Análisis de la influencia de diferentes nanopartículas en las propiedades reológicas y volumen de filtrado en lodos de perforación mediante una base de datos generada a partir de estudios publicados a nivel mundial.

Andrés Alexis Lozano Morales y Daniel Fernando Cordero Ordoñez

Autores

Trabajo de Grado para Optar al título de Ingeniero de Petróleos

Director

Diego Armando Vargas Silva, Msc. en Geofísica

Codirectora

Zuly Himelda Calderón Carrillo, Ph.D. en Ingeniería Química

Codirector

Ferney Mauricio Calderón Rincón, Msc. en Energías Renovables y Sostenibilidad Energética

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

A Dios por darme fortaleza en los momentos difíciles, por guiarme, escucharme y permitir alcanzar este importante logro.

A mis padres, ***María Amparo Morales*** *y* ***Rubén Darío Lozano****, por ser el motor de mi vida y mi mayor inspiración para salir adelante, por su apoyo y amor incondicional, consejos, esfuerzos y sacrificios que me permiten recibir este reconocimiento.*

A mis hermanos ***Mauricio*** *y* ***Natalia****, por escucharme en los momentos en que lo necesite, por creer en mí y en mis ocurrencias, porque son los mejores hermanos del mundo.*

En el lugar que te encuentres quiero dedicarte este logro abuelito, por tu interés en mí y mis hermanos, por tu bondad y generosidad, por confiar en mí desde el primer momento, ***Gratiniano Morales****, hoy te cumplo la promesa mi viejo querido.*

A mi novia ***Valentina Osorio Ocampo****, por ser mi compañera en este camino, por recordarme a diario el motivo de luchar por nuestros sueños, por tu humildad y sencillez y por siempre regalarme una sonrisa incluso en los momentos tristes.*

A todos y cada una de las personas que conocí en este aprendizaje, amigos y compañeros de carrera, gracias por todas las experiencias vividas.

Andrés Alexis Lozano Morales

A mis padres Hernando y Yolanda por ser incondicionales en mi formación como ser humano, por demostrarme con sus actos que quieren lo mejor para mí, por ayudarme en mi carrera con el fin de brindarme un mejor futuro y por todo esto les dedico este logro desde el corazón.

A mis hermanos Luis y Maritza, por el ánimo y empuje que me brindaron en momentos de debilidad. Y por último y no menos importante, a mi amigo y compañero de tesis Andrés, por ser de apoyo y ayuda durante todos estos años,

Daniel Fernando Cordero Ordoñez

Agradecimientos

Queremos dar nuestros más sinceros agradecimientos a:

La **Universidad Industrial de Santander** y a la **Escuela de Ingeniería de Petróleos,** por darnos la oportunidad de formarnos como profesionales, a todos nuestros profesores infinitas gracias por compartir su conocimiento.

Al **Grupo de Investigación Estabilidad de Pozos GIEP,** por permitirnos hacer parte de ellos y ofrecernos orientación cuando lo necesitamos.

A **Msc. Diego Armando Vargas Silva,** nuestro director, por su compromiso, orientación y tiempo invertido en la elaboración y culminación de esta investigación.

A **Ph.D. Zuly Himelda Calderón Carrillo** y **Msc. Ferney Mauricio Calderón Rincón,** nuestros codirectores, por brindarnos orientación y compartir un poco de su conocimiento para lograr que este trabajo investigativo culminara con éxito.

A **Tnlga. Luz Karime Contreras,** por su disposición y ayuda incondicional.

Tabla de contenido

Introducción 18

1. Marco de referencia. 21

1.1. Fluidos de perforación. 21

1.2. Funciones de los fluidos de perforación. 22

1.3. Clasificación de los fluidos de perforación. 22

1.4. Propiedades controladas por la reología del lodo de perforación. 23

1.4.1. Viscosidad aparente (VA). 23

1.4.2. Viscosidad plástica (VP). 23

1.4.3. Punto cedente o Yield point (YP). 24

1.4.4. Esfuerzos de gel. 24

1.5. Filtrado. 25

1.6. Nanotecnología. 26

1.7. Aplicaciones de la nanotecnología en la industria del petróleo y gas. 26

1.7.1. Exploración. 28

1.7.2. Perforación y producción. 28

1.7.3. Fluidos de perforación. 29

1.8. Bases de datos. 29

1.8.1. Ventajas de las bases de datos. 30

1.8.2. Desventajas. 30

1.9. Tratamiento de datos en hojas de cálculo de Excel. 30

1.10. Correlaciones. 32

1.10.1. Correlación de datos en Excel. 32

1.10.2. Regresión lineal simple. 32

1.10.3. Ajuste de una recta por mínimos cuadrados 33

1.10.4. El coeficiente de determinación, R^2. 34

2. Búsqueda de la información. 35

2.1. Revisión de la información. 35

2.2. Parámetros de búsqueda 36

2.3. Clasificación de la información. 38

2.3.1. Primera clasificación. 38

2.3.2. Segunda clasificación. 39

2.4. Herramienta Web Plot Digitizer. 40

2.4.1. Ejemplo real de extracción puntos XY de la propiedad VP para la base de datos. 40

3. Base de datos de propiedades reológicas y volumen de filtrado generada a partir de estudios publicados a nivel mundial. 45

3.1. Construcción de la base de datos. 46

3.2. Modo de uso base de datos. 48

3.2.1. Búsqueda de información. 49

3.2.2. Almacenamiento de información. 52

4. Análisis de datos y resultados. 53

4.1. Viscosidad plástica (VP). 54

4.2. Viscosidad aparente (VA). 63

4.3. Yield point (YP) 70

4.4. Resistencia de gel a 10 segundos (Gel 10 seg). 77

4.5. Resistencia de gel 10 minutos (Gel 10 min.) 82

4.6. Filtrado API 86

4.7. Filtrado HPHT 92

5. Conclusiones 97

6. Recomendaciones 99

Bibliografía 100

Lista de Tablas

Tabla 1. *Número de estudios clasificados para la base de datos*. 38

Tabla 2. *Correlaciones nanopartículas viscosidad plástica – Efecto temperatura*..... 58

Tabla 3. *Correlaciones nanopartículas viscosidad plástica – Efecto concentración. (A) Sección A, (B) Sección B.* 63

Tabla 4. *Correlaciones nanopartículas viscosidad aparente – Efecto temperatura.* 66

Tabla 5. *Correlaciones nanopartículas yield point – Efecto temperatura*. 72

Tabla 6. *Correlaciones nanopartículas gel 10 segundos – Efecto temperatura.*..... 79

Tabla 7. *Correlaciones nanopartículas gel 10 minutos – Efecto temperatura.*..... 84

Tabla 8. *Correlaciones filtrado API sección A.* 90

Tabla 9. *Correlaciones nanopartículas filtrado API – Efecto concentración. Sección B.* 92

Lista de figuras

Figura 1.*Viscosímetro Fann 35A.* 23

Figura 2.*Tipos de geles.* 25

Figura 3.*Características de la filtración.*..... 26

Figura 4.*Comparación de la medición nano escala.* 27

Figura 5. *Interfaz biblioteca UIS en la base de datos ScienceDirect.* 36

Figura 6. *Interfaz motor de búsqueda Google Académico o Scholar.* 37

Figura 7. *Menú Inicial Web Plot Digitizer.*..... 40

Figura 8. *Interfaz para cargar imágenes en Web Plot Digitizer.* 41

Figura 9. *Menú para elección de tipo de gráfica y proceder en Web Plot Digitizer.*..... 41

Figura 10. *Interfaz ubicación de puntos X_1, X_2, Y_1, Y_2 para calibración en Web Plot Digitizer.*. 42

Figura 11. *Interfaz Calibración de ejes ingresando los puntos en Web Plot Digitizer.* 42

Figura 12. *Interfaz de gráfica con puntos rojos en la función en Web Plot Digitizer.* 43

Figura 13. *Interfaz pares X, Y en Web Plot Digitizer.* 43

Figura 14. *Interfaz Microsoft Excel para "Guardar" tabla editable X,Y.* 44

Figura 15. *Interfaz Microsoft Excel con X, Y tabulados.* 44

Figura 16. *Verificación de datos extraídos con herramienta Web Plot Digitizer.* 45

Figura 17. *Clasificación base de datos, parte A.* 46

Figura 18. *Clasificación base de datos, parte B.* 47

Figura 19. *Clasificación base de datos, parte C.* 47

Figura 20. *Clasificación base de datos, parte D.*..... 47

Figura 21. *Clasificación base de datos, parte E.* 47

Figura 22. *Interfaz de usuario de la base de datos.* 49

Figura 23. *Búsqueda tipo de fluido y tipo de nanopartícula. A. Consulta de características, B. Opciones de búsqueda (Desglosar).* 49

Figura 24. *Búsqueda de concentración de nanopartícula. A. Unidades de concentración, B. Opciones de búsqueda.* 50

Figura 25. *Propiedades activas para aplicar el filtro.* 50

Figura 26. *Búsqueda de filtrado API.* 51

Figura 27. *Búsqueda combinada.* 51

Figura 28. *Interfaz de almacenamiento de nuevos estudios.* 52

Figura 29. *Almacenamiento de un nuevo estudio.* 52

Figura 30. *Efecto de la temperatura en la VP a concentración de nanopartícula constante 0,5%m.* 54

Figura 31. *Efecto de la temperatura en la VP a concentración de nanopartícula constante 0,5%m. Tendencia general*. 55

Figura 32. *Efecto de la temperatura en la VP a concentración de nanopartícula constante 1%m. Tendencia general.* 56

Figura 33. *Efecto de la temperatura en la VP en nanopartículas de (A) Sílice, (B) Alúmina, (C) Cobre, y (D) Hierro.* 57

Figura 34. *Efecto de la concentración de NP en la VP (Sección A), a temperatura constante 77°F.* 59

Figura 35. *Efecto de la concentración de NP en la VP (Sección A) a temperatura constante 77°F. Tendencia general.* 59

Figura 36. *Efecto de la concentración de NP en la VP (Sección B), a temperatura constante 77°F.* 60

Figura 37. *Efecto de la concentración de NP en la VP (Sección B) a temperatura constante 77°F. Tendencia general.* 61

Figura 38. *Efecto de la concentración de NP en la VP (Sección A) para nanopartículas de (A) Sílice, (B) Hierro*..... 61

Figura 39. *Efecto de la concentración de NP en la VP (Sección B) para nanopartículas de (A) Sílice, (B) Cobre*..... 62

Figura 40. *Efecto de la temperatura en la VA a concentración de NP constante 0,5 %m.* 63

Figura 41. *Efecto de la temperatura en la VA a concentración de NP constante 0,5 %m. Tendencia general*..... 64

Figura 42. *Efecto de la temperatura en la VA a concentración de NP constante 1 %m. Tendencia general.* 65

Figura 43. *Efecto de la temperatura en la VA en nanopartículas de (A) Sílice, (B) Hierro*..... 65

Figura 44. *Efecto de la concentración de NP en la VA (Sección A), a temperatura constante 77°F.* 66

Figura 45. *Efecto de la concentración de NP en la VA (Sección A), a temperatura constante 77°F. Tendencia general*..... 67

Figura 46. *Efecto de la concentración de NP en la VA (Sección B), a temperatura constante 77°F.* 67

Figura 47. *Efecto de la concentración de NP en la VA (Sección B), a temperatura constante 77°F. Tendencia general.*..... 68

Figura 48. *Efecto de la concentración de NP en la VA (Sección B), a temperatura constante 77°F. Doble tendencia.* 68

Figura 49. *Efecto de la concentración de NP Sílice en la viscosidad aparente. Sección A.* 69

Figura 50. *Efecto de la temperatura en el YP a concentración de NP constante 0,1%m. Tendencia general.* 70

Figura 51. *Efecto de la temperatura en el YP a concentración de NP constante 1%m. Tendencia general.* 71

Figura 52. *Efecto de la temperatura en el YP en nanopartículas de (A) Sílice, (B) Alúmina, (C) Cobre, y (D) Hierro.* 72

Figura 53. *Efecto de la concentración de NP en el YP (Sección A), a temperatura constante 77°F.* 73

Figura 54. *Efecto de la concentración de NP en el YP (Sección A), a temperatura constante 77°F. Tendencia general.* 74

Figura 55. *Efecto de la concentración de NP en el YP (Sección B), a temperatura constante 77°F.* 74

Figura 56. *Efecto de la concentración de NP en el YP (Sección B), a temperatura constante 77°F. Tendencia general.* 75

Figura 57. *Efecto de la concentración de NP en el YP (Sección B), a temperatura constante 77°F. Doble tendencia.* 76

Figura 58. *Comparación del efecto de la concentración de NP Sílice en el yield point, Sección A y B.* 76

Figura 59. *Efecto de la temperatura en el gel 10 seg. a concentración de NP constante 0,1%m.* *77*

Figura 60. *Efecto de la temperatura en el gel 10 seg. a concentración de NP constante 1%m.*.. *78*

Figura 61. *Efecto de la temperatura en el gel 10 seg. En nanopartículas de (A) Sílice, (B) Cobre, (C) Hierro, y (D) Arcilla.* 79

Figura 62. *Doble tendencia en efecto de la temperatura en el gel 10 seg. para la nanopartícula arcilla.* 80

Figura 63. *Efecto de la concentración de NP en el gel 10 seg. (Sección A), a temperatura constante 77°F. Tendencia general.* 80

Figura 64. *Efecto de la concentración de NP en el gel 10 seg. (Sección B), a temperatura constante 77°F. Tendencia general.* 81

Figura 65. *Efecto de la temperatura en el gel 10 min. a concentración de NP constante 0,1%m.* 82

Figura 66. *Efecto de la temperatura en el gel 10 min. a concentración de NP constante 1 %m.* 83

Figura 67. *Efecto de la temperatura en el gel 10 min. en nanopartículas de (A) Sílice, (B) Cobre, y (C) Hierro.* 84

Figura 68. *Efecto de la concentración de NP en el gel 10 min. (Sección A), a temperatura constante 77°F. Tendencia general.* 85

Figura 69. *Efecto de la concentración de NP en el gel 10 min. (Sección B), a temperatura constante 77°F. Tendencia general.* 85

Figura 70. *Efecto de la concentración de NP en el filtrado API, sección A. Discretizado por nanopartícula.* 87

Figura 71. *Efecto de la concentración de NP en el filtrado API, sección A. Tendencia general.* 87

Figura 72. *Efecto de la concentración de NP en el filtrado API, sección B. Discretizado por nanopartícula.* 88

Figura 73. *Efecto de la concentración de NP en el filtrado API, sección B. Tendencia general.* 89

Figura 74. *Efecto de la concentración de NP en el filtrado API, sección A para nanopartículas de (A) Sílice, (B) Alúmina.* 90

Figura 75. *Efecto de la concentración de NP en el filtrado API, sección B para nanopartículas de (A) Sílice, (B) Titanio, (C) Cobre, (D) Hierro, (E) Grafeno y (F) Zinc.* 91

Figura 76. *Efecto de la presión en el filtrado HPHT discretizado por nanopartícula. Sección A.* 93

Figura 77. *Efecto de la presión en el filtrado HPHT para la sección A. Tendencia general.* 94

Figura 78. *Efecto de la temperatura en el filtrado HPHT para la sección A. Tendencia general.* 95

Figura 79. *Efecto de la temperatura en el filtrado HPHT para la sección B. Discretizado por nanopartícula.* 95

Figura 80. *Efecto de la temperatura en el filtrado HPHT para la sección B. Tendencia general.* 96

Lista de Apéndices

Apéndice A. Clasificación de estudios por tipo de nanopartícula……110

Ver apéndices adjuntos, pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca.

Apéndice B. Base de datos de estudios recopilados referentes a uso de nanopartículas en lodos de perforación.

Resumen

Título: Análisis de la influencia de diferentes nanopartículas en las propiedades reológicas y volumen de filtrado en lodos de perforación mediante una base de datos generada a partir de estudios publicados a nivel mundial. *

Autores: Andrés Alexis Lozano Morales, Daniel Fernando Cordero Ordoñez.**

Palabras Clave: Nanopartículas, Propiedades reológicas, Filtrado, Base de datos, Correlación.

Descripción: Durante la perforación de pozos petroleros se presentan diferentes problemas que afectan la estabilidad del pozo y generan daño a la formación, en los últimos años, los fluidos de perforación han tenido avances tecnológicos importantes, uno de ellos es el uso de nanotecnología en su formulación con el objetivo de disminuir problemas asociados a la perforación. Se han realizado estudios a nivel mundial sobre el uso de nanopartículas en fluidos de perforación ocasionando que la información se encuentre dispersa. En este trabajo se realizó la recopilación, clasificación, organización y análisis de los datos de 76 estudios referentes al uso de nanopartículas en fluidos de perforación. La clasificación se enfocó en las propiedades reológicas y volumen de filtrado tales como: Viscosidad plástica, viscosidad aparente, yield point, esfuerzo de gel 10 seg-min, filtrado API y HPHT. Luego se diseñó y construyó una base de datos que permite realizar búsqueda de información de manera eficiente y segura, además de permitir la retroalimentación con nuevos estudios. Posteriormente, se realizaron diferentes análisis para determinar el efecto de la temperatura y concentración de nanopartícula en las propiedades estudio, en las que se obtuvieron correlaciones para las propiedades reológicas y volumen de filtrado API en un rango R^2 entre 0,4 – 0,9 tanto para el efecto de la temperatura como para el efecto de la concentración. Se presentan valores de R^2 moderadamente bajos debido a la alta dispersión de datos generada por las diferentes condiciones a las que se realizaron las pruebas y a distintos aditivos utilizados en la formulación de los lodos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Msc. Diego Armando Vargas Silva, Codirectora: Ph.D. Zuly Himelda Calderón Carrillo, Codirector: Msc (c). Ferney Mauricio Calderón Rincón

Abstract

Títle: Analysis of the influence of different nanoparticles on the rheological properties and filtration volume in drilling muds using a database generated from studies published worldwide. *

Authors: Andrés Alexis Lozano Morales, Daniel Fernando Cordero Ordoñez.**

Keywords: Nanoparticles, rheological properties, filtration, database, correlation.

Description: During drilling of oil wells there are different problems affecting well stability and causing damage to the formation, In the last few years, drilling fluids have had important technological advances, one of them is the use of nanotechnology in their formulation in order to reduce problems associated with drilling. Studies have been carried out worldwide on the use of nanoparticles in drilling fluids, causing the information to be scattered. In this work, the collection, classification, organization and analysis of data from 76 studies concerning the use of nanoparticles in drilling fluids was carried out. The classification was focused on rheological properties and filtration volume such as: Plastic viscosity, apparent viscosity, yield point, 10 sec-min gel stress, API and HPHT filtration. Then, it was designed a database which allows to search for information in a efficient and safe way. Futhermore, it enables to feed it with new data from other studies. Subsequently, different analyzes were carried out to determine the effect of temperature and nanoparticle concentration on the study properties, in which correlations were obtained for the rheological properties and API filtrate volume in a range R^2 between 0.4 - 0.9 both for the effect of temperature and for the effect of concentration. Moderately low R^2 values are presented due to the high data dispersion generated by the different conditions under which the tests were carried out and to different additives used in the formulation of the muds.

* Work Degree

** Faculty of physicochemical engineering. Oil engineering school. Director: Msc. Diego Armando Vargas Silva, Codirector: Ph.D. Zuly Himelda Calderón Carrillo, Codirector: Msc (c). Ferney Mauricio Calderón Rincón

Introducción

La industria del petróleo y gas, a pesar de estar establecida por muchas décadas, siempre se ha fundamentado en seguir aplicando las ciencias para optimizar o mejorar sus operaciones en campo. El agotamiento de muchas reservas convencionales de hidrocarburos junto con la creciente demanda de energía, han aumentado la importancia de abarcar la exploración de yacimientos no convencionales y por consiguiente la necesidad de mejorar y solucionar problemas frecuentes al momento de perforar nuevos yacimientos, ya sean convencionales o no convencionales (Sharma et al., 2012).

La nanotecnología es una ciencia que tiene un gran potencial debido a las propiedades únicas del material en esta escala, la cual se rige con nanopartículas de 100 nm o menos y que si se compara con un cabello humano, sería equivalente a tener entre 80.000 a 100.000 nanómetros de ancho. Puede ser aplicada en un amplio rango en la industria del petróleo, desde el descubrimiento del pozo hasta el abandono del mismo y no se limita a un producto, aparato o proceso, sino donde el investigador o científico encuentre la manera más eficaz o estratégica de usarla (Ojeda, 2019)**.** Con las innovaciones tecnológicas en esta ciencia, las nanopartículas se están convirtiendo en una parte complementaria del proceso de extracción de los hidrocarburos, mejorando así los procesos en cada etapa, ya sea en la perforación, cementación, producción y transporte de fluidos.

Dicho lo anterior, este trabajo de tesis está centrado en la aplicabilidad de la nanotecnología en la etapa de perforación, más específicamente en lodos de perforación, usando nanopartículas que ayudan a dar mejores características al fluido principal de esta operación. El lodo de perforación, aunque se sabe que trae múltiples funciones al perforar un pozo, al mismo tiempo puede ocasionar problemáticas al fallar en la operación, presentando inconvenientes como pérdida de circulación, daños a la formación, pega de tubería, erosión de la formación, reducción en la eficiencia de la perforación y otros.

Debido a esto, autores como (Saboori et al,. 2012), estudiaron el efecto de las nanopartículas de CMC, la cual ayudó en la disminución del espesor de la torta y reducción del volumen de filtrado del fluido de perforación en un 65% y 7%, respectivamente. Por otro lado, es probable la aparición de problemas en condiciones de alta presión y temperatura, debido a que los fluidos de perforación experimentan la degradación de las propiedades fisicoquímicas del fluido, propiciando daños a la formación. Es por esto que también se ha investigado el uso de nanopartículas en estas condiciones, donde (Mahmoud et al., 2016) logró una reducción significativa en el volumen de filtrado del 43% cuando utilizaron NP de óxido férrico al 0,5% en peso y con una temperatura de 350 °F a 500 psi.

Existen muchos autores que han evaluado el uso de nanopartículas para mejorar el desempeño de los fluidos de perforación, obteniendo resultados prometedores y desempeñando un papel importante en el avance de la industria. A diario se siguen realizando investigaciones que permiten dar más aceptación al uso de la nanotecnología, permitiendo que sea más accesible la información e identificando nuevas aplicaciones en el sector de los hidrocarburos.

Por lo anterior, se propone esta recopilación de información la cual tuvo en cuenta 76 estudios o investigaciones que trabajaban con 17 tipos de nanopartículas diferentes, los cuales se

extrajeron principalmente de investigaciones, revistas científicas, tesis, libros electrónicos y conferencias, pertenecientes a laboratorios, universidades, institutos y empresas especializadas en la industria a nivel mundial, que soportan el principal criterio a analizar el cual está enfocado a las propiedades reológicas y volumen de filtrado. Esto con el fin de clasificar la información, construir una base de datos unificando la data necesaria, graficar los comportamientos de las propiedades para así observar sus tendencias y generar unas correlaciones, que sean útiles para el investigador cuando las requiera. Al final del trabajo se podrá encontrar un análisis de la influencia de las nanopartículas en lodos de perforación basado en correlaciones generadas a partir de la información tratada en la base de datos.

1. Marco de referencia

En la industria petrolera, después de cumplir la etapa de exploración, se lleva a cabo el proceso de perforación, el cual presenta diversos desafíos dependiendo de los estudios de superficie y subsuelo. Esto requiere de un fluido de perforación que permita básicamente remover los recortes que se generan por la broca de perforación, enfriar y lubricar la broca y otras funciones que también son importantes para su buena operación. No obstante, a medida que pasan los años, las reservas de petróleo y gas disminuyen, las condiciones de los yacimientos son atípicas o problemáticas, surge la necesidad de continuar el desarrollo de campos maduros y aparecen nuevos desafíos que deben solucionarse por medio de la tecnología.

Si bien, la nanotecnología está siendo cada vez más utilizada en otras industrias, la industria del petróleo y el gas lleva una trayectoria que va en crecimiento constante debido a las diferentes pruebas de laboratorio y campo, en las que se han obtenido avances significativos, por lo tanto, es necesario recopilar estudios previos a nivel mundial con el fin de ir estableciendo comportamientos y deducciones en función de dichas investigaciones. Para conocer un poco más, a continuación, se abordará conceptos relacionados con la nanotecnología en la ingeniería de petróleos, más específicamente en los fluidos de perforación.

1.1. Fluidos de perforación

Un fluido de perforación es fundamentalmente un fluido circulante, líquido, gas o una mezcla de estos, con características físicas y químicas apropiadas, que permiten darle al lodo propiedades adecuadas para que pueda cumplir funciones específicas en la perforación de pozos petroleros (PDVSA, 2002).

1.2. Funciones de los fluidos de perforación

El fluido de perforación está diseñado para realizar de manera rápida y segura la perforación del pozo, minimizando impactos ambientales, daño a la formación y manteniendo la eficiencia de los equipos (MI-SWACO, 2001). A continuación, se mencionan las funciones más comunes del fluido de perforación.

1. Remoción de recortes del pozo.
2. Capacidad de suspensión.
3. Control de presiones de formación.
4. Enfriamiento y lubricación de la broca y sarta de perforación.
5. Soporte y estabilidad del pozo.
6. Suspensión de tuberías.
7. Transmisión de energía hidráulica a la sarta y broca.
8. Asegurar la evaluación de la formación.
9. Minimizar daños a la formación.
10. Control de la corrosión.
11. Favorecer el completamiento del pozo.
12. Reducir impacto ambiental.

1.3. Clasificación de los fluidos de perforación

Dependiendo los requerimientos operacionales, económicos y ambientales en la perforación, los lodos se clasifican en:

- Lodos neumáticos.
- Lodos base agua.
- Lodos base aceite y/o sintético.

1.4. Propiedades controladas por la reología del lodo de perforación

En el proceso de perforación, el control de las propiedades reológicas de un fluido es de vital importancia, ya que permite monitorear el funcionamiento del lodo y permite verificar que esté cumpliendo con las funciones y el grado de eficiencia de estas. Las propiedades son medidas mediante un viscosímetro rotacional (MI-SWACO, 2001), figura 1.

Figura 1.

Viscosímetro Fann 35A.

Adaptado de LabSolutions. Disponible en sitio web https://www.labsolutions.com.br/es/productos/viscosimetro-modelo-35a-207198/.

1.4.1. Viscosidad aparente (VA)

Es una medida de la resistencia del fluido a fluir por efectos de cohesión y adhesión causados por partículas suspendidas en el lodo (Constante & Paez, 2017).

$$VA[cP] = \frac{\theta 600}{2} \qquad \text{Ecu.1}$$

Donde θ600 es la velocidad de rotación a 600RPM en el viscosímetro.

1.4.2. Viscosidad plástica (VP)

Es la parte de la resistencia al flujo por resistencia mecánica causada por la interacción de partículas añadidas al fluido durante su elaboración o durante la limpieza del pozo. Se ve afectada

principalmente por la concentración, tamaño y forma de sólidos, ya que una reducción en el tamaño de las partículas o cambio de forma genera un aumento en la viscosidad plástica. También la afectan la viscosidad de la fase continua, presencia de polímeros de cadena larga y relaciones O/W o S/W (PDVSA, 2002). Se calcula:

$$VP[cP] = \theta 600 - \theta 300 \qquad \text{Ecu.2}$$

Donde θ300 y θ600 son las velocidades de rotación a 300RPM y 600RPM en el viscosímetro.

1.4.3. Punto cedente o Yield point (YP)

Es una medida de las fuerzas electroquímicas o de atracción en un fluido. Es una medida en condiciones de flujo y es el resultado de las cargas positivas y negativas ubicadas cerca de las superficies de los fluidos. Depende de la concentración de sólidos, ambiente de atracción entre estos sólidos y las propiedades superficiales de los mismos.

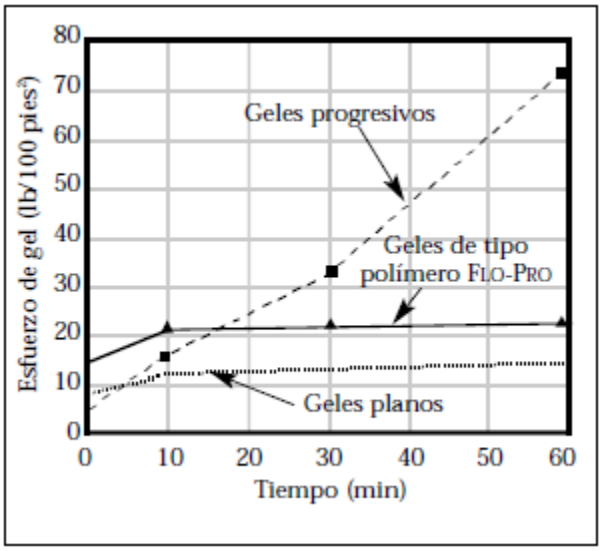
$$YP[Lb - f/100ft2] = \theta 300 - VP \qquad \text{Ecu.3}$$

1.4.4. Esfuerzos de gel

También conocida como tixotropía, es la capacidad que tienen algunos fluidos de formar una estructura de gel cuando están en estado de reposo, pero que al aplicarle un esfuerzo de corte pueda regresar a la fluidez. Cuando el esfuerzo de corte es 0 o cercano a cero, partículas cargadas electroquímicamente se enlazan entre sí para formar un gel semirrígido. Estos dependen de la cantidad y tipo de sólidos, tiempo, temperatura y tratamiento químico. En la figura 2 se aprecian los tipos de geles (MI-SWACO, 2001).

Figura 2.

Tipos de geles.



Adaptado de Manual de fluidos de perforación (MI-SWACO, 2001), p. 177.

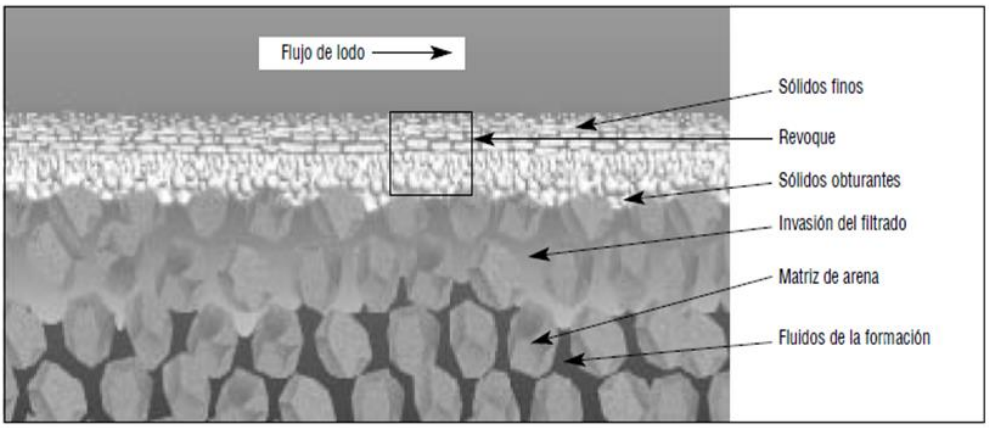
1.5. Filtrado

Una de las funciones básicas del fluido de perforación es sellar las formaciones permeables y controlar la filtración, (Hernandez & Manrique, 2018) refieren que las propiedades del revoque son de importante seguimiento para soportar las condiciones internas de pozo (figura 3), tal como su plasticidad, consistencia y espesor. La fase líquida del lodo de perforación que entra a una formación permeable mediante un diferencial de presión se le denomina filtración. El revoque es el encargado de taponar el ingreso del fluido a la formación y que no se presenten perdidas de fluido, lo que acarrearía en problemas de daño a la formación y elevados costos de reposición de fluido. La filtración se puede presentar de manera estática y dinámica, la filtración estática ocurre mientras el fluido está en estado de reposo, la filtración dinámica ocurre cuando se está circulando el fluido. Las pruebas realizadas por el ingeniero de lodos (filtración API y filtración HPHT) son pruebas de filtración estática, estas pruebas son eficaces para evaluar la tendencia de filtración del

lodo. Para fluidos convencionales base agua se realiza filtración a baja temperatura y presión API y para fluidos base aceite HPHT, este análisis también se utiliza para fluidos base agua.

Figura 3.

Características de la filtración.



Adaptado de manual de fluidos de perforación (MI-SWACO, 2001), p. 226.

1.6. Nanotecnología

Las estructuras de las que consta la nanotecnología son nanométricas, desarrolladas a partir de materia ya existente y modificadas a una escala aproximada de 1 y 100 nm (nanómetros) de tamaño, estas estructuras son controladas y manipuladas a nivel atómico y poseen propiedades físicas las cuales varían respecto al material original, es por esto que se presentan interacciones fisicoquímicas que mejoran los procesos de fabricación, propiedades y características del producto (Kong & Ohadi, 2010).

1.7. Aplicaciones de la nanotecnología en la industria del petróleo y gas

La aplicación de la nanotecnología en los diversos sectores de la industria ha sido desarrollada por el potencial y por sus resultados satisfactorios, permitiendo que los procesos productivos sean más eficientes y rentables en comparación a los procesos convencionales, todo esto debido al potencial de las propiedades a nano escala (Prieto, 2017). Aun así, el estudio del uso

de las nanopartículas en la industria sigue teniendo cada vez más relevancia con el fin de solucionar problemas asociados a los procesos donde se aplique nanotecnología.

Figura 4.

Comparación de la medición nano escala.

Adaptado de (Cruz Santiago, 2013), Perspectiva de la nano escala. Tres ejemplos de la nano escala: ADN, nanotubo de Carbono y una nanopartícula, comparados con elementos de tamaño común.

La Nanotecnología puede generar cambios significativos en áreas como la exploración, perforación, producción, recuperación mejorada de petróleo, refinación y distribución, debido a que ésta puede ser usada en el desarrollo de nuevos recursos que mejoran las características de los

materiales y los fluidos, siendo estos últimos quienes representan mayor importancia (Kong & Ohadi, 2010).

1.7.1. Exploración

Se han diseñado nanosensores que junto a las herramientas convencionales de exploración permiten identificar las propiedades de la roca y la interacción de los fluidos de una manera más precisa, lo que contribuye a planes de exploración con un nivel de confianza mayor. En la actualidad se han realizado investigaciones con el fin de inyectar nanosensores en petróleo y gas, debido a su tamaño de partícula tienen la capacidad de atravesar los poros de las estructuras geológicas para recopilar información de las características físicas de los yacimientos de hidrocarburos, la información proporcionada por los nanosensores puede establecer criterios de bombeo y otras actividades de investigación para mejorar las operaciones (Kong & Ohadi, 2010).

1.7.2. Perforación y producción

La industria del petróleo y gas está en busca de productos químicos compatibles y térmicamente estables, biodegradables, de tamaños de partícula menores a los usados actualmente para el diseño de fluidos inteligentes que se puedan usar en la perforación y producción. Se están generando cambios en los procesos y operaciones de la industria, ya que se considera que entre el 40 y 50% del recobro de hidrocarburos estará representado por reservas Off Shore donde las condiciones de trabajo representan mayores complicaciones y es necesario el óptimo desarrollo de los fluidos de perforación. Estos cambios representan una oportunidad de mercado única para los fluidos y materiales basados en nanotecnología, ya que podrían enfrentar retos donde la tecnología actual aún tiene falencias como es el manejo de las altas temperaturas y ambientes corrosivos y/o abrasivos (Kong & Ohadi, 2010).

