de su concentración, si estaban funcionalizadas o no y si el fluido era para perforación en sección overburden o yacimiento. Por consiguiente, en el análisis de los resultados, siendo la propiedad más importante el control de filtrado, se obtuvieron resultados prometedores cuando se agregaron nanopartículas comerciales y funcionalizadas a una concentración de 0.3% p/v para el lodo overburden y 0.5 %p/v de nanopartículas comerciales para el lodo yacimiento. Las nanopartículas funcionalizadas para el lodo yacimiento no tuvieron una buena respuesta en el control de filtrado ni en la reología debido a la interacción de éstas con los carbonatos que hacen parte de la formulación de este tipo de fluido.

Se aprendieron todas las condiciones experimentales que se deben tener en cuenta a nivel de laboratorio para lograr con éxito un protocolo de síntesis de nanopartículas de SiO<sub>2</sub>. Por ejemplo, se partió de un precursor de silicio, en este caso el TEOS, se realizó por el método one-pot que significa agregar todos los componentes y reactivos en un recipiente con condiciones como agitación, calentamiento, implementación de sistemas de reflujo, tiempos de reposo y secado. Asimismo, se asimiló que la reacción de síntesis se debe dar en presencia de amoníaco para garantizar el medio básico y que de este modo ésta ocurra.

Se comprobó mediante las técnicas de caracterización IR y DLS que se pueden funcionalizar nanopartículas de SiO<sub>2</sub> comerciales mediante un proceso de previa activación, controlando el medio básico en que se debe dar la reacción, logrando con esto una gran ventaja en cuánto al

aprovechamiento del tiempo, disminución de uso de equipos de laboratorio y por ende mejor productividad al momento de obtención de nanopartículas funcionalizadas en cantidades considerables.

Se concluye que el efecto que tuvo la funcionalización con APTES en las nanopartículas para las propiedades analizadas como el comportamiento reológico y los volúmenes filtrados no fue el mejor, debido a que los grupos aaminados disminuyeron significativamente los esfuerzos de corte y por ende la viscosidad plástica, el yield point y el yield stress.

La temperatura y la presión son factores importantes que afectan las nanopartículas ya que al realizar las pruebas API, las nanopartículas tenían una buena respuesta en cuanto al control de filtrado, pero, cuando éstas eran sometidas a una temperatura superior (como en la prueba HPHT) el comportamiento de las nanopartículas se vio reflejado en los filtrados de éstas y así mismo, cuando se sometieron a una presión diferencial de 1000psi (prueba PPT).

## 5.Recomendaciones

En el momento de hacer la limpieza de las nanopartículas funcionalizadas, mediante el lavado y centrifugado con etanol, no se deben dejar en reposo mucho tiempo después de que éstas salen de la centrífuga, evitando con eso que vuelvan y se dispersen en el etanol.

Una vez transcurra el tiempo para que se dé la reacción, se debe empezar el proceso de lavado y centrifugado inmediatamente teniendo en cuenta los tiempos y lavados estipulados.

En el momento de los tiempos, implementar un sistema de cronómetro con alarma cuando se requiera agregar un reactivo adicional, esto debido a que el tiempo es una variable fundamental en los procesos de síntesis y funcionalización.

Agitar más tiempo las nanopartículas funcionalizadas para garantizar una mejor dispersión evitando con esto que se formen aglomerados en el momento de la agregación a los lodos.

Sonicar siempre previamente a realizar los procesos de centrifugación para evitar que quede producto pegado en los recipientes y viales optimizando así la separación en la centrífuga.

Se recomienda evaluar otro componente en la formulación del lodo como posible solvente (un surfactante) para las nanopartículas de SiO<sub>2</sub> tanto comerciales como funcionalizadas. Esto con el objetivo de que ellas se solubilizan de mejor manera y se comporten de forma estable para que puedan actuar de manera más eficiente en la mejora de las propiedades estudiadas del fluido de perforación.

