

Evaluación de la adición de grafeno oxidado en los bordes sobre las propiedades reológicas y de filtración de un lodo de perforación overburden base agua

Karen Melissa Prada Sedano y Silvia Juliana Tarazona Ruiz

Trabajo de grado para optar al título de Química

Director

Enrique Mejia Ospino

PhD.

Codirector

Wilmar Antonio Contreras Toloza

MSc.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Química

Bucaramanga

2026

Agradecimientos

A Dios, mi eterna fuente de vida.

A mi amado esposo, por su amor, apoyo incondicional y compañía diaria.

A mi madre, a mi padre y a mis hermanas, por ser siempre mi refugio seguro.

Y a mi Ari, el amor de mi vida.

-Melissa

A Dios, por brindarme la fuerza, la salud y la perseverancia para culminar esta etapa.

A mis padres, Patricia y Alfredo, pilares de mi vida, ejemplo de esfuerzo incansable. Gracias por enseñarme, con su amor incondicional y ejemplo, el verdadero valor del sacrificio y la constancia.

A Juan David, mi hermano que es mucho más que eso: mi alegría, mi motor y, muchas veces, mi razón para seguir.

A mi familia, por ser refugio, compañía, motivo para seguir adelante, por estar presentes en cada etapa con palabras de aliento.

A mis profesores, por ser guías en este camino, por su compromiso con la enseñanza y por despertar en mí la pasión por la ciencia. Su dedicación ha sido fundamental en mi formación.

A Felipe, por estar a mi lado en los días buenos y, sobre todo, en los difíciles. Por su apoyo, paciencia, amor y motivación para alcanzar siempre mis metas.

-Silvia

Al profesor Enrique Mejía, por permitirnos hacer parte de su grupo de investigación.

A Wilmar Contreras, por su guía, exigencia y compromiso, así como por sus observaciones críticas y disposición para enriquecer este trabajo con su experiencia.

A Nicolás Cárdenas, por su valiosa ayuda técnica y metodológica, siempre dispuesto a brindar apoyo cuando más lo necesitábamos.

A todo el equipo del Laboratorio de Espectroscopía Atómica y Molecular (LEAM), por acogernos y ofrecer un espacio de aprendizaje, colaboración y crecimiento.

Y finalmente, a la Universidad Industrial de Santander, por brindarnos la formación académica y humana que hoy nos permite dar este paso con orgullo.

A todos los que, de alguna forma, formaron parte de este proceso: nuestra más sincera gratitud.

-Melissa y Silvia

Índice

Introducción	15
1 Objetivos	17
1.1 Objetivo general	17
1.2 Objetivos específicos	17
2 Marco teórico	17
2.1 Reología	17
2.1.1 Conceptos básicos de reología	18
2.1.2 Modelos reológicos de fluidos no newtonianos	19
2.1.3 Esfuerzo de corte (<i>Shear stress</i>) y tasa de corte (<i>Shear rate</i>)	20
2.2 Fluido de perforación	21
2.2.1 Composición de los fluidos de perforación	22
2.3 Propiedades fundamentales de los lodos de perforación	22
2.3.1 Viscosidad.	22
2.3.2 Viscosidad plástica (VP).	23
2.4 Parámetros operativos clave para la evaluación de lodos	23
2.4.1 Filtración API:	24
2.4.2 Rendimiento de filtración:	24
2.4.3 Peso específico (densidad):	24
2.4.4 Dureza total:	24
2.4.5 Alcalinidad:	24

EGO EN LODOS DE PERFORACIÓN	5
2.4.6 Proceso de rolado:	24
2.5 Importancia de las propiedades reológicas	24
2.6 Funciones de los fluidos de perforación	25
2.6.1 Lavado del fondo del pozo	25
2.6.2 Estabilidad del pozo	25
2.6.3 Suspensión y remoción de recortes	25
2.6.4 Sellado de formaciones permeables	26
2.6.5 Enfriamiento y lubricación de la barrena	26
2.6.6 Control de las presiones de la formación	26
2.6.7 Soporte sustantivo del peso de la sarta de perforación	27
2.6.8 Minimización de daños al yacimiento	27
2.6.9 Control de la corrosión	28
2.6.10 Obtención de información stratigráfica	28
2.6.11 Suspensión de cortes y sólidos al interrumpirse la perforación	28
2.6.12 Transmisión de potencia	28
2.6.13 Transmisión de energía hidráulica a las herramientas y a la mecha	28
2.6.14 Minimizar el impacto ambiental.	29
2.7 Condiciones operativas exigentes	30
2.8 Clasificación de los fluidos de perforación	31
2.8.1 Lodo a base de agua (WBM)	31
2.8.2 Lodos a base de aceite (OBM)	32
2.8.3 Lodos base gaseosa	33
2.8.4 Lodos nativos	34
2.9 Aditivos comerciales	35

EGO EN LODOS DE PERFORACIÓN	6
2.9.1 Aditivos para el control de filtrado	35
2.9.2 Aditivos para el control de densidad	35
2.9.3 Aditivos reológicos	36
2.9.4 Aditivos inhibidores de arcillas	36
2.9.5 Aditivos anticorrosivos	36
2.9.6 Aditivos antiespumantes	36
2.9.7 Consideraciones adicionales	36
2.10 Componentes del lodo de perforación a estudiar	36
2.10.1 Celulosa polianiónica (PAC-L)	36
2.10.2 Goma xantana (GX)	37
2.10.3 Barita	39
2.10.4 Óxido de grafito	39
2.11 Óxido de grafeno (GO)	40
2.12 Edge-graphene oxide (EGO)	41
2.13 Nanomateriales	41
2.14 Nanomateriales y su definición en el contexto colombiano	41
2.14.1 Nanopartículas: definición y características generales	42
2.14.2 Nanofluidos	43
2.14.3 Métodos de síntesis de nanomateriales	43
2.14.4 Caracterización de las nanopartículas	44
2.14.5 Prueba de compatibilidad de aditivos	45
2.15 Viscosímetro HAAKE iQ con geometría cilíndrica coaxial	46
2.15.1 Análisis de Varianza (ANOVA)	48
3 Parte experimental	49

EGO EN LODOS DE PERFORACIÓN	7
3.1 Preparación de los lodos de perforación	49
3.1.1 Curvas reológicas de lodos de perforación a diferentes concentraciones de GX	50
3.1.2 Evaluación visual de la torta de filtrado: selección de la muestra óptima	52
3.2 Obtención del Grafeno oxidado en los bordes (EGO)	54
3.2.1 Oxidación suave del grafito	55
3.2.2 Expansión del grafito funcionalizado en los bordes (EFG)	56
3.2.3 Exfoliación y obtención del EGO	57
3.3 Caracterización del EGO	58
3.4 Determinación de la concentración	59
3.5 Adición del grafeno oxidado en los bordes a un fluido de perforación base agua	59
3.6 Determinación de la densidad de los lodos a estudiar	60
3.7 Protocolos de medición de las propiedades del lodo	63
3.7.1 Análisis reológico de las curvas de esfuerzo de corte con EGO	63
3.7.2 Viscosidad plástica (VP)	66
3.7.3 Viscosidad aparente (VA)	67
3.7.4 Punto Cedente (YP):	69
3.8 Prueba de filtrado API	70
3.8.1 Análisis estadístico de la viscosidad plástica vs. concentración de EGO y temperatura	73
3.8.2 Consideraciones operativas en la formulación de lodos de perforación con EGO	75
4 Conclusiones y perspectivas	76
Referencias Bibliográficas	78
Apéndice A	82

EGO EN LODOS DE PERFORACIÓN

8

Apéndice B

83

Índice de cuadros

Tabla	1. Comparación cualitativa de bandas FTIR entre GO y EGO.	60
Tabla	2. Densidades de las muestras con diferentes concentraciones de EGO agregadas al lodo con $[GX] = 3.33 \text{ g/L}$	61
Tabla	3. Viscosidad plástica (VP) a 25°C y 65°C para diferentes concentraciones de EGO	66
Tabla	4. Viscosidad aparente (VA) a 25°C y 65°C para diferentes concentraciones de EGO	68
Tabla	5. Punto cedente (YP) a 25 °C y 65 °C para diferentes concentraciones de EGO ...	69
Tabla	6. Volumen filtrado (mL) en función del tiempo para diferentes concentraciones de EGO.....	71
Tabla	7. ANOVA para la viscosidad plástica (VP) según la concentración de EGO a 25°C.	74
Tabla	8. Resultados de la prueba post-hoc de Tukey HSD para la VP según concentración de EGO.....	74
Tabla	9. Resultados reológicos: esfuerzo cortante (τ) e índice de comportamiento (n) para cada muestra a diferentes velocidades de rotación (RPM).	82
Tabla	10. Datos reológicos para diferentes concentraciones de EGO (25°C).....	82
Tabla	11. Datos reológicos para diferentes concentraciones de EGO (65°C).....	83