1.7.3. Fluidos de perforación

A partir de la nanotecnología se generan nano-materiales o nano-partículas las cuales al ser añadidas a los fluidos convencionales dan lugar a fluidos inteligentes o nanofluidos, obteniendo como resultado una alteración a las propiedades fisicoquímicas del fluido (Cruz Santiago, 2013). Los nanofluidos se pueden clasificar en simples y avanzados. Aquellos con tamaños de partículas iguales suelen ser denominados nanofluidos simples y a los que hacen referencia a distintos tamaños de partículas, nanofluidos avanzados. Desde el punto de vista funcional, los nanofluidos se pueden clasificar como funcionales o multifuncionales, cuya diferencia se basa en la cantidad de tareas que pueden realizar las nanopartículas en un fluido, ya sea una única tarea o múltiples tareas. Investigaciones muestran los efectos que tienen las nanopartículas en la reología, control de pérdida de filtrado y mejoramiento en la estabilidad de lutitas, luego de ser adicionadas como aditivo en un fluido de perforación. Es importante resaltar que estas nanopartículas pueden actuar como viscosificantes, ya que poseen valores altos en su área superficial debido a su tamaño, por lo tanto, hay mayor absorción de la fase liquida (Hoelscher et al., 2012).

1.8. Bases de datos

Una base de datos es una estructura computarizada, compartida e integrada que guarda un conjunto de datos de forma lógica. La colección de datos, normalmente denominada base de datos contiene información importante para una empresa.

Un sistema gestor de bases de datos DBMS (por sus siglas en inglés, Data Base Management System) es el software que permite a los usuarios procesar, describir, administrar y recuperar los datos almacenados en una base de datos (Nevado, 2010). El DBMS sirve como intermediario entre el usuario y la base de datos.

1.8.1. Ventajas de las bases de datos

- Independencia de los datos.
- Mayor seguridad en los datos.
- Integridad de los datos.
- Mínima inconsistencia de datos.
- Acceso de datos más eficiente.
- Mejor toma de decisiones.
- Productividad aumentada del usuario final.
- Reducción del espacio de almacenamiento.
- Acceso simultáneo a los datos.

1.8.2. Desventajas

- Instalación costosa.
- Requiere personal calificado.
- Implantación larga y difícil.
- Ausencia de estándares reales.

1.9. Tratamiento de datos en hojas de cálculo de Excel

Microsoft Excel es sin duda, una buena opción para los investigadores. La captura de datos tiene múltiples facilidades como la edición de estos, cuando el investigador logra disponer de una base de datos, los campos o las variables de interés para su investigación se les puede aplicar tratamiento estadístico basado en las posibilidades existentes disponibles (Pérez, 2006), tales como:

- Ordenar los artículos según el criterio de una o varias variables.

- Filtrar, que significa visualizar en un momento dado solo los artículos que cumplan ciertos requisitos.
- Aplicar diversos modos de subtotales para algunas variables, al grupo de artículos que tienen el mismo valor para alguna otra variable.
- Solicitar una tabla dinámica que resuma la distribución de frecuencias de alguna variable o que relacione varias variables.
- Rendir una estadística descriptiva de alguna(s) variable(s).
- Realizar pruebas de la inferencial, suministradas estas en su análisis de datos.

El análisis de datos provee diferentes pruebas, entre ellas: Estadística descriptiva que rinde el siguiente informe para una o más variables seleccionadas. En ese sentido el análisis de datos provee una serie de pruebas entre las que figuran aquellas más comúnmente usadas como: análisis de varianza de un factor, regresión, prueba f para la igualdad de dos varianzas, prueba t para dos muestras pareadas, prueba t para dos muestras independientes con varianzas iguales, prueba t para dos muestras independientes con varianzas desiguales y prueba z para las medias de dos muestras (Pérez, 2006).

Además, este programa presenta herramientas muy importantes para el análisis y presentación de los datos de una investigación. Una de ellas está relacionada con la posibilidad de construir gráficos a partir de los datos presentados en una hoja de cálculo o gráficos dinámicos, de gran utilidad para un mejor análisis y resumen de los datos. También este programa cuenta con la posibilidad de desarrollar un enorme número de funciones matemáticas, económicas y estadísticas.

1.10. Correlaciones

1.10.1. Correlación de datos en Excel

Para realizar análisis de datos y generación de correlaciones en una hoja de cálculo se utilizan diferentes herramientas estadísticas que permiten obtener el coeficiente de correlación entre 2 variables. Las funciones COEF.DE.CORREL y PEARSON de la hoja de cálculo, permiten calcular el coeficiente de correlación entre dos variables cuando se observan medidas de cada variable para cada uno de los N sujeto (Corcuera, 2013). El coeficiente de correlación se escala para que su valor sea independiente de las unidades en las que se expresen las dos variables de medida (Microsoft, n.d.). En la herramienta también se pueden encontrar otro tipo de análisis de correlaciones.

1.10.2. Regresión lineal simple

La regresión está dirigida a describir cómo es la relación entre dos variables X y Y, de tal manera que incluso se pueden hacer predicciones sobre los valores de la variable Y, a partir de los X. Cuando la asociación entre ambas variables es fuerte, la regresión ofrece un modelo estadístico que puede alcanzar finalidades predictivas (Laguna, 2019).

La regresión supone que hay una variable fija, controlada por el investigador (es la variable independiente o predictora), y otra que no está controlada (variable respuesta o dependiente). La correlación supone que ninguna es fija: las dos variables están fuera del control del investigador.

La regresión en su forma más sencilla se llama regresión lineal simple. Se trata de una técnica estadística que analiza la relación entre dos variables cuantitativas, tratando de verificar si dicha relación es lineal. Si tenemos dos variables hablamos de regresión simple, si hay más de dos variables regresión múltiple. Su objetivo es explicar el comportamiento de una variable Y, que denominaremos variable explicada (o dependiente o endógena), a partir de otra variable X, que

llamaremos variable explicativa (o independiente o exógena). Una vez realizado el diagrama de dispersión y después de observar una posible relación lineal entre las dos variables, se podrá encontrar la ecuación de la recta que mejor se ajuste a la nube de puntos. Esta recta se denomina recta de regresión.

1.10.3. Ajuste de una recta por mínimos cuadrados

La regresión lineal consiste en encontrar (aproximar) los valores de una variable a partir de los de otra, usando una relación funcional de tipo lineal, es decir, buscamos cantidades ´**a**´ (ordenada en el origen) y ´**b**´ (pendiente de la recta lineal) tales que se puedan escribir $\hat{Y} = a + bX$, con el menor error posible entre $\hat{Y}$ y Y donde $\hat{Y} = f(x)$; $Y = f(x) + error$.

Para cada valor observado de la variable independiente xi podemos considerar dos valores de la variable dependiente, el observado yi y el estimado a partir de la ecuación de la recta, $\hat{y}i=a+bxi$.

Para cada observación podemos definir el error o residuo como la distancia vertical entre el punto (xi, yi) y la recta, es decir: yi – (a + bxi). Por cada recta que se considere, se tendrá una colección diferente de residuos. (Laguna, 2019)

Se trata de buscar la recta que dé lugar a los residuos más pequeños, es decir, la recta que hace mínima la suma de cuadrados de las distancias verticales entre cada punto y la recta, de tal manera que se minimice la suma de los errores al cuadrado.

$$SC\,\mathrm{Re}\,s = \sum_{i=1}^{N} e_i^2 = \sum_{i=1}^{N} (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Ecu.4

Para determinar la recta de regresión, se utiliza el método de los mínimos cuadrados. Las cantidades a y b que minimizan dicho error son los llamados coeficientes de regresión:

$$b = \frac{S_{XY}}{S_X^2} \qquad a = \bar{y} - b\bar{x}$$

Ecu.5

La cantidad b se denomina “coeficiente de regresión de Y sobre X”.

- Interpretación de la ordenada en el origen a: Este parámetro representa la estimación del valor de Y cuando X es igual a cero.
- Interpretación de la pendiente de la recta b: El coeficiente de regresión es muy importante, porque mide el cambio de la variable Y por cada unidad de cambio de X. Este parámetro informa cómo están relacionadas las dos variables en el sentido que indica en qué cantidad (y si es positiva o negativa) varían los valores de Y cuando varían los valores de la X en una unidad. De hecho, el coeficiente de regresión “b” y el coeficiente de correlación “r” siempre tendrán el mismo signo. (Laguna, 2019)
    - Si b > 0, cada aumento de X se corresponde con un aumento de Y.
    - Si b < 0, Y decrece a medida que aumenta X.

El método de los mínimos cuadrados consiste en buscar los valores de los parámetros “a” y “b” de manera que la suma de los cuadrados de los residuos sea mínima. Esta es la recta de regresión por mínimos cuadrados.

1.10.4. El coeficiente de determinación, R^2

Indica el grado de ajuste de la recta de regresión a los valores de la muestra, y se define como el porcentaje de la variabilidad total de la variable dependiente Y que es explicada por la recta de regresión. Cuanto menos dispersos sean los residuos (recordar que lo residuos o errores son la diferencia entre los valores observados y los valores estimados por la recta de regresión), mejor será la bondad del ajuste.

$$R^2 = 1 - \frac{S_e^2}{S_Y^2}$$

Ecu.6

Las características de este coeficiente son:

- R^2 es una cantidad adimensional que sólo puede tomar valores entre [0, 1].
- Cuando un ajuste es bueno, R^2 será cercano a uno (mayor será la fuerza de asociación entre ambas variables).
- Cuando un ajuste es malo, R^2 será cercano a cero (la recta no explica nada, no existe asociación entre X y Y).

Puesto que R^2 explica la proporción de variabilidad de los datos que queda explicada por el modelo de regresión, cuanto más cercano a la unidad esté, mejor es el ajuste (Laguna, 2019).

2. Búsqueda de la información

Inicialmente se realizó una búsqueda de los conceptos relacionados con la investigación con el fin de afianzar los conocimientos aprendidos y poder construir el marco teórico. Esto como fundamento, para posteriormente al realizar una revisión de la información, se pueda tener un criterio con determinación y facilidad para desestimar contenido no relevante para esta investigación.

2.1. Revisión de la información

En la etapa inicial se recolectó información de manera virtual, donde se realizó una búsqueda y un barrido general de los estudios realizados a nivel mundial que relacionaran el estudio de las propiedades reológicas y volumen de filtrado en lodos de perforación y que adicionalmente en su formulación se utilizaran nanopartículas. En esta recolección se pudo

encontrar información que, a pesar de incluir el contenido explícito del título, tuvo que ser descartada debido a que abordaba el tema de manera teórica más no de un modo experimental.

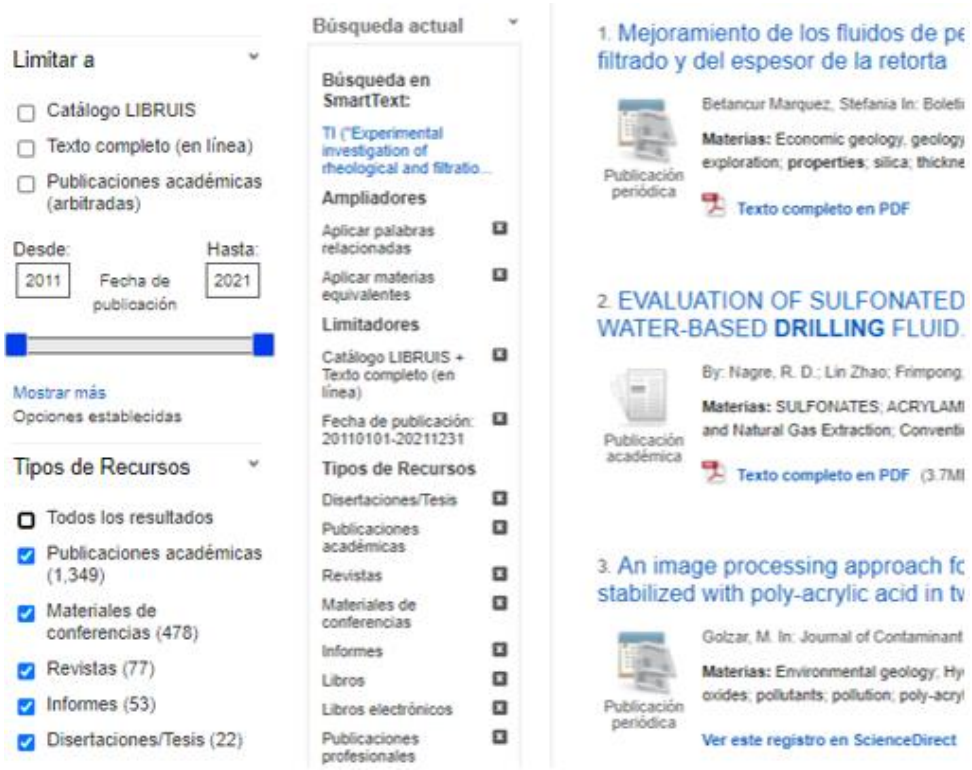
Como se indicó anteriormente, la búsqueda se hizo principalmente en recursos virtuales tales como libros electrónicos, artículos científicos, revistas técnicas, trabajos de grado, biblioteca UIS y Google Académico, siendo estos dos últimos los recursos donde se encontraron la mayor cantidad de estudios referentes a nanopartículas aplicadas en fluidos de perforación.

2.2. Parámetros de búsqueda

En la biblioteca UIS se pudo hacer uso de una gran base de datos en la plataforma ScienceDirect, la cual para obtener una información menos extensa se delimitó como se puede ver en la figura 5.

Figura 5.

Interfaz biblioteca UIS en la base de datos ScienceDirect.



Disponible en sitio web: https://bibliotecavirtual.uis.edu.co/login

En la figura 5 se puede apreciar que el motor de búsqueda se limitó principalmente por fecha en sus últimos 15 años y su tipo de recurso, por ejemplo: publicaciones académicas, informes de conferencias, tesis y otros.

De igual manera para el motor de búsqueda Google Scholar o Google académico se obtuvo información teniendo en cuenta la fecha de su publicación, el número de citaciones y que los artículos fueran netamente académicos. Ver figura 6.

Figura 6.

Interfaz motor de búsqueda Google Académico o Scholar.

Disponible en sitio web: https://scholar.google.es/schhp?hl=es

Estos parámetros de búsqueda ayudaron a refinar la información para así disminuir el tiempo de recolección y por ende el número de revisiones de artículos o documentos. La idea de buscar en estas plataformas es garantizar la confiabilidad y veracidad de la información, puesto

que, en paralelo se tuvo en cuenta que la data debía estar soportada con estudios, pruebas en laboratorio y sustentada por diferentes entidades como universidades, revistas científicas y empresas especializadas en la industria. Dentro de este marco, solo se tuvo en cuenta aquellos artículos, tesis o investigaciones que incorporaran una data de las propiedades reológicas y volumen de filtrado, ya que son estas propiedades el criterio principal de selección de la investigación, quedando así un número total de 76 estudios en la etapa de revisión.

2.3. Clasificación de la información

2.3.1. Primera clasificación

De lo anterior se desprende la segunda etapa, debido que al tener la información revisada y seleccionada se procedió a clasificarla de tal manera que fuese más accesible y tratable. Se hicieron dos clasificaciones previas a la construcción de la base de datos con el objetivo de organizar la información relevante. La primera clasificación se puede observar en la tabla 1.

Tabla 1.

Número de estudios clasificados para la base de datos.

NÚMERO DE NANOPARTÍCULAS	TIPO DE NANOPARTÍCULA	CANTIDAD DE ESTUDIOS RECOPILADOS	%
1	SÍLICE	29	38,16
2	ALÚMINA	7	9,21
3	TITANIO	6	7,89
4	COBRE	4	5,26
5	HIERRO	8	10,53
6	GRAFENO	3	3,95
7	PLATA	1	1,32
8	CMC	1	1,32
9	CARBONO	1	1,32
10	NANOBENTONITA	3	3,95
11	ZINC	3	3,95
12	CNT	4	5,26
13	CALCIO	1	1,32
14	ATAPULGUITA	1	1,32
15	ARCILLA	1	1,32

16	MAGNESIO	1	1,32
17	NP COMERCIALES	2	2,63
	TOTAL DE ESTUDIOS	76	100%

La clasificación anterior tuvo en cuenta solamente el tipo de nanopartícula y la cantidad de estudios en número y porcentaje que tienen data de pruebas de laboratorio. Las nanopartículas que solo poseen 1 o 2 estudios de laboratorio, se tuvieron en cuenta solo para análisis general de las diferentes propiedades a estudiar, obteniendo una tendencia general con todas las nanopartículas, no se hicieron análisis individuales con ellas ya que no serían representativos.

2.3.2. Segunda clasificación

Seguidamente, se hizo una clasificación más amplia para conocer ciertos criterios de cada estudio o artículo, se establecieron los siguientes parámetros de clasificación: Nombre del artículo, año de publicación, autor(es), tipo de nanopartícula, una breve descripción del artículo y por último una clasificación que indica si el estudio posee datos, ya sean de propiedades reológicas o volumen de filtrado. En el apéndice A se muestra la clasificación construida por cada estudio teniendo en cuenta las diferentes nanopartículas.

La clasificación de 17 tablas presentada en el apéndice A tiene como finalidad organizar la información de la siguiente manera: Separar por tablas la información de cada artículo según sea el tipo de nanopartícula, describir el contenido interno del artículo de forma muy corta y por último conocer de manera inmediata que artículos poseen datos experimentales de las propiedades reológicas y volumen de filtrado. Obtenido lo anterior, se puede decir que la información ha sido recolectada, revisada y clasificada para extraer los datos experimentales de cada artículo.

2.4. Herramienta Web Plot Digitizer

Como preámbulo a la construcción de la base de datos, se utilizó una herramienta para la extracción de datos con el fin de separarlos de manera más eficiente y confiable, debido a que la información se presentaba tabulada en gráficos de barras o en gráficas 2D. Al realizar una lectura en un plano XY, existe alta probabilidad de tomar puntos erróneos con el ojo humano que no correspondan al valor observado, por el contrario, los datos son más precisos y exactos al usar una herramienta tecnológica como lo es Web Plot Digitizer. La herramienta se ejecuta en la web y es una extensión de Google Chrome para extraer datos numéricos de imágenes o mapas. Los algoritmos que usa para la extracción automática facilitan la obtención de una gran cantidad de puntos de datos de forma rápida y precisa. Admite gráficos XY, gráficos de barras, diagramas polares, diagramas ternarios y mapas.

2.4.1. Ejemplo real de extracción puntos XY de la propiedad VP para la base de datos

Se mostrará un paso a paso del funcionamiento de la herramienta Web Plot Digitizer con una gráfica de concentración de NP vs Viscosidad plástica a manera de ejemplo.

- **Paso 1**: Cargar la imagen de la gráfica dando click en “Load Image”.

Figura 7.

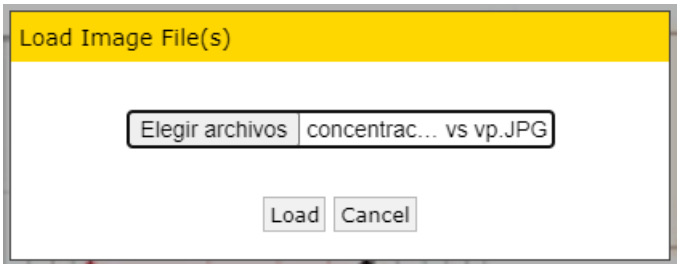
Menú Inicial Web Plot Digitizer.

Disponible en sitio web: https://apps.automeris.io/wpd/

- **Paso 2**: Elegir el archivo .jpg guardado en el dispositivo y dar click en “Load”.

Figura 8.

Interfaz para cargar imágenes en Web Plot Digitizer.

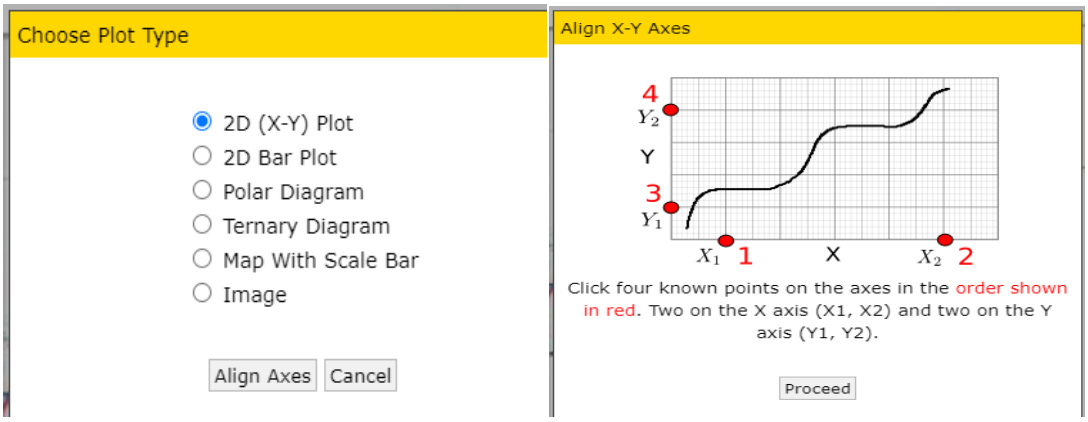


Disponible en sitio web: https://apps.automeris.io/wpd/

- **Paso 3**: Este caso corresponde a una gráfica de dos ejes XY o dos dimensiones, por lo tanto, se selecciona la opción 2D (X-Y) Plot dando click en "Align Axes" y seguidamente en "Proceed".

Figura 9.

Menú para elección de tipo de gráfica y proceder en Web Plot Digitizer.

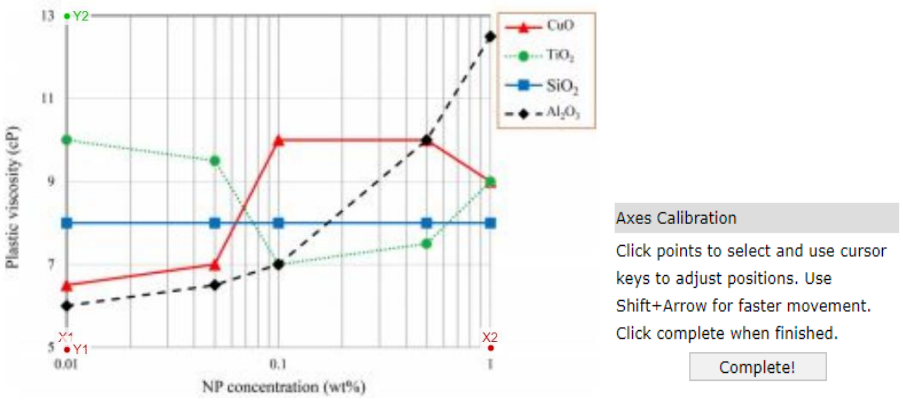


Disponible en sitio web: https://apps.automeris.io/wpd/

- **Paso 4**: Seguidamente se ubican manualmente dos puntos en el eje X (X_1 y X_2) y dos puntos en el eje Y (Y_1 y Y_2), con el fin que la herramienta por medio del software haga un dimensionamiento de la gráfica 2D que se cargó, luego oprimir "Complete". Se debe tener en cuenta que los puntos que se marquen deben ser conocidos y no necesariamente deben ser los puntos más extremos.

Figura 10.

Interfaz ubicación de puntos X_1, X_2, Y_1, Y_2 para calibración en Web Plot Digitizer.

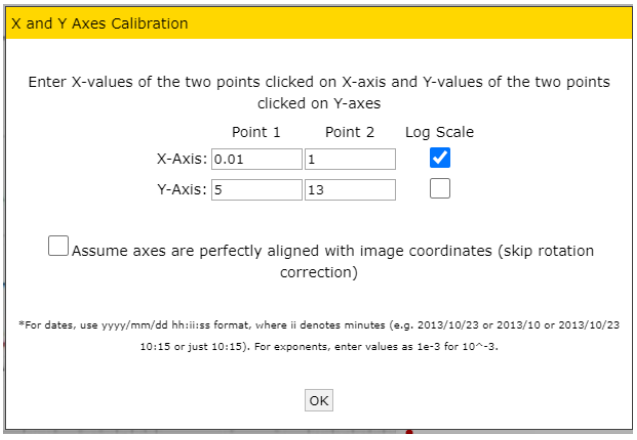


Disponible en sitio web: https://apps.automeris.io/wpd/

- **Paso 5**: Ingresar el valor numérico de X_1, X_2, Y_1, Y_2 teniendo en cuenta la escala de los ejes, ordinal o logarítmica. Si es logarítmica oprimir "Log Scale" y posteriormente "ok". En este paso la herramienta queda calibrada con la escala de la gráfica con sus respectivas medidas.

Figura 11.

Interfaz Calibración de ejes ingresando los puntos en Web Plot Digitizer.

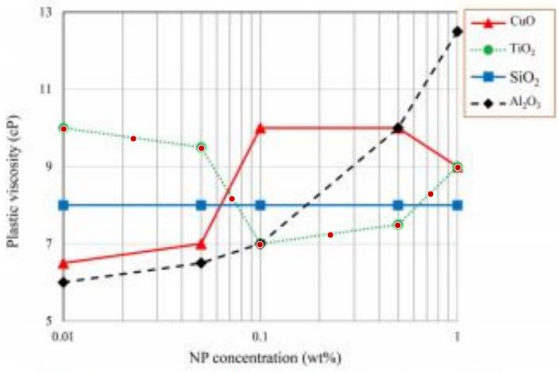


Disponible en sitio web: https://apps.automeris.io/wpd/

- **Paso 6:** Añadir puntos como se ven representados con el color rojo sobre la tendencia verde, donde se quiere conocer sus pares de puntos XY, en este caso se escogió la línea de la nanopartícula TiO_2.

Figura 12.

Interfaz de gráfica con puntos rojos en la función en Web Plot Digitizer.

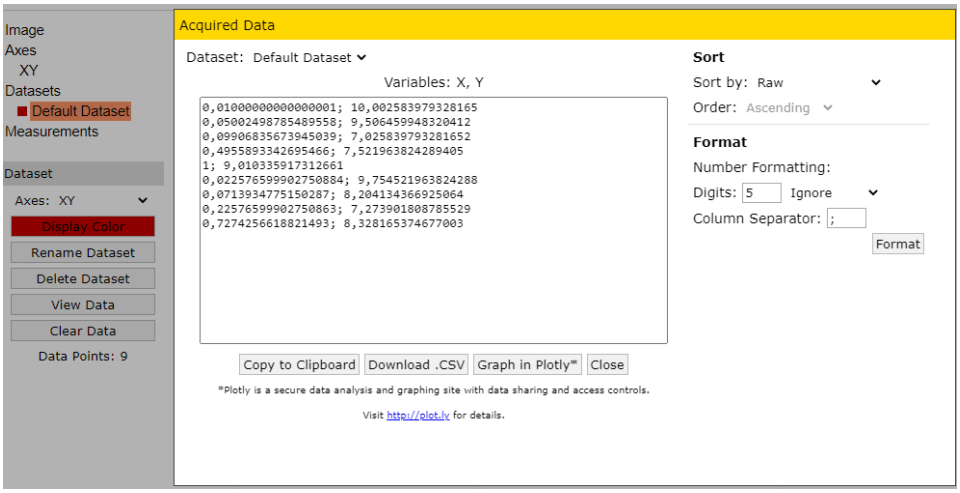


Disponible en sitio web: https://apps.automeris.io/wpd/

- **Paso 7:** Dar click en "View Data" para ver los pares de X,Y y conocer los valores que se necesitan para completar la tabla o plantilla de la base de datos.

Figura 13.

Interfaz pares X, Y en Web Plot Digitizer.

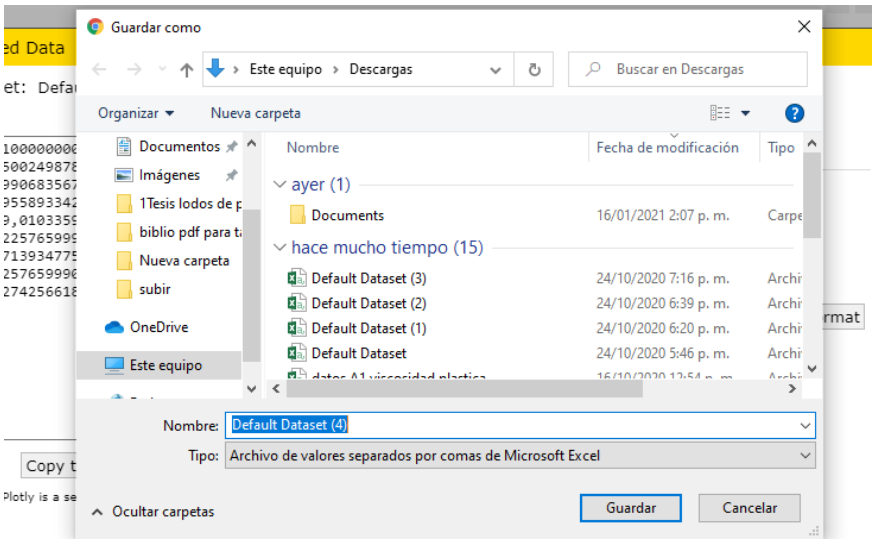


Disponible en sitio web: https://apps.automeris.io/wpd/

- **Paso 8:** Dar click en "Download" en el paso anterior y guardar el archivo Excel en el dispositivo, seguidamente abrirlo para ver de manera organizada las coordenadas X,Y de la gráfica inicial.

Figura 14.

Interfaz Microsoft Excel para "Guardar" tabla editable X,Y.

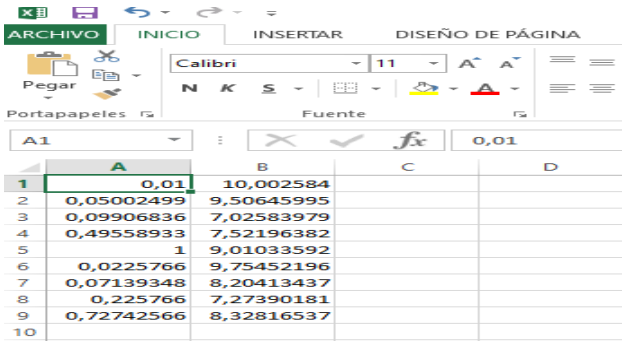


Disponible en el sitio web: https://apps.automeris.io/wpd/

Ya teniendo los puntos en la herramienta Excel pueden ser usados de diversas maneras, como graficarlos y analizarlos.

Figura 15.

Interfaz Microsoft Excel con X, Y tabulados.



	A	B	C	D
1	0,01	10,002584		
2	0,05002499	9,50645995		
3	0,09906836	7,02583979		
4	0,49558933	7,52196382		
5	1	9,01033592		
6	0,0225766	9,75452196		
7	0,07139348	8,20413437		
8	0,225766	7,27390181		
9	0,72742566	8,32816537		
10				

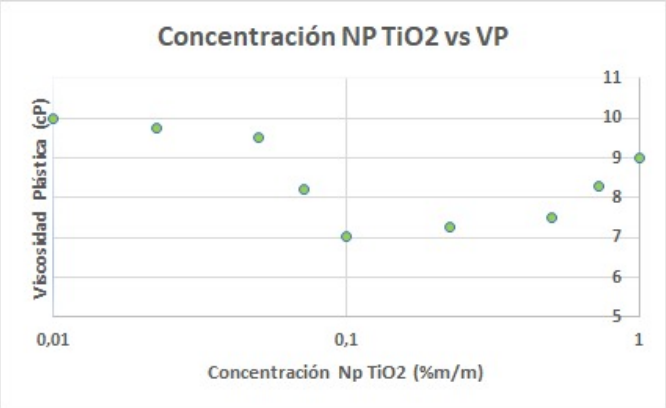
Disponible en sitio web: https://www.microsoft.com/es-es/microsoft-365/excel.

Como se puede observar en la figura 12 del paso 6, se tienen varias tendencias de diferentes nanopartículas, las cuales pueden ser tratadas de la misma manera para la extracción de sus datos.

Como parte de la verificación del proceso, se graficaron los datos anteriores en Microsoft Excel con el fin de compararla con la figura 12 del paso 6 la cual es la original.

Figura 16.

Verificación de datos extraídos con herramienta Web Plot Digitizer.



Disponible en sitio web: https://www.microsoft.com/es-es/microsoft-365/excel

Como se observa, la tendencia es muy parecida a la mostrada en la figura 12 del paso 6 correspondiente a la nanopartícula TiO_2. Hay que tener en cuenta que entre más puntos XY se extraen de la gráfica original, más precisa y exacta será la gráfica.

3. Base de datos de propiedades reológicas y volumen de filtrado generada a partir de estudios publicados a nivel mundial

El programa que se utilizó para hacer la recopilación de información de manera eficiente y ordenada, además de fácil acceso fue Microsoft Excel, esta herramienta permite elaborar diversas funciones, algunas de ellas son análisis de datos, contabilidad, bases de datos, tablas, gráficos, exportación de documentos compatibles (Word, Excel, PowerPoint, PDF, imágenes, entre otros) y macros de la forma más sencilla y de fácil entendimiento.

3.1. Construcción de la base de datos

Después de la recopilación de información, organización y clasificación por diferentes parámetros (Capitulo 2), se procede al diseño y realización de la base de datos.

Microsoft Excel es una hoja de cálculo que trabaja mediante tablas, lo que permite distribuir la información de manera eficiente. En el diseño que se realizó se introdujeron las siguientes características; (Figura 17), Número de la investigación, nombre de la investigación, autores, universidad/empresa (Organización que realizó el estudio), año (Año en que fue publicado el artículo), tipo de fluido (Base agua WBM, base sintética SBM o base aceite OBM), nanopartícula (Tipo de nanopartícula utilizada en la investigación); (Figura 18), tamaño de nanopartícula, área superficial BET, temperatura (A las que fueron realizadas las pruebas), densidad del fluido, pH del fluido, material (Se especifica el tipo de nanopartícula y los diferentes materiales o aditivos que lo acompañan), concentración (Concentración de la nanopartícula en el fluido, se realizó la clasificación por unidades de medida, partes por millón (ppm), libras por barril (lpb) y porcentaje en concentración de masa (%m/m)); (Figura 19), volumen de filtrado API (Se clasifica en 4 volúmenes de filtrado, a 7, 10, 20 y 30 minutos), reducción perdidas por filtrado, espesor de la torta; (Figura 20), reducción del espesor de la torta, volumen de filtrado HPHT (Se especifican las condiciones de presión y temperatura), velocidad de rotación (θ600, θ300, θ200, θ100, θ6, θ3); Figura (21), viscosidad plástica (VP), viscosidad aparente (VA), Yield point (YP), gel 10 segundos y gel 10 minutos.

Figura 17.

Clasificación base de datos, parte A.

N°	NOMBRE DE LA INVESTIGACIÓN	AUTORES	UNIVERSIDAD / EMPRESA	AÑO	TIPO DE FLUIDO	NANOPARTICULA
8	Application of aluminium oxide nanoparticles to enhance rheological and filtration properties of water based muds at HPHT conditions	Sean Robert Smith, Roozbeh Rafati, Amin Sharifi Haddad, Ashleigh Cooper, Hossein Hamidia	School of Engineering, University of Aberdeen, Aberdeen, AB24 3UE, United Kingdom Baroid Drilling Fluid Laboratory, Halliburton, Dyce, Aberdeen, United Kingdom, AB21 0GN, United	2018	Base agua WBM	Silice

Figura 18.