Se recomienda realizar un estudio económico de las partículas comerciales y funcionalizadas a diferentes concentraciones, esto con el fin de tomar una mejor decisión a la hora de seleccionar una concentración de nanopartículas basada en costo/beneficio.

### Referencias Bibliográficas

- Anoop, K., *et al*, e. (2014). Rheology of mineral oil-SiO<sub>2</sub> nanofluids at high pressure and high temperatures. *International Journal of Thermal Sciences* 77, 108-115.
- Betancur, S., *et al*, e. (2014). Mejoramiento de los fluidos de perforación usando nanopartículas funcionalizadas: reducción de las pérdidas de filtrado y del espesor de la retorta. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín.
- Hamid, K., *et al*, e. (2018). Experimental investigation of thermal conductivity and dynamic viscosity on nanoparticle mixture ratios of TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 116, 1143-1152.
- Hoelscher, K., *et al*, e. (2013). *Nanotechnology Application in Drilling Fluids*. Ravenna, Italia: 11th Offshore Mediterranean Conference and Exhibition in Ravenna.
- Llinás, M., & Sánchez, D. (2013). *Nanopartículas de Sílice: preparación y aplicaciones en biomedicina*. Universidad Ramon Llull, Grupo de Ingeniería Molecular.
- Mahmoud, O. *et al*, e. (2016). *Nanoparticle-Based Drilling Fluids for Minimizing Formation Damage in HP/HT Applications*. Society of Petroleum Engineers.
- Mahmoud, O., *et al*, e. (2017). *Characterization of Filter Cake Generated by Nanoparticle-Based Drilling Fluid for HP/HT Applications*. Society of Petroleum Engineers.
- Parizad, A., *et al*, e. (2018). SiO<sub>2</sub> nanoparticle and KCl salt effects on filtration and thixotropical behavior of polymeric water based drilling fluid: With zeta potential and size analysis. *Results in Physics* 9, 1656-1665.
- Polanyi, M. (2016). *Nanopartículas inteligentes para la optimización de fluidos de perforación*. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín.

- Sedaghatzadeh, M., *et al*, e. (2012). An Improvement in Thermal and Rheological Properties of Water-based Drilling Fluids Using Multiwall Carbon Nanotube (MWCNT). *Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology*, 55-65.
- Wu, Y., *et al*, e. (2017). Poly(2-acrylamide-2-methylpropanesulfonic acid)-Modified SiO<sub>2</sub> Nanoparticles for Water-Based Muds. *Industrial & Engineering Chemical Research*, 168-174.
- Yang, X., *et al*, e. (2017). Environmental-friendly salt water mud with nano-SiO<sub>2</sub> in horizontal drilling for shale gas. *Journal of Petroleum science and Engineering* 156, 408-418.