Índice de figuras

Figura	1. Representación gráfica de las ecuaciones de diferentes modelos reológicos.	18
Figura	2. Clasificación de los fluidos según su comportamiento reológico.	19
Figura	3. Representación del esfuerzo de corte τ y la tasa de corte $\dot{\gamma}$ entre dos placas paralelas.	20
Figura	4. Relación entre esfuerzo de corte y tasa de corte para distintos tipos de fluidos. Imagen.	21
Figura	5. Estructura molecular representativa de la celulosa polianiónica (PAC-L).	37
Figura	6. Estructura molecular representativa de la goma xantana	37
Figura	7. Representación gráfica del óxido de grafeno y óxido de grafeno reducido.	40
Figura	8. Viscosímetro HAAKE iQ.	46
Figura	9. <i>a.</i> Geometría cilíndrica del viscosímetro. <i>b.</i> Vista superior del sistema cilíndrico. <i>c.</i> Representación del flujo de corte.	48
Figura	10. Curvas de esfuerzo cortante en función de la velocidad de rotación para diferentes concentraciones de goma xantana (GX). Se observa un comportamiento pseudoplástico más acentuado con el aumento de la concentración de GX.	50
Figura	11. Curvas de esfuerzo cortante en función de la velocidad de rotación para diferentes concentraciones de goma xantana (GX), en el rango de 3–30 RPM.	51
Figura	12. Comparación visual de las tortas de filtrado. La Muestra 2 exhibe una torta delgada y homogénea, mientras que la Muestra 6, con mayor concentración de polímero, presenta una torta más gruesa y potencialmente menos permeable.	53
Figura	13. Mecanismo de obtención del óxido de grafeno de borde mediante oxidación selectiva y exfoliación controlada del grafito.	54

Figura 14. Protocolo de oxidación suave del grafito para la obtención del grafito funcionalizado en los bordes (EFG).	56
Figura 15. Protocolo de expansión y terminación del proceso oxidativo del grafito funcionalizado.	56
Figura 16. Protocolo de exfoliación asistida del grafito funcionalizado para la obtención del EGO.	57
Figura 17. Espectro FTIR del óxido de grafeno funcionalizado en los bordes (EGO). Se destacan las regiones características: banda ancha O–H (3225 cm^{-1}), estiramiento C=O (1704 cm^{-1}), vibraciones esqueléticas C=C/H–O–H (1620 cm^{-1}) y estiramientos C–O/C–O–C ($1050\text{--}1250\text{ cm}^{-1}$).	59
Figura 18. Densidad de las fluidos de perforación con diferentes concentraciones de EGO. Se observa un incremento progresivo en la densidad con el aumento de la concentración de EGO, alcanzando una estabilización entre 0,4 y 0,6 ppb.	62
Figura 19. Comparación de curvas de esfuerzo cortante en función de la velocidad de rotación para distintas dosis de EGO a 25 °C y 65 °C.	65
Figura 20. Variación de la viscosidad plástica (VP) con la concentración de alizado a dos temperaturas. Se observa un incremento progresivo con la concentración en ambas condiciones, siendo más pronunciado a 65°C.	67
Figura 21. Variación de la viscosidad aparente (VA) con la concentración de EGO a 25 °C y 65 °C.	68
Figura 22. Variación del punto cedente (YP) con la concentración de alizado a 25 °C y 65 °C. Se aprecia un aumento pronunciado de YP a partir de 0.2 ppb, siendo más elevado a 65 °C debido a la mayor contribución de interacciones interparticulares en condiciones térmicas altas.	70

Figura 23. **Formación de la torta con [EGO] = 0.4 ppb** 72

Resumen

Título: Evaluación de la adición de grafeno oxidado en los bordes sobre las propiedades reológicas y de filtración de un lodo de perforación a base agua *

Autores: Karen Melissa Prada Sedano, Silvia Juliana Tarazona Ruiz **

Palabras clave: EGO, Método de Hummers, Fluido de perforación, Grafeno, Propiedades reológicas y de filtración.

Descripción:

En el ámbito de la perforación de pozos petroleros, el uso de lodos de perforación resulta fundamental para garantizar la estabilidad del pozo, el transporte de recortes y el control de presiones subterráneas. Particularmente, los lodos *overburden* —utilizados en los primeros metros de perforación, donde predominan formaciones blandas y terrenos poco consolidados— enfrentan el desafío de minimizar la pérdida de fluido hacia la formación y mantener propiedades reológicas adecuadas bajo condiciones variables.

En respuesta a estos retos, el presente estudio evalúa experimentalmente el efecto de incorporar óxido de grafeno oxidado en los bordes (EGO) a un fluido de perforación base agua. Se investigó cómo distintas concentraciones del nanomaterial influyen en parámetros clave como la viscosidad plástica, la viscosidad aparente, el punto cedente y la capacidad de filtración del sistema. Adicionalmente, se caracterizó estructuralmente el EGO mediante espectroscopía infrarroja (FTIR), confirmando la presencia de grupos funcionales oxigenados en los bordes de las láminas, esenciales para su dispersión estable en medio acuoso.

Los resultados obtenidos muestran que la adición de EGO mejora significativamente el comportamiento reológico del lodo, incrementando su resistencia interna al flujo y su capacidad de suspensión de sólidos, incluso bajo condiciones térmicas simuladas de fondo de pozo. Asimismo, se observó una reducción sustancial en el volumen de filtrado y una formación más eficiente de la torta de filtración. Estos efectos se logran con concentraciones bajas del aditivo (0.2–0.4,ppb), lo que refuerza la viabilidad técnica y económica de su implementación en campo.

En conjunto, los hallazgos de este trabajo sugieren que el óxido de grafeno funcionalizado en los bordes es un aditivo promisor para el diseño de lodos de perforación avanzados, adaptables a distintas profundidades y condiciones operativas, sin comprometer la integridad estructural del sistema ni aumentar significativamente los costos de formulación.

* Proyecto de investigación

** Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Director PhD. Enrique Mejía Ospino. Codirector MSc. Wilmar Antonio Contreras Toloza.

Abstract

Title: Evaluation of the addition of oxidized graphene at the edge on the rheological and filtration properties of a water-based drilling mud*

Authors: Karen Melissa Prada Sedano, Silvia Juliana Tarazona Ruiz **

Key words: EGO, Hummers method, Drilling fluid, Graphene, Rheological and filtration properties.

Description:

In oil well drilling operations, the use of drilling fluids is essential to ensure borehole stability, cuttings transport, and effective pressure control. Specifically, overburden drilling fluids—used during the initial meters of the well where unconsolidated soils and soft rocks prevail—face the challenge of minimizing fluid loss into the formation while maintaining adequate rheological properties under varying conditions.

To address these issues, this study experimentally evaluates the effect of incorporating edge-functionalized graphene oxide (EGO) into a water-based overburden drilling fluid. The influence of different concentrations of EGO on key parameters such as plastic viscosity, apparent viscosity, yield point, and filtration capacity was investigated. In addition, the structural characterization of the nanomaterial was performed via Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), confirming the presence of oxygenated functional groups at the graphene edges, which are essential for stable dispersion in aqueous media.

The results show that the addition of EGO significantly enhances the rheological performance of the fluid, increasing internal flow resistance and solid suspension capacity—even under simulated downhole thermal conditions. Moreover, a substantial reduction in filtrate volume and the formation of thinner, low-permeability filter cakes were observed. These effects were achieved at low additive concentrations (0.2–0.4 ppb), supporting the technical and economic feasibility of field-scale implementation.

Overall, the findings of this work suggest that edge-functionalized graphene oxide is a promising additive for the design of advanced drilling fluids, adaptable to different depths and operational scenarios, without compromising system integrity or incurring substantial formulation costs.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Director PhD. Enrique Mejia Ospino. Codirector MSc. Wilmar Antonio Contreras Toloza.

Introducción

La aplicación de la nanotecnología en la industria del petróleo se está convirtiendo rápidamente en un área imperativa para la investigación y el desarrollo (Pei y Cheng, 2012); En esta área se están realizando investigaciones para desarrollar fluidos de perforación modificados con nanopartículas con el objeto de mejorar sus propiedades o de mantenerlas en una amplia gama de condiciones operativas.

El éxito de un programa de perforación depende de la composición y propiedades del fluido de perforación utilizado para la operación; este, también llamado lodo, es un componente integral del proceso de perforación debido a que presta varias utilidades y cuya composición comprende viscosificantes, un fluido base (agua, aceite, etc.), densificantes, entre otros, circulando en circuito dentro del agujero por el interior de la tubería, impulsado por bombas y finalmente, devuelto a la superficie por el espacio anular (espacio formado entre la pared del agujero y el diámetro exterior de la tubería) (Molina, s.f.).

Los lodos de perforación deben exhibir estabilidad física, química y térmica de una manera respetuosa con el medio ambiente. Las propiedades reológicas del lodo, como la viscosidad plástica, el límite elástico y la resistencia del gel, entre otras, y las características de pérdida de fluidos deben examinarse cuidadosamente para lograr el rendimiento óptimo del proceso de perforación (Perween, Thakur, Beg, Sharma, y Ranjan, 2019). Las funciones del lodo de perforación son mantener la presión hidrostática cuando la presión de formación excede la presión del lodo de perforación, enfriar la broca cuando se perfora en formaciones geológicas duras durante más tiempo y suspender y transportar los recortes perforados del subsuelo a la superficie. Sin embargo, estas funciones se pueden realizar correctamente con el tratamiento adecuado de la reología de los lodos de perforación (Aftab, Ismail, y Ibupoto, 2017).