Clasificación base de datos, parte B.

TAMAÑO NANOPARTICULA - DP(nm)	AREA SUPERFICIAL BET (m2/g)	TEMPERATURA (°F)	DENSIDAD (Lb-m/gal)	pH	MATERIAL	CONCENTRACIÓN MATERIAL (ppm)	CONCENTRACIÓN MATERIAL (lpb)
12	175	73	8,5	4,2	SiO2	No Reg.	No Reg.

Figura 19.

Clasificación base de datos, parte C.

CONCENTRACIÓN MATERIAL (%m/m)	FILTRADO 7 MIN (ml)	FILTRADO 10 MIN (ml)	FILTRADO 20 MIN (ml)	FILTRADO 30 MIN (ml)	REDUCCIÓN PERDIDAS POR FILTRADO (%)	ESPESOR TORTA(1/32 in)
0,1	2,7	3,6	5,4	7	12,5	0,041

Figura 20.

Clasificación base de datos, parte D.

REDUCCIÓN ESPESOR TORTA (%)	FILTRADO HPHT (ml) 30 MIN	ϑ600 (rpm)	ϑ300 (rpm)	ϑ200 (rpm)	ϑ100 (rpm)	ϑ6 (rpm)	ϑ3 (rpm)
55,2	17,5 @248F - 500psi	39	28	23	18	11	10

Figura 21.

Clasificación base de datos, parte E.

VISCOSIDAD PLÁSTICA (cP) ±0.1	VISCOSIDAD APARENTE (cP) ±0.1	YIELD POINT (Lb-f / 100ft2)	GEL 10 SEG	GEL 10 MIN
40	60	40	18	41

Seguidamente se procedió a diseñar el formato de búsqueda de información o filtro, esto con el fin de que el programa maneje y despliegue de manera oportuna la información, presentándola de manera organizada según la necesidad del usuario. Debido a la gran cantidad de información, para realizar una búsqueda los pasos a seguir son muy reiterativos, se diseñó una macro en Excel, Una macro es una acción o un conjunto de acciones que se puede ejecutar todas las veces que se desee, y que es de fácil modificación cuando sea necesario (López & Vielma, 2019). Los formatos de consulta definidos en la macro constan de 9 parámetros de búsqueda de la información: Tipo de fluido, nanopartícula, concentración de material, filtrado API a 30 minutos, viscosidad plástica, viscosidad aparente, Yield point, gel 10 segundos y gel 10 minutos. Ver figura 22.

Por último, la interfaz de usuario (Figura 22) debe ser clara, fácil de manejar y que permita múltiples opciones de búsqueda al usuario, optimizando esfuerzo y tiempo, asegurando los datos y presentando la información verazmente. Microsoft Excel permite todas estas características poniendo la base de datos en funcionamiento de forma inmediata.

3.2. Modo de uso base de datos

La base de datos se diseñó de manera que permita realizar búsqueda de información existente dentro de la misma y también permita ser alimentada con nuevos estudios cuando se requiera.

Figura 22.

Interfaz de usuario de la base de datos.

3.2.1. Búsqueda de información

A manera de ejemplo se va a realizar una búsqueda de un fluido base agua WBM en el que se haya utilizado la nanopartícula Óxido de Silicio en su formulación, en la interfaz lo primero que se hace es buscar tipo de fluido y tipo de nanopartícula, figura 23a.

Figura 23.

Búsqueda tipo de fluido y tipo de nanopartícula. A. Consulta de características, B. Opciones de búsqueda (Desglosar).

Si el usuario requiere hacer una búsqueda con una nanopartícula diferente o un tipo de fluido diferente puede desglosar la barra de búsqueda para más opciones como se muestra en la figura 23b. Además, para realizar la búsqueda por concentración de nanopartícula se debe ubicar la unidad de medida de concentración, específicamente en partes por millón (ppm), libras por barril (lpb) y porcentaje en masa (%m); Figura 24a.

Figura 24.

Búsqueda de concentración de nanopartícula. A. Unidades de concentración, B. Opciones de búsqueda.

De igual manera, en cada una de las concentraciones existen diferentes valores que permiten al usuario una búsqueda más completa (Figura 24b). La búsqueda para las propiedades Filtrado API, viscosidad plástica, viscosidad aparente, yield point, gel 10 segundos y gel 10 minutos (Figura 25) se realiza de la siguiente manera:

Figura 25.

Propiedades activas para aplicar el filtro.

FILTRADO 30 MIN (ml)	VISCOSIDAD PLÁSTICA (cP) ±0.1	VISCOSIDAD APARENTE (cP) ±0.1	YIELD POINT (Lb-f / 100ft2)	GEL 10 SEG	GEL 10 MIN
7	5,2	19	32	23	7
BUSCAR	BUSCAR	BUSCAR	BUSCAR	BUSCAR	BUSCAR

Se ubica la propiedad a buscar, a manera de ejemplo se usará el filtrado API, se selecciona el valor a buscar dentro de las opciones que arroja el desglosable y se oprime “BUSCAR”. Ver figura 26.

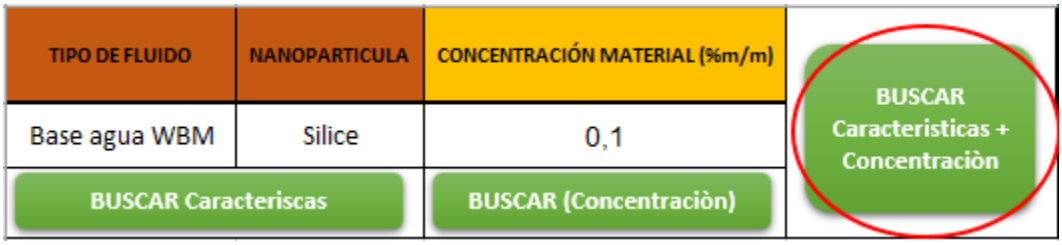
Figura 26.

Búsqueda de filtrado API.

Por último, para realizar una búsqueda combinada y darle la posibilidad al usuario de filtrar con más precisión la información, se combinaron las opciones de búsqueda de características y concentración como se muestra en la figura 27. El usuario debe seleccionar tipo de fluido, tipo de nanopartícula y la concentración a la que fue utilizada la nanopartícula en el fluido, seguidamente oprimir el botón “BUSCAR CARACTERISTICAS + CONCENTRACIÓN”. Las demás propiedades no son combinables.

Figura 27.

Búsqueda combinada.



El usuario tiene la posibilidad de realizar las búsquedas que considere necesario, ya que puede usar la opción BORRAR para realizar nuevas búsquedas, debe tener en cuenta que después de cada búsqueda es indispensable oprimir este botón.

3.2.2. Almacenamiento de información

El usuario tiene la posibilidad de alimentar la base de datos con nuevos estudios en tiempo real, permitiendo robustecerla y ofreciendo la posibilidad a nuevos usuarios obtener más información ordenada y confiable. La interfaz de almacenamiento se muestra en la figura 28.

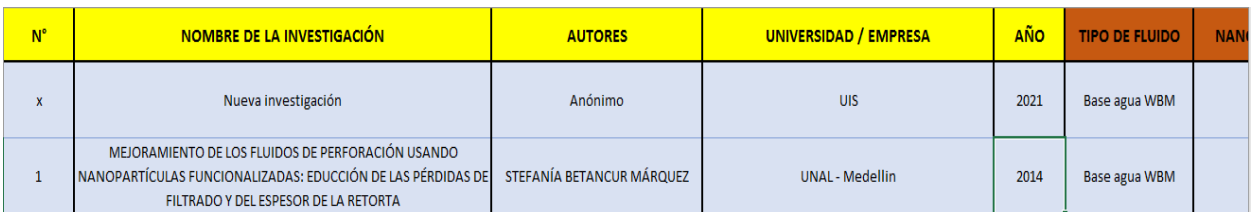
Figura 28.

Interfaz de almacenamiento de nuevos estudios.

Esta opción permite almacenar información de cada uno de los parámetros de almacenamiento establecidos en el diseño de la base de datos, el usuario debe ingresar en la casilla correspondiente la información y oprimir el botón “GUARDAR”, si se desconoce algún valor a guardar, incorporarlo de la manera: “No Reg.”. Al momento de guardar un nuevo estudio la base de datos lo ubicará en la parte superior como lo muestra la figura 29.

Figura 29.

Almacenamiento de un nuevo estudio.



N°	NOMBRE DE LA INVESTIGACIÓN	AUTORES	UNIVERSIDAD / EMPRESA	AÑO	TIPO DE FLUIDO	NAN
x	Nueva investigación	Anónimo	UIS	2021	Base agua WBM	
1	MEJORAMIENTO DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN USANDO NANOPARTÍCULAS FUNCIONALIZADAS: EDUCCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE FILTRADO Y DEL ESPESOR DE LA RETORTA	STEFANÍA BETANCUR MÁRQUEZ	UNAL - Medellin	2014	Base agua WBM	

Oprimir el botón “NUEVO ESTUDIO” para limpiar la fila de ingreso de información y así incorporar nuevos estudios. La opción BACKUP realiza una copia de seguridad de toda la base de datos en una hoja de cálculo aparte, incluso la información incorporada recientemente con el fin de protegerla. Con esto se garantiza que la información consignada en la base de datos permanezca segura y completa. Es necesario oprimirlo cada vez que se guarde información. Por último, la información que ha sido guardada recientemente en la base de datos podrá ser consultada en el filtro explicado en el apartado anterior. La base de datos puede ser consultada en el anexo A el cual contiene un instructivo de uso en la primera hoja de Excel. En el siguiente enlace se muestra un video explicativo del uso de la base de datos https://drive.google.com/file/d/1t1665iWbJgLzHMgo3URjaBiZKvXkydue/view?usp=sharing.

4. Análisis de datos y resultados

Después de la recopilación de información, organización y clasificación, además de crear la base de datos se procede al análisis de los datos recopilados en los diferentes estudios. Para buscar tendencias y/o comportamientos que permitan determinar la influencia de las nanopartículas en las propiedades reológicas y el volumen de filtrado, se estipularon una serie de combinaciones de variables, con el fin de analizar cómo es el comportamiento de cada propiedad respecto a la variación de temperatura y concentración de nanopartícula (NP). El análisis de temperatura se realizó de manera general, es decir, teniendo en cuenta todas las nanopartículas y los diferentes aditivos que se utilizaron en las diferentes formulaciones. Con respecto a la concentración de NP, se realizó el análisis separando los datos en 2 grupos, en el primer grupo aquellos en los que el fluido estuviera compuesto de material viscosificante y nanopartícula, en el segundo, se tuvieron en cuenta los diferentes aditivos utilizados en la formulación de los lodos.

Esto con el fin de analizar el efecto de las nanopartículas en las diferentes propiedades estudiadas y generar correlaciones más acertadas.

El análisis se realizó a cada propiedad por separado. Para el tratamiento de datos se seleccionaron las concentraciones y temperaturas que mayor cantidad de datos tuvieron.

4.1. Viscosidad plástica (VP)

En este análisis se seleccionaron las concentraciones que poseían la mayor cantidad de datos, las cuales fueron: 0.5 y 1 %m. En el primer análisis se estudió el efecto de la temperatura en la VP utilizando todas las nanopartículas posibles a una concentración constante (Figura 30 y 31).

Figura 30.

Efecto de la temperatura en la VP a concentración de nanopartícula constante 0,5%m.

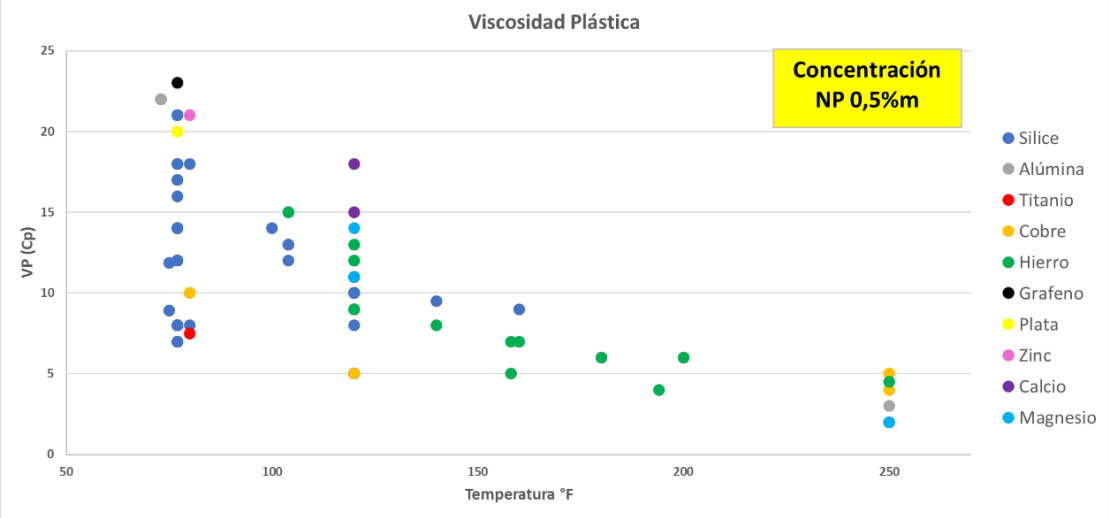
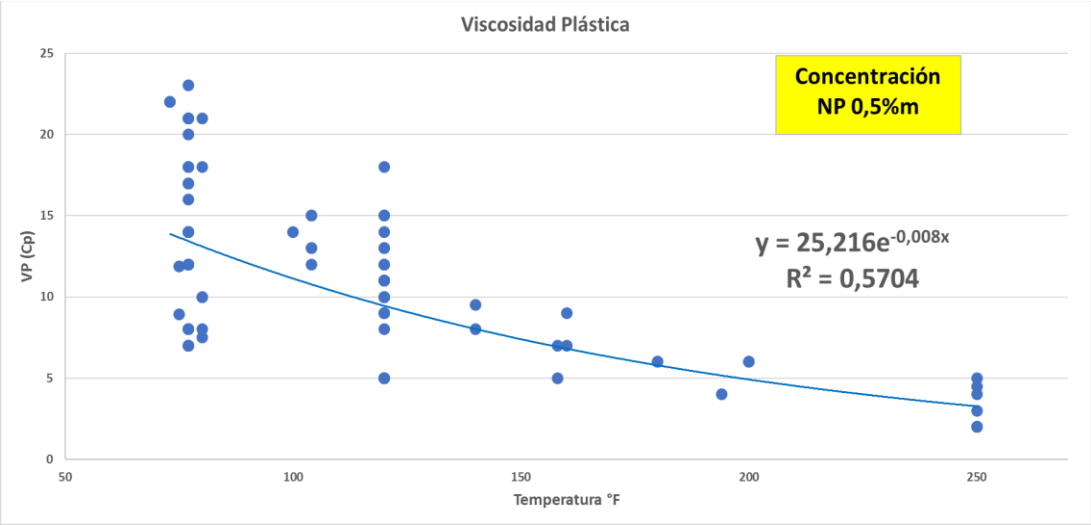


Figura 31.

Efecto de la temperatura en la VP a concentración de nanopartícula constante 0,5%m. Tendencia general.

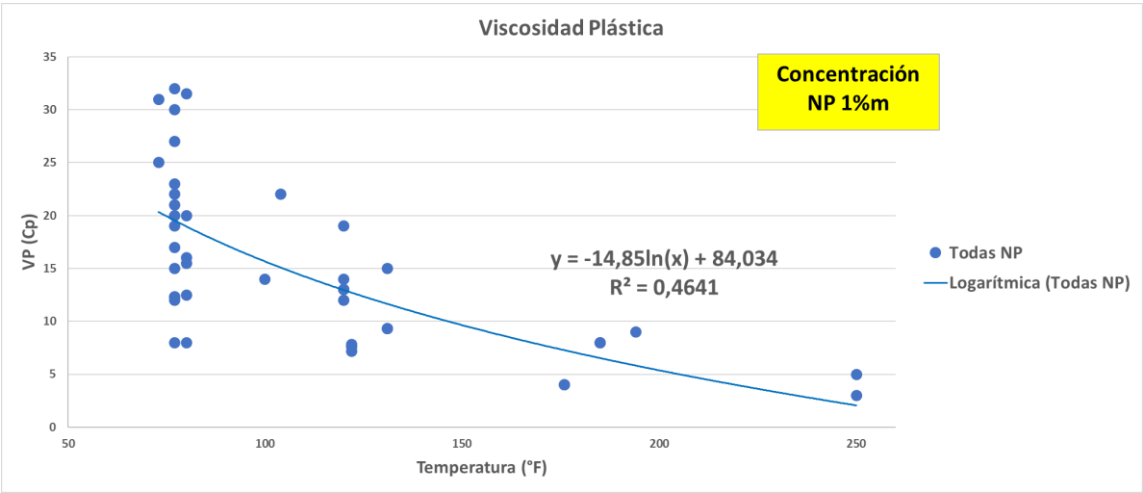


En la figura 31 se muestra la tendencia de la VP a concentración NP 0,5%m constante. Se evidencia una tendencia de disminución de la viscosidad plástica a medida que aumenta la temperatura. Este comportamiento es esperado debido a que el fluido tendrá mayor tendencia a fluir, ya que las fuerzas internas disminuyen permitiendo que este se mueva más libremente, además, de que su densidad disminuye y afecta directamente la viscosidad, como lo explica (Roger I. Tanner, 1992) . Se obtuvo una relación entre la VP y la temperatura con una ecuación de tipo exponencial $\mathbf{y = 25{,}216e^{-0{,}008x}}$ y un coeficiente de regresión $\mathbf{R^2 = 0{,}5704.}$ Se presenta alta dispersión debido a que en algunos estudios se obtuvieron valores altos de VP como para la nanopartícula zinc, este se debe a que el tamaño y forma de la nanopartícula es muy pequeño, lo que ocasiona que las nanopartículas se adhieran a la superficie de la bentonita y aumente la viscosidad (Aftab et al., 2016), para los demás valores de sílice y alúmina se presentan valores altos debido a la densidad del fluido y a diferentes aditivos utilizados en la formulación del fluido (Smith et al., 2018).

Para la concentración de 1%m (Figura 32) se obtuvo una relación logarítmica con ecuación **y = -14,85ln(x) + 84,034** y un coeficiente de regresión de **R^2 = 0,4641**. Las correlaciones son moderadamente aceptables a pesar de la alta dispersión de datos que se presenta, para ambas concentraciones los modelos representan la tendencia de la curva. La nube de puntos se debe a que las condiciones en las que son tomados los datos varían mucho, pues son estudios realizados a diferentes densidades de fluido, con diferentes aditivos y materiales, en equipos distintos y demás condiciones. Al igual que en la concentración 0,5%m, los datos atípicos afectan el ajuste de la ecuación, en este caso (Medhi et al., 2020) afirma que el uso de nanopartículas de sílice y cobre no presentaron mucha variación en la gravedad específica del fluido. Estos valores altos de VP se presentan ya que el fluido es a base de poliamina y en contacto con NP de sílice se convierte en un espesante, aumentando considerablemente la viscosidad.

Figura 32.

Efecto de la temperatura en la VP a concentración de nanopartícula constante 1%m. Tendencia general.



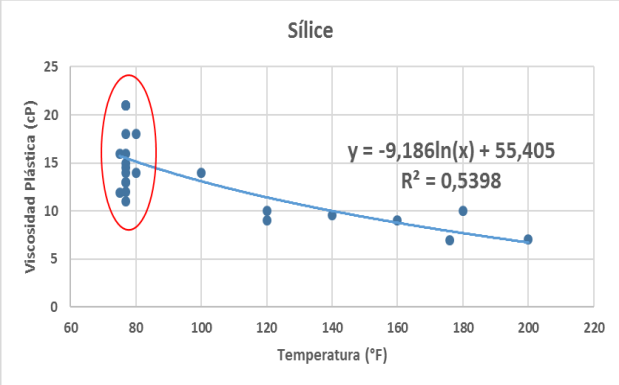
El análisis también se realizó para cada nanopartícula por separado, con el fin de estudiar la tendencia que presenta cada una. Se hizo a diferentes concentraciones de nanopartícula y se

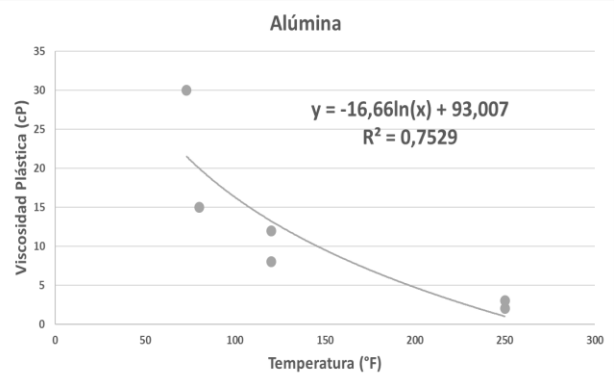
seleccionaron las que mayor cantidad de datos poseen, entre estas se encuentran: Sílice, cobre, alúmina y hierro. Ver figura 33.

Figura 33.

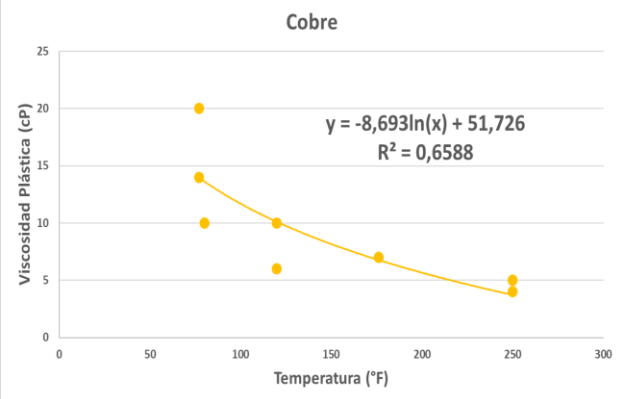
Efecto de la temperatura en la VP en nanopartículas de (A) Sílice, (B) Alúmina, (C) Cobre, y (D) Hierro.

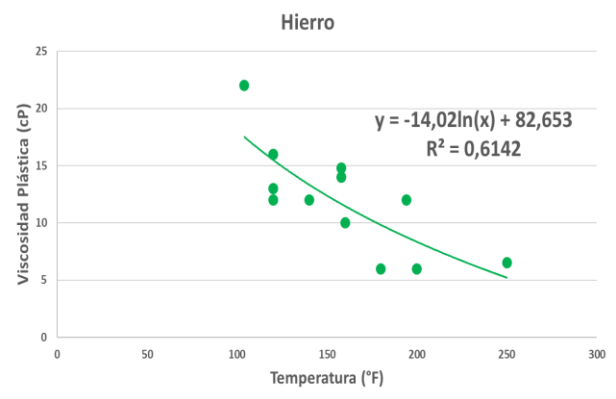
A. B.





C. D.





La disminución de la viscosidad plástica con el aumento de la temperatura se mantiene en todas las tendencias de las nanopartículas, en la tabla 2 se muestran las diferentes ecuaciones y coeficientes de regresión para cada una. El menor R^2 se presenta para el sílice **R^2 = 0,5398**, debido a que es la nanopartícula con mayor cantidad de datos, lo que genera una dispersión mucho mayor y por consiguiente una correlación baja. En la figura 33A se resalta una alta densidad de datos,

esta corresponde a que se realizaron una gran cantidad de estudios a temperatura ambiente (77°F). La alúmina presenta el mayor coeficiente de regresión **R^2 = 0,7529**, presentando una buena correlación a pesar de evidenciar datos atípicos que corresponden al uso de almidón en la formulación, aditivo utilizado para controlar filtrado y que actúa también como material viscosificante (Al-Saba et al., 2018). Todas las nanopartículas presentaron ecuaciones de tipo logarítmico.

Tabla 2.

Correlaciones nanopartículas viscosidad plástica – Efecto temperatura.

Nanopartícula	Correlación		
	Tipo	Ecuación	R^2
Sílice	Logarítmica	y = -9,186ln(x) + 55,405	0,5398
Alúmina	Logarítmica	y = -16,66ln(x) + 93,007	0,7529
Cobre	Logarítmica	y = -8,693ln(x) + 51,726	0,6588
Hierro	Logarítmica	y = -14,02ln(x) + 82,653	0,6142

El análisis respecto a la concentración de NP se realizó a temperatura constante 77°F y se dividió en 2 secciones, la primera **(Sección A)** corresponde a estudios en los que solamente se utilizó material viscosificante, agua y nanopartículas. En la segunda **(Sección B),** se seleccionaron aquellos que adicionalmente tuvieran aditivos utilizados en la formulación de lodos de perforación, tales como: Controladores de filtrado, polímeros, inhibidores, etc. En las figuras 34 y 35 se muestran los comportamientos para la primera sección.

Figura 34.

Efecto de la concentración de NP en la VP (Sección A), a temperatura constante 77°F.

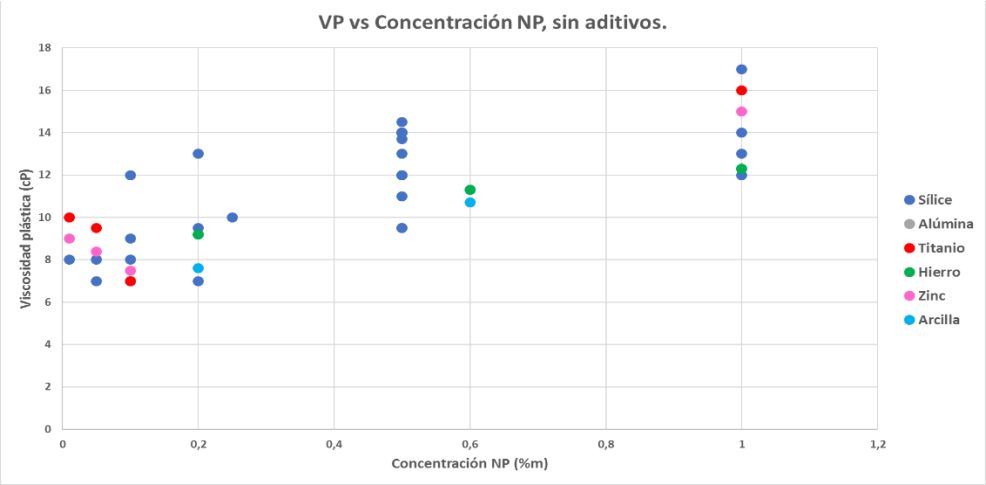
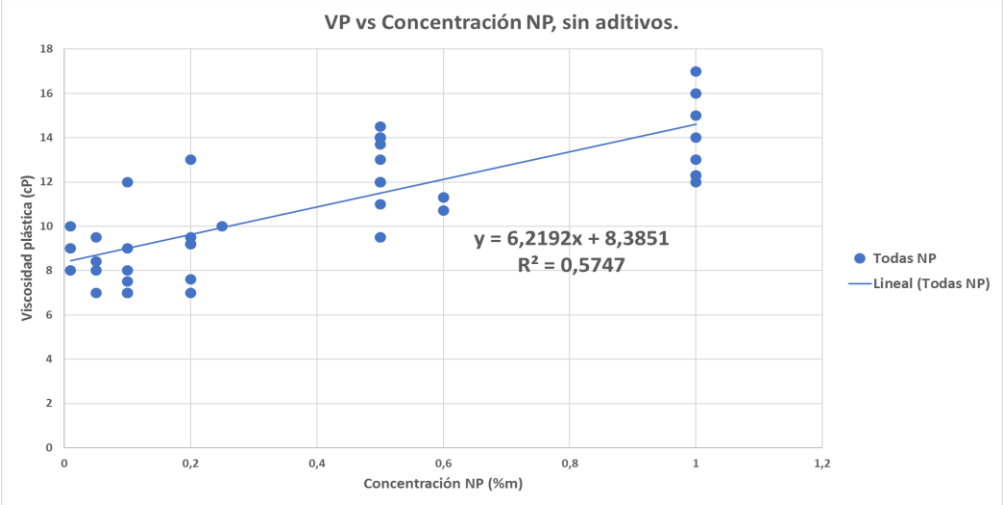


Figura 35.

Efecto de la concentración de NP en la VP (Sección A) a temperatura constante 77°F. Tendencia general.



En la figura 35 se evidencia una tendencia de aumento de la VP directamente proporcional a la concentración, debido a que algunas nanopartículas actúan como aditivo viscosificante ya que por su tamaño nanométrico generan mayor fricción interna entre las capas del fluido aumentando la densidad y por ende la viscosidad (Bayat et al., 2018). Además, las propiedades físicas de las

nanopartículas como la geometría, densidad y capacidad calorífica juegan un papel importante en la alteración del fluido. Existe una relación aceptable entre los datos como lo indica **R^2 = 0,5747** y su respectiva ecuación de tipo lineal **y = 6,2192x + 8,3851,** a pesar de que se presenta alta dispersión**.** En las figuras 36 y 37 se muestra el comportamiento para el análisis de la sección B. Se presenta un coeficiente de regresión menor **R^2 = 0,4791** en comparación a la sección A, debido a que los diferentes aditivos afectan la viscosidad del fluido y directamente el coeficiente de ajuste. Esos datos atípicos corresponden a los resultados obtenidos por (Medhi et al., 2020) usando un fluido NDDF a base de poliamida, también se presentan altos valores de viscosidad debido a la variación de concentración de bentonita usado por (Cumaraswamy Vipulanandan et al., 2016) y otros autores, el ajuste de la curva se presenta con una ecuación lineal **y = 28,068x + 4,948.**

Figura 36.

Efecto de la concentración de NP en la VP (Sección B), a temperatura constante 77°F.

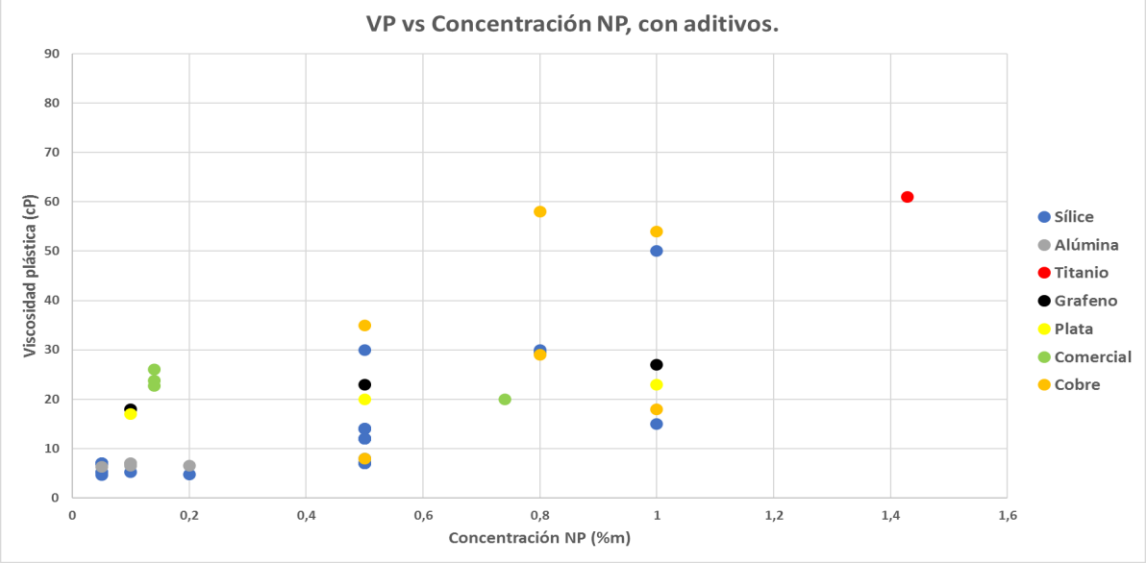
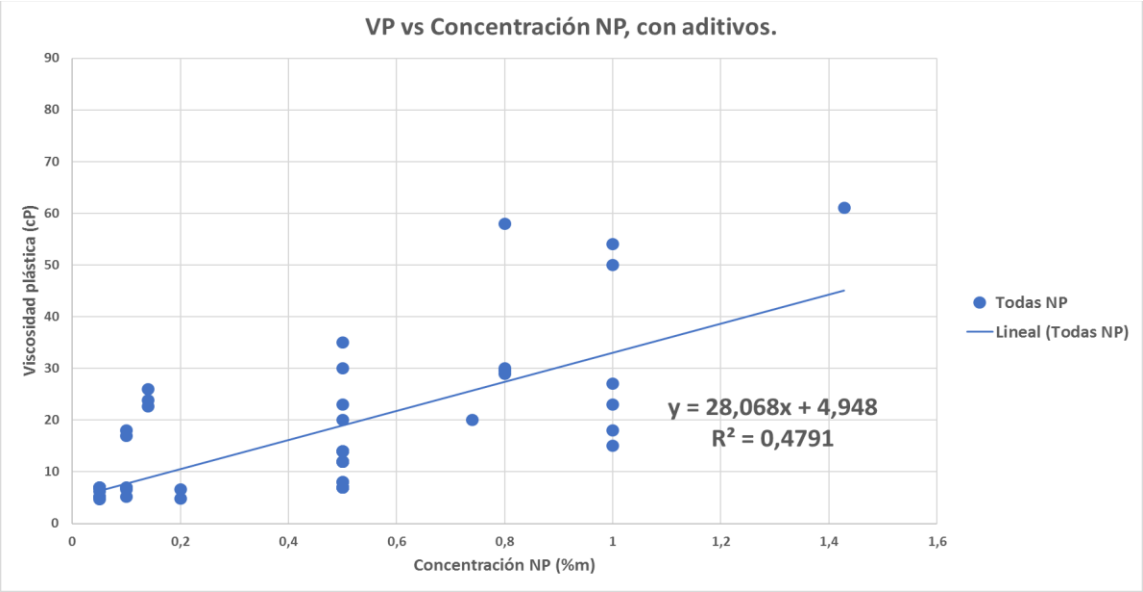


Figura 37.

Efecto de la concentración de NP en la VP (Sección B) a temperatura constante 77°F. Tendencia general.



En el análisis individual por nanopartícula, el hierro y sílice (Figura 38) mostraron tendencias significativas para la sección A sin aditivos, por otra parte, para el análisis con aditivos las nanopartículas a las que se le pudo generar correlación fueron el sílice y cobre (Figura 39).

Figura 38.

Efecto de la concentración de NP en la VP (Sección A) para nanopartículas de (A) Sílice, (B) Hierro.