## Apéndices

Apéndice A Productos para preparación de nanopartículas de SiO<sub>2</sub>

Apéndice B Productos para preparación lodo base agua







## Apéndice C Diámetro hidrodinámico (DLS)

Figura C1. DLS Tamaño de Nanopartículas de sílice comerciales

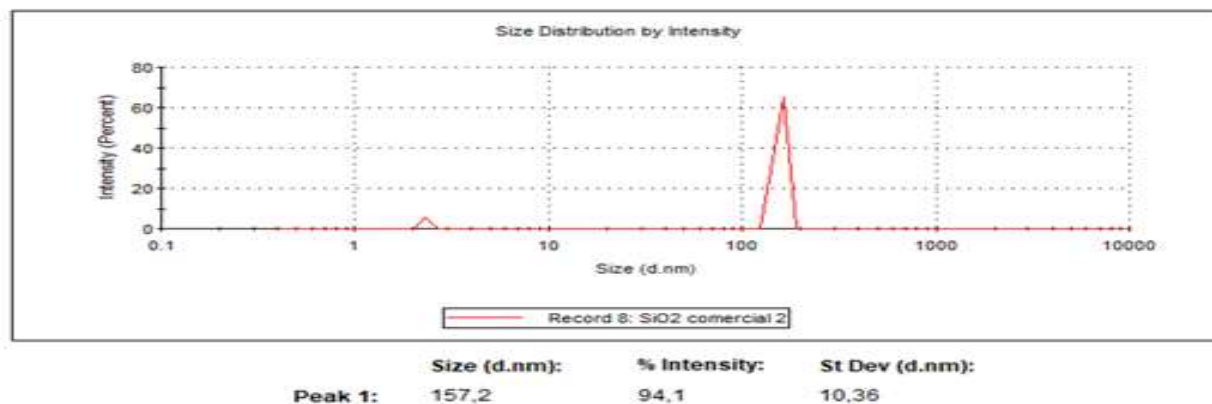
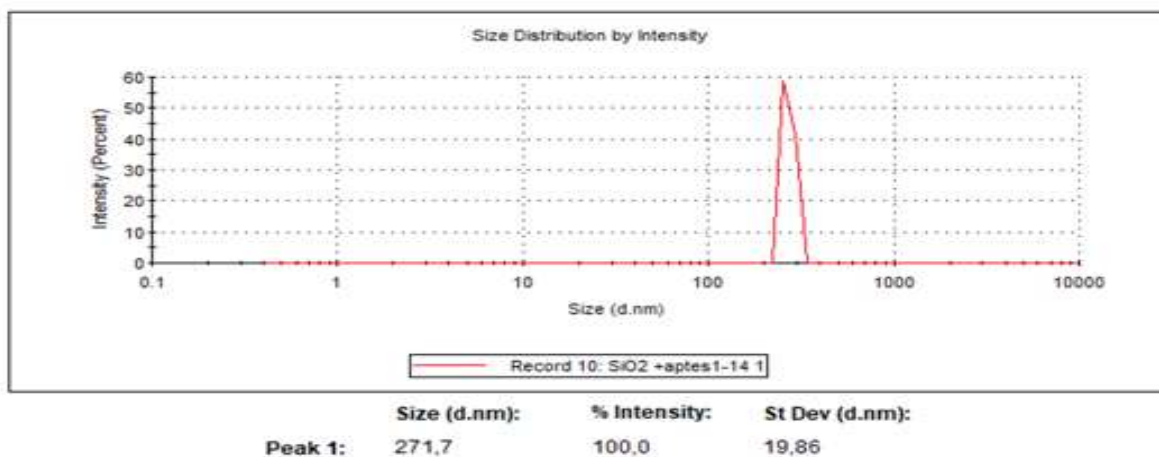


Figura C2. DLS tamaño de Nanopartícula de sílice comercial funcionalizada con APTES



## Apéndice D. Fuerza de Geles

*Tabla D1. Resultados de fuerzas de geles para lodo overburden con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> comerciales*

RESULTADOS DE NANOPARTÍCULAS DE SiO <sub>2</sub> COMERCIALES EN LODO OVERBURDEN			
CONCENTRACIÓN	FUERZA DE GELES [Lb/100 ft <sup>2</sup> ]		
[%p/v]	10 SEGUNDOS	10 MINUTOS	30 MINUTOS
0	6	9	12
0,1	6	9	12
0,2	5	8	11
0,3	4	7	10
0,4	4	6	8
0,5	5	8	11
1	5	8	11

*Tabla D2. Resultados de fuerzas de geles para lodo overburden con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> funcionalizadas con APTES*

RESULTADOS DE NANOPARTÍCULAS DE SiO <sub>2</sub> FUNCIONALIZADAS EN LODO OVERBURDEN			
CONCENTRACIÓN	FUERZA DE GELES [Lb/100 ft <sup>2</sup> ]		
[%p/v]	10 SEGUNDOS	10 MINUTOS	30 MINUTOS
0	6	9	12
0,1	6	9	11
0,2	5	8	11
0,3	5	8	11
0,4	4	7	10
0,5	4	7	9
1	4	7	9