Durante los últimos años se ha mostrado que la incorporación de nanopartículas dentro de la formulación de los lodos permite modificar algunas de sus propiedades en beneficio del proceso de perforación; uno de estos nanomateriales que ha causado gran interés, por sus propiedades o por su versatilidad en múltiples aplicaciones, es el óxido de grafeno; desde que se logró aislar por primera vez una lámina de grafeno en el año 2004, se han llevado a cabo diferentes trabajos de investigación en múltiples áreas de la ciencia, incluyendo la industria petrolera, donde se ha buscado obtener mejoras en diferentes propiedades debido a las características únicas que presenta no solo este nanomaterial sino también sus derivados.

El óxido de grafeno tiene propiedades únicas que lo hacen atractivo para la industria petrolera. Teniendo en cuenta diferentes estudios realizados en los últimos años, el grafeno y sus derivados han demostrado tener resultados positivos en varias propiedades de los fluidos de perforación, destacándose en su capacidad para mejorar el control de la permeabilidad de los yacimientos de petróleo y gas. El óxido de grafeno se puede agregar a los fluidos de perforación para mejorar su capacidad de penetrar en la formación y aumentar la eficiencia de la producción; la estabilización o prevención del hinchamiento de arcillas y el mejoramiento de las propiedades reológicas y de filtrado de los fluidos de perforación (Pakdaman, Osfour, Azin, Niknam, y Roohi, 2019).

Este proyecto de investigación que se llevó a cabo en el grupo de investigación del laboratorio de espectroscopia atómica y molecular de la universidad industrial de Santander, surge con el fin de evaluar el *Edge Graphene Oxide* (EGO) como aditivo para mejorar las propiedades reológicas y de filtración de un fluido de perforación a base de agua, comparándolo con el mismo fluido sin la adición del óxido, y a su vez con otros aditivos utilizados actualmente en la industria.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Evaluar experimentalmente el efecto de incorporar nanopartículas de EGO a un fluido de perforación overburden a base de agua, sobre sus propiedades reológicas y de filtración.

1.2. Objetivos específicos

- Sintetizar las nanopartículas de Grafeno Oxidado en los Bordes (EGO) a partir de grafito.
- Evaluar las propiedades reológicas y de filtración del lodo con nanopartículas de EGO incorporadas a distintas concentraciones.

2. Marco teórico

2.1. Reología

La reología es una disciplina científica que estudia la deformación y el flujo de la materia, con especial atención a los materiales que exhiben propiedades tanto líquidas como sólidas. Su nombre proviene del griego *rheo* (fluir) y *logos* (estudio), y fue adoptado para describir esta área del conocimiento centrada en el análisis de la respuesta de los materiales ante esfuerzos aplicados.

Aunque la reología podría abarcar fenómenos complejos en ámbitos como la mecánica de fluidos, la aeronáutica o la ciencia de materiales, su enfoque práctico suele restringirse a configuraciones simples de deformación, como las que se presentan en flujo laminar o esfuerzos de corte uniforme (CIED y PDVSA, 2002). A través del estudio de estas respuestas, es posible establecer modelos matemáticos o relaciones constitutivas que permiten predecir el comportamiento del material bajo distintas condiciones operativas (Hawker, Robinson, y Vogt, 2002).

Desde esta perspectiva, la reología persigue dos objetivos principales. Por un lado, busca predecir el comportamiento macroscópico de los fluidos en condiciones de procesamiento, lo cual es esencial para el diseño y operación de equipos industriales. Por otro lado, permite estudiar de forma indirecta la microestructura del material mediante la observación de sus propiedades reológicas, evaluando así el efecto de variables como la temperatura, la concentración de aditivos o la velocidad de deformación (Hawker y cols., 2002).

Los materiales de interés para la reología incluyen una amplia gama de sustancias que se sitúan entre el comportamiento de un fluido viscoso newtoniano y el de un sólido elástico ideal. Entre ellos se encuentran productos industriales y biológicos como pinturas, grasas, mayonesa, sangre, yogurt, y por supuesto, los lodos de perforación (Hawker y cols., 2002; Contreras, 2015).

2.1.1 Conceptos básicos de reología

Los fundamentos de la reología se centran en la relación entre tensión y deformación, tanto en materiales sólidos como en fluidos. En materiales sólidos idealmente elásticos, como los descritos por la ley de Hooke, la tensión (τ) es directamente proporcional a la deformación unitaria (γ), según la Ecuación (1):

$$\tau = G \cdot \gamma \tag{1}$$

donde G es el módulo de corte, una propiedad intrínseca del material.

En fluidos newtonianos, la tensión es proporcional a la tasa de deformación $\dot{\gamma}$, que representa el cambio temporal de la deformación:

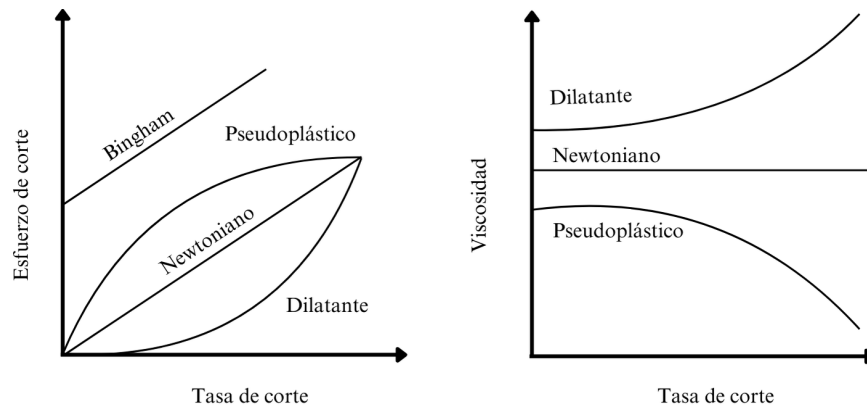
$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} \tag{2}$$

Aplicando esta relación, se obtiene la ley de viscosidad de Newton (Ecuación 3):

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \tag{3}$$

donde η es la viscosidad dinámica del fluido (en Pa·s o cP; 1000 cP = 1 Pa · s).

Figura 1
Representación gráfica de las ecuaciones de diferentes modelos reológicos.



Nota Tomada de An introduction to rheology, por Barnes et al. 1989

Como se observa en la Figura 1, en los fluidos no newtonianos la relación entre τ y $\dot{\gamma}$ no es

lineal. La viscosidad aparente $\eta(\dot{\gamma})$ depende del tipo de flujo, de manera que η deja de ser constante y se convierte en una función del gradiente de velocidad. Esto refleja efectos estructurales, tiempos de relajación y memoria del material (María Nuñez, 2001).

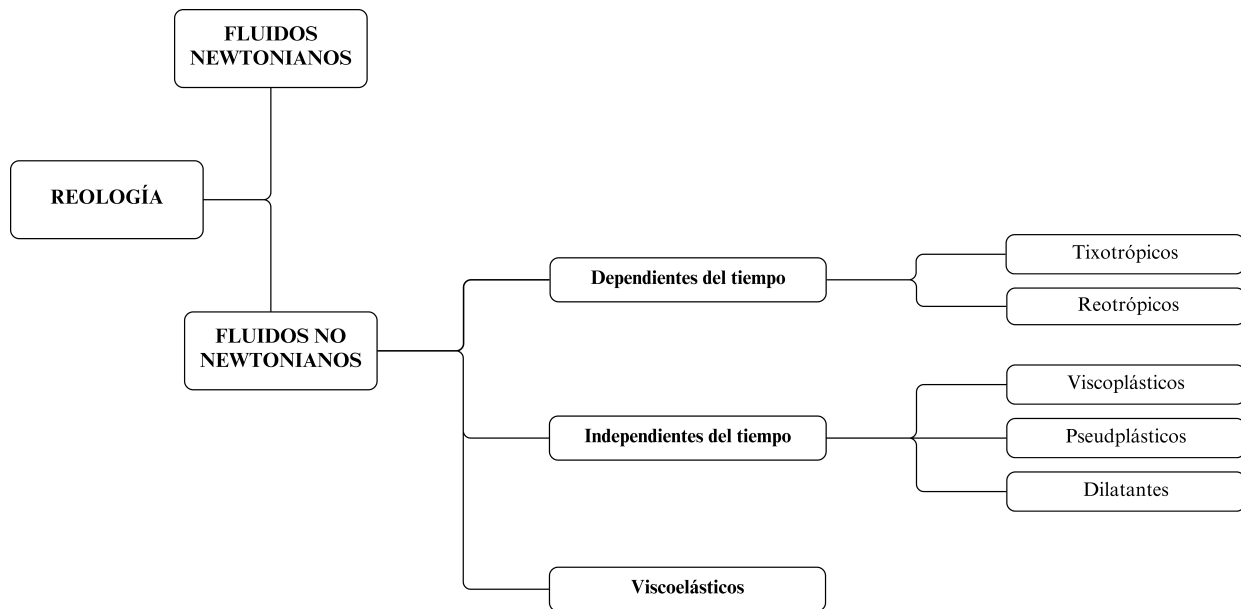
2.1.2 Modelos reológicos de fluidos no newtonianos

Para fluidos no newtonianos, la relación entre tensión y tasa de deformación se describe mediante:

$$\mu(\dot{\gamma}) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \tag{4}$$

Figura 2

Clasificación de los fluidos según su comportamiento reológico.



Nota Elaboración propia.