A. B.

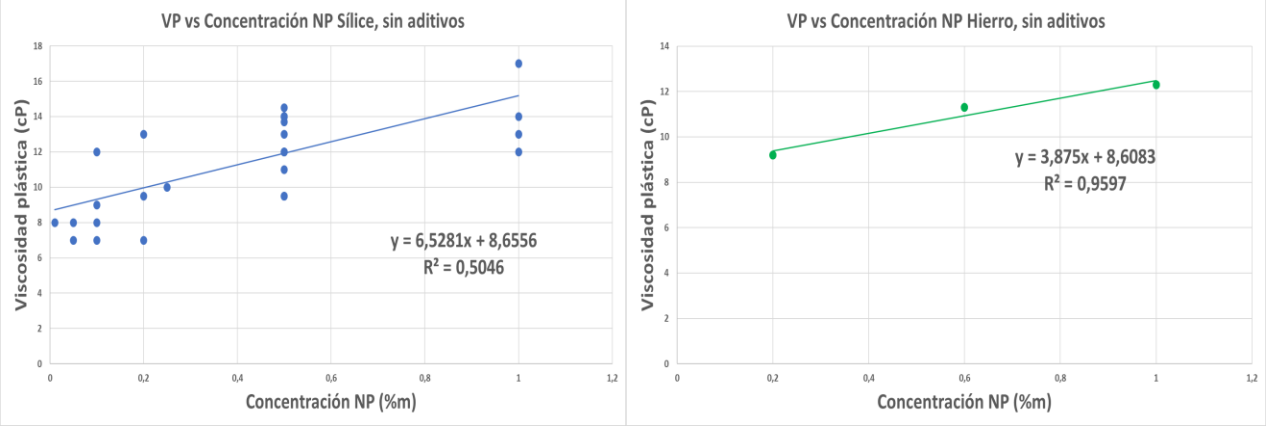
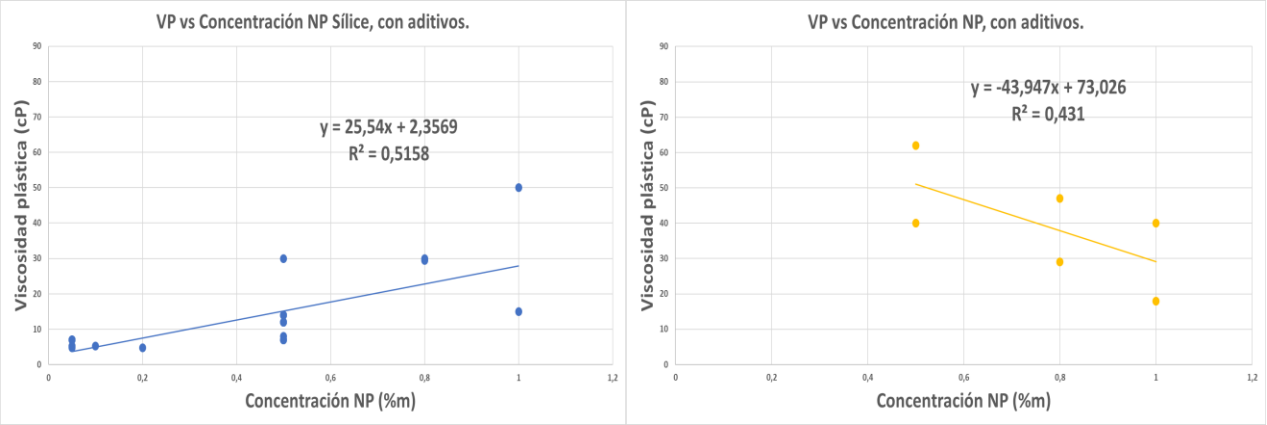


Figura 39.

Efecto de la concentración de NP en la VP (Sección B) para nanopartículas de (A) Sílice, (B) Cobre.

A. B.



En la tabla 3 se clasifican los tipos de ecuaciones de las correlaciones para la concentración. Para la sección A correspondiente al análisis sin aditivos el sílice presentó una relación con ecuación lineal **y = 6,5281x + 8,6556** y un coeficiente **R^2 = 0,5046,** su tendencia es directamente proporcional y presenta una relación buena. Autores como (Amanullah et al., 2011) y (Cheraghian et al., 2018) obtuvieron resultados de aumento de VP total, para este último del 70% a 77°F. El hierro también presentó aumento de la VP con la concentración, presenta una ecuación lineal **y = 3,875x + 8,6083** con un **R^2= 0,9597,** el cual indica muy buena correlación. Para la sección B (Figura 39), el sílice presentó un comportamiento similar al obtenido en la sección A, para el cobre se obtuvo una correlación lineal **y = -43,947x + 73,026,** presentando una tendencia inversa a la del sílice y el hierro, con una disminución de la VP y un **R^2= 0,431.** Esta tendencia la explica (Bayat et al., 2018), ya que obtuvieron una disminución de las propiedades reológicas debido a que algunas nanopartículas pueden no generar ciertos enlaces químicos con la bentonita y disminuir su viscosidad, por lo tanto recomiendan utilizar esta nanopartícula a concentraciones inferiores al 0,5%m ya que obtuvieron aumento de la VP, a concentraciones de 1%m la viscosidad disminuyó.

Tabla 3.

Correlaciones nanopartículas viscosidad plástica – Efecto concentración. (A) Sección A, (B) Sección B.

A.

Nanopartícula	Correlación		
	Tipo	**Ecuación**	***R²***
Sílice	Lineal	y = 6,5281x + 8,6556	0,5046
Hierro	Lineal	y = 3,875x + 8,6083	0,9597

B.

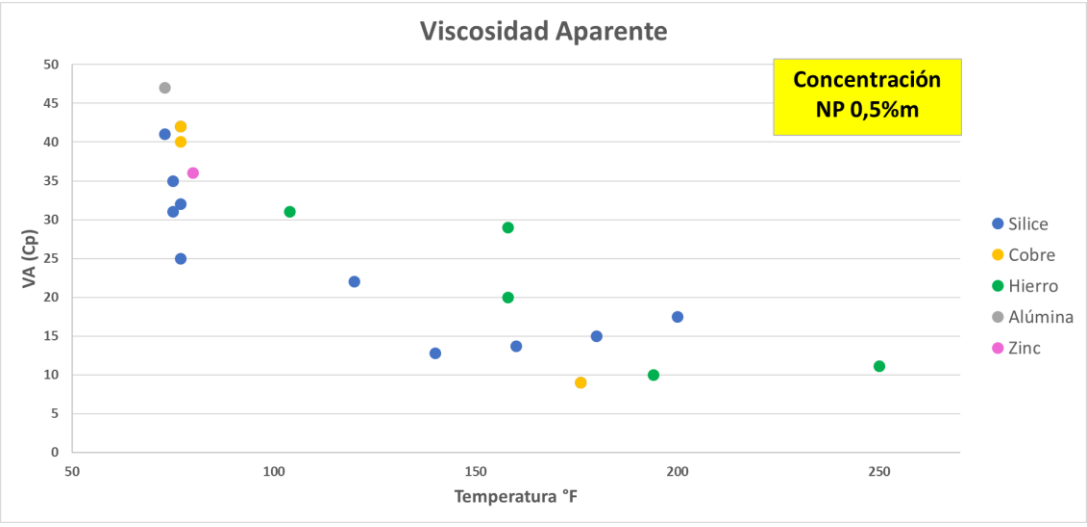
Nanopartícula	Correlación		
	Tipo	**Ecuación**	***R²***
Sílice	Lineal	y = 25,54x + 2,3569	0,5158
Cobre	Lineal	y = -43,947x + 73,026	0,431

4.2. Viscosidad aparente (VA)

El análisis de esta propiedad se realizó a las concentraciones de 0,5 y 1%m. Se estudió el comportamiento de la VA respecto a la temperatura y concentración de NP, en la figura 40 se muestra el análisis respecto a la temperatura con diferentes nanopartículas.

Figura 40.

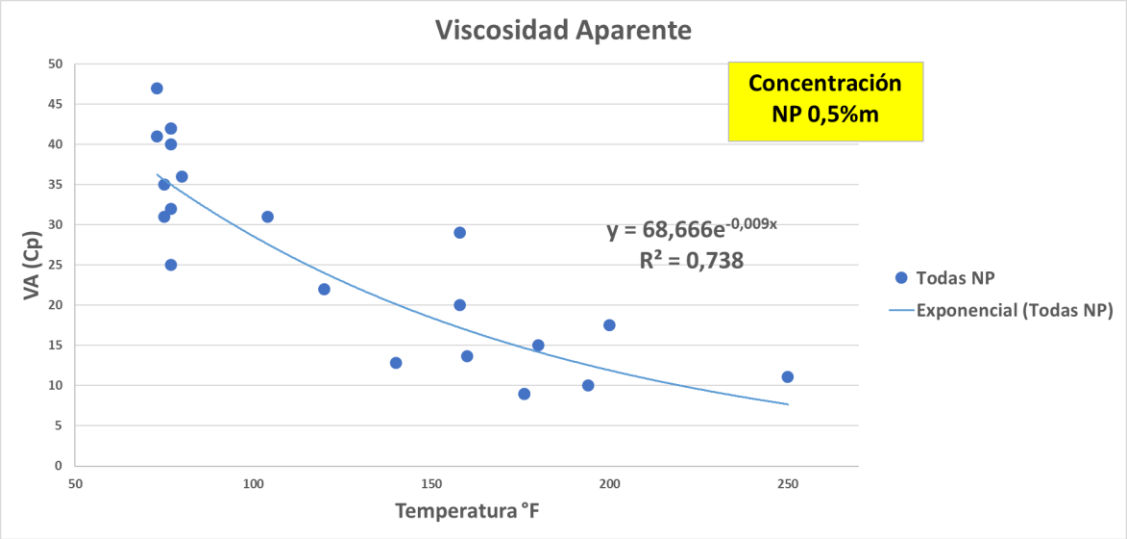
Efecto de la temperatura en la VA a concentración de NP constante 0,5 %m.



El comportamiento de los datos refleja una disminución de la viscosidad aparente a medida que la temperatura aumenta, en la figura 41 se trazó una línea de tendencia la cual presenta una ecuación exponencial **$y = 68{,}666e^{-0{,}009x}$** con un coeficiente de regresión **$R^2 = 0{,}738$.** La relación existente es buena, se ajusta al comportamiento de los datos.

Figura 41.

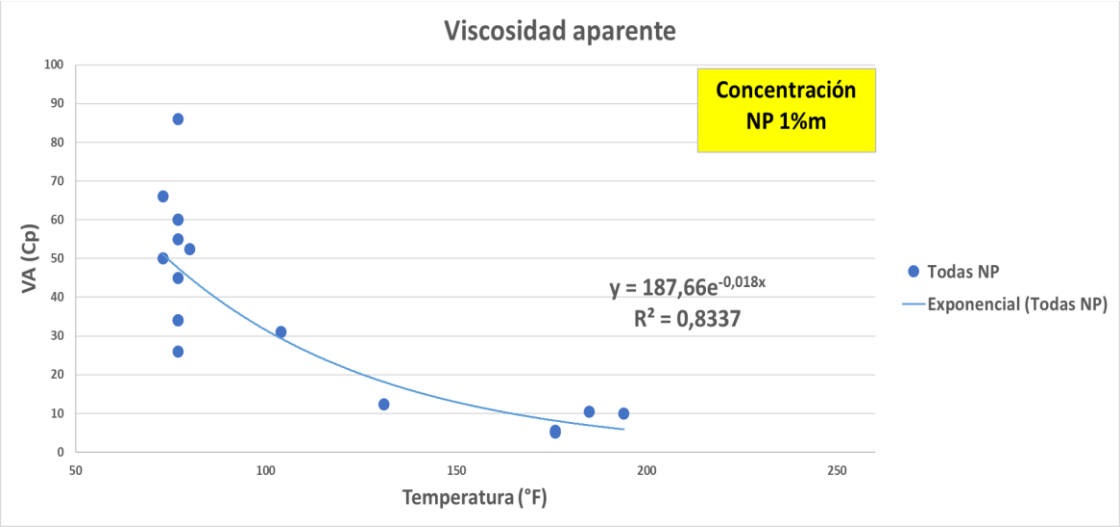
Efecto de la temperatura en la VA a concentración de NP constante 0,5 %m. Tendencia general.



El comportamiento que se presentó para la concentración de 1%m fue similar al presentado a 0,5%m, en la figura 42 se muestra la tendencia. La relación presenta una ecuación exponencial **$y = 187{,}66e^{-0{,}018x}$** con coeficiente **$R^2 = 0{,}8337$,** siendo este último un valor muy aceptable. Se presenta alta concentración de datos a la temperatura 77°F debido a que se realizaron muchos estudios a temperatura ambiente.

Figura 42.

Efecto de la temperatura en la VA a concentración de NP constante 1 %m. Tendencia general.

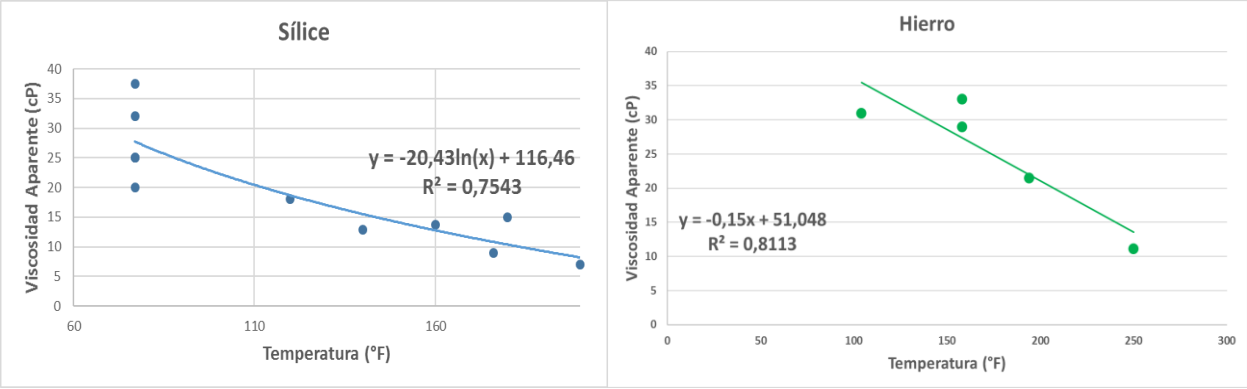


El análisis por nanoparticula se realizó para el hierro y sílice (Figura 43). Las demás nanoparticulas no presentaban la cantidad de datos suficientes para lograr analizar un comportamiento.

Figura 43.

Efecto de la temperatura en la VA en nanopartículas de (A) Sílice, (B) Hierro.

A. B.



Ambos comportamientos fueron de disminución de la propiedad con el aumento de la temperatura, el sílice presentó una tendencia con ecuación de tipo logarítmica y el hierro de tipo

lineal, en la tabla 4 se especifican los valores. El coeficiente de regresión para el sílice **R^2 = 0,7543** se ve afectado por la cantidad de estudios concentrados a una misma temperatura (77°F).

Tabla 4.

Correlaciones nanopartículas viscosidad aparente – Efecto temperatura.

Nanopartícula	Correlación		
	Tipo	Ecuación	R^2
Sílice	Logarítmica	y = -20,43ln(x) + 116,46	0,7543
Hierro	Lineal	y = -0,15x + 51,048	0,8113

Al igual que la propiedad VP, en la VA se seccionó el análisis respecto a la concentración de NP en dos, sin aditivos (Sección A) y con aditivos (Sección B). En las figuras 44 y 45 se muestran los comportamientos para la sección A.

Figura 44.

Efecto de la concentración de NP en la VA (Sección A), a temperatura constante 77°F.

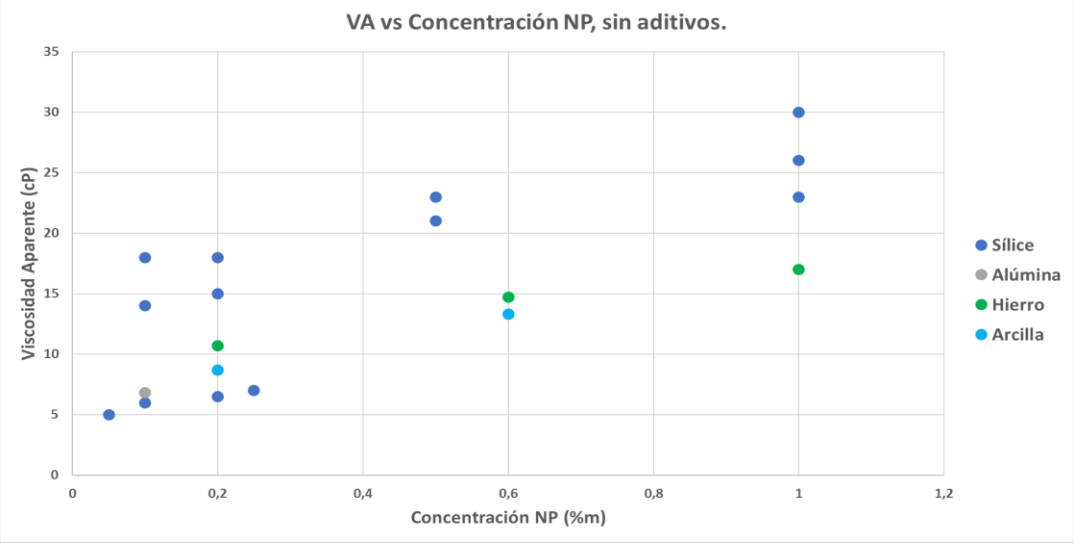
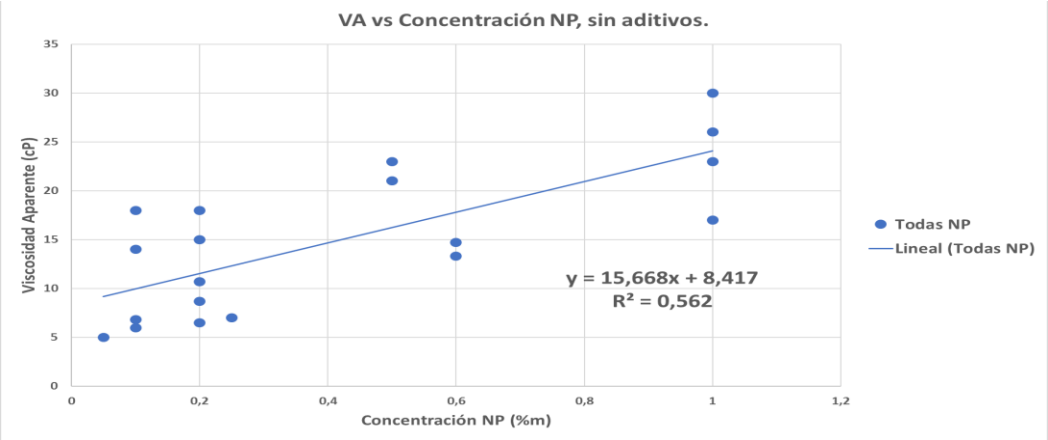


Figura 45.

Efecto de la concentración de NP en la VA (Sección A), a temperatura constante 77°F. Tendencia general.



Se obtuvo una correlación de tipo lineal **y = 15,668x + 8,417** con un coeficiente de regresión **R² = 0,562** (Figura 45). El aumento de la propiedad respecto a la concentración corresponde a lo esperado, debido a que como se explicó anteriormente en la viscosidad plástica hay mayor cantidad de sólidos suspendidos que generan mayor fricción interna y por consiguiente la viscosidad aumenta (Bayat et al., 2018). Para la sección B se muestran las tendencias en las figuras 46 y 47.

Figura 46.

Efecto de la concentración de NP en la VA (Sección B), a temperatura constante 77°F.

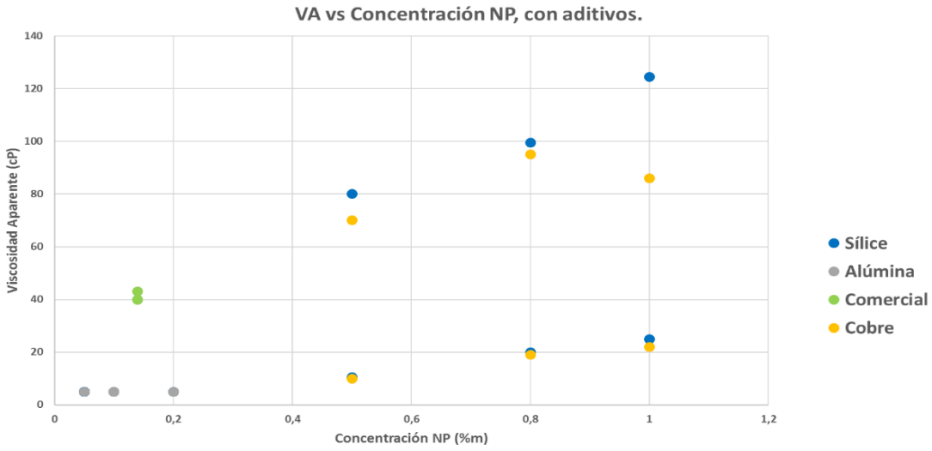
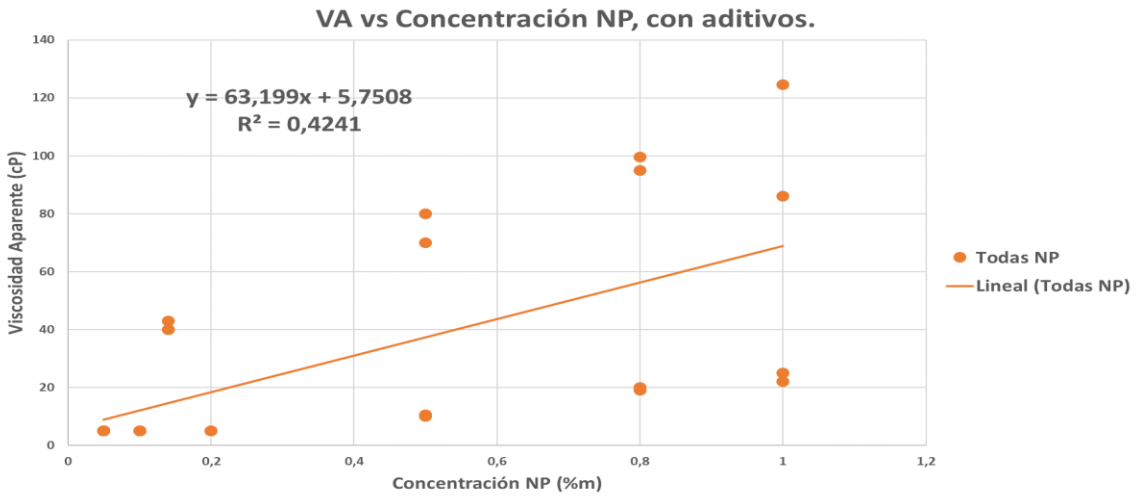


Figura 47.

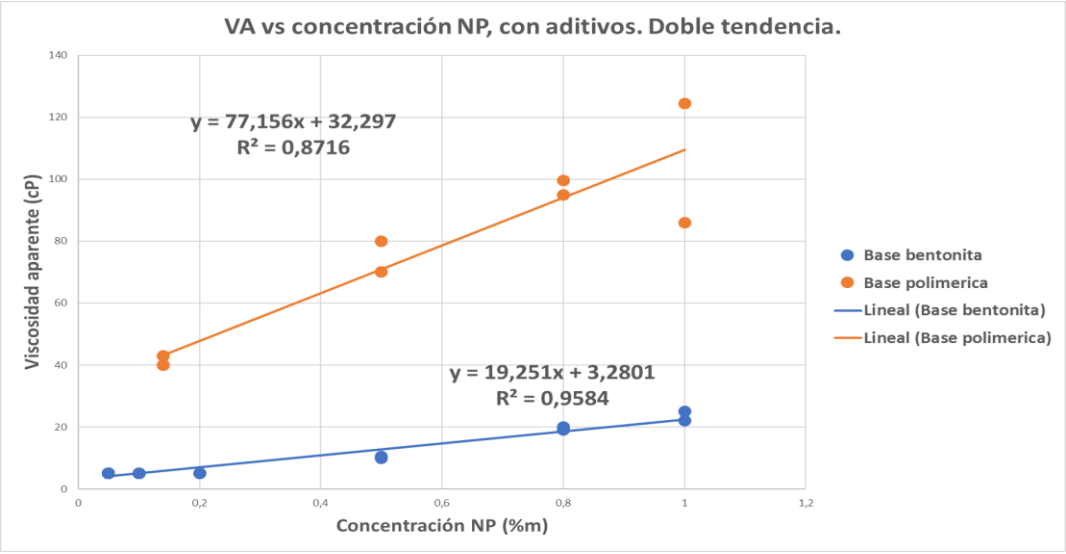
Efecto de la concentración de NP en la VA (Sección B), a temperatura constante 77°F. Tendencia general.



Se obtuvo una relación con ecuación de tipo lineal **y = 63,199x + 5,7508** y **R² = 0,4241,** sin embargo, se evidencia una doble tendencia en los datos. En la figura 48 se muestran las tendencias.

Figura 48.

Efecto de la concentración de NP en la VA (Sección B), a temperatura constante 77°F. Doble tendencia.

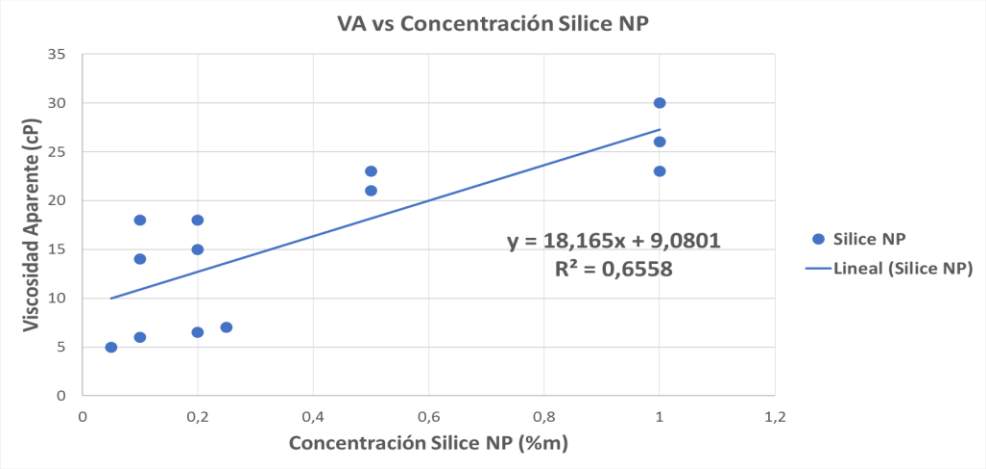


La tendencia superior (Naranja) corresponde a un fluido a base de poliamida, este aditivo que actúa como espesante y aumenta las propiedades reológicas, la tendencia inferior (azul) corresponde a un fluido a base de bentonita (Medhi et al., 2020), se presentan coeficientes de regresión altos de **0,8716** y **0,9584** respectivamente.

Se realizó el análisis para la nanopartícula sílice de la sección A (Figura 49) y presentó una tendencia directamente proporcional, con una ecuación de tipo lineal **y = 18,165x + 9,0801** y un **R^2 = 0,6558,** siendo un coeficiente aceptable entre la dispersión de datos que se presenta. Algunos autores como (Flores, 2017) obtuvieron aumento de la VA con el aumento de la concentración, sin embargo, para algunas concentraciones de NP se evidenció una tendencia de disminución como lo demuestra (Salih et al., 2016) en las pruebas realizadas, estos resultados presentan diferentes tendencias, que generan al momento de buscar un modelo que las represente alta dispersión de datos. Para el análisis individual por nanopartícula de la sección B no se generaron correlaciones debido a que el sílice fue la que mayor cantidad de datos aportaba a la tendencia general y por esta razón al analizarla por separado se presentaba un comportamiento similar al general con un coeficiente de regresión **R^2 = 0,5263.**

Figura 49.

Efecto de la concentración de NP Sílice en la viscosidad aparente. Sección A.

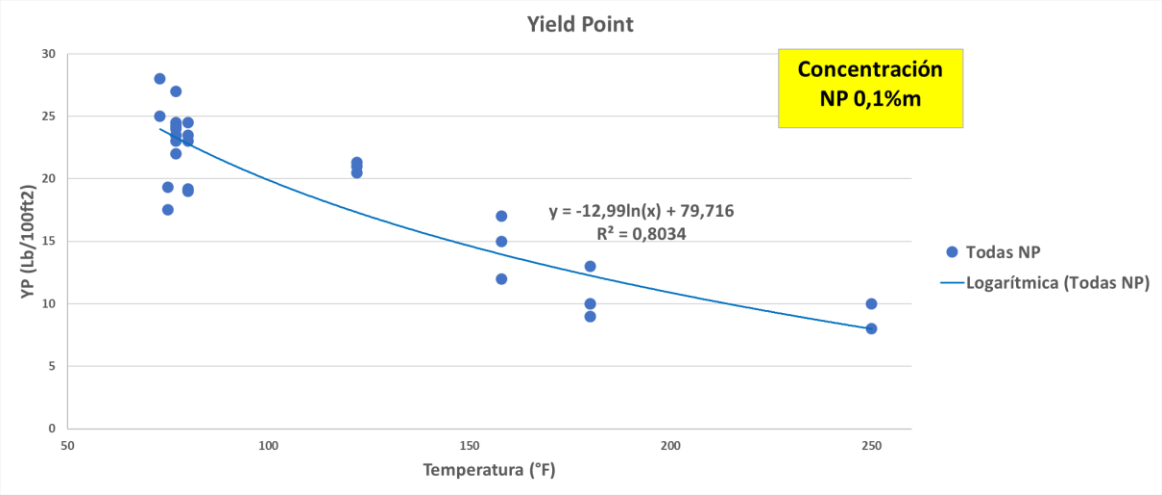


4.3. Yield point (YP)

Esta propiedad es de suma importancia en la perforación de pozos, ya que permite arrastrar los recortes que genera la broca a medida que se va perforando y los lleva hasta la superficie. Debido a la gran cantidad de estudios consultados y las condiciones a las que se realizaron las pruebas, se lograron obtener correlaciones que se ajustan a la tendencia de los datos. Se estudió el comportamiento para las concentraciones 0,1 y 1 %m. Figuras 50 y 51.

Figura 50.

Efecto de la temperatura en el YP a concentración de NP constante 0,1%m. Tendencia general.



El yield point al ser una medida de las fuerzas de atracción electroquímicas de un fluido se ve afectado directamente por la temperatura, debido a que al aumento de ésta, las fuerzas internas ubicadas en la superficie de las partículas disminuyen al reducir la fricción (MI-SWACO, 2001). Los datos atípicos que se presentan de 73°F corresponden a un estudio en el que a concentración de 0,1%m de NP se obtuvieron altos valores en las propiedades reológicas, a partir de 0,2%m de NP los valores comenzaron a disminuir (Smith et al., 2018). Además, aditivos que son usados para controlar filtrado afectan las propiedades reológicas del lodo. Se obtuvo una correlación con ecuación logarítmica **y = -12,99ln(x) + 79,716** y coeficiente **R² = 0,8034,** para la concentración de

1%m la tendencia fue similar a la de 0,1%m, se obtuvo una relación con una ecuación de tipo logarítmica **y = -18,66ln(x) + 104,79** y **R^2 = 0,6453.** Se presenta alta dispersión de datos debido al número de estudios a 77°F**.** El efecto generado a las nanopartículas sílice, alúmina, hierro y cobre analizadas por separado se muestra en la figura 52. El sílice y cobre presentaron un comportamiento de disminución del yield point, a diferencia del hierro y alúmina que tuvieron un efecto adverso de aumento. Los altos valores de YP que presenta el cobre son debido a que los fluidos son base poliamida y valores bajos base bentonita. Los valores atípicos que presenta el hierro se deben a que en la investigación que realizó (Perween et al., 2019) utilizaron un fluido bentónico con aditivos poliméricos. La tendencia de aumento del YP con la temperatura para el hierro la explica (Mahmoud et al., 2016) ya que obtienen mayor limite elástico a temperaturas altas mejorando la capacidad de suspensión dinámica de los recortes de perforación. En cuanto a las correlaciones, la alúmina fue la que mayor relación de las variables presentó **R^2 = 0,8579** y el cobre el menor **R^2 = 0,3979.** En la tabla 5 se muestran las correlaciones para cada nanopartícula.

Figura 51.

Efecto de la temperatura en el YP a concentración de NP constante 1%m. Tendencia general.

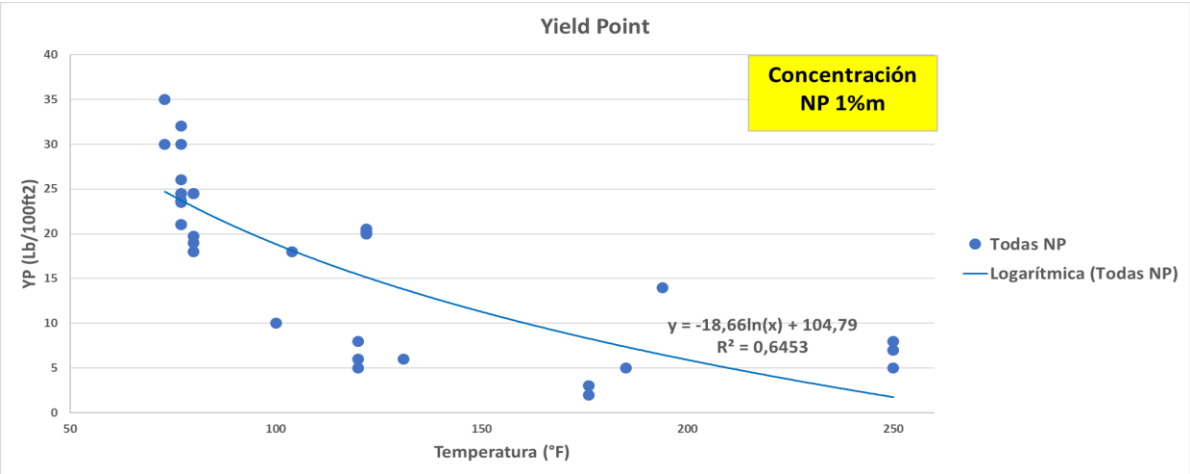
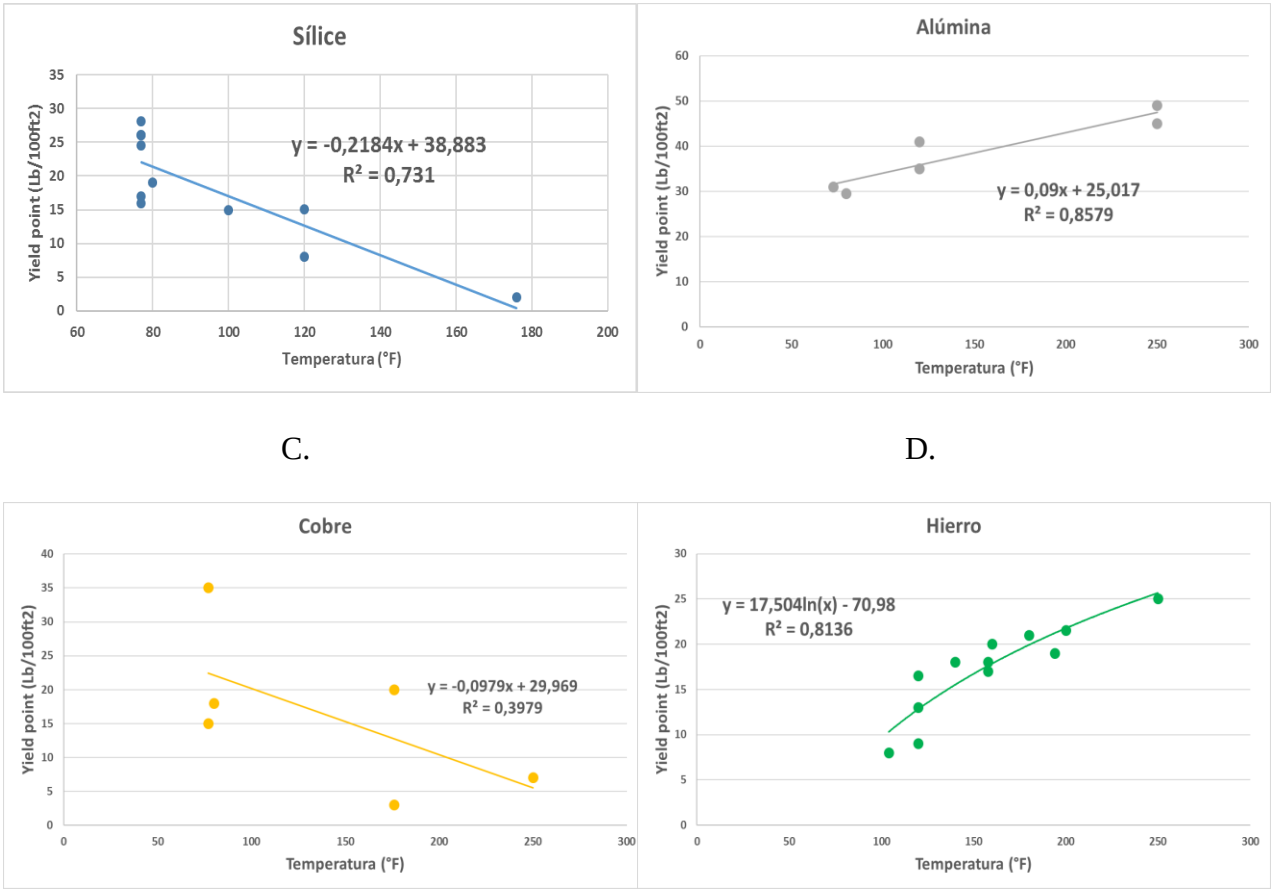


Figura 52.