*Tabla D3. Resultados de fuerza de geles para lodo yacimiento con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> comerciales*

RESULTADOS DE NANOPARTÍCULAS DE SiO <sub>2</sub> COMERCIALES EN LODO YACIMIENTO			
CONCENTRACIÓN	FUERZA DE GELES [Lb/100 ft <sup>2</sup> ]		
[%p/v]	10 SEGUNDOS	10 MINUTOS	30 MINUTOS
0	6	9	12
0,1	6	9	12
0,2	6	9	12
0,3	6	9	11
0,4	6	8	11
0,5	5	8	12
1	5	8	11

*Tabla D4. Resultados de fuerza de geles para lodo yacimiento con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> funcionalizadas con APTES*

RESULTADOS DE NANOPARTÍCULAS DE SiO <sub>2</sub> FUNCIONALIZADAS EN LODO YACIMIENTO			
CONCENTRACIÓN	FUERZA DE GELES [Lb/100 ft <sup>2</sup> ]		
[%p/v]	10 SEGUNDOS	10 MINUTOS	30 MINUTOS
0	6	9	12
0,1	5	8	11
0,2	5	8	11
0,3	5	7	9
0,4	4	7	9
0,5	4	7	9
1	5	7	9

## Apéndice E Modelo plástico de Bingham

*Tabla E1. Resultados de cálculos de Bingham para lodo overburden con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> comerciales*

RESULTADOS DE NANOPARTÍCULAS DE SiO <sub>2</sub> COMERCIALES EN LODO OVERBURDEN			
CONCENTRACIÓN	CÁLCULOS DE PROPIEDADES REOLÓGICAS		
[%p/v]	VP [cP]	YP [Lb/100 ft <sup>2</sup> ]	YS [Lb/100 ft <sup>2</sup> ]
0	22	22	4
0,1	21	23	4
0,2	21	21	4
0,3	22	20	3
0,4	20	19	3
0,5	21	24	4
1	22	20	3

*Tabla E2. Resultados de cálculos de Bingham para lodo overburden con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> funcionalizadas con APTES*

RESULTADOS DE NANOPARTÍCULAS DE SiO <sub>2</sub> FUNCIONALIZADAS EN LODO OVERBURDEN			
CONCENTRACIÓN	CÁLCULOS DE PROPIEDADES REOLÓGICAS		
[%p/v]	VP [cP]	YP [Lb/100 ft <sup>2</sup> ]	YS [Lb/100 ft <sup>2</sup> ]
0	22	22	4
0,1	21	22	4
0,2	21	21	3
0,3	20	22	3
0,4	20	21	3
0,5	20	20	3
1	20	18	2

**Tabla E3. Resultados de cálculos de Bingham para lodo yacimiento con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> comerciales**

RESULTADOS DE NANOPARTÍCULAS DE SiO <sub>2</sub> COMERCIALES EN LODO YACIMIENTO			
CONCENTRACIÓN	CÁLCULOS DE PROPIEDADES REOLÓGICAS		
[%p/v]	VP [cP]	YP [Lb/100 ft <sup>2</sup> ]	YS [Lb/100 ft <sup>2</sup> ]
0	28	29	5
0,1	25	31	5
0,2	25	30	5
0,3	24	30	4
0,4	25	28	4
0,5	25	27	4
1	25	25	4

**Tabla E4. Resultados de cálculos de Bingham para lodo yacimiento con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> funcionalizadas con APTES**

RESULTADOS DE NANOPARTÍCULAS DE SiO <sub>2</sub> FUNCIONALIZADAS EN LODO YACIMIENTO			
CONCENTRACIÓN	CÁLCULOS DE PROPIEDADES REOLÓGICAS		
[%p/v]	VP [cP]	YP [Lb/100 ft <sup>2</sup> ]	YS [Lb/100 ft <sup>2</sup> ]
0	28	29	5
0,1	25	28	4
0,2	23	27	4
0,3	20	25	4
0,4	18	18	3
0,5	14	16	3
1	17	17	4