A continuación, se presentan las ecuaciones constitutivas para distintos modelos reológicos (Figura Figura 2):

2.1.2.1 Ley de la potencia (Power Law):

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \tag{5}$$

- Si $n > 1$: fluido *dilatante*. - Si $n < 1$: fluido *pseudoplástico*.

2.1.2.2 Modelo de Bingham:

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (6)$$

2.1.2.3 Fluido newtoniano:

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (7)$$

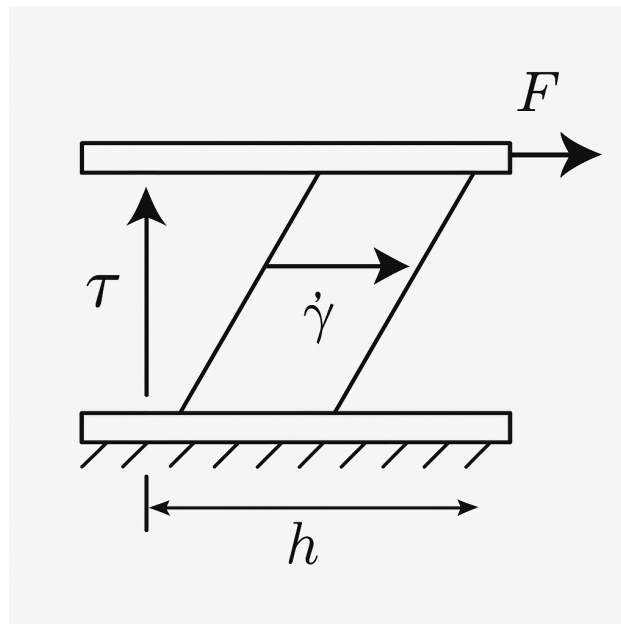
2.1.2.4 Modelo de Herschel-Bulkley:

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (8)$$

Este último es ampliamente utilizado para describir el comportamiento real de lodos de perforación.

2.1.3 Esfuerzo de corte (Shear stress) y tasa de corte (Shear rate)**Figura 3**

Representación del esfuerzo de corte τ y la tasa de corte $\dot{\gamma}$ entre dos placas paralelas.



Nota Imagen adaptada de Rheology basics Fluidan,s.f.

El esfuerzo de corte se define como:

$$\tau = \frac{F}{A} \tag{9}$$

donde F es la fuerza tangencial y A el área de aplicación. La tasa de corte, en configuración entre placas paralelas, se expresa como:

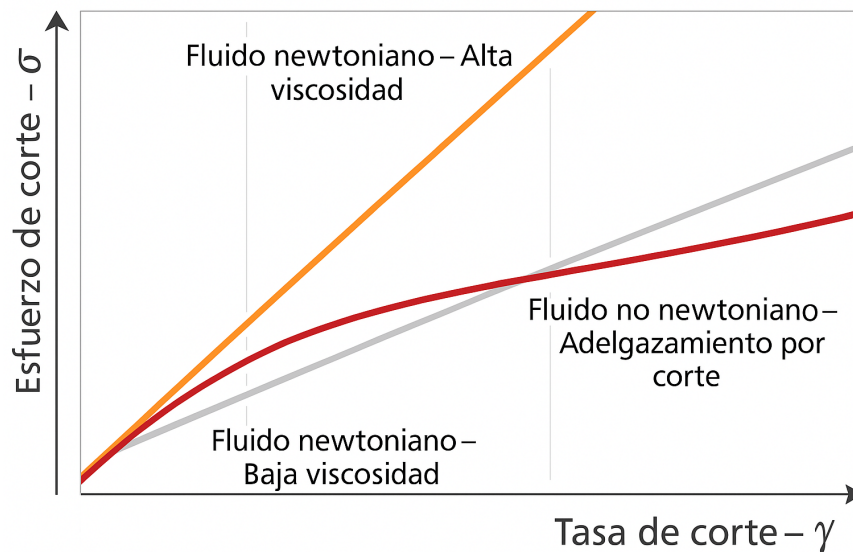
$$\dot{\gamma} = \frac{v}{h} \tag{10}$$

donde v es la velocidad de la placa superior y h la distancia entre placas. Estas relaciones se aplican bajo condiciones de flujo laminar y permiten establecer el comportamiento reológico del fluido.

En materiales pseudoplásticos, el modelo más empleado es el de Herschel-Bulkley, descrito nuevamente en la Ecuación (8).

Figura 4

Relación entre esfuerzo de corte y tasa de corte para distintos tipos de fluidos. Imagen.



Nota Imagen adaptada de Rheology basics Fluidan,s.f.

2.2. Fluido de perforación

Un fluido de perforación es una mezcla compleja compuesta por una fase líquida y una fase sólida, empleada para facilitar la remoción de ripios durante la perforación de pozos. La fase líquida

puede estar constituida por agua, aceite, o una mezcla de ambos (como en el caso de las emulsiones), mientras que la fase sólida está formada por partículas coloidales de arcillas en suspensión, que requieren aditivos químicos para optimizar sus propiedades físicas y reológicas (Salas, 2000; Hawker y cols., 2002). Este tipo de fluido es comúnmente denominado “lodo de perforación” en la práctica petrolera (CIED y PDVSA, 2002).

2.2.1 Composición de los fluidos de perforación

Los componentes del fluido se incorporan desde superficie y varían según las necesidades operativas. La fase líquida incluye agua, gasoil o petróleo, mientras que la fase sólida puede incluir minerales y sales provenientes de la interacción con la formación geológica atravesada (Salas, 2000; Hawker y cols., 2002). La mezcla se modifica con diversos aditivos, como agentes densificantes (barita, carbonato de calcio, sales solubles), viscosificantes (arcillas, polímeros), y emulsificantes que aumentan la capacidad del lodo para transportar recortes y mantenerlos en suspensión (CIED y PDVSA, 2002).

2.2.1.1 Fase continua. En los lodos base agua, el agua constituye la fase continua. Esta puede contener sales disueltas como sodio (Na^+), calcio (Ca^{2+}) y oxhidrilos (OH^-), los cuales influyen significativamente en el comportamiento del sistema. Altas concentraciones de cationes pueden inhibir la hidratación de arcillas, mientras que los iones oxhidrilo regulan el pH, mejoran la dispersión de sólidos y reducen la corrosión (CIED y PDVSA, 2002).

2.2.1.2 Fase dispersa. La fase dispersa está constituida por sólidos en suspensión o glóbulos de hidrocarburos. Cuando se incorpora petróleo a un lodo base agua, se incrementa la viscosidad, se disminuye la pérdida de fluido a través de las paredes del pozo y se mejora el desempeño en situaciones como atascos diferenciales (Salas, 2000; CIED y PDVSA, 2002).

2.3. Propiedades fundamentales de los lodos de perforación

Las propiedades físicas y reológicas de los lodos de perforación son determinantes para seleccionar un sistema eficiente que garantice el transporte de recortes, la estabilidad del pozo, la lubricación de la broca y la protección de la formación. Estas propiedades se evalúan mediante instrumentos especializados, como el viscosímetro rotacional, siguiendo los lineamientos del estándar API RP 13B-1 / ISO 10414-1 (Alomair, Matar, y Alshaikh, 2017; Amador-Díaz, Veliz-Lorenzo, y Bataller-Venta, 2015).

2.3.1 Viscosidad.

Es una medida de la resistencia interna del lodo al flujo. Dado que los lodos presentan un comportamiento no newtoniano y tixotrópico, se requiere más de un parámetro para describir su respuesta al esfuerzo cortante. Una viscosidad adecuada garantiza un balance entre eficiencia hidráulica y capacidad de suspensión de sólidos (CIED y PDVSA, 2002; Hawker y cols., 2002).

2.3.2 Viscosidad plástica (VP).

Representa la fricción mecánica entre los sólidos suspendidos y el líquido bajo cizallamiento. Se calcula como:

$$VP \text{ (cP)} = \theta_{600} - \theta_{300} \quad (11)$$

Es crítica en sistemas densos para evitar sobrepresión y mantener una circulación fluida (CIED y PDVSA, 2002).

2.3.2.1 Viscosidad aparente (VA). Mide la viscosidad total del sistema bajo condiciones de flujo laminar. Se calcula con:

$$VA \text{ (cP)} = \frac{\theta_{600}}{2} \quad (12)$$

2.3.2.2 Esfuerzo de gel. Es la fuerza necesaria para romper la estructura gelificada del lodo tras un reposo. Es clave para mantener los recortes suspendidos en paradas de circulación y prevenir el asentamiento de sólidos (Hawker y cols., 2002).

2.3.2.3 Punto cedente (YP). Se refiere a la resistencia inicial del lodo a fluir. Está determinado por interacciones electroquímicas entre partículas, y se calcula con:

$$YP \left(\frac{\text{lb}}{100\text{ft}^2} \right) = \theta_{300} - VP \quad (13)$$

Un punto cedente alto puede indicar floculación por contaminantes como calcio o carbonatos (Hawker y cols., 2002).

2.3.2.4 pH (potencial de hidrógeno). Es la medida de la acidez o alcalinidad del fluido. Un pH entre 8.5 y 10.5 mejora la inhibición de arcillas y la acción de aditivos. Se ajusta con NaOH o KOH y en campo se mide con papel tornasol (CIED y PDVSA, 2002).