Efecto de la temperatura en el YP en nanopartículas de (A) Sílice, (B) Alúmina, (C) Cobre, y (D) Hierro.

A. B.



C. D.

Tabla 5.

Correlaciones nanopartículas yield point – Efecto temperatura.

Nanopartícula	Correlación		
	Tipo	Ecuación	R^2
Sílice	Lineal	y = -0,2184x + 38,883	0,731
Alúmina	Lineal	y = 0,09x + 25,017	0,8579
Cobre	Lineal	y = -0,0979x + 29,969	0,3979
Hierro	Logarítmica	y = 17,504ln(x) - 70,98	0,8136

El efecto de la concentración de NP a temperatura constante para la sección A se muestra en las figuras 53 y 54. Se evidencia el aumento del yield point a medida que aumenta la concentración de NP, por lo general, el aumento de los valores del yield point permite que los recortes se transporten a superficie más rápido, sin embargo, el valor no debe ser excesivamente alto para no generar una sobrepresión en la bomba (Bayat et al., 2018). La correlación de los datos proporcionó una ecuación de tipo lineal **y = 9,4624x + 7,1783** con un coeficiente de regresión **R^2 = 0,6642,** es una correlación buena teniendo en cuenta la gran cantidad de datos dispersos que se presentan.

Figura 53.

Efecto de la concentración de NP en el YP (Sección A), a temperatura constante 77°F.

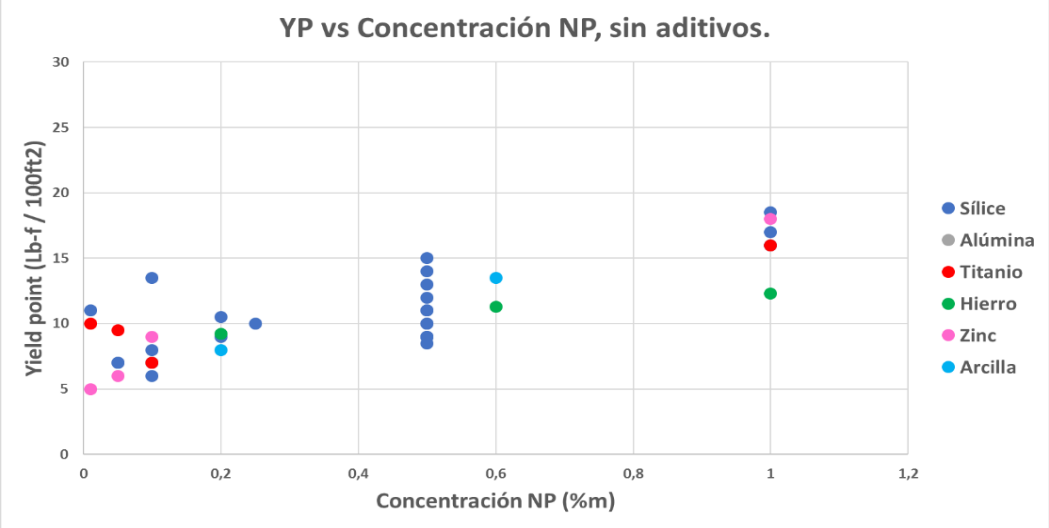
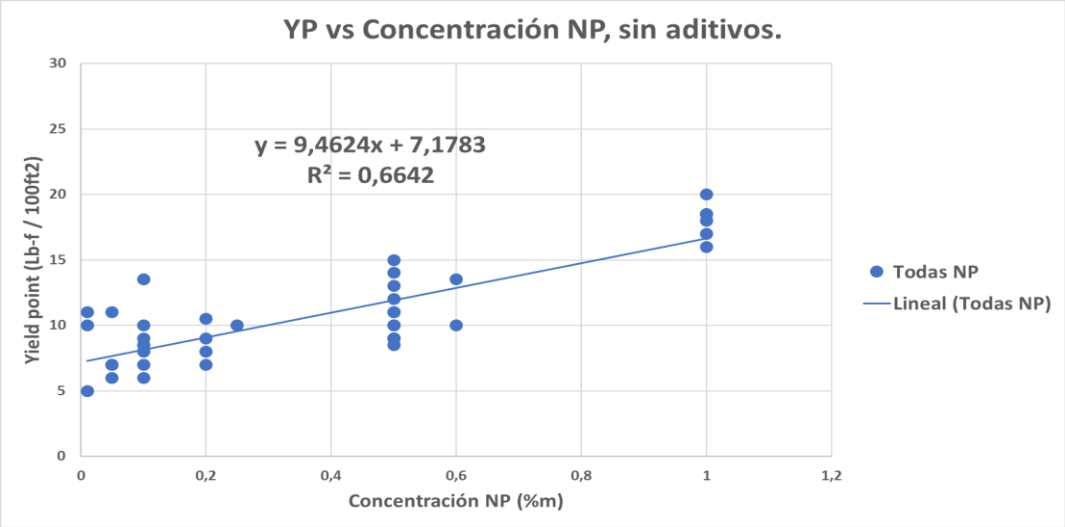


Figura 54.

Efecto de la concentración de NP en el YP (Sección A), a temperatura constante 77°F. Tendencia general.



También se realizó el análisis para los estudios que en su formulación tienen diferentes aditivos que no son viscosificante, agua y NP (Sección B). En las gráficas 55 y 56 se muestra el comportamiento.

Figura 55.

Efecto de la concentración de NP en el YP (Sección B), a temperatura constante 77°F.

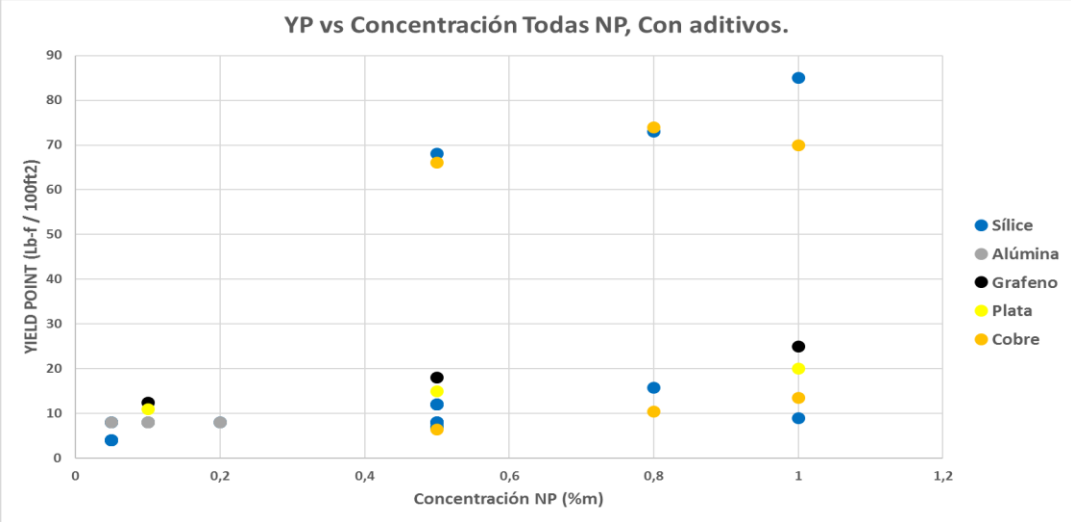
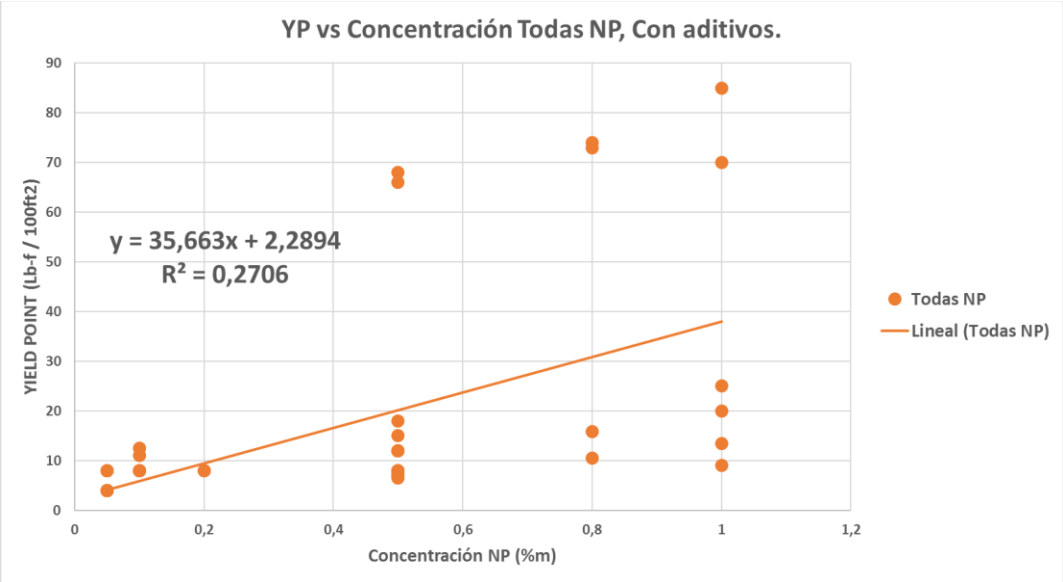


Figura 56.

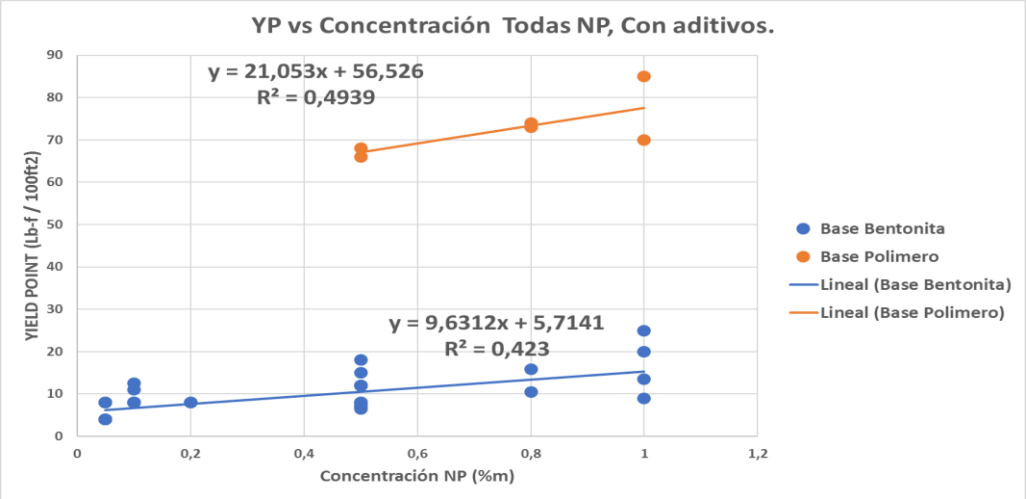
Efecto de la concentración de NP en el YP (Sección B), a temperatura constante 77°F. Tendencia general.



Se evidencia un aumento del YP con el aumento de la concentración de NP, además, se presenta una doble tendencia en los datos, la tendencia superior corresponde a un set de datos con un fluido base polímero y la inferior con un fluido base bentonita. En las pruebas realizadas por (Cumaraswamy Vipulanandan et al., 2016) y (Bayat et al., 2018) se obtuvieron resultados de aumento del yield point utilizando sílice, alúmina y nanoarcilla en un 50% con el aumento de la concentración de nanopartícula. En la figura 57 se muestran ambas tendencias y sus respectivas ecuaciones con coeficientes de regresión.

Figura 57.

Efecto de la concentración de NP en el YP (Sección B), a temperatura constante 77°F. Doble tendencia.

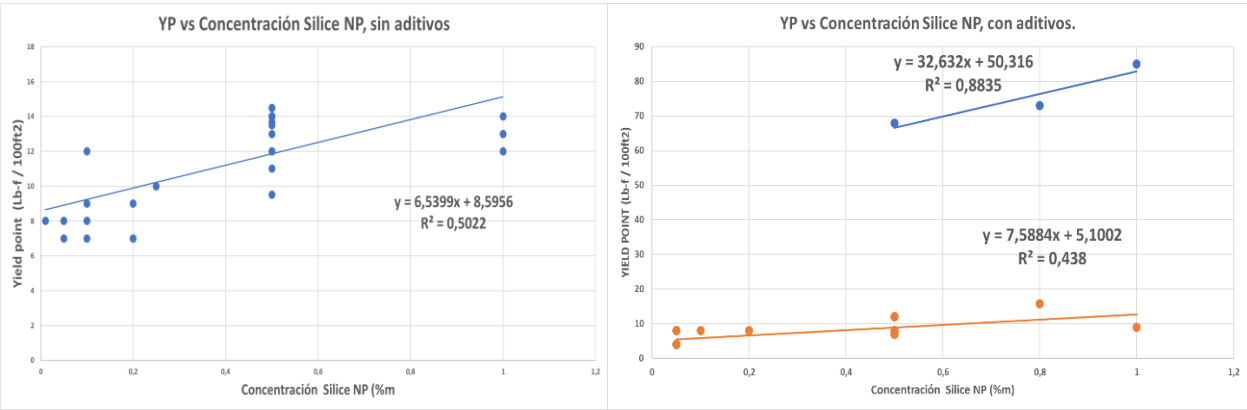


Para la nanopartícula sílice en ambas secciones se obtuvieron las ecuaciones que se muestran en la figura 58. Para las demás nanopartículas no se generaron correlaciones debido a que por la cantidad de datos no era representativo.

Figura 58.

Comparación del efecto de la concentración de NP Sílice en el yield point, Sección A y B.

A. B.



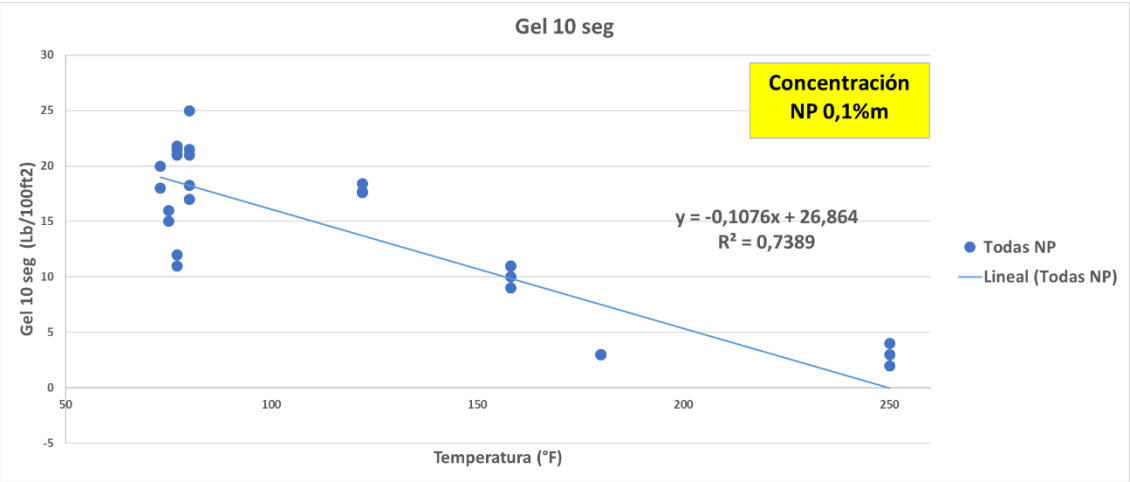
Se presentaron ecuaciones de tipo lineal, se puede evidenciar un aumento directamente proporcional en ambas curvas, además, en la tendencia de la sección B se muestra la afectación de algunos aditivos en el YP, aumentando considerablemente la propiedad a valores de 70 lb/100 ft^2. Para la sección A se generó una correlación con ecuación de tipo lineal **y = 6,5399x + 8,5956** y un **R^2 = 0,5022,** para la sección B se obtuvieron coeficientes de ajuste de **R^2 = 0,8835** para la tendencia superior y **R^2 = 0,438** para la inferior.

4.4. Resistencia de gel a 10 segundos (Gel 10 seg)

De la manera que se realizó el análisis para las anteriores propiedades, el gel 10 seg. fue estudiado a diferentes concentraciones y temperaturas para revisar el comportamiento de la propiedad respecto al uso de nanopartículas en los fluidos de perforación. Se realizó el estudio del efecto de la temperatura a concentración de nanopartícula constante, estas concentraciones corresponden a 0,1 y 1%m. Ver figuras 59 y 60.

Figura 59.

Efecto de la temperatura en el gel 10 seg. a concentración de NP constante 0,1%m.



La tendencia de la curva es pronunciada para la concentración de 0,1%m, se presenta disminución del gel 10 seg con el aumento de la temperatura debido a que el fluido pierde

capacidad tixotrópica, la correlación presenta un coeficiente de regresión bueno **R^2 = 0,7389** con una ecuación de tipo lineal **y = -0,1076x + 26,864.** En la figura 60 se puede apreciar una tendencia similar a la anterior, esta corresponde a la concentración de 1%m. Se obtuvo una ecuación de tipo logarítmica **y = -11,13ln(x) + 66,537** con un **R^2 = 0,5523.** La relación es considerablemente buena, se ajusta a la tendencia de disminución de la curva teniendo en cuenta la cantidad de datos que se presentan a temperatura ambiente (77°F). En el análisis individual por nanopartícula se graficaron aquellas que tenían mayor cantidad de datos y presentaban una tendencia marcada (Figura 61), entre estas están: Sílice, cobre, hierro y arcilla. Se evidencia que los comportamientos tienden a disminuir la propiedad gel 10 seg con la temperatura,

Figura 60.

Efecto de la temperatura en el gel 10 seg. a concentración de NP constante 1%m.

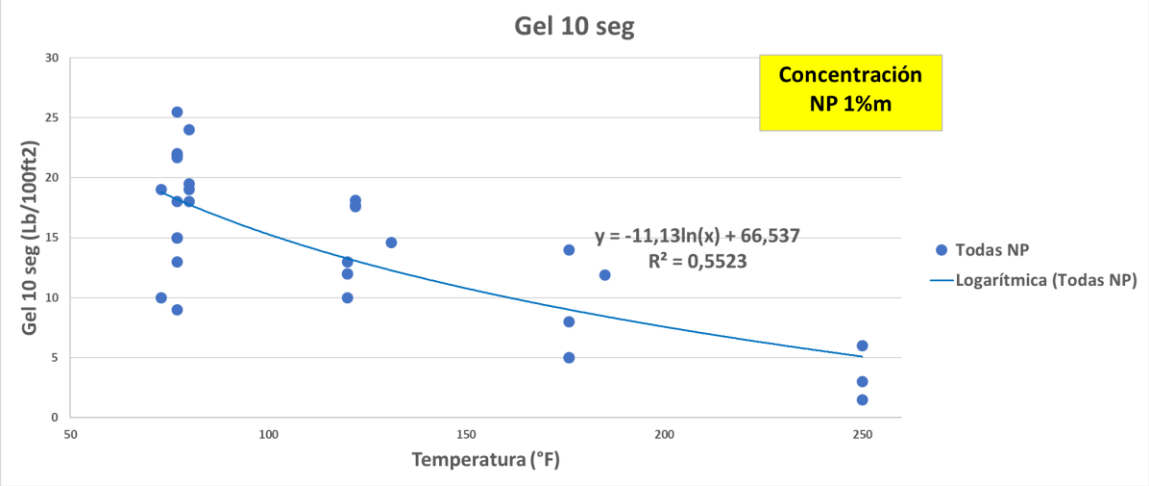
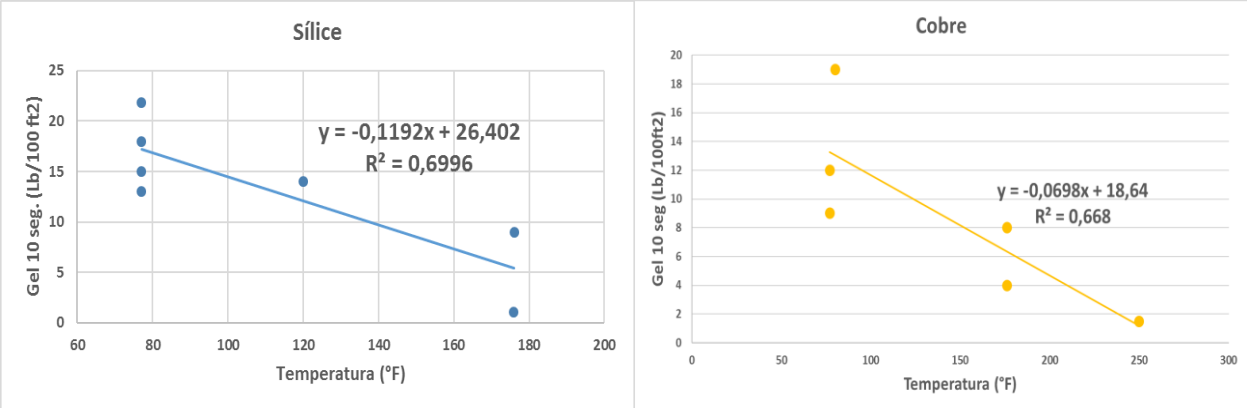


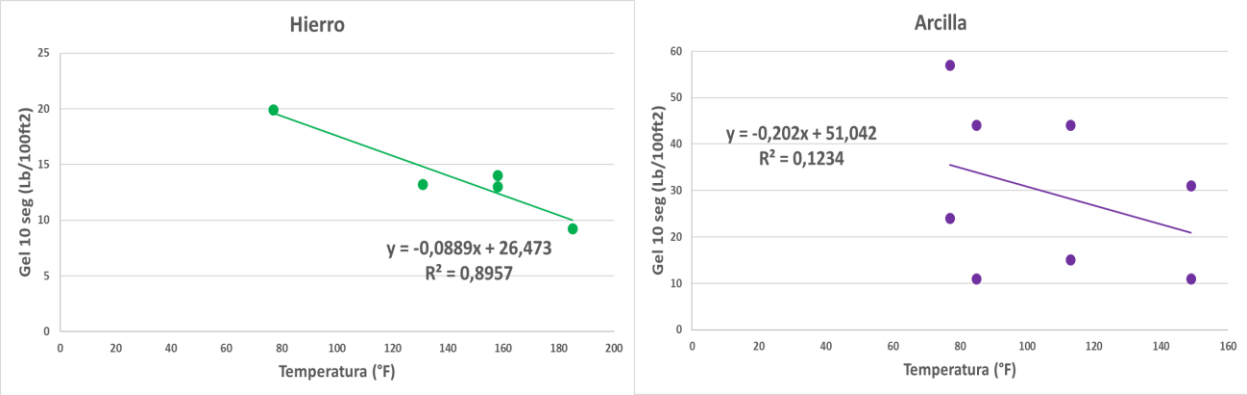
Figura 61.

Efecto de la temperatura en el gel 10 seg. En nanopartículas de (A) Sílice, (B) Cobre, (C) Hierro, y (D) Arcilla.

A. B.



C. D.



En la tabla 6 se muestran las correlaciones obtenidas.

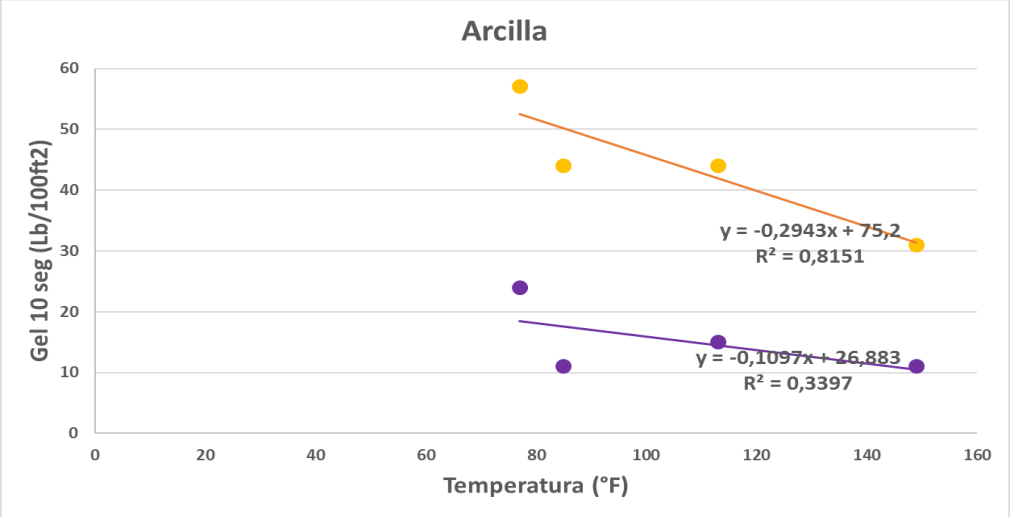
Tabla 6.

Correlaciones nanopartículas gel 10 segundos – Efecto temperatura.

Nanopartícula	Correlación		
	Tipo	Ecuación	R^2
Sílice	Lineal	y = -0,1192x + 26,402	0,6996
Cobre	Lineal	y = -0,0698x + 18,64	0,668
Hierro	Lineal	y = -0,0889x + 26,473	0,8957
Arcilla	Lineal	y = -0,202x + 51,042	0,1234

Figura 62.

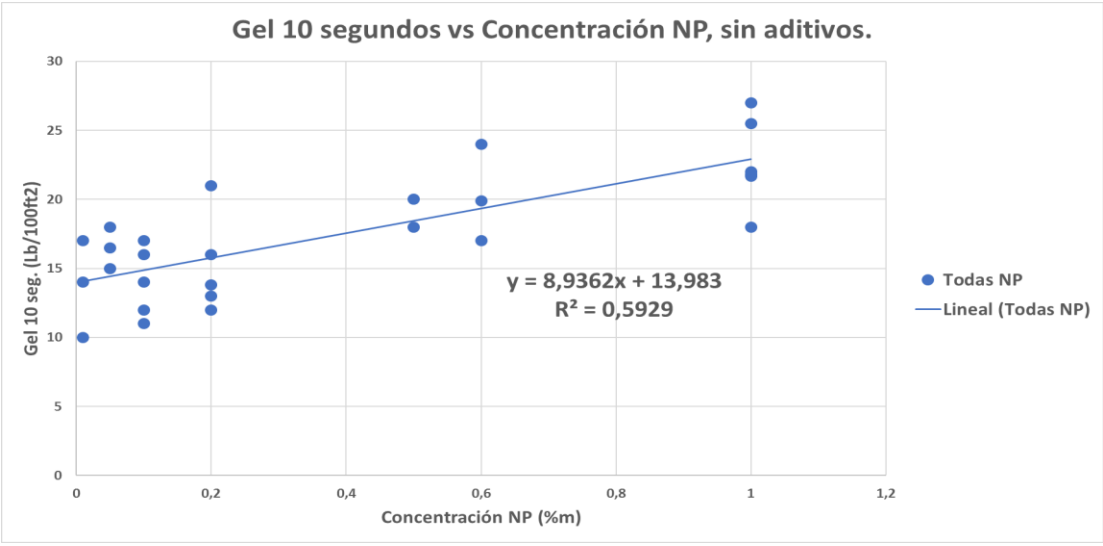
Doble tendencia en efecto de la temperatura en el gel 10 seg. para la nanopartícula arcilla.



Para la arcilla se evidencia un comportamiento de doble tendencia (figura 62), para los valores de gel 10 seg. superiores a 30 lb/100ft2 se utilizó un fluido con concentración de bentonita 8%, para los datos inferiores la concentración correspondía al 2%. El efecto de la concentración de nanopartícula a temperatura constante para la sección A se ilustra en la figura 63.

Figura 63.

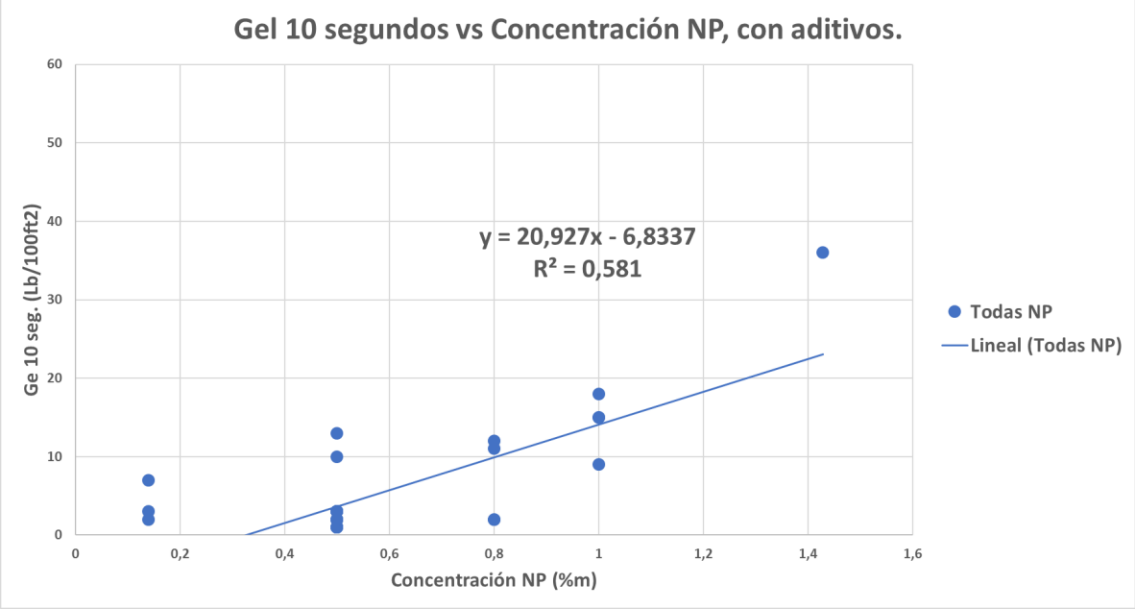
Efecto de la concentración de NP en el gel 10 seg. (Sección A), a temperatura constante 77°F. Tendencia general.



La correlación entre las 2 variables presentó una ecuación de tipo lineal **y = 8,9362x + 13,983** con un **R^2 = 0,5929,** la tendencia de la curva es de aumento para la propiedad gel 10 seg a medida que aumenta la concentración de NP manteniendo la temperatura constante a 77°F, este aumento refleja que a mayores concentraciones de NP el fluido puede suspender los recortes generados por la perforación y disminuir problemas asociados. Con respecto a la influencia de los diferentes aditivos usados en la formulación de los lodos se presenta el comportamiento en la figura 64.

Figura 64.

Efecto de la concentración de NP en el gel 10 seg. (Sección B), a temperatura constante 77°F. Tendencia general.



Se obtuvo una correlación con ecuación de tipo lineal **y = 20,927x - 6,8337** con un coeficiente de regresión **R^2 = 0,581,** es muy similar al obtenido para la sección A sin aditivos. Se presenta mayor dispersión de los datos en la sección B si se tiene en cuenta que para la sección A hay mayor cantidad de datos.

Para el análisis individual por nanopartícula debido al filtro que se aplicó de seccionar los datos en 2 grupos, solo para la nanopartícula sílice se pudo generar correlaciones representativas en ambas secciones. A y B.

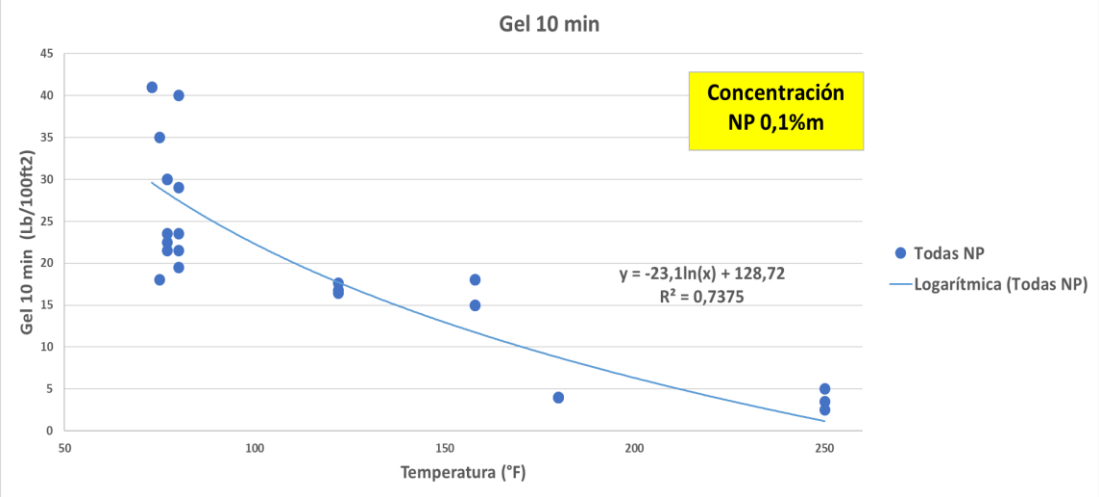
Para la sección A se obtuvo una relación entre los datos con un coeficiente de ajuste de **R^2 = 0,672** y una ecuación de tipo lineal **y = 9,6335x + 12,87,** presentando una tendencia de aumento directamente proporcional. Para la sección B la ecuación es de tipo lineal **y = 24,765x - 9,9697** y un **R^2 = 0,6355,** al igual que en la sección A el aumento fue directamente proporcional. Autores como (Cumaraswamy Vipulanandan et al., 2016) obtuvieron aumento en el gel 10 seg. para la arcilla, (Cheraghian et al., 2018) para el sílice y (Bayat et al., 2018) para el titanio y alúmina.

4.5. Resistencia de gel 10 minutos (Gel 10 min.)

Se seleccionaron nuevamente las concentraciones 0,1 y 1%m para realizar el análisis respecto a la temperatura. Ver figuras 65 y 66.

Figura 65.

Efecto de la temperatura en el gel 10 min. a concentración de NP constante 0,1%m.