## Apéndice F Filtrados API, HPHT y PPT

Tabla F1. Resultados de filtrados para lodo overburden con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> comerciales

RESULTADOS DE NANOPARTÍCULAS DE SiO <sub>2</sub> COMERCIALES EN LODO OVERBURDEN					
CONCENTRACIÓN	FILTRADOS [ml]				
[%p/v]	API	HPHT	SPURT LOSS	30 MINUTOS PARA PPT	TOTAL
0	4,8	14	2	15	28
0,1	4,8	13	2	14	26
0,2	4,6	16	1,8	13	24,2
0,3	4,5	17	1,5	12,4	23,3
0,4	4,3	18	1,2	12,2	23,2
0,5	4,2	18	1	12	23
1	4,6	19	1	12,4	23,8

Tabla F2. Resultados de filtrados para lodo overburden con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> funcionalizadas con APTES

RESULTADOS DE NANOPARTÍCULAS DE SiO <sub>2</sub> FUNCIONALIZADAS EN LODO OVERBURDEN					
CONCENTRACIÓN	FILTRADOS [ml]				
[%p/v]	API	HPHT	SPURT LOSS	30 MINUTOS PARA PPT	TOTAL
0	4,8	14	2	15	28
0,1	4,8	13	1,5	13,8	26,1
0,2	4,5	14,5	1,2	12	22,8
0,3	4,4	15,2	1	10,8	20,6
0,4	4,5	17	1	11,4	21,8
0,5	4,6	19,6	0,8	12,2	23,6
1	5,6	20,8	0,8	12,6	24,4

*Tabla F3. Resultados de filtrados para lodo yacimiento con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> comerciales*

RESULTADOS DE NANOPARTÍCULAS DE SiO <sub>2</sub> COMERCIALES EN LODO YACIMIENTO					
CONCENTRACIÓN	FILTRADOS [ml]				
[%p/v]	API	HPHT	SPURT LOSS	30 MINUTOS PARA PPT	TOTAL
0	5,6	16,4	2	12,2	22,4
0,1	5,2	15,6	1,4	11,4	21,4
0,2	5	15,2	1,4	11,4	21,4
0,3	4,7	15	1,2	10,8	20,4
0,4	4,6	15,4	1	10,6	20,2
0,5	4,5	15,8	1	10,2	19,4
1	4,5	16,2	1	11	21

*Tabla F4. Resultados de filtrados para lodo yacimiento con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> funcionalizadas con APTES*

RESULTADOS DE NANOPARTÍCULAS DE SiO <sub>2</sub> FUNCIONALIZADAS EN LODO YACIMIENTO					
CONCENTRACIÓN	FILTRADOS [ml]				
[%p/v]	API	HPHT	SPURT LOSS	30 MINUTOS PARA PPT	TOTAL
0	5,6	16,4	2	12,2	22,4
0,1	5,6	16,2	2	12,4	22,8
0,2	5,4	15,4	2,2	13	23,8
0,3	5,4	14,8	2,6	14,4	26,2
0,4	5,6	16,4	3	15,6	28,2
0,5	6	17,8	4	17	30
1	6,2	20,4	7	19	34

**Apéndice G Soporte experimentos****Proceso de síntesis y funcionalización de nanopartículas**

*Imagen G1. Proceso gota a gota en baño maría*



*Imagen G2. Sistema de reflujo*

**Proceso de activación y funcionalización**

*Imagen G3. Proceso en ultrasonido*



*Imagen G4. Nanopartículas activadas de SiO<sub>2</sub>*



*Imagen G5. Nanopartículas funcionalizadas*



*Imagen G6. Viales para centrifuga*

### Preparación de lodos



*Imagen G7. Lodo overburden*



*Imagen G8. Lodo Yacimiento*

**Pruebas de filtrado**



**Imagen G9. Prueba Reología**



**Imagen G10. Prueba API**



**Imagen G11. Prueba HPHT**



**Imagen G12. Prueba PPT**