2.3.2.5 Cloruros. Son los aniones Cl^- provenientes de sales disueltas. Altas concentraciones pueden alterar la solubilidad de aditivos y provocar reacciones indeseadas en la formación (CIED y PDVSA, 2002).

2.3.2.6 Torta de filtrado. Es la capa de sólidos depositada en las paredes del pozo. Su espesor y permeabilidad afectan la estabilidad del agujero y la eficiencia del sellado contra pérdidas (CIED y PDVSA, 2002).

2.4. Parámetros operativos clave para la evaluación de lodos

Los parámetros operativos permiten analizar el desempeño de los lodos bajo condiciones reales de perforación. Su correcta interpretación es decisiva para ajustar la formulación y garantizar el éxito del proceso.

2.4.1 Filtración API:

Evalúa la pérdida de fluido hacia la formación. Un bajo volumen de filtrado indica buena capacidad de sellado, evitando invasiones y protegiendo la integridad del pozo (CIED y PDVSA, 2002).

2.4.2 Rendimiento de filtración:

Se refiere a la capacidad del lodo para retener sólidos. Un rendimiento bajo puede evidenciar la presencia de coloides o partículas finas que afectan la estabilidad del sistema.

2.4.3 Peso específico (densidad):

Expresado en g/cm^3 o lb/gal , determina la presión hidrostática ejercida sobre la formación. Es un factor clave para equilibrar presiones de formación y evitar arremetidas o pérdidas de circulación.

2.4.4 Dureza total:

Corresponde a la presencia de iones como Ca^{2+} y Mg^{2+} . Afecta la estabilidad química del lodo, pudiendo generar incrustaciones o alterar la acción de polímeros.

2.4.5 Alcalinidad:

Está relacionada con la capacidad del fluido para neutralizar ácidos. Su control es esencial para evitar corrosión, mantener la funcionalidad de aditivos y la dispersión de arcillas.

2.4.6 Proceso de rolado:

Describe la compactación del material en las paredes del pozo. Un mal control puede dificultar la circulación, provocar atrapamiento de tuberías o pérdidas localizadas.

En conjunto, las propiedades y parámetros aquí descritos constituyen el núcleo técnico para seleccionar, formular y ajustar un fluido de perforación eficaz, adaptado a las condiciones del yacimiento y a los objetivos operacionales de cada pozo.

2.5. Importancia de las propiedades reológicas

Las propiedades reológicas afectan directamente la capacidad del lodo para limpiar el pozo, mantener la suspensión de sólidos, reducir la fricción mecánica en la broca, y mejorar el desempeño hidráulico general. Un perfil reológico adecuado es esencial para optimizar la seguridad, eficiencia y sostenibilidad de la operación de perforación (Hewitt, 2017).

2.6. Funciones de los fluidos de perforación

Si bien en sus inicios el objetivo principal de los fluidos de perforación era actuar como vehículo para la remoción de recortes del pozo, en la actualidad estos cumplen múltiples funciones esenciales en el proceso de perforación (Ryen Caenn y Gray, 2011). A continuación, se describen sus funciones:

2.6.1 Lavado del fondo del pozo

El fluido de perforación genera un flujo líquido de alta velocidad al salir por los puertos de la broca. Este chorro es dirigido hacia el fondo del pozo con el propósito de remover los recortes acumulados, los cuales tienden a depositarse debido a la diferencia de presión entre el fluido de perforación y la formación geológica (Caili Dai, 2018).

2.6.2 Estabilidad del pozo

La estabilidad del pozo se refiere a la capacidad del pozo para mantener su forma y dimensiones originales durante y después de la perforación. Idealmente, un pozo debe conservar un perfil cilíndrico uniforme, sin colapsos, ensanchamientos ni deformaciones. Cuando el diámetro del pozo se amplía de manera no deseada, se compromete su integridad estructural, lo que puede dificultar su posterior estabilización .

El ensanchamiento del pozo puede generar una serie de complicaciones operativas, entre ellas: disminución de la velocidad anular, ineficiente remoción de recortes, incremento de la concentración de sólidos en el lodo, dificultad en la interpretación de registros de formación, aumento en los costos de cementación y calidad deficiente del revestimiento cementado.

Para prevenir estos efectos adversos, el control adecuado de las propiedades del lodo —especialmente su reología, densidad y capacidad de sellado— es fundamental. El diseño del fluido debe estar orientado a minimizar la invasión de filtrado, estabilizar las paredes del pozo y controlar las presiones de formación (CIED y PDVSA, 2002).

2.6.3 Suspensión y remoción de recortes

Una función esencial de los lodos de perforación es la capacidad de suspender los recortes generados por la broca, así como los aditivos y materiales densificantes añadidos al sistema. Esta función debe mantenerse bajo diversas condiciones de operación, tanto estáticas como dinámicas, garantizando al mismo tiempo que los recortes puedan ser removidos de manera eficiente por los equipos de control de sólidos en superficie (Hawker y cols., 2002).

Cuando los recortes de perforación no se mantienen en suspensión durante periodos de inactividad o baja circulación, tienden a sedimentarse y formar acumulaciones que pueden provocar puentes, rellenos en el espacio anular, o incluso el atascamiento de la sarta de perforación. Este fenómeno también puede generar pérdida de circulación y afectar la integridad del pozo (Salas, 2000).

Por otro lado, el asentamiento de materiales densificantes como la barita puede ocasionar variaciones significativas en la densidad del fluido, afectando la presión hidrostática y el control de la formación. Este tipo de asentamiento es más común en pozos de alto ángulo, donde las velocidades anulares son reducidas y la circulación del lodo no es suficiente para mantener los sólidos en suspensión de forma efectiva (CIED y PDVSA, 2002).

Un diseño adecuado del fluido, con propiedades reológicas que aseguren buena capacidad de transporte y suspensión, es fundamental para evitar estos problemas operativos.

2.6.4 Sellado de formaciones permeables

Una de las funciones clave del fluido de perforación es la capacidad de sellar o obturar las zonas permeables de la formación. Para ello, el sistema debe estar formulado de manera que deposite un revoque delgado, uniforme y de baja permeabilidad sobre las paredes del pozo. Este recubrimiento minimiza la invasión de filtrado hacia la roca, contribuyendo así a la estabilidad estructural del pozo y a la reducción de complicaciones durante la perforación (Salas, 2000).

Cuando el revoque es demasiado grueso o la tasa de filtración es elevada, pueden generarse problemas significativos, como incremento del torque y el arrastre, registros geofísicos de baja calidad, atascamiento de tuberías, pérdida de circulación, y daños a la formación productiva (CIED y PDVSA, 2002).

En el caso de formaciones altamente permeables, caracterizadas por grandes gargantas de poro, el lodo completo podría invadir el medio poroso dependiendo del tamaño de sus partículas. Para estas situaciones, es necesario incorporar agentes puenteantes que actúen como barrera física, bloqueando las aberturas más amplias y facilitando así la formación de un sello efectivo por parte de los sólidos del lodo (CIED y PDVSA, 2002).

2.6.5 Enfriamiento y lubricación de la barrena

Durante el proceso de perforación, se genera una cantidad considerable de calor como consecuencia de la fricción entre la barrena, las herramientas de perforación y la formación geológica, la cual presenta una temperatura natural conocida como “gradiente geotérmico”. Debido a esto, el fluido de perforación debe poseer una capacidad calorífica y conductividad térmica suficientes para recoger el calor en el fondo del pozo, transportarlo hasta la superficie y disiparlo hacia la atmósfera.

Adicionalmente, el lodo contribuye a la lubricación de la barrena mediante la incorporación de aditivos especiales que modifican la tensión superficial del sistema. Esta capacidad lubricante se manifiesta en la disminución de la torsión de la sarta, el aumento de la vida útil de la barrena y la reducción de la presión requerida por las bombas.

2.6.6 Control de las presiones de la formación

El control de las presiones de la formación es una función crítica del fluido de perforación. Si la presión ejercida por el pozo excede la presión de fractura de la formación, se producirá la pérdida de

fluidos hacia el interior de la misma. Por el contrario, si la presión del pozo cae por debajo de la presión de poro, los fluidos presentes en la formación pueden ingresar al pozo, lo que podría generar una explosión o un evento de “kick” (Stefan Z. Miska, 2022).

El gradiente de presión de formación corresponde a un valor promedio de aproximadamente 0.107 kg/cm^2 por metro de profundidad. El lodo debe generar una presión hidrostática suficiente para contrarrestar la presión de la formación, lo cual depende directamente de su densidad y de la profundidad del pozo. Por tanto, la densidad del fluido de perforación debe ser cuidadosamente ajustada para contener la presión de la formación y evitar la intrusión de fluidos hacia el interior del pozo.

2.6.7 Soporte sustantivo del peso de la sarta de perforación

A medida que se alcanzan mayores profundidades durante la perforación, el peso total que debe soportar el equipo en superficie se incrementa considerablemente. Sin embargo, al encontrarse la sarta de perforación sumergida en el fluido de perforación, actúa sobre ella un empuje ascendente según el principio de Arquímedes. Este fenómeno, conocido como efecto de flotación, depende tanto de la profundidad a la que se encuentra la tubería como de la densidad del fluido que la rodea.