Se presenta un comportamiento similar al gel 10 seg. de disminución de la propiedad con el aumento de la temperatura. Para la concentración de 0,1%m se obtuvo una relación con ecuación

de tipo logarítmica **y = -23,1ln(x) + 128,72** y un coeficiente **R^2 = 0,7375** presentando buena correlación entre las variables de estudio. En la concentración 1%m (Figura 66) se obtuvo un comportamiento similar con una ecuación logarítmica **y = -16,68ln(x) + 96,959** con un coeficiente de regresión **R^2 = 0,6485,** también es un indicador del ajuste de la ecuación a la curva. Se logró obtener correlaciones para diferentes nanopartículas, las cuales son: Sílice, cobre y el hierro. En la figura 67 se muestran los comportamientos.

Las tendencias para las tres nanopartículas se presentaron en la disminución de la propiedad gel 10 min, se obtuvieron correlaciones con coeficientes de regresión muy aceptables, como lo es el del hierro **R^2 = 0,8883.** En la tabla 7 se presentan las ecuaciones y coeficientes de las demás nanopartículas estudiadas.

Figura 66.

Efecto de la temperatura en el gel 10 min. a concentración de NP constante 1 %m.

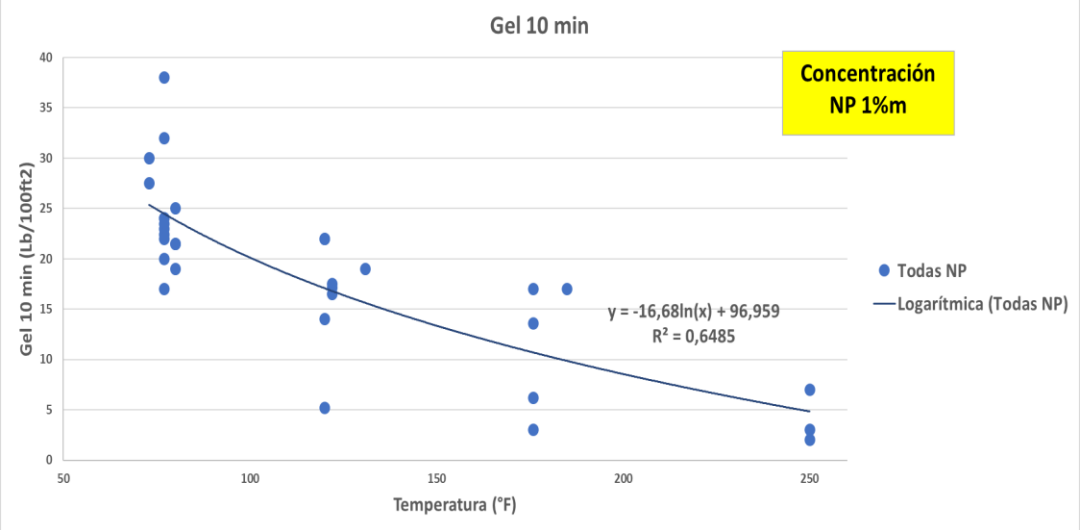
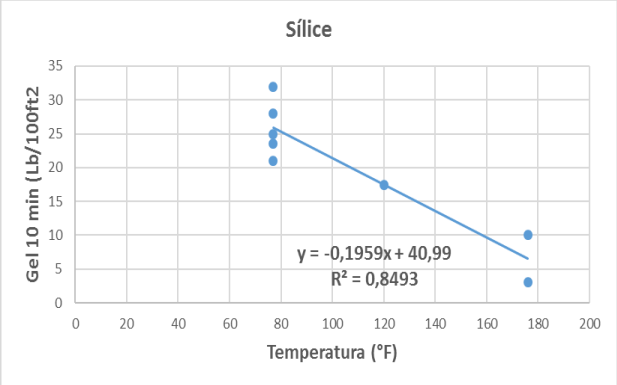


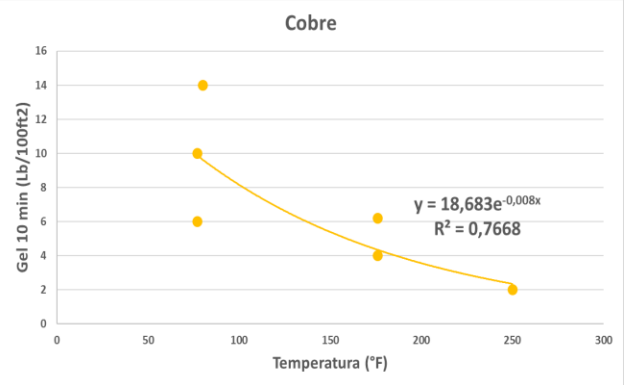
Figura 67.

Efecto de la temperatura en el gel 10 min. en nanopartículas de (A) Sílice, (B) Cobre, y (C) Hierro.

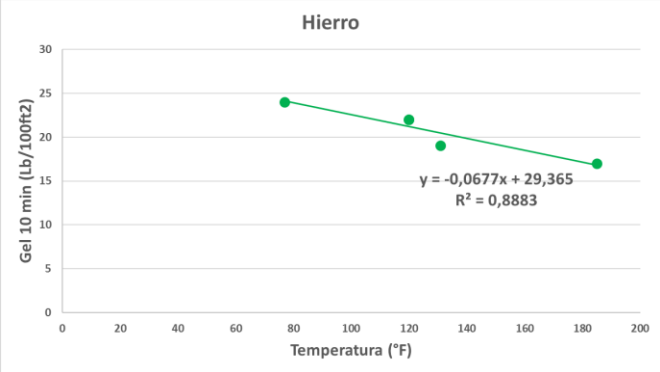
A.



B.



C.



Para el sílice y cobre se presenta alta cantidad de datos a 77°F, afectando directamente el ajuste de la ecuación de la curva.

Tabla 7.

Correlaciones nanopartículas gel 10 minutos – Efecto temperatura.

Nanopartícula	Correlación		
	Tipo	Ecuación	R^2
Sílice	Lineal	y = -0,1959x + 40,99	0,8493
Cobre	Exponencial	$y = 18{,}683e^{-0{,}008x}$	0,7668
Hierro	Lineal	y = -0,0677x + 29,365	0,8883

El efecto de la concentración a temperatura constante para el análisis sin aditivos (Sección A) se muestra en la figura 68 y para la sección B en la figura 69.

Figura 68.

Efecto de la concentración de NP en el gel 10 min. (Sección A), a temperatura constante 77°F. Tendencia general.

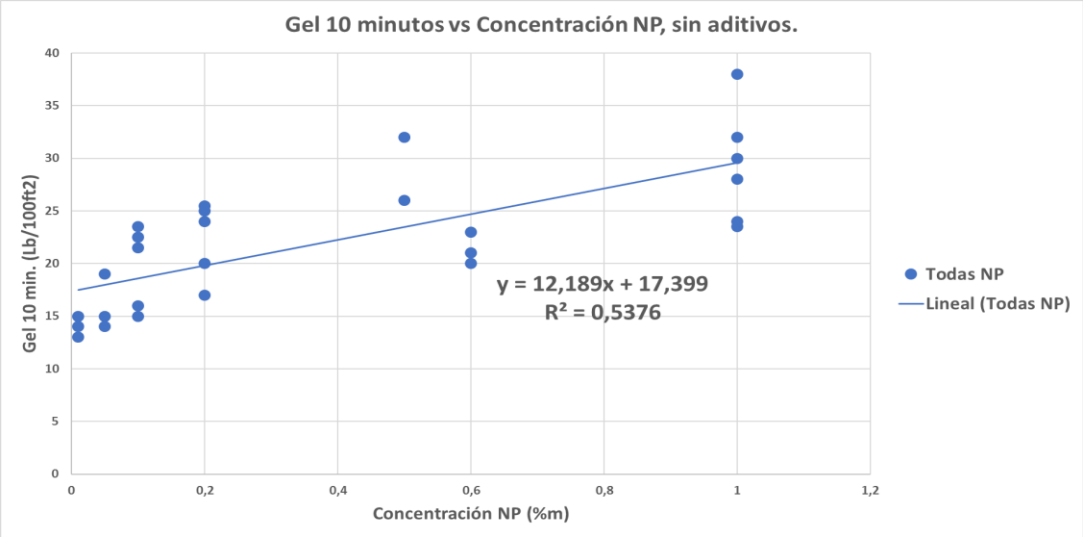
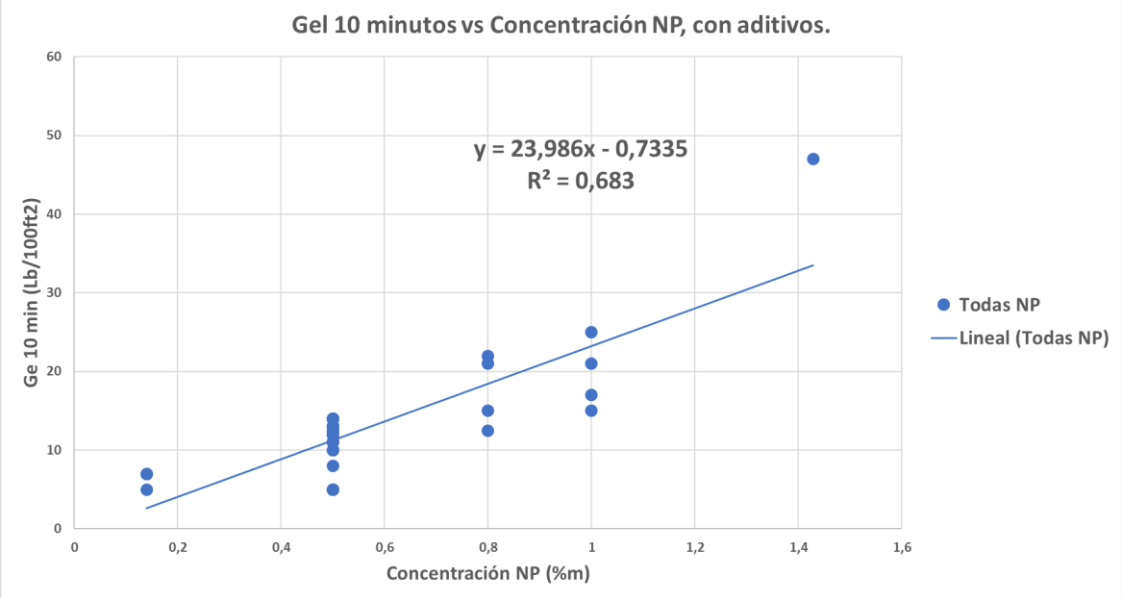


Figura 69.

Efecto de la concentración de NP en el gel 10 min. (Sección B), a temperatura constante 77°F. Tendencia general.



Se evidencia un aumento del gel 10 min a medida que aumenta la concentración de nanopartícula, se obtuvo una correlación con ecuación de tipo lineal **y = 12,189x + 17,399** y coeficiente de regresión **R^2 = 0,5376** para el análisis de la sección A**,** la ecuación se ajusta a la tendencia de la curva, pero se presenta moderada correlación debido a la alta densidad de datos dispersos. Para la sección B se obtuvo una correlación con ecuación de tipo lineal **y = 23,986x - 0,733** y **R^2 = 0,683.** Este coeficiente de regresión es mayor que el de la sección A debido a que se observa menos cantidad de datos, por lo tanto, menos dispersión.

De igual manera que para el gel 10 seg. la única nanopartícula que presentó tendencia representativa para el análisis de ambas secciones fue el sílice. Respecto a la sección A se obtuvo una ecuación de tipo lineal **y = 15,069x + 17,689** con **R^2 = 0,5986,** presentando un buen ajuste. Para la sección B se tuvo un comportamiento similar con una correlación de tipo lineal **y = 18,509x + 1,6917** y **R^2 = 0,4397.**

4.6. Filtrado API

La prueba consiste en determinar la velocidad a la cual un fluido pasa a través de un papel filtro bajo ciertas condiciones de tiempo, temperatura y presión especificadas en la norma API RP 13B. La prueba de filtrado API es realizada a temperatura superficial y a una presión de 100 psi, y los resultados se registran como número de mililitros perdidos en 30 minutos (MI-SWACO, 2001). El análisis de filtrado API se realizó mediante el estudio del comportamiento de la propiedad vs concentración de nanopartícula separándose en 2 grupos, en el primero (Sección A), todos los estudios correspondientes solamente al uso de viscosificante, agua y NP; en el segundo (Sección B), se graficaron aquellos estudios en los que aparte de los aditivos mencionados anteriormente, se tuvieran en cuenta aditivos controladores de filtrado en la formulación. En la figura 70 se muestra el comportamiento discretizado por nanopartícula para la sección A.

Figura 70.

Efecto de la concentración de NP en el filtrado API, sección A. Discretizado por nanopartícula.

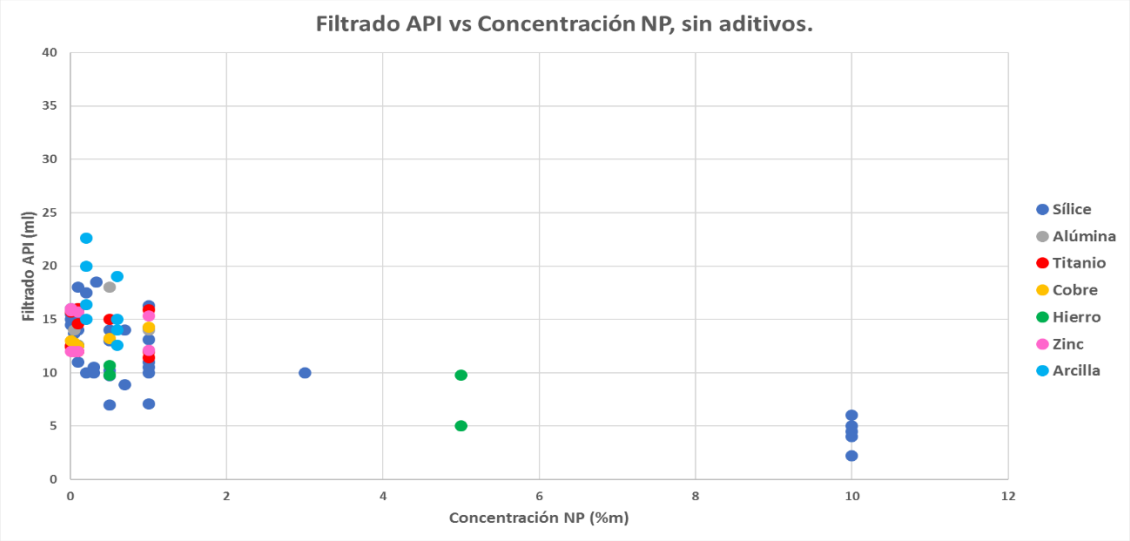
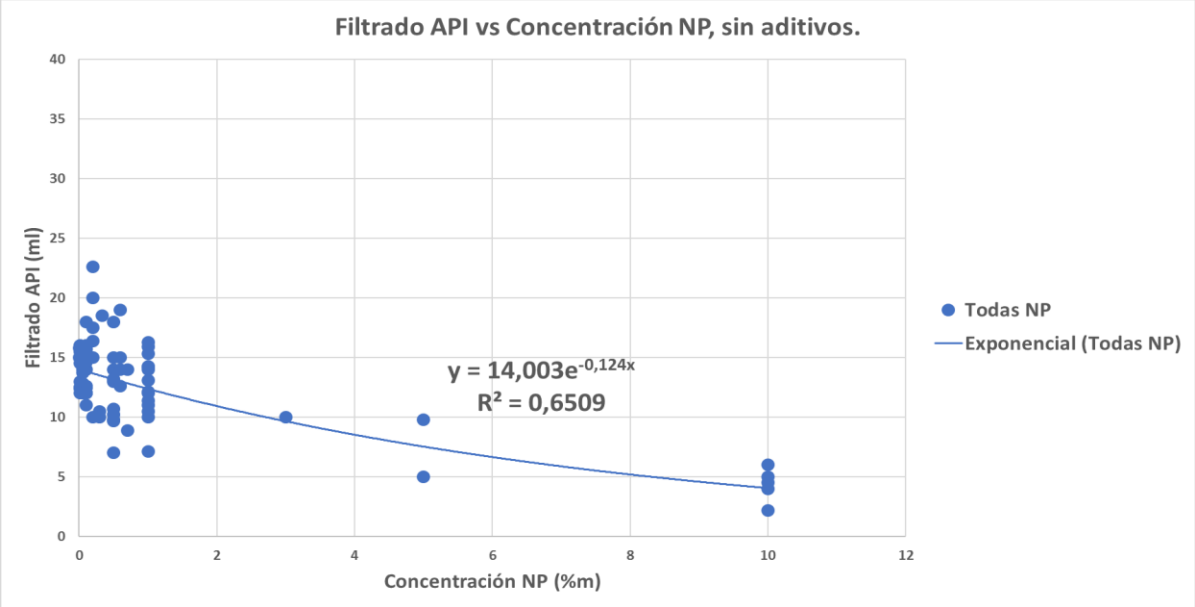


Figura 71.

Efecto de la concentración de NP en el filtrado API, sección A. Tendencia general.



En la figura 71 se evidencia una alta densidad de datos en el rango de concentración de nanopartícula 0 – 1 %m debido a que la gran mayoría de estudios utiliza este rango de concentración por disponibilidad del producto, alto costo y en la mayoría de los casos a

concentraciones bajas de NP se obtiene más reducción del volumen de filtrado (Bayat et al., 2018). Se obtuvo una correlación con ecuación de tipo exponencial $\mathbf{y = 14{,}003e^{-0{,}124x}}$ y un coeficiente de $\mathbf{R^2 = 0{,}6509}$, se presenta un buen ajuste de la ecuación a pesar de la dispersión de los datos. Con respecto al análisis de la sección B (Figuras 72 y 73) se obtuvo una relación de tipo exponencial $\mathbf{y = 11{,}841e^{-0{,}143x}}$ con un coeficiente de ajuste $\mathbf{R^2 = 0{,}4664}$. Este coeficiente es menor al de la sección A debido a que existe una dispersión de datos mayor por que presenta diferentes concentraciones de controlador de filtrado, además, algunas nanopartículas en combinación con aditivos comúnmente usados en la formulación de lodos aumentan o disminuyen el volumen de filtrado, ocasionando que al momento de buscar una tendencia que represente el comportamiento de los datos se presente mayor dispersión.

Figura 72.

Efecto de la concentración de NP en el filtrado API, sección B. Discretizado por nanopartícula.

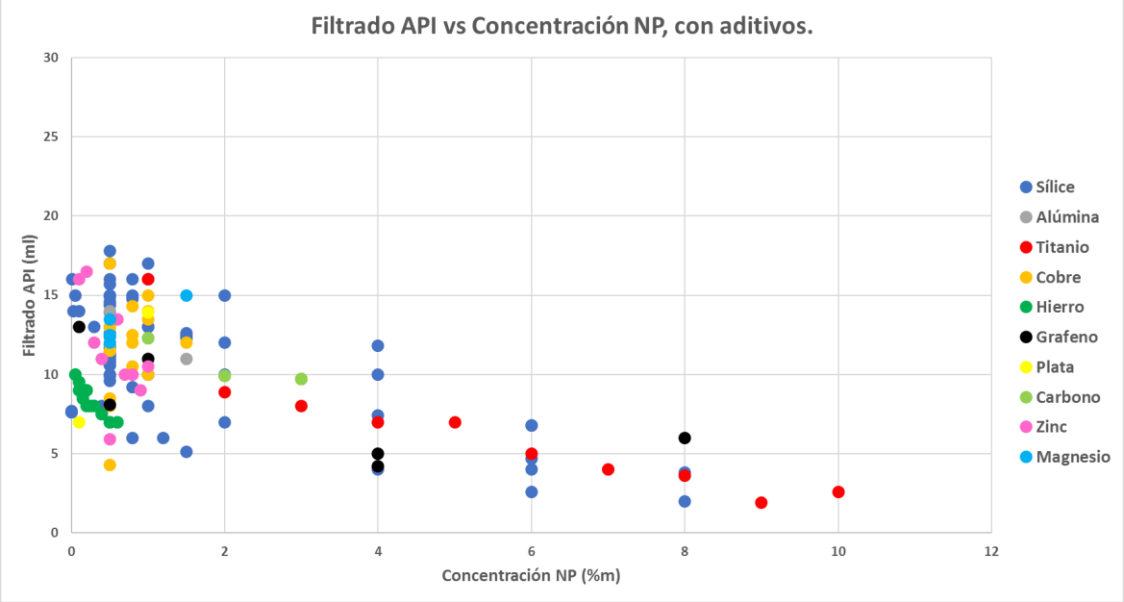
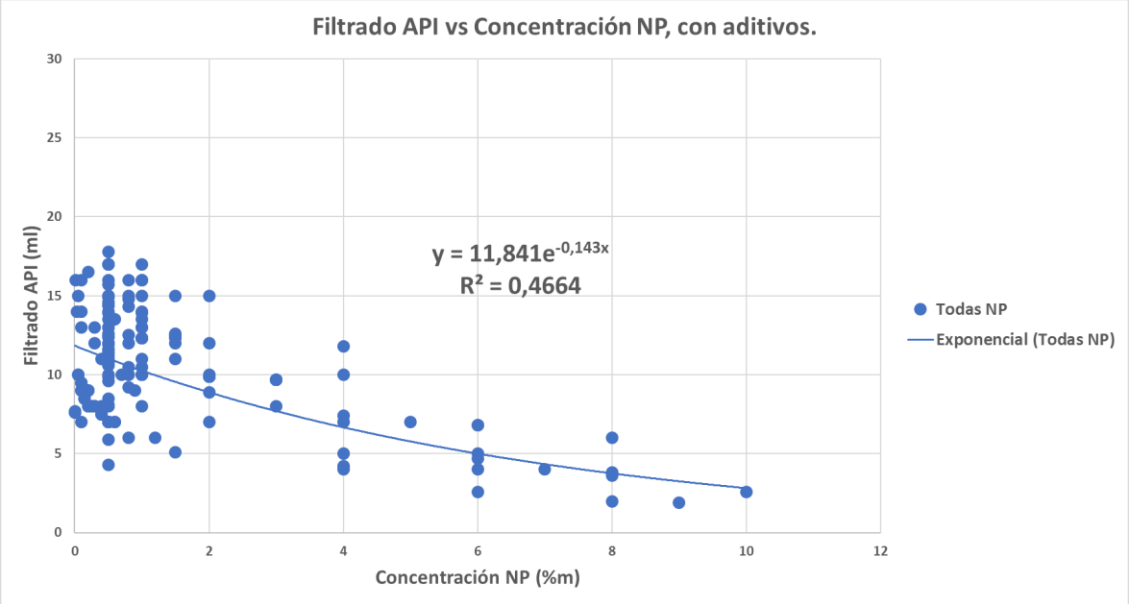


Figura 73.

Efecto de la concentración de NP en el filtrado API, sección B. Tendencia general.



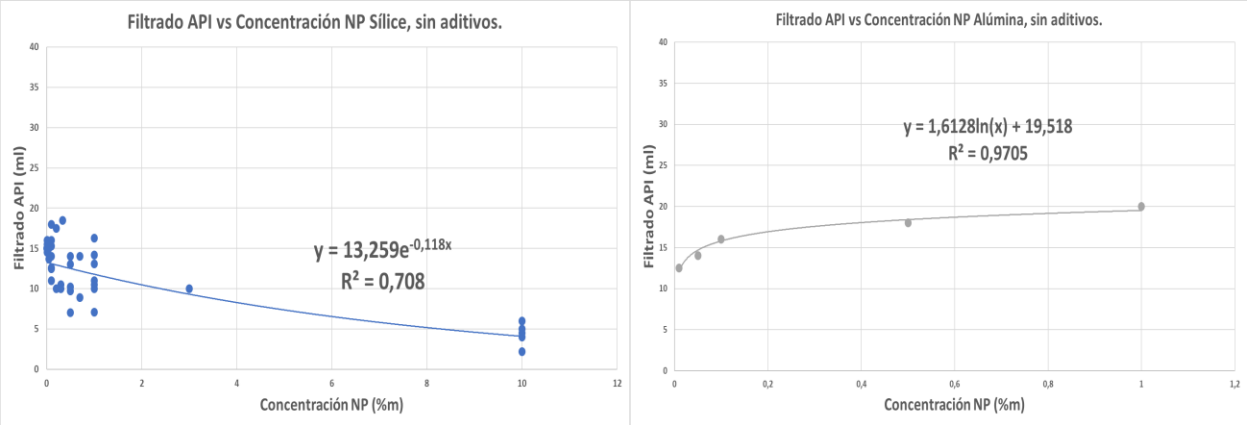
El comportamiento para ambas secciones es de disminución del filtrado API con el aumento de la concentración de NP, el volumen de filtrado promedio para la sección A es de 12,9 ml y para la sección B es 10,4 ml, aunque la diferencia es cercana se resalta el buen trabajo de las nanopartículas como controladores de filtrado, aun así, estas en combinación con otros aditivos especializados en controlar pérdidas de fluido hacia la formación presentan una mejora en los resultados. Cabe destacar que las concentraciones de los aditivos controladores de filtrado eran muy variables ocasionando algunos volúmenes de filtrado atípicos que afectan el ajuste y tendencia de la curva.

En el análisis individual por nanopartícula para la sección A se presentaron tendencias marcadas para el sílice y la alúmina. En la figura 74 se muestran los comportamientos.

Figura 74.

Efecto de la concentración de NP en el filtrado API, sección A para nanopartículas de (A) Sílice, (B) Alúmina.

A. B.



En las gráficas se puede apreciar una tendencia de disminución del filtrado API para el sílice y de aumento para la alúmina. Este comportamiento lo explica (Bayat et al., 2018) ya que en sus resultados obtuvieron aumento del 80% en el volumen de filtrado para concentraciones de alúmina inferiores al 1%m, según este autor, no es un tipo de nanopartícula recomendada para controlar el filtrado. Con respecto a las correlaciones se obtuvieron buenos ajustes para ambas tendencias, en la tabla 8 se muestran las correlaciones obtenidas.

Tabla 8.

Correlaciones filtrado API sección A.

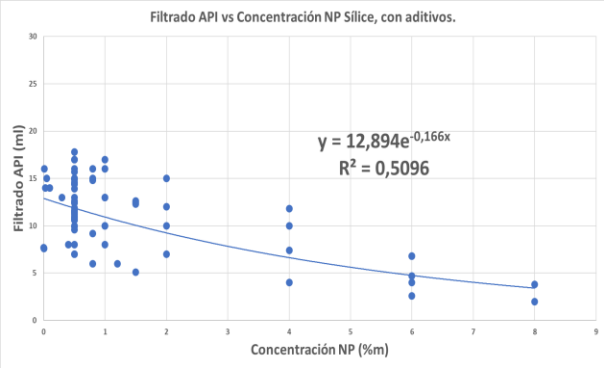
Nanopartícula	**Correlación**		
	Tipo	**Ecuación**	***R²***
Sílice	Exponencial	$y = 13{,}259e^{-0{,}118x}$	0,708
Alúmina	Logarítmica	y = 1,6128ln(x) + 19,518	0,9705

Para la sección B, el sílice, titanio, cobre, hierro, grafeno y zinc presentaron tendencias significativas. En la figura 75 se muestran los comportamientos.

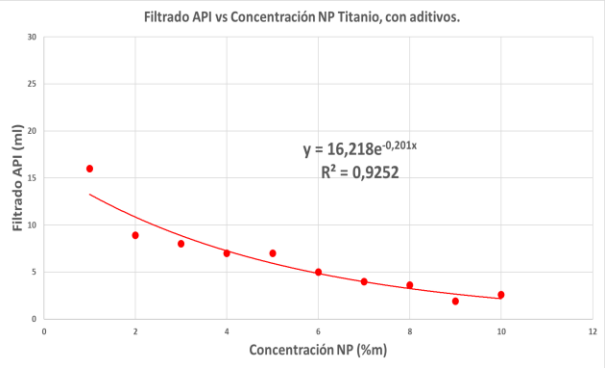
Figura 75.

Efecto de la concentración de NP en el filtrado API, sección B para nanopartículas de (A) Sílice, (B) Titanio, (C) Cobre, (D) Hierro, (E) Grafeno y (F) Zinc.

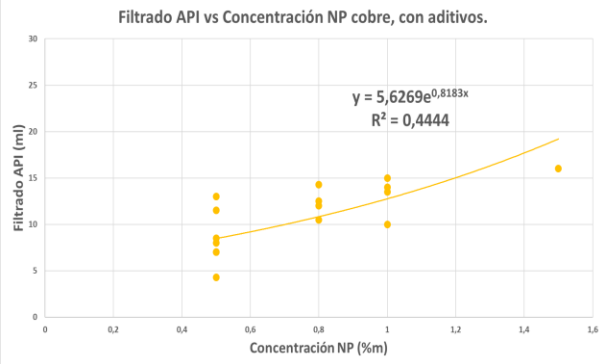
A.



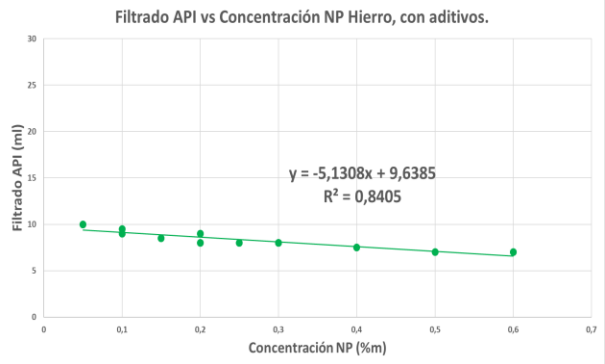
B.



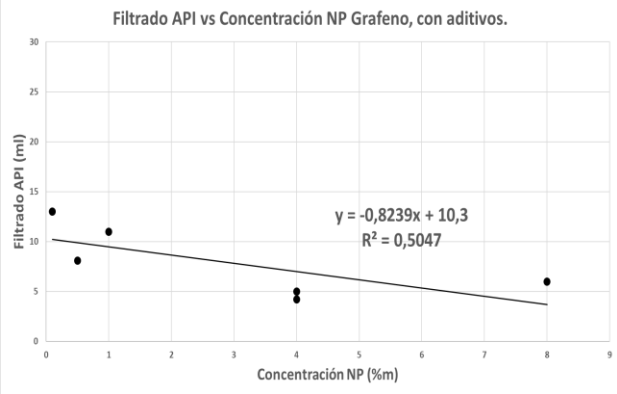
C.



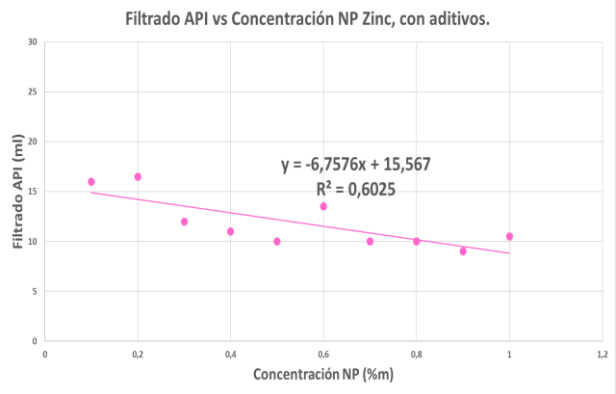
D.



E.



F.



En las gráficas se puede apreciar la tendencia de disminución del filtrado con el aumento de la concentración para las nanopartículas de sílice, titanio, hierro, grafeno y zinc, para el cobre se presentó un comportamiento de aumento de filtrado. Autores como (Srivatsa & Ziaja, 2011) utilizaron nanopartículas de sílice como agente controlador de filtrado y obtuvieron una disminución del 50%. La dispersión de datos que se evidencia en la figura 75C que corresponde al cobre, se debe a que algunos fluidos eran base poliamina y otros tenían bajas concentraciones de aditivos controladores de filtrado. En la tabla 9 se muestran las ecuaciones obtenidas.

Tabla 9.

Correlaciones nanopartículas filtrado API – Efecto concentración. Sección B.

Nanopartícula	Correlación		
	Tipo	**Ecuación**	R^2
Sílice	Exponencial	$y = 12{,}894e^{-0{,}166x}$	0,5096
Titanio	Exponencial	$y = 16{,}218e^{-0{,}201x}$	0,9252
Cobre	Exponencial	$y = 5{,}6269e^{0{,}8183x}$	0,4444
Hierro	Lineal	y = -5,1308x + 9,6385	0,8405
Grafeno	Lineal	y = -0,8239x + 10,3	0,5047
Zinc	Lineal	y = -6,7576x + 15,567	0,6025

El rango de volumen de filtrado en general se presenta entre 0 – 25 ml, los volúmenes altos de filtrado se deben a que en formulaciones utilizadas en lodos estudiados se usaban concentraciones bajas de controladores de filtrado, con el fin de probar el efecto de la nanopartícula como controlador, para algunos casos no se presentaban buenos resultados como el cobre y la alúmina.

4.7. Filtrado HPHT

La prueba de filtrado HPHT se realiza a condiciones específicas de presión y temperatura con el fin de simular de la mejor manera las condiciones a las que se someten el fluido de perforación en fondo de pozo. Para esta investigación se analizó el efecto de la presión y temperatura en el volumen de filtrado HPHT utilizando nanopartículas en la formulación del lodo.

Este análisis como para las anteriores propiedades se dividió en 2 partes, la primera se tuvo en cuenta los fluidos que poseían en su formulación material viscosificante, agua y NP (Sección A). Para el segundo análisis se tuvo en cuenta además de los anteriores aditivos otros como controladores de filtrado, polímeros, inhibidores, etc. (Sección B).

El comportamiento del filtrado a alta presión para la sección A se muestra en las figuras 76 y 77.

Figura 76.

Efecto de la presión en el filtrado HPHT discretizado por nanopartícula. Sección A.