El peso efectivo de la sarta y de la tubería de revestimiento dentro del pozo es menor que su peso en el aire, ya que se encuentra modificado por este efecto de flotación. En consecuencia, un aumento en la densidad del lodo reduce el peso que debe ser sostenido por el equipo de superficie, contribuyendo así a una operación más eficiente y segura.

2.6.8 Minimización de daños al yacimiento

Una de las prioridades durante la perforación de zonas productoras es evitar cualquier tipo de daño que pueda comprometer la capacidad del yacimiento para producir hidrocarburos. Se considera daño a la formación cualquier reducción en la porosidad o en la permeabilidad natural de la roca, lo cual puede traducirse en una disminución significativa del flujo hacia el pozo.

Este tipo de daño puede originarse por múltiples mecanismos. Entre los más comunes se encuentran la invasión de sólidos del lodo o de los recortes de perforación, así como interacciones químicas no deseadas entre los componentes del lodo y los minerales de la formación. También pueden ocurrir daños mecánicos causados por la acción directa del conjunto de perforación sobre la estructura del yacimiento (CIED y PDVSA, 2002).

La presencia de daño se evidencia, entre otros factores, por una caída de presión en la zona próxima al pozo durante la producción, lo que se conoce como daño superficial o daño por presión diferencial. Para mitigar este efecto, es esencial diseñar fluidos de perforación con propiedades de filtración controladas, química compatible con la formación, y bajo contenido de sólidos invasivos.

2.6.9 Control de la corrosión

Los componentes metálicos que conforman la columna de perforación y la tubería de revestimiento están en constante contacto con el fluido de perforación, lo que los expone a diferentes tipos de corrosión. Esta degradación puede verse agravada por la presencia de gases disueltos como oxígeno (O_2), dióxido de carbono (CO_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S), los cuales pueden actuar como agentes corrosivos tanto en superficie como en el fondo del pozo.

Uno de los factores que influye directamente en la corrosión es el pH del sistema. En general, un pH bajo favorece los procesos corrosivos, mientras que valores más alcalinos tienden a inhibirlos. Por esta razón, una función importante del fluido de perforación es mantener condiciones químicas que minimicen la corrosión, protegiendo así la integridad de los equipos durante la operación (CIED y PDVSA, 2002).

2.6.10 Obtención de información estratigráfica

El fluido de perforación arrastra hacia la superficie los recortes generados por la broca durante el avance del pozo. Estos recortes permiten obtener información valiosa sobre las características de las formaciones atravesadas, tales como la presencia de petróleo o gas, así como ciertas propiedades físicas del material geológico (Caili Dai, 2018).

2.6.11 Suspensión de cortes y sólidos al interrumpirse la perforación

Cuando se interrumpe la circulación del fluido de perforación durante un determinado periodo de tiempo, los recortes generados no se depositan inmediatamente en el fondo del pozo. Esto se debe a una propiedad del lodo conocida como *gelatinosidad*, la cual le permite adquirir una estructura semisólida en reposo. Esta característica evita que los sólidos caigan al fondo, previniendo así obstrucciones, dificultades al introducir la tubería y complicaciones al reanudar la perforación.

2.6.12 Transmisión de potencia

El fluido de perforación actúa como medio para transmitir la potencia hidráulica requerida hasta el fondo del pozo, a través de las boquillas ubicadas en la barrena (Sierra Baena, 2000). Al salir por estos puertos, el fluido genera un chorro de alta presión que transfiere la energía proporcionada por las bombas hacia la zona de contacto con la formación, lo que mejora la eficiencia en la rotura de la roca y aumenta la velocidad de perforación (Caili Dai, 2018).

2.6.13 Transmisión de energía hidráulica a las herramientas y a la mecha

Durante la perforación, uno de los propósitos clave del fluido de perforación es actuar como medio transmisor de energía hidráulica hacia la mecha y las herramientas situadas en el fondo del pozo. Esta energía se canaliza principalmente a través de las boquillas de la broca, donde el

lodo emerge a alta presión, facilitando la remoción de recortes y contribuyendo directamente a la velocidad de penetración (*Rate of Penetration – ROP*) (CIED y PDVSA, 2002).

En pozos someros —aquellos cuya profundidad es relativamente baja, generalmente menores a 1.500 metros— la presión hidráulica disponible en la columna de perforación suele ser suficiente para garantizar una limpieza eficaz de la mecha. Sin embargo, a medida que la profundidad del pozo aumenta, la presión diferencial disponible disminuye progresivamente, y llega un punto en el que puede volverse insuficiente para mantener una limpieza adecuada en la zona de corte de la broca (CIED y PDVSA, 2002).

Para contrarrestar este efecto, es esencial ajustar cuidadosamente las propiedades del lodo, como la densidad, viscosidad y caudal, de modo que se optimice la entrega de energía hidráulica a mayores profundidades. Además de facilitar la remoción de recortes, esta energía es fundamental para el funcionamiento de herramientas direccionales y sistemas de adquisición de datos como los Motores de Fondo (Downhole Motors), los sistemas de Medición Mientras Se Perfora (MWD, por sus siglas en inglés) y Registro Mientras Se Perfora (LWD, por sus siglas en inglés), que requieren flujo y presión continua para operar eficientemente.

En síntesis, la gestión adecuada de la energía hidráulica transmitida por el fluido no solo mejora la eficiencia del proceso de perforación, sino que también habilita el uso de tecnologías críticas para la toma de decisiones en tiempo real.

2.6.14 Minimizar el impacto ambiental.

En las operaciones de perforación de pozos petroleros, los fluidos de perforación, una vez utilizados, se convierten en residuos que deben ser gestionados de manera ambientalmente responsable. Cada país tiene una normativa diferente. Específicamente, en Colombia, la normativa ambiental establece directrices claras para la disposición final de estos fluidos, con el objetivo de minimizar su impacto en los ecosistemas y en la salud humana.

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, a través de la Resolución 0855 de 2022, regula los casos en que no se requiere adelantar un trámite de modificación de licencia ambiental para ciertas actividades del sector hidrocarburos, siempre que se cumplan con las condiciones técnicas y ambientales establecidas, incluyendo la integridad mecánica del pozo y la seguridad de la formación receptora (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

Asimismo, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) ha definido Términos de Referencia específicos para la elaboración de Estudios de Impacto Ambiental (EIA) en proyectos de perforación exploratoria. Estos Términos exigen describir detalladamente las actividades de perforación, las tecnologías a emplear y las medidas de manejo ambiental orientadas a la mitigación de impactos, incluyendo la gestión de fluidos de perforación (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2020).

Entre las prácticas comúnmente aceptadas para la disposición ambientalmente segura de estos fluidos se encuentran:

- **Inyección en formaciones geológicas profundas:** Consiste en disponer los fluidos dentro de

formaciones subterráneas confinadas, evitando cualquier riesgo de contaminación de acuíferos o del medio superficial.

- **Tratamiento y reutilización:** A través de procesos físico-químicos, los fluidos pueden ser tratados para reducir su carga contaminante y ser reaprovechados en futuras operaciones de perforación.
- **Transporte a sitios autorizados:** Cuando no es viable la inyección o el tratamiento en sitio, los residuos deben ser llevados a instalaciones con licencia ambiental, que garanticen una disposición final segura conforme a la normativa vigente.

El cumplimiento riguroso de estas disposiciones es esencial para reducir los impactos negativos asociados a la operación petrolera. Un manejo responsable de los fluidos de perforación no solo protege los recursos naturales, sino que también garantiza la sostenibilidad a largo plazo de las actividades del sector hidrocarburos.

2.7. Condiciones operativas exigentes

En el contexto de fluidos de perforación, se consideran *condiciones operativas exigentes* aquellos escenarios de pozo que combinan factores térmicos, hidráulicos y mecánicos capaces de comprometer la estabilidad reológica de un lodo convencional (Darley y Gray, 1988; American Petroleum Institute, 2019). A continuación se describen los criterios adoptados en este estudio para clasificar dichas condiciones, junto con sus implicaciones prácticas:

- a) **Temperatura elevada de fondo (60 °C–90 °C).** Valores superiores a 60 °C aceleran la disrupción de enlaces no covalentes en polímeros naturales (p. ej., PAC, GX) y reducen la viscosidad en reposo, disminuyendo la capacidad de suspensión de recortes. Un lodo adecuado debe mantener su integridad estructural y su comportamiento pseudoplástico dentro de este intervalo térmico.
- b) **Gradientes de presión y caudales de circulación altos.** En pozos profundos o de diámetros reducidos se requieren tasas de bombeo elevadas ((180–280) L/min) para garantizar la limpieza del agujero. El fluido debe exhibir un índice de flujo $n < 1$ que permita disminuir la viscosidad aparente a altas tasas de cizallamiento, limitando las pérdidas de presión y el consumo energético.
- c) **Alta generación instantánea de recortes.** Velocidades de penetración superiores a 15 m/h aumentan la carga sólida en suspensión. El lodo debe presentar un esfuerzo umbral (τ_0) y una viscosidad plástica suficientes para transportar recortes de hasta 3 mm sin sedimentación, incluso en secciones inclinadas.