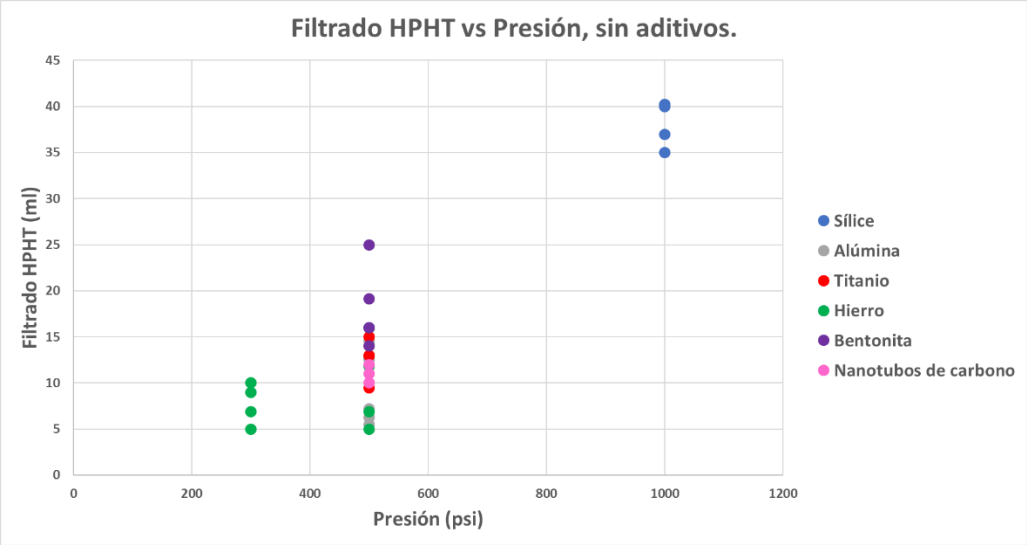
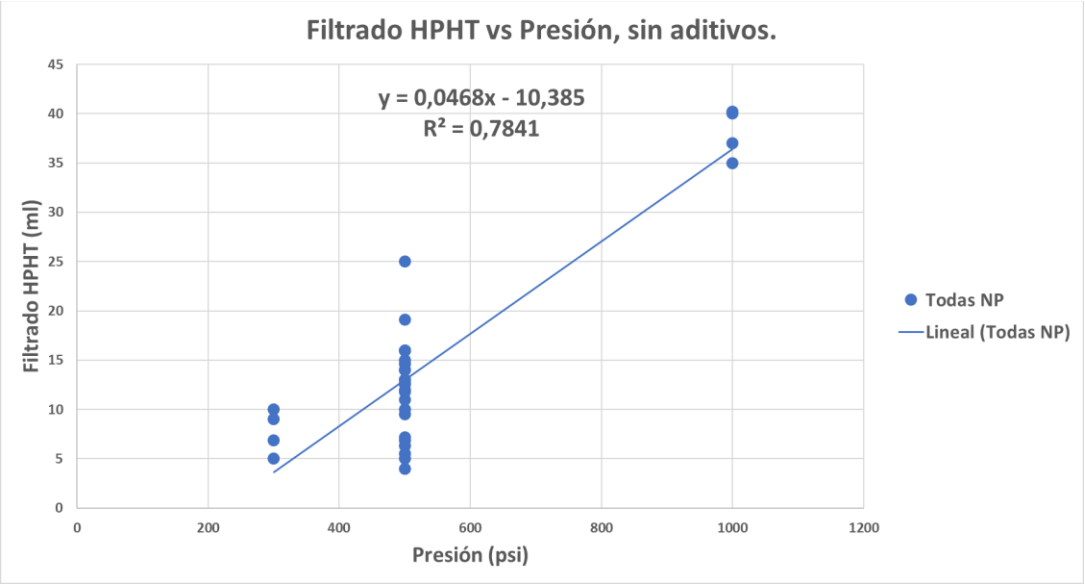


Figura 77.

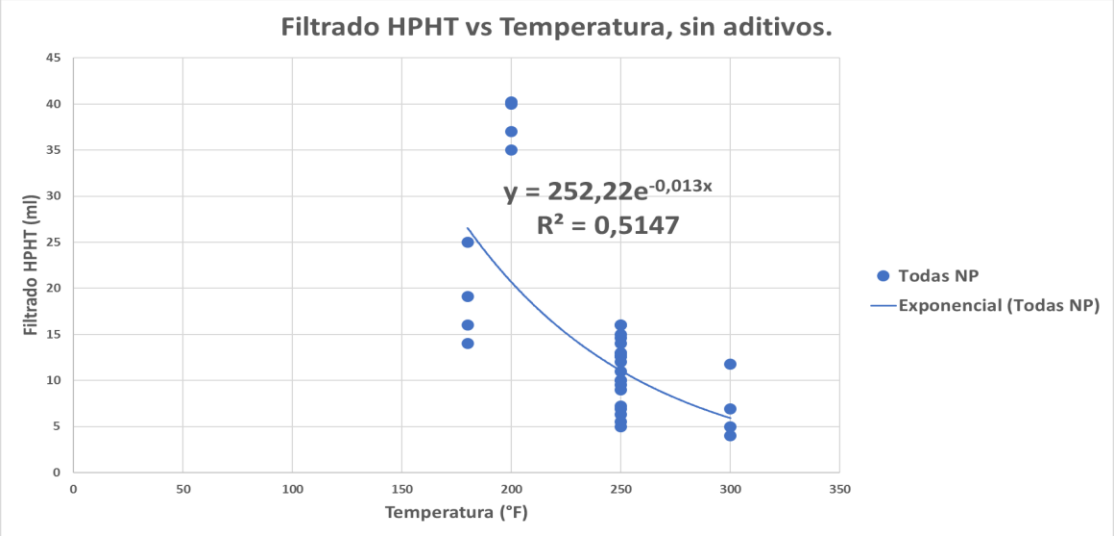
Efecto de la presión en el filtrado HPHT para la sección A. Tendencia general.



En la figura 77 se trazó una línea de tendencia para el comportamiento de la presión respecto al volumen de filtrado HPHT. Se evidencia un aumento del volumen de filtrado a medida que aumenta la presión, este comportamiento es esperado debido a que se ejerce un esfuerzo mayor al fluido forzándolo a salir hacia la formación. La relación que se obtuvo fue de tipo lineal, la cual es representada por la ecuación **y = 0,0468x - 10,385** con un coeficiente **R² = 0,7841.** La variabilidad de los datos es baja teniendo en cuenta que la prueba se hace a condiciones de presión específica, lo que ocasiona que los datos no tengan una continuidad en la tendencia de la curva. Para la sección B no se generó correlación debido a que la cantidad de datos era baja y no era representativo generar una tendencia. Para el análisis del efecto de la temperatura en la sección A se obtuvo el comportamiento que se ilustra en la figura 78.

Figura 78.

Efecto de la temperatura en el filtrado HPHT para la sección A. Tendencia general.



En las figuras 79 y 80 se ilustran los comportamientos para la sección B.

Figura 79.

Efecto de la temperatura en el filtrado HPHT para la sección B. Discretizado por nanopartícula.

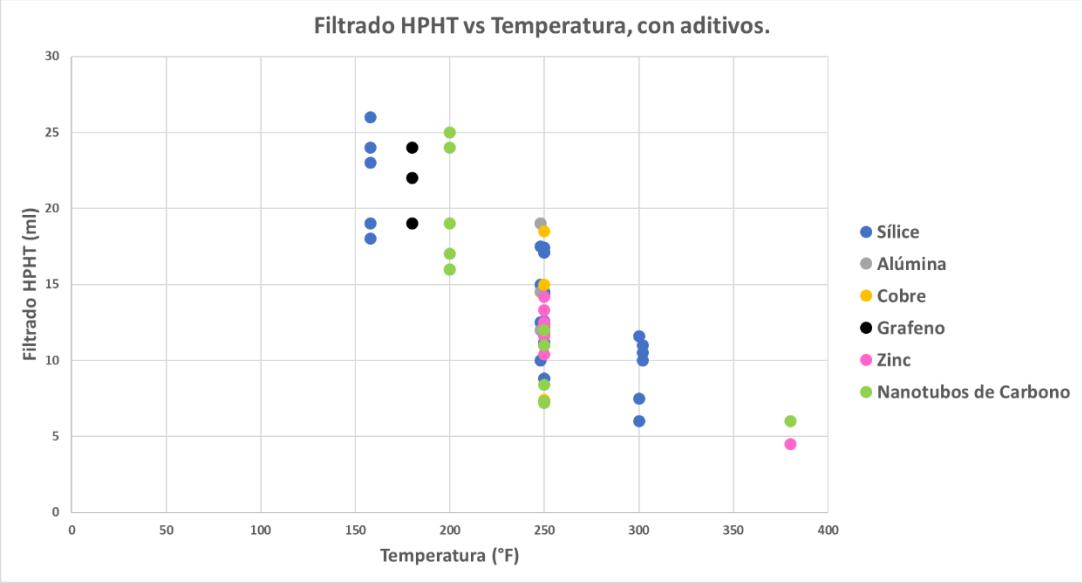
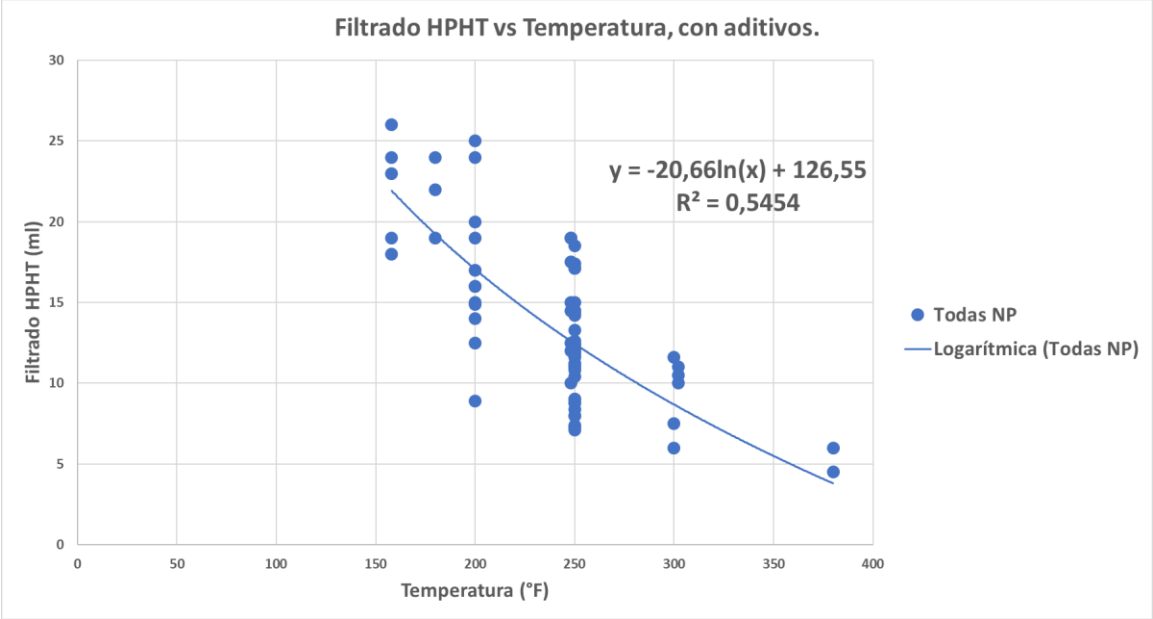


Figura 80.

Efecto de la temperatura en el filtrado HPHT para la sección B. Tendencia general.



Para la temperatura se presenta un comportamiento inverso al de la presión, a mayor temperatura el volumen de filtrado disminuye, esto se produce debido a que a temperaturas altas los fluidos pierden estabilidad ocasionando que sus fases tiendan a separarse, en las figuras 78 y 80 se pueden apreciar volúmenes de filtrado altos cuando inicia el aumento de la temperatura (200 °F), al llegar a temperaturas más altas, el fluido ya ha filtrado la fase acuosa previamente y da la sensación de disminución de filtrado. Según (Gbadamosi et al., 2019) a mayor temperatura el fluido de perforación base bentonita tiende a degradarse y el filtrado debe ser controlado por un aditivo apropiado para prevenir altas perdidas de fluido hacia la formación, esto significa que a mayor temperatura se obtiene mayor pérdida de filtrado en comparación con el filtrado API.

Se obtuvo una correlación con ecuación de tipo exponencial $\mathbf{y = 252{,}22e^{-0{,}013x}}$ y $\mathbf{R^2 = 0{,}5147}$ para la sección A. Para la sección B se obtuvo una correlación de tipo logarítmica **y = -20,66ln(x) + 126,55** y un $\mathbf{R^2 = 0{,}5454.}$ Ambas relaciones son moderadas debido a la alta dispersión de los datos ya que la prueba se hace a condiciones específicas.

5. Conclusiones

En general, el uso de nanopartículas en fluidos de perforación mejora la estabilidad del fluido a altas temperaturas, ocasionando una significativa mejora a las propiedades reológicas, en cuanto al volumen de filtrado, disminuye significativamente debido a que actúan como agentes controladores de filtrado.

Se diseñó una base de datos en la cual se incluyeron 76 estudios respecto al uso de nanopartículas en fluidos de perforación de los cuales, el 38,16% corresponden a estudios de la nanopartícula sílice y la segunda más usada es el hierro, además, la base de datos se dispone para una futura retroalimentación con nuevos estudios.

De acuerdo con los estudios analizados, la concentración de nanopartícula que se utiliza para la formulación de fluidos de perforación se encuentra en el rango de uso de 0 – 1%m, siendo este rango el que mejor resultados arroja respecto a las propiedades reológicas y volumen de filtrado.

Se generaron correlaciones del efecto de la temperatura y concentración de nanopartícula en las diferentes propiedades reológicas y volumen de filtrado, de la cuales se obtuvieron tres tipos de tendencias; lineal, exponencial y logarítmica. Además, para el análisis del efecto de la temperatura se encontró una gran cantidad de datos a 77°F debido a que muchas pruebas de laboratorio fueron realizadas a temperatura ambiente.

Los coeficientes de regresión (R^2) para las propiedades reológicas y volumen de filtrado API y HPHT se encuentran en el rango de 0,4 - 0,9, tanto para el efecto de la temperatura como para el efecto de la concentración, esto debido a la alta dispersión de datos, sin embargo, ningún dato fue omitido para tener presente todos los posibles escenarios relacionados con el efecto de las

nanopartículas, aun así, en la totalidad de las gráficas se observa la tendencia del efecto de aumento o disminución de la propiedad analizada.

6. Recomendaciones

Se recomienda mantener la base de datos en constante actualización para estar al tanto de nuevos estudios, pruebas y tipos de nanopartículas que permitan el estudio de las propiedades reológicas y volumen de filtrado, para que de esta manera se pueda tener la posibilidad de realizar consultas con una amplia gama de información y generar correlaciones con mayor grado de confiabilidad.

Para las nubes de datos que se generan debido a la alta dispersión, se recomienda analizar a detalle las condiciones bajo las cuales se hicieron las pruebas, para verificar si se puede establecer más de una tendencia.

Se sugiere continuar el análisis realizando filtros individuales por cada uno de los aditivos, con el fin de analizar la afectación que tienen cada uno de estos junto con las nanopartículas en las propiedades reológicas y volumen de filtrado.

Bibliografía

Abdo, J., & Haneef, M. D. (2013). Clay nanoparticles modified drilling fluids for drilling of deep hydrocarbon wells. *Applied Clay Science*, *86*, 76–82. https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.10.017

Abdou, M. I., Al-sabagh, A. M., & Dardir, M. M. (2013). Evaluation of Egyptian bentonite and nano-bentonite as drilling mud. *Egyptian Journal of Petroleum*, *22*(1), 53–59. https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2012.07.002

Aftab, A., Ismail, A. R., Khokhar, S., & Ibupoto, Z. H. (2016). Novel zinc oxide nanoparticles deposited acrylamide composite used for enhancing the performance of water-based drilling fluids at elevated temperature conditions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, *146*, 1142–1157. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.08.014

Al-Saba, M. T., Al Fadhli, A., Marafi, A., Hussain, A., Bander, F., & Al Dushaishi, M. F. (2018). Application of nanoparticles in improving rheological properties of water based drilling fluids. *Society of Petroleum Engineers - SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition 2018, SATS 2018*, 1–10. https://doi.org/10.2118/192239-ms

Al-Yasiri, M., Awad, A., Pervaiz, S., & Wen, D. (2019). Influence of silica nanoparticles on the functionality of water-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, *179*, 504–512. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.04.081

Amanullah, M., Al-Arfaj, M. K., & Al-Abdullatif, Z. (2011). Preliminary test results of nano-based drilling fluids for oil and gas field application. *SPE/IADC Drilling Conference, Proceedings*, *1*(1965), 112–120. https://doi.org/10.2118/139534-ms

Amarfio E. M., & Abdulkadir M. (2015). Effect of Fe4O3 Nanoparticles on the Rheological Properties of Water Based Mud. *Journal of Physical Science and Application*, *5*(6).

https://doi.org/10.17265/2159-5348/2015.06.005

Bayat, A. E., Jalalat Moghanloo, P., Piroozian, A., & Rafati, R. (2018). Experimental investigation of rheological and filtration properties of water-based drilling fluids in presence of various nanoparticles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *555*, 256–263. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.07.001

Bayat, A. E., & Shams, R. (2019). Appraising the impacts of SiO2, ZnO and TiO2 nanoparticles on rheological properties and shale inhibition of water-based drilling muds. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *581*(June), 123792. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123792

Betancur Márquez, S., Cortés Correa, F. B., & Alzate Espinosa, G. A. (2014). Mejoramiento De Los Fluidos De Perforación Usando Nanopartículas Funcionalizadas: Reducción De Las Pérdidas De Filtrado Y Del Espesor De La Retorta. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, *35*, 5–14. https://doi.org/10.15446/rbct.n35.43179

Boyou, N. V., Ismail, I., Wan Sulaiman, W. R., Sharifi Haddad, A., Husein, N., Hui, H. T., & Nadaraja, K. (2019). Experimental investigation of hole cleaning in directional drilling by using nano-enhanced water-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, *176*(July 2018), 220–231. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.01.063

Calderon, A. M. G. C. Fa. I. M. (2017). *Evaluación Tecnica de un fluido de perforación base agua utilizando como aditivo nano-particulas de óxido de grafeno a escala de laboratorio para la inhibición de lutitas en los Campos Castilla y Chichimene de ECOPETROL S.A.*

Cheraghian, G., Hemmati, M., Masihi, M., & Bazgir, S. (2013). An experimental investigation of the enhanced oil recovery and improved performance of drilling fluids using titanium dioxide and fumed silica nanoparticles. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, *3*(1), 1–9.

https://doi.org/10.1186/2193-8865-3-78

Cheraghian, G., Wu, Q., Mostofi, M., Li, M. C., Afrand, M., & Sangwai, J. S. (2018). Effect of a novel clay/silica nanocomposite on water-based drilling fluids: Improvements in rheological and filtration properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *555*, 339–350. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.06.072

Constante, M., & Paez, K. (2017). *Estudio de factibilidad técnica del uso de aceite transesterificado de ricino (Ricinus Communis) como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa* (Issue 3). https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Contreras, O., Hareland, G., Husein, M., Nygaard, R., & Alsaba, M. (2014). Application of in-house prepared nanoparticles as filtration control additive to reduce formation damage. *SPE - European Formation Damage Conference, Proceedings, EFDC*, *1*, 34–44. https://doi.org/10.2118/168116-ms

Corcuera, P. (2013). Hojas de cálculo, Excel básico. *Dpto. Matemática Aplicada y Ciencias de La Computación Universidad de Cantabria*.

Cruz Santiago, J. francisco. (2013). *Nanotecnología Aplicada a la Industria Petrolera*. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

Fakoya, M. F., & Shah, S. N. (2013). Rheological properties of surfactant-based and polymeric nano-fluids. *Society of Petroleum Engineers - Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition 2013*, *March*, 321–337. https://doi.org/10.2118/163921-ms

Flores, A. V. (2017). *Mejoramiento del Lodo de Perforación Base Agua con la Adición de Nanopartículas para Optimizar las Propiedades de la Retorta y Minimizar el Daño de Formación*.

Garcia, A. M., & Manjarres, F. I. (2017). *Evaluación técnica de un fluido de perforación base*

agua utilizando como aditivo nano-partículas de óxido de grafeno a escala de laboratorio para la inhibición de lutitas en los campos castilla y chichimene de ecopetrol s.a. *7*(1), 45–56.

Gbadamosi, A. O., Junin, R., Abdalla, Y., Agi, A., & Oseh, J. O. (2019). Experimental investigation of the effects of silica nanoparticle on hole cleaning efficiency of water-based drilling mud. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, *172*, 1226–1234. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.09.097

Ghasemi, N., Mirzaee, M., Aghayari, R., & Maddah, H. (2018). Investigating Created Properties of Nanoparticles Based Drilling Mud. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, *54*(5), 1381–1393. https://doi.org/10.1007/s00231-017-2229-7

Hamad, B. A., Xu, M., & Liu, W. (2019). Performance of environmentally friendly silica nanoparticles-enhanced drilling mud from sugarcane bagasse. *Particulate Science and Technology*, *6351*. https://doi.org/10.1080/02726351.2019.1675835

Hernandez, M. M. P., & Manrique, A. O. (2018). Formulación de un fluido de perforación de alto rendimiento polimérico en base agua para el bloque cpo-05 de la cuenca de los llanos orientales. In □□□□□□*:* *Vol.* □□□□ □ (Issue 4). https://www.jstage.jst.go.jp/article/amr/1/5/1_010501/_article/-char/ja/%0Ahttp://www.ghbook.ir/index.php?name=های رسانه و فرهنگ نوین&option=com_dbook&task=readonline&book_id=13650&page=73&chkhashk=ED9C9491B4&Itemid=218&lang=fa&tmpl=component%0Ahttp://dx.

Hoelscher, K. P., De Stefano, G., Riley, M., & Young, S. (2012). Application of nanotechnology in drilling fluids. *Society of Petroleum Engineers - SPE International Oilfield Nanotechnology Conference 2012*, *June*, 297–303. https://doi.org/10.2118/157031-ms

Hoelscher, K. P., Young, S., Friedheim, J., & De Stefano, G. (2013). Nanotechnology application in drilling fluids. *Offshore Mediterranean Conference and Exhibition 2013, OMC 2013*, 1–11.

Husin, H., Elraies, K. A., Choi, H. J., & Aman, Z. (2018). Influence of graphene nanoplatelet and silver nanoparticle on the rheological properties of water-based mud. *Applied Sciences (Switzerland)*, *8*(8). https://doi.org/10.3390/app8081386

Ismail, A. R. (2014). Improve performance of water-based drilling fluids. *Sriwijaya International Seminar on Energy-Environmental Science and Technology*, *1*(1), 43–47.

Ismail, A. R., Rashid, N. M., Jaafar, M. Z., Sulaiman, W. R. W., & Buang, N. A. (2014). Effect of Nanomaterial on the Rheology of Drilling Fluids. *Journal of Applied Sciences*, *14*(11), 1192–1197. https://doi.org/10.3923/jas.2014.1192.1197

Ismail, A. R., Wan Sulaiman, W. R., Jaafar, M. Z., Ismail, I., & Sabu Hera, E. (2016). Nanoparticles performance as fluid loss additives in water based drilling fluids. *Materials Science Forum*, *864*, 189–193. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.864.189

Javeri, S. M., Haindade, Z. W., & Jere, C. B. (2011). Mitigating loss circulation and differential sticking problems using silicon nanoparticles. *Proceedings of the SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*, 136–139. https://doi.org/10.2118/145840-ms

Ji, L., Guo, Q., Friedheim, J., Swaco, M., Zhang, R., Chenevert, M., & Sharma, M. (2012). Drilling Unconventional Shales with Innovative Water-Based Mud – Part I : Evaluation of Nanoparticles as a Physical Shale Inhibitor. *Conference Paper - American Association of Drilling Engineers*.

Jung, Y., Barry, M., Lee, J., Tran, P., Soong, Y., Martello, D., & Chyu, M. (2011). Effect of

nanoparticle-additives on the rheological properties of clay-based fluids at hig temperature and high pressure. *Conference Paper - American Association of Drilling Engineers*, *v*, 1–4.

Katende, A., Boyou, N. V., Ismail, I., Chung, D. Z., Sagala, F., Hussein, N., & Ismail, M. S. (2019). Improving the performance of oil based mud and water based mud in a high temperature hole using nanosilica nanoparticles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *577*(June), 645–673. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.05.088

Keshavarz Moraveji, M., Ghaffarkhah, A., Agin, F., Talebkeikhah, M., Jahanshahi, A., Kalantar, A., Amirhosseini, S. F., Karimifard, M., Mortazavipour, S. I., Sehat, A. A., & Arjmand, M. (2020). Application of amorphous silica nanoparticles in improving the rheological properties, filtration and shale stability of glycol-based drilling fluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *115*. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104625

Khan, M. A., Al-Salim, H. S., & Arsanjani, L. N. (2018). Development of high temperature pressure (HTHP) water based drilling mud using synthetic polymers, and nanoparticles. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, *47*(1), 172–182.

Kök, M. V., & Bal, B. (2019). Effects of silica nanoparticles on the performance of water-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, *180*(May), 605–614. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.05.069

Kong, X., & Ohadi, M. M. (2010). Applications of micro and nano technologies in the oil and gas industry-an overview of the recent progress. *Society of Petroleum Engineers - 14th Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference 2010, ADIPEC 2010*, *3*, 1703–1713.

Laguna, A. C. (2019). 4. Correlación y Regresión lineal. *Diplomado IACS Correlación y Regresión Lineal*, *4*, 1–18.

López, N., & Vielma, J. (2019). Using Microsoft Excel Macros To Analyze Planar Structures . *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, *24*, 123–139.

Mahmoud, O., Nasr-El-Din, H. A., Vryzas, Z., & Kelessidis, V. C. (2016). Nanoparticle-based drilling fluids for minimizing formation damage in HP/HT applications. *SPE International Formation Damage Control Symposium Proceedings*, *2016-Janua*. https://doi.org/10.2118/178949-ms

Maritza, L., & Quiceno, V. (2019). *Efecto de la distribución del tamaño de partículas a escala nanométrica en los fluidos de perforación base agua : Reducción del filtrado y espesor del revoque*.

Medhi, S., Chowdhury, S., Gupta, D. K., & Mazumdar, A. (2020). An investigation on the effects of silica and copper oxide nanoparticles on rheological and fluid loss property of drilling fluids. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, *10*(1), 91–101. https://doi.org/10.1007/s13202-019-0721-y

MI-SWACO. (2001). *Manual de fluidos de perforación.* 792.

Microsoft. (n.d.). *Usar las Herramientas para análisis para realizar análisis de datos complejos*.

Mohammed, A. S. (2017). Effect of temperature on the rheological properties with shear stress limit of iron oxide nanoparticle modified bentonite drilling muds. *Egyptian Journal of Petroleum*, *26*(3), 791–802. https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2016.10.018

Nasser, J., Jesil, A., Mohiuddin, T., Ruqeshi, M. Al, Devi, G., & Mohataram, S. (2013). Experimental Investigation of Drilling Fluid Performance as Nanoparticles. *World Journal of Nano Science and Engineering*, *03*(03), 57–61. https://doi.org/10.4236/wjnse.2013.33008

Nevado, M. V. (2010). *Introducción a las bases de datos relacionales* (V. Libros (ed.)).

Ojeda, L. (2019). *La nanotecnología, el gran aliado de la industria del petróleo y el gas*. El Diario

Digital El Periódico de La Energía de Origen Español, Es Una Página Web de Información Especializada En El Sector de La Energía. https://elperiodicodelaenergia.com/la-nanotecnologia-el-gran-aliado-de-la-industria-del-petroleo-y-el-gas/

Oseh, J. O., Mohd Norddin, M. N. A., Ismail, I., Gbadamosi, A. O., Agi, A., & Ismail, A. R. (2020). Experimental investigation of cuttings transportation in deviated and horizontal wellbores using polypropylene–nanosilica composite drilling mud. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, *189*(July 2019), 106958. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.106958

PDVSA. (2002). *Manual de fluidos de perforación*. *I*, 285.

Pérez, L. O. (2006). Microsoft Excel: una herramienta para la investigación. *MediSur*, *4*(3), 68–71.

Perween, S., Thakur, N. K., Beg, M., Sharma, S., & Ranjan, A. (2019). Enhancing the properties of water based drilling fluid using bismuth ferrite nanoparticles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *561*, 165–177. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.10.060

Prieto, K. M. (2017). *Evaluación de la viabilidad técnico- financiera de las nanopartículas de sílice como aditivo para el control del filtrado en el fluido de perforación base agua a nivel laboratorio* (Vol. 7, Issue 1).

Ramos, L. E. S. R. y M. A. V. (2013). Evaluación Técnica a Escala Laboratorio de un fluido de perforación base agua utilizando nano-particulas de LM-200 para la inhibición de lutitas en el Campo Castilla de ECOPETROL S.A. *Journal of Chemical Information and Modeling*, *01*(01), 1689–1699.

Riley, M., Stamatakis, E., Young, S., Hoelscher, K. P., Stefano, G. De, & Swaco, M. (2012).

Drilling Unconventional Shale with Innovative Water-Based Mud – Part II : Mud Formulations and Performance. 1–5.

Roger I. Tanner. (1992). *Engineering Rheology* (P. book : English (ed.); Oxford Eng). Oxford : Clarendon Press, 1992.

Rozo, P. R. (2020). *Evaluación del efecto de las nano- partículas de alúmina y sílice presentes en el filtrado del lodo para la inhibición de finos y la preservación de la humectabilidad al agua en un campo de los Llanos Orientales.*

S Al Ruqeishi, M. (2018). Nanoparticles as Drilling Fluids Rheological Properties Modifiers. *Progress in Petrochemical Science*, *1*(5), 1–7. https://doi.org/10.31031/pps.2018.01.000521

Sadeghalvaad, M., & Sabbaghi, S. (2015). The effect of the TiO2/polyacrylamide nanocomposite on water-based drilling fluid properties. *Powder Technology*, *272*, 113–119. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.11.032

Salih, A. H., Elshehabi, T. A., & Bilgesu, H. I. (2016). Impact of nanomaterials on the rheological and filtration properties of water-based drilling fluids. *SPE Eastern Regional Meeting*, *2016-Janua*. https://doi.org/10.2118/184067-MS

Sharma, M. M., Zhang, R., Chenevert, M. E., Ji, L., Guo, Q., & Friedheim, J. (2012). A new family of nanoparticle based drilling fluids. *Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, *5*, 4095–4107. https://doi.org/10.2118/160045-ms

Smith, S. R., Rafati, R., Sharifi Haddad, A., Cooper, A., & Hamidi, H. (2018). Application of aluminium oxide nanoparticles to enhance rheological and filtration properties of water based muds at HPHT conditions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *537*, 361–371. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.10.050

Soboori, R., Sabbaghi, S., Mowla, D., & Soltani, A. (2012). Decreasing of Water Loss and Mud

Cake Thickness by CMC Nanoparticles in Mud Drilling. *Int. J.Nano Dimens*, *3*(2), 101–104. http://www.ijnd.ir/article_3647_761.html

Srivatsa, J. T., & Ziaja, M. B. (2011). An experimental investigation on use of nanoparticles as fluid loss additives in a surfactant - polymer based drilling fluid. *International Petroleum Technology Conference 2011, IPTC 2011*.

St, E., & Sha, M. (2012). Novel Water-base Mud for Shale Ga as , Part II I : Mud Fo ormulatio ons and Performances. *SPE, Society y of Petroleum Engine Eers*, *2*, 7.

Vipulanandan, C., Mohammed, A., & Samuel, R. G. (2017). Smart bentonite drilling muds modified with iron oxide nanoparticles & characterized based on the electrical resistivity & rheological properties with varying magnetic field strengths & temperatures. *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*, *5*, 3613–3630. https://doi.org/10.4043/27626-ms

Vipulanandan, Cumaraswamy, Mohammed, A., Dighe, S., & Hughes, B. (2016). *Nanoclay Modified Drilling Muds for HPHT Applications*. *Krishnamoorti 2006*.

Vryzas, Z., & Kelessidis, V. C. (2017). Nano-based drilling fluids: A review. *Energies*, *10*(4). https://doi.org/10.3390/en10040540

Wladimir, A., & Bola, F. (2017). *Mejoramiento del lodo de perforación Base Agua con la Adición de Nanopartículas para Optimizar las Propiedades de la Retorta y Minimizar el Daño de Formación*.

Zakaria, M. F., Husein, M., & Hareland, G. (2012). Novel nanoparticle-based drilling fluid with improved characteristics. *Society of Petroleum Engineers - SPE International Oilfield Nanotechnology Conference 2012, 2009*, 232–237. https://doi.org/10.2118/1112-0100-jpt

Apéndices

Apéndice A. Clasificación de estudios por tipo de nanopartícula.

Tabla A1.
Clasificación de estudios referentes a lodos de perforación con nanopartículas de sílice en su formulación.