- d) **Trayectorias desviadas o horizontales.** Ángulos de desviación mayores a 45° incrementan la tendencia al asentamiento de sólidos y al pegado diferencial. Se demanda una ventana operativa donde la viscosidad en reposo sea elevada, pero la viscosidad bajo flujo permanezca moderada.
- e) **Contaminantes iónicos y sólidos finos.** La presencia de Ca^{2+} , Mg^{2+} o sólidos coloidales puede flocular arcillas y degradar polímeros. Los aditivos deben tolerar estas especies, manteniendo la dispersión y la estabilidad del sistema.

2.8. Clasificación de los fluidos de perforación

La clasificación de los lodos de perforación se realiza con base en tres criterios principales: la alcalinidad de la fase fluida, el grado de dispersión y el tipo de productos químicos empleados en su formulación.

2.8.1 Lodo a base de agua (WBM)

Los lodos a base de agua (Water-Based Muds, WBM) son aquellos en los que la fase continua es el agua, que actúa como medio de suspensión para los sólidos coloidales y materiales añadidos. Esta formulación representa una de las opciones más utilizadas en la perforación de pozos debido a su bajo costo, versatilidad y menor impacto ambiental en comparación con otros tipos de lodos (Salas, 2000; CIED y PDVSA, 2002; Hossain y Al-Majed, 2015).

En condiciones normales, el agua representa al menos el 50 % del volumen total de la mezcla. Para modificar sus propiedades reológicas, de filtrado e inhibición de arcillas, se utilizan diversos aditivos como bentonita, cal, lignitos, polímeros, y agentes inhibidores específicos. No obstante, estos lodos son menos estables a temperaturas superiores a 220 °F y pueden requerir ajustes adicionales en presencia de sales o contaminantes.

A continuación, se detallan las principales clases de lodos a base de agua:

- **Lodos de agua fresca no inhibidos:** Contienen agua dulce con bajo contenido salino y arcillas sódicas. Son económicos, de composición sencilla, y adecuados para perforaciones poco profundas sin presencia significativa de arcillas hidratables.
- **Lodos de agua fresca con bentonita:** Comúnmente utilizados hasta profundidades de 4000 pies. Se les puede añadir pequeñas cantidades de cal para reducir costos y mejorar el revoque. Son adecuados para formaciones duras.
- **Lodos inhibidos:** Contienen compuestos que impiden la hidratación y desintegración de arcillas y lutitas. Se preparan con agua salada, cal, yeso o salmueras de formiato. La inhibición se logra mediante el intercambio iónico, transformando arcillas sódicas en cálcicas.

- **Lodos a base de KCl y polímeros:** Diseñados para encapsular e inhibir mecánica y químicamente las arcillas hidratables de la formación, previniendo derrumbes y el ensanchamiento del pozo.
- **Lodos tratados con lignosulfonato de cromo:** Dispersan partículas de arcilla, reducen la viscosidad y el gel del sistema, e inhiben las arcillas gracias a la acción del cromo.
- **Lodos en agua salada:** Contienen una alta concentración de cloruro de sodio (hasta 315.000 ppm). Son empleados en formaciones salinas o para controlar la hidratación de lutitas. También pueden incluir sales de calcio, potasio y magnesio, según el propósito específico.
- **Lodos nativos:** Se utilizan en etapas iniciales de perforación (hasta 1500 pies). Son preparados con agua y bentonita, y ocasionalmente cal. No requieren control químico ni monitoreo de filtrado.
- **Lodos espumosos o con niebla:** Se emplean para perforaciones con severas pérdidas de circulación. Se forman inyectando gas en agua o en soluciones gelificadas con agentes espumantes.
- **Lodos tratados con cal o yeso:** Utilizados en formaciones específicas (como anhidritas). Presentan buena tolerancia a sales, pero pueden gelificarse a altas temperaturas.
- **Lodos de salmueras de formiato:** Compatibles con aguas formacionales ricas en sulfatos y carbonatos, reducen la posibilidad de daño por precipitación de sales.

2.8.2 *Lodos a base de aceite (OBM)*

Los lodos base aceite, (Oil-Based Muds, OBM) son sistemas en los que la fase continua está compuesta por aceite, el cual actúa como medio de suspensión para la fase dispersa, que puede contener sólidos coloidales o pequeñas cantidades de agua, como ocurre en el caso de las emulsiones inversas (CIED y PDVSA, 2002). En estos sistemas, el agua permanece en forma de pequeñas gotas dispersas, y para garantizar la estabilidad de la mezcla es necesario el uso de agentes emulsificantes (Salas, 2000).

Este tipo de lodos puede contener hasta un 5 % de agua, y está formulado con mezclas de álcalis, ácidos orgánicos, estabilizantes, asfaltos oxidados y aceites minerales o diesel de alto punto de inflamación. Gracias a su composición, los lodos base aceite ofrecen ventajas como mayor lubricidad, buena estabilidad térmica y menor interacción con formaciones reactivas o altamente salinas.

Este tipo de fluido se utiliza principalmente en formaciones de alta temperatura o en condiciones donde los lodos a base de agua presentan reacciones adversas con la formación, como hinchamiento de arcillas o inestabilidad química (Hossain y Al-Majed, 2015).

A continuación, se describen los principales tipos de lodos base aceite:

- **Lodos base aceite con control de filtrado:** Se utilizan en formaciones con presión subnormal o zonas donde existe pérdida de circulación. El control de filtrado permite preservar la estabilidad del pozo y reducir la invasión de filtrado hacia la formación.
- **Lodos base aceite con relación 50/50:** Son empleados en regiones ambientalmente sensibles donde el manejo de recortes contaminados representa un desafío. La proporción equilibrada entre agua y aceite reduce el volumen de fluido oleoso, facilitando el tratamiento y disposición de residuos.
- **Lodos base aceite sin control de filtrado:** Estos sistemas priorizan una alta tasa de penetración y menores costos iniciales. No obstante, presentan menor estabilidad térmica y requieren una mayor cantidad de aceite, lo que puede representar una desventaja operativa en pozos profundos o de alta temperatura.
- **Lodos 100 % aceite:** Están compuestos exclusivamente por aceite mineral o sintético, sin presencia de agua. Ofrecen alta lubricidad y baja reactividad con la formación, aunque su uso está limitado por consideraciones ambientales y de costo.
- **Sistemas sintéticos:** También conocidos como “lodos basados en pseudo-aceite”, son una alternativa más reciente que busca imitar las propiedades de los lodos tradicionales base aceite, pero con menor impacto ambiental. Sin embargo, algunos compuestos presentan toxicidad acuática, y su alto costo por barril —que puede aumentar significativamente en caso de pérdidas de circulación— limita su aplicación. Además, su estabilidad a altas temperaturas puede ser inferior a la de los sistemas convencionales.

2.8.3 Lodos base gaseosa

Los lodos base gaseosa son fluidos de perforación cuya fase continua está compuesta por un gas, generalmente aire, nitrógeno, gas natural u otros gases inertes. Se emplean en zonas donde las pérdidas de circulación son severas, así como en formaciones extremadamente duras o altamente consolidadas, donde se requiere maximizar la tasa de penetración (Salas, 2000).

Este tipo de lodo ofrece ventajas operativas importantes, entre ellas una mayor eficiencia de perforación, menor desgaste de la mecha y un control más estricto sobre la invasión de fluidos a la formación. Además, su uso minimiza el daño a las zonas productivas y permite una evaluación inmediata y continua de la presencia de hidrocarburos.

Los principales tipos de lodos base gaseosa incluyen:

- **Lodos con aire:** Se utilizan aire seco, gases inertes o mezclas de aire con pequeñas cantidades de agua como fluido de perforación. Son particularmente útiles en formaciones consolidadas y secas, donde el ingreso de líquidos podría generar lodo no deseado que afecte el desempeño de la broca. La tasa de penetración es generalmente superior en comparación con otros tipos de lodos, y los recortes se pulverizan y transportan a alta velocidad hacia la superficie.

Sin embargo, estos sistemas carecen de propiedades suspensivas, por lo que requieren altas velocidades anulares para transportar eficientemente los sólidos. No se recomienda su uso en pozos con paredes inestables, zonas con alta presión de poro o presencia de agua.

- **Lodos espumosos y nieblas:** Se obtienen inyectando agentes espumantes y agua (o base gel) en una corriente de gas, generando una espuma viscosa y estable. Estos sistemas presentan una mayor capacidad de acarreo, atribuible a su viscosidad más que a la velocidad de flujo. Los lodos aireados con base gel son útiles para reducir la presión hidrostática, prevenir pérdidas de circulación en zonas de baja presión e incrementar la velocidad de perforación.

2.8.4 Lodos nativos

Los lodos nativos son fluidos de iniciación utilizados en las primeras etapas de perforación, generalmente hasta profundidades de 1500 pies. Se preparan a partir de una mezcla de agua y bentonita, aunque por razones económicas es común que parte de la bentonita sea sustituida por cal, formando una lechada espesa de bajo costo (Salas, 2000).

Este sistema no requiere un control riguroso de aditivos químicos, ya que opera con densidades que no superan las 10 lb/gal y no necesita regulación de filtrado ni ajuste detallado de las propiedades reológicas. Durante la perforación, las arcillas presentes en la formación pueden integrarse al fluido, mejorando su capacidad de acarreo y suspensión de sólidos.