Nombre del artículo	Año	Autor(es)	Tipo de nanopartícula	Breve descripción	Datos de filtrado	Datos de reología
Mejoramiento de los fluidos de perforación usando nanopartículas funcionalizadas: educción de las pérdidas de filtrado y del espesor de la retorta.	2014	Stefanía Betancur Márquez	Sílice	Mejorar fluidos de perforación, mediante el uso de nanopartículas funcionalizadas a diferentes concentraciones para la reducción de pérdidas de filtrado y la retorta .(Betancur Márquez et al., 2014)	si	si
Mejoramiento del Lodo de Perforación Base Agua con la Adición de Nanopartículas para Optimizar las Propiedades de la Retorta y Minimizar el Daño de Formación	2017	Alejandro Wladimir Flores Bolaños	Sílice	Adición de nanopartículas sintetizadas al lodo de perforación para mejorar el retorno, disminuir el daño a la formación y el espesor de la retorta.(Wladimir & Bola, 2017)	si	si
A New Family of Nanoparticle Based Drilling Fluids	2012	Mukul M. Sharma R. Zhang M.E Chenevert L. Ji Q. Guo J. Friedheim	Sílice	Fluidos de perforación a base de agua con nanopartículas, para evaluar la interacción con formaciones de lutitas. Se demostró que se reduce el flujo de agua hacia la formación de	si	si

				esquistos considerablemente. (Sharma et al., 2012).		
Experimental investigation of hole cleaning in directional drilling by using nano-enhanced water-based drilling fluids	2019	Natalie Vanessa Boyou, Issham Ismail, Wan Rosli Wan Sulaiman, Amin Sharifi Haddad, et al.	Sílice	Diseño de un fluido de perforación con propiedades reológicas mejoradas para solucionar el transporte y limpieza del hueco del pozo direccional. (Boyou et al., 2019).	no	si
Experimental investigation of cuttings transportation in deviated and horizontal wellbores using polypropylene–nanosilica composite drilling mud	2020	Jeffrey O. Oseh, M.N.A. Mohd Norddin, Issham Ismail, Afeez O. Gbadamosi, Augustine Agi, Abdul R. Ismail	Sílice	Aplicación de Np con base WBM (polipropileno - SiO_2) muestra resultados prometedores en un proceso de transporte de recortes. En presencia poliacrilamida parcialmente hidrolizada (PHPA) no obtiene resultados favorables. (Oseh et al., 2020)	si	si
Experimental investigation of the effects of silica nanoparticle on hole cleaning efficiency of water-based drilling mud	2018	Afeez O. Gbadamosi, Radzuan Junin, Yassir Abdalla, Augustine Agi, Jeffrey O. Oseh	Sílice	Variación de concentración de nano sílice para mejorar la viscosidad y circulación de los lodos en una operación de perforación eficiente.(Gbadamosi et al., 2019)	si	si
Experimental investigation of rheological and filtration properties of waterbased drilling fluids in presence of various nanoparticles	2018	Ali Esfandyari Bayata, Peyman Jalalat Moghanloo, Ali Piroozian, Roozbeh Rafati	Sílice	Mejoraron el desempeño de una Bentonita-WBM mediante la adición de Np hidrófilas (Al_2O_3, TiO_2, SiO_2, y CuO). Concluyen que la adición de NP en concentración por debajo del 0.5%m/m tiene potencial para	si	si

				mejorar la reología y filtrado. (Bayat et al, 2018)		
Application of aluminium oxide nanoparticles to enhance rheological and filtration properties of water based muds at HPHT conditions.	2018	Sean Robert Smith, Roozbeh Rafati, Amin Sharifi Haddad, Ashleigh Cooper, Hossein Hamidia.	Sílice	Analizan el desempeño de la perforación a base de agua de fluidos que fueron formulados con dos tipos de nano materiales (óxido de aluminio y sílice) en condiciones de alta y baja presión y temperatura. (Smith et al., 2018)	si	si
An experimental investigation of the enhanced oil recovery and improved performance of drilling fluids using titanium dioxide and fumed silica nanoparticles.	2013	Goshtasp Cheraghian, Mahmood Hemmati*, Mohsen Masihi and Saeed Bazgir	Sílice	Experimentan la inyección de dos NP disueltas en agua en un entorno simulado y también se ha investigado el efecto de estas nanopartículas en el fluido típico de perforación a base de agua. Aumenta la recuperación de aceite.(Cheraghian et al., 2013)	no	si
Effect of a novel clay/silica nanocomposite on water-based drilling fluids: Improvements in rheological and filtration properties	2018	Goshtasp Cheraghiana, Qinglin Wu, Masood Mostofi, Mei-Chun Li, Jitendra S.Sangwai, et al.	Sílice	Sintetizan nano compuesto de arcilla / SiO_2 (por método hidrotermal efectivo) y realizan una serie de experimentos para evaluar el efecto de SiO_2 y nanopartículas de arcilla en la reología y propiedades de filtración de la perforación (WBM) (Cheraghian et al., 2018)	si	si

Drilling Unconventional Shales with Innovative Water-Based Mud – Part I: Evaluation of Nanoparticles as a Physical Shale Inhibitor	2012	Lujun Ji, Quan Guo and Jim Friedheim, M-I SWACO; Rui Zhang*, Martin Chenevert and Mukul Sharma.	Sílice	Se centra en la técnica y los resultados de rendimiento de las nanopartículas como inhibidor físico de la lutita al taponar los poros y las microgrietas en la lutita y prevenir la invasión de agua en la lutita. .(Ji et al., 2012)	si	si
Drilling Unconventional Shale with Innovative Water-Based Mud – Part II: Mud Formulations and Performance.	2012	Meghan Riley, Emanuel Stamatakis, Steve Young, Katherine Price Hoelscher, et al.	Sílice	Lodo de perforación que se combina con nano sílice para lograr propiedades reológicas deseadas y estabilidad en el pozo. Disminuyen la permeabilidad de la lutita al taponar los poros a nano escala y así evitar la invasión de agua. (Riley et al., 2012)	no	si
An Experimental Investigation on use of Nanoparticles as Fluid Loss Additives in a Surfactant – Polymer Based Drilling Fluid	2012	Jayanth T. Srivatsa, Malgorzata B. Ziaja,	Sílice	El objetivo de esta investigación fue estudiar la efectividad de una mezcla de fluido Biopolímero-Surfactante, que contiene nanopartículas como aditivos para la pérdida de fluidos, en la reducción de las pérdidas de filtrado a la formación al formar una torta de filtración delgada. (Srivatsa & Ziaja, 2011)	si	si

Efecto de la distribución del tamaño de partículas a escala nanométrica en los fluidos de perforación base agua: Reducción del filtrado y espesor del revoque.	2019	Laura Maritza Valencia Quiceno	Sílice	Evalúa el efecto de la distribución de tamaño de nanopartículas en un fluido de perforación base agua para el mejoramiento de las propiedades del revoque y del filtrado. (Maritza & Quiceno, 2019)	si	si
Evaluación de la viabilidad técnico-financiera de las nanopartículas de sílice como aditivo para el control del filtrado en el fluido de perforación base agua a nivel laboratorio.	2019	Katerin Maritza Prieto Rey	Sílice	A partir de una serie de pruebas de laboratorio en varias etapas evalúa la nano sílice en fase acuosa como controlador de filtrado en el lodo base agua.(Prieto, 2017)	si	si
Evaluación del efecto de las nano- partículas de alúmina y sílice presentes en el filtrado del lodo para la inhibición de finos y la preservación de la humectabilidad al agua en un campo de los Llanos Orientales.	2020	Diana del Pilar Ruiz Rozo	Sílice	Los fenómenos abordados fueron la inhibición de migración de finos y la preservación de la humectabilidad con el uso de nanopartículas de sílice y alúmina.(Rozo, 2020)	si	no

Impact of Nanomaterials on the Rheological and Filtration Properties of Water-Based Drilling Fluids.	2016	A. H. Salih, T. A. Elshehabi, H. I. Bilgesu	Sílice	Trata de la selección de concentración optima de nanopartículas para mejorar las propiedades del fluido de perforación y la hidráulica.(Salih et al., 2016).	si	si
Influence of silica nanoparticles on the functionality of water-based drilling fluids.	2019	Mortatha Al-Yasiri, Afrah Awad, Shahid Pervaiz, Dongsheng Wen	Sílice	Informa el desarrollo de una nueva técnica de perforación fluido utilizando una mezcla de biopolímero / nanopartículas para mejorar el rendimiento de una formulación de lodo.(Al-Yasiri et al., 2019)	no	si
Novel Water-base Mud for Shale Gas, Part II: Mud Formulations and Performances	2012	Meghan Riley, Emanuel Stamatakis, Steve Young Et Al.	Sílice	El uso de nanopartículas para disminuir la permeabilidad de la lutita mediante la obstrucción física de los poros nano escalares tiene el potencial en la aplicación de fluidos de perforación a base de agua en formaciones de lutitas.(St & Sha, 2012)	no	si
Application of amorphous silica nanoparticles in improving the rheological properties, filtration and shale stability of glycol-based drilling fluids	2020	Mostafa Keshavarz Moraveji, Ahmadreza Ghaffarkhah, Farough Agin, Et Al.	Sílice	Aborda una perforación sostenible basada en glicol fluido que está diseñado en este estudio para sustituir la perforación a base de petróleo de uso rutinario en lodos.(Keshavarz Moraveji et al., 2020)	si	si

Mitigating Loss Circulation And Differential Sticking Problems Using Silicon Nanoparticles.	2011	Saket M. Javeri, SPE, Zishaan W. Haindade, SPE, Chaitanya B. Jere, SPE	Sílice	Debido a los problemas de daños en zonas porosas y permeables se hace uso del sílice como ventaja para un lodo más continuo e integrado para que tenga menor volumen de filtrado hacia la formación.(Javeri et al., 2011)	no	si
Effects of silica nanoparticles on the performance of water-based drilling fluids.	2019	Mustafa Verşan Kök∗, Berk Bal	Sílice	Esta investigación realizó dos grupos de experimentos para observar los efectos de la sílice sobre la filtración y las propiedades reológicas de los fluidos de perforación a base de agua. (Kök & Bal, 2019)	si	si
Rheological Properties of Surfactant-Based and Polymeric Nano-Fluids.	2013	M.F. Fakoya, SPE, and S.N. Shah, SPE	Sílice	Presenta una investigación experimental de la nanotecnología sobre las propiedades reológicas de SBF, fluidos poliméricos y mezclas de fluidos poliméricos SBF. (Fakoya & Shah, 2013).	no	si
Appraising the impacts of SiO2, ZnO and TiO2 nanoparticles on rheological properties and shale inhibition of water-based drilling muds.	2019	Ali Esfandyari Bayat, Reza Shams	Sílice	Estudia el efecto de varias nanopartículas, dióxido de titanio, dióxido de silicio y óxido de zinc para mejorar las propiedades reológicas y la tasa de recuperación de lutitas a dos temperaturas (25 y 50 ° C). (Bayat & Shams, 2019)	si	si

Performance of environmentally friendly silica nanoparticles-enhanced drilling mud from sugarcane bagasse.	2019	B. A. Hamad, M. Xu, and W. Liu	Sílice	Desarrollaron un lodo de perforación de bajo costo, alto rendimiento y ecológico utilizando nanopartículas de sílice de bagazo de caña de azúcar (SBSN).(Hamad et al., 2019)	si	si
Nanoparticles Performance as Fluid Loss Additives in Water Based Drilling Fluids.	2016	Abdul Razak Ismail, Wan Rosli Wan Sulaiman, Mohd Zaidi Jaafar, Issham Ismail, Et Al	Sílice	Evalúa el rendimiento de la nanosílice y los nanotubos de carbono de paredes múltiples (MWCNT) como aditivos para la pérdida de fluidos en fluidos de perforación a base de agua con diversas concentraciones y temperaturas de Np.(Ismail et al., 2016)	si	si
Improving the performance of oil based mud and water based mud in a high temperature hole using nanosilica nanoparticles.	2019	Allan Katendea, Natalie V. Boyou, Issham Ismail, Derek Z. Chung; Et Al.	Sílice	Evaluar el desempeño de nanosílice (NS) como reductor de pérdida de fluido y mejorador de propiedades reológicas en sistemas OBM y WBM en condiciones de alta temperatura. (Katende et al., 2019)	no	si
Nanoparticle-Based Drilling Fluids for Minimizing Formation Damage in HP/HT Applications	2016	Omar Mahmoud, and Hisham A. Nasr-El-Din, Texas A&M University; Zisis Vryzas, Et Al	Sílice	Se centra en las técnicas de laboratorio y los resultados de rendimiento de las pruebas de fluidos de perforación innovadores a base de agua que contienen nanopartículas (NP) para minimizar el daño a la	no	si

				formación en condiciones de alta presión / alta temperatura (HP / HT).(Mahmoud et al., 2016)		
An investigation on the effects of silica and copper oxide nanoparticles on rheological and fluid loss property of drilling fluids.	2020	Srawanti Medhi, Satyajit Chowdhury, Dharmender Kumar Gupta, Aryab Mazumdar	Sílice	Investigaron los efectos de las nanopartículas de óxido de cobre y sílice sobre NDDF a base de poliamina y fluidos de perforación convencionales a base de bentonita (BDF).(Medhi et al., 2020)	si	si

Tabla A2.
Clasificación de estudios referentes a lodos de perforación con nanopartículas de alúmina en su formulación.

Nombre del artículo	Año	Autor(es)	Tipo de nanopartícula	Breve descripción	Datos de filtrado	Datos de reología
Mejoramiento de los fluidos de perforación usando nanopartículas funcionalizadas: educción de las pérdidas de filtrado y del espesor de la retorta.	2014	Stefanía Betancur Márquez	Alúmina	Mejorar fluidos de perforación, mediante el uso de nanopartículas funcionalizadas a diferentes concentraciones para la reducción de pérdidas de filtrado y la retorta. (Betancur Márquez et al., 2014).	si	si
Experimental investigation of rheological and filtration properties of waterbased drilling fluids in presence of various nanoparticles.	2018	Ali Esfandyari Bayata, Peyman Jalalat Moghanloo, Ali Piroozian, Roozbeh Rafati	Alúmina	Mejoraron el desempeño de una Bentonita-WBM mediante la adición de cuatro tipos de nanopartículas hidrófilas (Al_2O_3, TiO_2, SiO_2, y CuO). La adición de NP en concentraciones por debajo del 0.5% en peso tiene potencial para mejorar	si	si

				la reología y Filtrado. (Bayat et al., 2018).		
Application of aluminium oxide nanoparticles to enhance rheological and filtration properties of water based muds at HPHT conditions.	2018	Sean Robert Smith, Roozbeh Rafati, Amin Sharifi Haddad, Ashleigh Cooper, Hossein Hamidia	Alúmina	Analizaron el desempeño de la perforación a base de agua fl fluidos que fueron formulados con dos tipos de nanomateriales (óxido de aluminio y sílice) en condiciones de alta y baja presión y temperatura. Demostraron que existe una concentración óptima de nanopartículas. (Smith et al., 2018)	si	si
Evaluación del efecto de las nano- partículas de alúmina y sílice presentes en el filtrado del lodo para la inhibición de finos y la preservación de la humectabilidad al agua en un campo de los Llanos Orientales.	2020	Diana del Pilar Ruiz Rozo	Alúmina	Los fenómenos abordados fueron la inhibición de la migración de finos y la preservación de la humectabilidad con el uso de nanopartículas de Sílice y Alúmina.(Rozo, 2020)	si	no
Improve Performance of Water-based Drilling Fluids Using Nanoparticles	2014	Abdul Razak Ismail, Tan Chee Seong, Nor Aziah Buang and Wan Rosli	Alúmina	Se investigó el impacto y la influencia de diferentes concentraciones de nanotubos de carbono de paredes múltiples y nano óxidos metálicos óxido de titanio, óxido de aluminio y óxido de cobre en las propiedades reológicas del fluido de perforación a base de agua. (Ismail, 2014)	si	si

Application of Nanoparticles in Improving Rheological Properties of Water Based Drilling Fluids	2018	M.T. Al-saba, Australian College Of Kuwait; A. Al Fadhli, KNPC; A. Marafi, SPE; Et Al	Alúmina	Evalúa tres tipos de nanopartículas, la alúmina, el óxido de cobre y el óxido de magnesio, en dos concentraciones diferentes cuyo objetivo es observar el efecto de la adición de nanopartículas sobre las propiedades reológicas de los fluidos de perforación (Al-Saba et al., 2018)	no	si
Investigating Created Properties of Nanoparticles Based Drilling Mud	2017	Nahid Ghasemi & Mojtaba Mirzaee & Reza Aghayari & Heydar Maddah	Alúmina	En este estudio, investigaron el efecto de agregar Alúmina y TiO_2 nanopartículas en el lodo de perforación. Estos componentes se utilizaron de 20 y 60 nm de tamaño y 0,05% en peso de concentración. (Ghasemi et al., 2018)	si	si

Tabla A3.
Clasificación de estudios referentes a lodos de perforación con nanopartículas de titanio en su formulación.

Nombre del artículo	Año	Autor(es)	Tipo de nanopartícula	Breve descripción	Datos de filtrado	Datos de reología
Experimental investigation of rheological and filtration properties of waterbased drilling fluids in presence of various nanoparticles.	2014	Ali Esfandyari Bayat, Peyman Jalalat Moghanloo, Ali Piroozian, Et Al	Titanio	En este estudio, investigaron el efecto de agregar Alúmina y TiO_2 nanopartículas en el lodo de perforación. Estos componentes se utilizaron de 20 y 60 nm de tamaño y 0,05% en peso de concentración.(Bayat et al., 2018)	si	si

An experimental investigation of the enhanced oil recovery and improved performance of drilling fluids using titanium dioxide and fumed silica nanoparticles.	2013	Goshtasp Cheraghian, Mahmood Hemmati*, Mohsen Masihi and Saeed Bazgir	Titanio	Experimentan la inyección de dos nanopartículas disueltas en agua en un entorno simulado y su efecto en el fluido de perforación. El uso de nanopartículas en todas las muestras ha aumentado la recuperación de aceite.(Cheraghian et al., 2013)	no	si
The effect of the TiO2/polyacrylamide nanocomposite on water-based drilling fluid properties.	2015	Mehran Sadeghalvaad, Samad Sabbaghi	Titanio	Tiene el objetivo mejorar el fluido de perforación a base de agua mediante el uso de TiO_2 / aditivo nano compuesto de poliacrilamida (PAM). Este aditivo se obtuvo mediante la polimerización de monómero de acrilamida en presencia de TiO_2.(Sadeghalvaad & Sabbaghi, 2015)	si	si
Improve Performance of Water-based Drilling Fluids Using Nanoparticles.	2014	Abdul Razak Ismail, Tan Chee Seong, Nor Aziah Buang and Wan Rosli	Titanio	Se investigó el impacto y la influencia de diferentes concentraciones de nanotubos de carbono de paredes múltiples y nano óxidos metálicos óxido de titanio, óxido de aluminio y óxido de cobre en las propiedades reológicas del fluido de perforación a base de agua. (Ismail, 2014)	si	si

Appraising the impacts of SiO_2, ZnO and TiO_2 nanoparticles on rheological properties and shale inhibition of water-based drilling muds.	2019	Ali Esfandyari Bayat, Reza Shams	Titanio	Estudia el efecto de varias nanopartículas, TiO_2, silice y ZnO_2 para mejorar las propiedades reológicas y la tasa de recuperación de lutitas a dos temperaturas (25 y 50 ° C). (Bayat & Shams, 2019)	si	si
Investigating Created Properties of Nanoparticles Based Drilling Mud.	2018	Nahid Ghasemi & Mojtaba Mirzaee & Reza Aghayari & Heydar Maddah	Titanio	En este estudio, investigaron el efecto de agregar Alúmina y TiO_2 nanopartículas en el lodo de perforación. Estos componentes se utilizaron de 20 y 60 nm de tamaño y 0,05% en peso de concentración. (Ghasemi et al., 2018)	si	si

Tabla A4.
Clasificación de estudios referentes a lodos de perforación con nanopartículas de cobre en su formulación.

Nombre del artículo	Año	Autor(es)	Tipo de nanopartícula	Breve descripción	Datos de filtrado	Datos de reología
Experimental investigation of rheological and filtration properties of waterbased drilling fluids in	2018	Ali Esfandyari Bayat, Peyman Jalalat Moghanloo, Ali Piroozian, Roozbeh Rafati	Cobre	Mejoraron el desempeño de la Bentonita mediante la adición de cuatro tipos de Np hidrófilas (Al_2O_3, TiO_2, SiO_2, y CuO). Concluyen que la adición de Np en concentraciones por debajo del 0.5% en peso a la Bentonita-WBM tiene potencial para	si	si

presence of various nanoparticles				mejorar la reología y Filtrado. (Bayat et al., 2018)		
Application of Nanoparticles in Improving Rheological Properties of Water Based Drilling Fluids	2018	M.T. Al-saba, Australian College Of Kuwait; A. Al Fadhli, KNPC; A. Marafi, SPE; Et Al	Cobre	Evalúa diferentes nanopartículas, incluido el óxido de aluminio, el óxido de cobre y el óxido de magnesio, en dos concentraciones diferentes cuyo objetivo es observar el efecto de la adición de nanopartículas sobre las propiedades reológicas de los fluidos de perforación a base de agua.(Al-Saba et al., 2018)	si	si
An investigation on the effects of silica and copper oxide nanoparticles on rheological and fluid loss property of drilling fluids.	2020	Srawanti Medhi, Satyajit Chowdhury, Dharmender Kumar Gupta, Aryab Mazumdar	Cobre	Investigaron los efectos de las nanopartículas de óxido de cobre y sílice sobre NDDF a base de poliamina y fluidos de perforación convencionales a base de bentonita (BDF).(Medhi et al., 2020)	si	si
Application of Nanoparticles in Improving Rheological Properties of Water Based Drilling Fluids.	2014	M.T. Al-saba, Australian College Of Kuwait; A. Al Fadhli, KNPC; A. Marafi, SPE; Et Al	Cobre	Evalúa diferentes nanopartículas, incluido el óxido de aluminio, el óxido de cobre y el óxido de magnesio, en dos concentraciones diferentes cuyo objetivo es observar el efecto de la adición de nanopartículas sobre las propiedades reológicas de los fluidos de perforación a base de agua.(Al-Saba et al., 2018)	si	si

Tabla A5.
Clasificación de estudios referentes a lodos de perforación con nanopartículas de hierro en su formulación.

Nombre del artículo	Año	Autor(es)	Tipo de nanopartícula	Breve descripción	Datos de filtrado	Datos de reología
Nano-Based Drilling Fluids: A Review	2017	Zisis Vryzas and Vassilios C. Kelessidis	Hierro	Resume el progreso reciente realizado en el uso de nanopartículas como aditivos en los fluidos de perforación con el fin de darles a dichos fluidos características reológicas y de filtración óptima, aumentar la estabilidad de la lutita y lograr el fortalecimiento del pozo.(Vryzas & Kelessidis, 2017)	si	si
Application of In-House Prepared Nanoparticles as Filtration Control Additive to Reduce Formation Damage.	2014	Oscar Contreras Geir Hareland Maen Husein Runar Nygaard Mortadha, Et Al	Hierro	Contiene una aplicación exitosa de nanopartículas a base de hierro y calcio para reducir la pérdida de filtración en medios permeables convencionales para lodos a base de aceite (OBM) utilizando presión de filtro prensa de alta temperatura (HPHT) (Contreras et al., 2014)	si	si
Effect of temperature on the rheological properties with shear stress limit of iron oxide nanoparticle modified bentonite drilling muds	2016	Ahmed S. Mohammed	Hierro	Investigaron el efecto de la temperatura sobre las propiedades reológicas y la pérdida de peso de un lodo de perforación de bentonita a base de agua modificada con nanopartículas de óxido de hierro.(Mohammed, 2017)	no	si

Effect of Nanoparticle-Additives on the Rheological Properties of Clay-Based Fluids at High Temperature and High Pressure Smart Bentonite	2011	Youngsoo Jung, Matthew Barry, Jung-Kun Lee, Phuoc Tran, Yee Soong, Et Al	Hierro	Muestra el papel de los aditivos de nanopartículas de óxido de hierro en la estabilización de fluidos de perforación basados en partículas de arcilla bajo condiciones de alta temperatura y alta presión. (Jung et al., 2011)	si	no
Drilling Muds Modified with Iron Oxide Nanoparticles and Characterized Based on the Electrical Resistivity and Rheological Properties with Varying Magnetic Field Strengths and Temperatures	2017	C. Vipulanandan and A. Mohammed R. G. Samuel	Hierro	Estudia los efectos de la intensidad del campo magnético y las temperaturas sobre la resistividad eléctrica y las propiedades reológicas de un lodo de perforación de bentonita inteligente sensible y modificada con nanopartículas de óxido de hierro. (C. Vipulanandan et al., 2017)	no	si
Nanoparticle-Based Drilling Fluids for Minimizing Formation Damage in HP/HT Applications.	2016	Omar Mahmoud, and Hisham A. Nasr-El-Din, Texas A&M University; Zisis Vryzas, Et Al	Hierro	Se centra en las técnicas de laboratorio y los resultados de rendimiento de las pruebas de fluidos de perforación innovadores a base de agua que contienen nanopartículas (NP) para minimizar el daño a la formación en condiciones de alta presión / alta	no	si

				temperatura (HP / HT).(Mahmoud et al., 2016)		
Effect of $Fe4O_3$ Nanoparticles on the Rheological Properties of Water Based Mud	2015	Amarfio E. M. and Abdulkadir M.	Hierro	Investiga la estabilidad de las NP Fe_4O_3 sobre las propiedades reológicas del lodo de bentonita a base de agua, así como en su grado de estabilización térmica sobre el fluido, la temperatura y la velocidad de corte en el esfuerzo cortante de la perforación. (Amarfio E. M. & Abdulkadir M., 2015)	no	si
Enhancing the properties of Water based Drilling Fluid using Bismuth Ferrite Nanoparticles	2018	Shama Perween, Nitu Kumari Thakur, Mukarram Beg, Shivanjali Sharma, Amit Ranjan	Hierro	Sintetizaron NP de $BiFeO_3$ mediante técnicas químicas húmedas no acuosas y se utilizó como aditivo junto a la bentonita y otros aditivos poliméricos. Resultó una buena compatibilidad con la arcilla y mejoraron propiedades del lodo.(Perween et al., 2019)	si	si

Tabla A6.

Clasificación de estudios referentes a lodos de perforación con nanopartículas de Grafeno en su formulación.

Nombre del artículo	Año	Autor(es)	Tipo de nanopartícula	Breve descripción	Datos de filtrado	Datos de reología
Evaluación técnica de un fluido de perforación base agua utilizando como aditivo nano-partículas de óxido de grafeno a escala de laboratorio para la inhibición de lutitas en los	2017	Ana Melisa García Calvo - Fabián Iván Manjarres Calderón	Grafeno	Evalúa en un proceso experimental de dos etapas el óxido de grafeno como nanomaterial y aditivo en un fluido de perforación base agua para mejorar la inhibición en las lutitas y la estabilidad del pozo. (Calderon, 2017)	si	si

Campo Castilla y Chichimene de Ecopetrol s.a						
Influence of Graphene Nanoplatelet and Silver Nanoparticle on the Rheological Properties of Water-Based Mud	2018	Hazlina Husin, Khaled Abdalla Elraies, Hyoung Jin Choi, and Zachary Aman	Grafeno	Agregaron nano plaquetas de grafeno y Np de plata a una formulación de lodo. Realizaron mediciones de propiedades reológicas y de filtración para evaluar la influencia de las nanopartículas agregadas. (Husin et al., 2018)	si	si
Nanotechnology application in drilling fluids	2013	Katherine Price Hoelscher, Steve Young, Jim Friedheim, Guido De Stefano	Grafeno	Discute la aplicación de nanotecnología en la estabilización de lutitas y los resultados de proyectos que utilizan grafeno, nanotubos de carbono, nano sílice y otras nanoquímicas. (Hoelscher et al., 2013)	no	si

Tabla A7**.**

Clasificación de estudios referentes a lodos de perforación con nanopartículas de plata en su formulación.

Nombre del artículo	Año	Autor(es)	Tipo de nanopartícula	Breve descripción	Dato de filtrado	Dato de reología
Influence of Graphene Nanoplatelet and Silver Nanoparticle on the Rheological Properties of Water-Based Mud	2018	Hazlina Husin, Khaled Abdalla Elraies, Hyoung Jin Choi, Et Al	Plata	Agregaron nanoplaquetas de grafeno y Np de plata a una formulación de lodo. Realizaron mediciones de propiedades reológicas y de filtración para evaluar la influencia de las nanopartículas agregadas.(Husin et al., 2018)	si	si

Tabla A8.
Clasificación de estudios referentes a lodos de perforación con nanopartículas de carboximetil-celulosa en su formulación.

Nombre del artículo	Año	Autor(es)	Tipo de nanopartícula	Breve descripción	Dato de filtrado	Dato de reología
Decreasing of water loss and mud cake thickness by CMC nanoparticles in mud drilling	2012	R. Saboori S. Sabbaghi D. Mowla A. Soltani	Carboximetil-celulosa	Investiga el efecto de las nanopartículas de CMC, la pérdida de agua y el espesor de la torta de lodo en la perforación de lodo. (Soboori et al., 2012)	si	no

Tabla A9.
Clasificación de estudios referentes a lodos de perforación con nanopartículas de carbono en su formulación.

Nombre del artículo	Año	Autor(es)	Tipo de nanopartícula	Breve descripción	Dato de filtrado	Dato de reología
Nanoparticles as Drilling Fluids Rheological Properties Modifiers	2018	Majid S Al Ruqeishi, Younis Al Salmi and Tariq Mohiuddin	Carbono	Muestra un resultado favorable del uso de aditivos de nanopartículas de carbono y nanocables de ZnO proporcionan un control significativo del fluido de perforación propiedades reológicas. (S Al Ruqeishi, 2018)	si	si

Tabla A10.
Clasificación de estudios referentes a lodos de perforación con nanopartículas de bentonita en su formulación.

Nombre del articulo	Año	Autor(es)	Tipo de nanopartícula	Breve descripción	Datos de filtrado	Datos de reología
Evaluación técnica a escala laboratorio de un fluido de perforación base agua utilizando nano-partículas de lm-200 para la inhibición de lutitas en el campo castilla de Ecopetrol s.a	2018	Laura Eugenia Sánchez Russo Miguel Ángel Viveros Ramos, Halliburton s.a	Bentonita	La sección de estudio es el diseño del fluido de perforación con NP de bentonita teniendo en cuenta las necesidades del Campo Castilla.(Ramos, 2013)	si	si
Experimental Investigation of Drilling Fluid Performance as Nanoparticles	2013	Jamal Nasser, Anna Jesil, Tariq Mohiuddin, Majid Al Ruqeshi, Geetha Devi, Shahjahan Mohataram	Bentonita	Su investigación usa un fluido de perforación a base de agua de nanobentonita sintetizada. El fluido retuvo todas las propiedades reológicas deseadas a temperaturas y presiones elevadas.(Nasser et al., 2013)	si	si
Evaluation of Egyptian bentonite and nano-bentonite as drilling mud	2014	M.I. Abdou, A.M. Al-sabagh *, M.M. Dardir	Bentonita	Prepararon NP de bentonita mediante nano-molienda. Tanto la bentonita natural como la nanobentonita se evaluaron como lodo de perforación. La evaluación implicó el estudio de las propiedades reológicas y filtración.(Abdou et al., 2013)	si	si

Tabla A11.
Clasificación de estudios referentes a lodos de perforación con nanopartículas de zinc en su formulación.

Nombre del artículo	Año	Autor(es)	Tipo de nanopartícula	Breve descripción	Datos de filtrado	Datos de reología
Novel zinc oxide nanoparticles deposited acrylamide composite used for enhancing the performance of water-based drilling fluids at elevated temperature conditions	2016	A. Aftab, A.R. Ismail, S. Khokhar, Z.H. Ibupoto	Zinc	Estudiaron los efectos del compuesto de nanopartículas de óxido de zinc-acrilamida denominado compuesto ZnO-Am sobre el comportamiento reológico y de hinchamiento de las lutitas del WBDF convencional. (Aftab et al., 2016)	si	si
Development of High Temperature High Pressure (HTHP) Water Based Drilling Mud using Synthetic Polymers, and Nanoparticles	2018	Mansoor Ali Khan, Hikmat Said Al-Salim, Leila Niloofar Arsanjani	Zinc	Se centra en el diseño, optimización y formulación de fluidos de perforación a base de agua HTHP de acuerdo con la especificación requerida, tales como propiedades reológicas y pérdida de fluidos. La investigación fue ilimitada al uso de arcilla, polímeros y nanopartículas para mejorar el lodo.(Khan et al., 2018)	si	si
Appraising the impacts of SiO2, ZnO and TiO2 nanoparticles on rheological properties and shale inhibition of water-based drilling muds	2019	Ali Esfandyari Bayat, Reza Shams	Zinc	Estudia el efecto de varias nanopartículas, dióxido de titanio, dióxido de silicio y óxido de zinc para mejorar las propiedades reológicas y la tasa de recuperación de lutitas de una muestra de WBM a dos	si	si

				temperaturas (25 y 50 ° C).(Bayat & Shams, 2019)		

Tabla A12**.**

Clasificación de estudios referentes a lodos de perforación con nanopartículas de nanotubos de carbono - CNT en su formulación.

Nombre del artículo	Año	Autor(es)	Tipo de nanopartícula	Breve descripción	Datos de filtrado	Datos de reología
Development of High Temperature High Pressure (HTHP) Water Based Drilling Mud using Synthetic Polymers, and Nanoparticles	2018	Mansoor Ali Khan, Hikmat Said Al-Salim, Leila Niloofar Arsanjani	Nanotubos de Carbono CNT	Se centra en el diseño, optimización y formulación de fluidos de perforación a base de agua HTHP de acuerdo con la especificación requerida, tales como propiedades reológicas y pérdida de fluidos. La investigación fue ilimitada al uso de arcilla, polímeros y nanopartículas para mejorar el lodo.(Khan et al., 2018)	Si	si
Effect of nanomaterial on the rheology of drilling fluids	2014	Abdul Razak Ismail Norhana Mohamed Rashid Mohd Zaidi Jaafar Wan Rosli Et Al	Nanotubos de Carbono CNT	Esta investigación se centra en determinar la concentración óptima de nanotubos de carbono de paredes múltiples para producir mejores propiedades reológicas en fluidos de perforación a base de agua y éster a diversas	no	si

				temperaturas.(Ismail et al., 2014)		
Nanoparticles Performance as Fluid Loss Additives in Water Based Drilling Fluids	2016	Abdul Razak Ismail, Wan Rosli Wan Sulaiman, Mohd Zaidi Jaafar, Issham Ismail, Et Al	Nanotubos de Carbono CNT	Evalúa el rendimiento de la nanosílice y los nanotubos de carbono de paredes múltiples (MWCNT) como aditivos para la pérdida de fluidos en fluidos de perforación a base de agua con diversas concentraciones y temperaturas de nanopartículas.(Ismail et al., 2016)	si	si
Nanotechnology application in drilling fluids	2013	Katherine Price Hoelscher, Steve Young, Jim Friedheim, Guido De Stefano	Nanotubos de Carbono CNT	Discute la aplicación de nanotecnología en la estabilización de lutitas y los resultados de proyectos que utilizan grafeno, nanotubos de carbono, nanosílice y otras nanoquímicas. (Hoelscher et al., 2013)	no	si

Tabla A13.
Clasificación de estudios referentes a lodos de perforación con nanopartículas de calcio en su formulación.

Nombre del artículo	Año	Autor(es)	Tipo de nanopartícula	Breve descripción	Datos de filtrado	Datos de reología
Application of In-House Prepared Nanoparticles as Filtration Control Additive to Reduce Formation Damage	2014	Oscar Contreras Geir Hareland Maen Husein Runar Nygaard Mortadha, Et Al	Calcio	Contiene una aplicación exitosa de nanopartículas a base de hierro y calcio para reducir la pérdida de filtración en medios permeables convencionales para lodos a base de aceite (OBM) utilizando presión de filtro prensa de alta temperatura (HPHT) (Contreras et al., 2014)	si	si

Tabla A14.
Clasificación de estudios referentes a lodos de perforación con nanopartículas de atapulguita en su formulación.

Nombre del artículo	Año	Autor (es)	Tipo de nanopartícula	Breve descripción	Datos de filtrado	Datos de reología
Clay nanoparticles modified drilling fluids for drilling of deep hydrocarbon wells	2013	J. Abdo, M.D. Haneef	Atapulguita	Presenta un enfoque para estabilizar la perforación en la reología de fluidos en condiciones HPHT mediante el uso de nanopartículas palygorskita. Después de las investigaciones de laboratorio proporcionaron resultados consistentes, es decir, perforación estable. (Abdo & Haneef, 2013)	no	si

Tabla A15**.**
Clasificación de estudios referentes a lodos de perforación con nanopartículas de arcilla en su formulación.

Nombre del artículo	Año	Autor (es)	Tipo de nanopartícula	Breve descripción	Datos de filtrado	Datos de reología
Nanoclay Modified Drilling Muds for HPHT Applications	2016	Cumaraswamy Vipulanandan and Ahmed Mohammed	Arcilla	En este estudio, investigaron el efecto de la temperatura sobre la resistividad eléctrica y las propiedades reológicas de los lodos de perforación de bentonita a base de agua modificados con nanoarcilla. (Cumaraswamy Vipulanandan et al., 2016)	no	si

Tabla A16.
Clasificación de estudios referentes a lodos de perforación con nanopartículas de magnesio en su formulación.

Nombre del artículo	Año	Autor(es)	Tipo de nanopartícula	Breve descripción	Datos de filtrado	Datos de reología
Application of Nanoparticles in Improving Rheological Properties of Water Based Drilling Fluids	2018	M.T. Al-saba, Australian College Of Kuwait; A. Al Fadhli, KNPC; A. Marafi, SPE; Et Al	Magnesio	Evalúa diferentes nanopartículas, incluido el óxido de aluminio, el óxido de cobre y el óxido de magnesio, en dos concentraciones diferentes cuyo objetivo es observar el efecto de la adición de nanopartículas sobre las propiedades reológicas de los fluidos de	no	si

				perforación a base de agua.(Al-Saba et al., 2018)		

Tabla A17.
Clasificación de estudios referentes a lodos de perforación con nanopartículas de nanopartículas comerciales en su formulación.

Nombre del artículo	Año	Autor(es)	Tipo de nanopartícula	Breve descripción	Datos de filtrado	Datos de reología
Novel Nanoparticle-Based Drilling Fluid with Improved Characteristics	2012	Mohammad F. Zakaria,SPE, Maen Husein, SPE, Geir Hareland,SPE	NP Comerciales	En el trabajo, desarrollaron una nueva clase de materiales de pérdida de circulación de nanopartículas. Se han probado dos enfoques diferentes de formación de NP y adición al fluido de perforación a base de petróleo(Zakaria et al., 2012)	si	si
Preliminary Test Results of Nano-based Drilling Fluids for Oil and Gas Field Application	2011	Md. Amanullah, SPE, Mohammad K Al-Arfaj, Ziad Al-Abdullatif	NP Comerciales	Describe la formulación y los resultados de las pruebas preliminares de varios fluidos de perforación de base nano. Los fluidos desarrollados se formularon utilizando una mezcla de nano y nano estabilizador para estudiar el propiedades reológicas y de filtración.(Amanullah et al., 2011)	si	si