2.8.4.1 Características principales:

- Es un lodo de iniciación económico y de uso frecuente en zonas superficiales, aunque puede emplearse ocasionalmente a mayores profundidades.
- Favorece la formación de un revoque protector sobre las paredes del pozo.
- Su capacidad de acarreo puede mejorarse con la adición de bentonita adicional.
- La viscosidad puede controlarse mediante dilución, sedimentación o eliminación mecánica de sólidos.
- Se utiliza como primer sistema circulante durante los primeros 1500 pies de perforación.
- El aumento de sólidos permite incrementar la presión hidrostática del sistema, ayudando a prevenir arremetidas.
- El pH se mantiene generalmente en un rango entre 8 y 9.5.

2.8.4.2 Ventajas:

- Bajo costo de preparación y operación, lo que representa un ahorro de tiempo y dinero.
- Buena capacidad de acarreo de ripios y limpieza eficiente del hoyo.

- Favorece la formación de un revoque protector en las zonas perforadas.
- Permite mantener el control sobre la viscosidad del fluido.
- Contribuye al control del filtrado gracias a los aditivos naturales contenidos en la mezcla.

2.8.4.3 Desventajas:

- No ofrece control preciso del pH.
- La presencia de sales y dureza en el agua interfiere con la hidratación de la bentonita, reduciendo su eficacia.
- Requiere agitación constante para evitar la floculación de sólidos.
- Aunque no es tóxico, las partículas en suspensión pueden causar irritación en los ojos y vías respiratorias.

2.9. Aditivos comerciales

Los aditivos comerciales son componentes clave en la formulación de los fluidos de perforación. Su función es mejorar propiedades como la reología, la densidad, el control de filtrado, la estabilidad frente a arcillas, la prevención de la corrosión y la inhibición de espuma. La correcta selección de estos aditivos depende de las condiciones geológicas y operativas del pozo. A continuación, se describen los principales tipos de aditivos utilizados en la industria.

2.9.1 Aditivos para el control de filtrado

Estos aditivos minimizan la pérdida de fluido hacia la formación, formando una torta de filtración delgada y de baja permeabilidad. Esto previene la migración de partículas sólidas del lodo y evita el bloqueo de poros en la roca. Entre los más utilizados se encuentran la bentonita sódica, la poliacrilamida y derivados de celulosa como el PAC-L y la carboximetilcelulosa (CMC) (Hernandez Pedreros y Manrique Osorio, 2018).

2.9.2 Aditivos para el control de densidad

Se emplean para ajustar la densidad del fluido, garantizando un adecuado control de la presión hidrostática y evitando problemas como el colapso del pozo o entradas no deseadas de fluidos. Los aditivos más comunes son la barita, la hematita y el carbonato de calcio (Hernandez Pedreros y Manrique Osorio, 2018).

2.9.3 Aditivos reológicos

Estos aditivos permiten modificar propiedades como la viscosidad plástica, la viscosidad aparente y la tixotropía, mejorando la capacidad del fluido para transportar sólidos y estabilizar el pozo. Se destacan la goma xantana, la carboximetilcelulosa y polímeros sintéticos de alto peso molecular (Hernandez Pedreros y Manrique Osorio, 2018).

2.9.4 Aditivos inhibidores de arcillas

Se utilizan para evitar la hidratación, disgregación o hinchamiento de arcillas tanto en la formación como en el fluido. Entre los principales se encuentran los lignosulfonatos, polímeros de tiosulfato y compuestos de amina, que actúan encapsulando partículas y estabilizando la fase sólida (Hernandez Pedreros y Manrique Osorio, 2018).

2.9.5 Aditivos anticorrosivos

Estos aditivos protegen las superficies metálicas de equipos y tuberías frente a la acción corrosiva del fluido. Pueden ser de origen orgánico o inorgánico, destacándose los inhibidores a base de ácidos sulfónicos y polímeros de amina (Hernandez Pedreros y Manrique Osorio, 2018).

2.9.6 Aditivos antiespumantes

Son utilizados para evitar la formación excesiva de espuma durante la circulación del fluido, lo cual puede afectar la eficiencia del sistema hidráulico. Entre los antiespumantes más comunes se encuentran los derivados de silicona y los poliglicoles (Hernandez Pedreros y Manrique Osorio, 2018).

2.9.7 Consideraciones adicionales

Además de los aditivos mencionados, existe una amplia gama de compuestos especializados cuya incorporación depende del tipo de fluido base, la profundidad del pozo, la presión, la temperatura y las características particulares de la formación. Su selección debe realizarse con base en criterios técnicos, económicos y ambientales, garantizando su compatibilidad y efectividad en las condiciones específicas de operación.

2.10. Componentes del lodo de perforación a estudiar

2.10.1 Celulosa polianiónica (PAC-L)

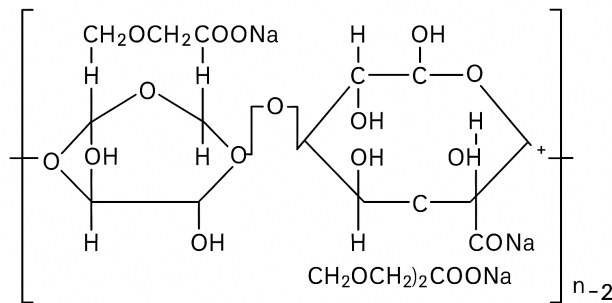
La celulosa polianiónica, también conocida como PAC-L (por sus siglas en inglés: *Polyanionic Cellulose – Low Viscosity*), es un derivado modificado de la celulosa que incorpora grupos aniónicos en su estructura molecular. Este aditivo es ampliamente utilizado en lodos de perforación base agua

por su capacidad para controlar la pérdida de fluido sin incrementar significativamente la viscosidad del sistema (Smith y Johnson, 2020).

En operaciones de perforación, el PAC-L favorece la formación de una torta de filtración delgada, densa y compacta, lo que reduce la invasión de fluidos hacia la formación y previene la contaminación del pozo. Además, debido a su carácter aniónico, puede interactuar con iones y minerales arcillosos presentes en el subsuelo, ayudando a inhibir el hinchamiento y la dispersión de arcillas. Estas propiedades son fundamentales para mantener la estabilidad del pozo y reducir el riesgo de atascamientos.

Figura 5

Estructura molecular representativa de la celulosa polianiónica (PAC-L)



Nota Imagen adaptada de .

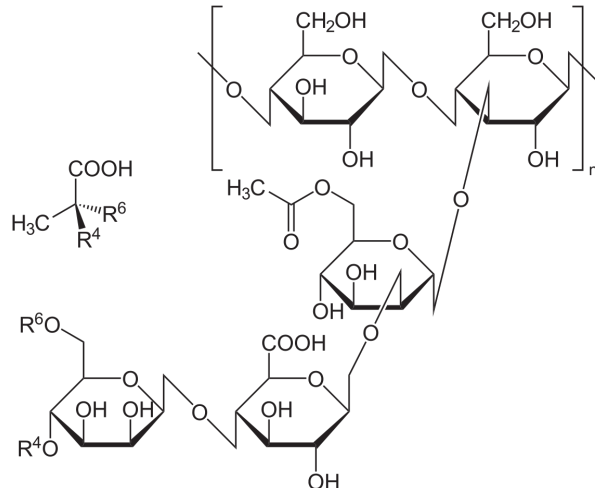
2.10.2 Goma xantana (GX)

La goma xantana es un polisacárido de alto peso molecular producido mediante fermentación bacteriana, comúnmente utilizado en fluidos de perforación debido a sus destacadas propiedades reológicas y estabilizantes. Su principal función consiste en incrementar la viscosidad aparente del lodo, lo cual favorece la suspensión de sólidos y el transporte eficiente de recortes, especialmente durante interrupciones en la circulación (García y Pérez, 2021).

Adicionalmente, la goma xantana contribuye al control de pérdidas de fluido mediante la formación de una torta de filtración estable y uniforme. Esta característica mejora la integridad del pozo, disminuye el riesgo de colapsos o atascamientos y permite una operación más segura y continua.

Figura 6

Estructura molecular representativa de la goma xantana



La goma xantana (GX) es un polisacárido de cadena parcialmente ramificada y semiflexible que, en medios acuosos, desarrolla redes tridimensionales estables. Al incorporarse a un lodo de perforación base agua, su respuesta reológica está dominada por tres mecanismos fisicoquímicos complementarios:

1. **Formación de una red estructural hidratada.** En solución, las macromoléculas de GX adoptan una conformación helicoidal que interacciona con el agua mediante puentes de hidrógeno y fuerzas electrostáticas. Con el aumento de la concentración, las cadenas se solapan y generan una matriz viscoelástica que restringe la movilidad tanto del solvente como de las partículas sólidas, elevando la viscosidad aparente y el esfuerzo cortante a bajas tasas de cizallamiento. Este efecto mejora la suspensión de recortes y la estabilidad global del sistema (Zatz y Knapp, 1984; Khan, Yusuf, y Sardar, 2018).
2. **Pseudoplasticidad inducida por alineación molecular.** Bajo cizallamientos elevados (altas *rpm*), las cadenas de GX tienden a orientarse en la dirección del flujo, lo que reduce la resistencia interna del fluido. La ruptura temporal de los enlaces no covalentes ocasiona una disminución pronunciada de la viscosidad aparente; este fenómeno se intensifica a concentraciones superiores de GX y explica la caída de esfuerzo observada en las curvas reológicas (Zatz y Knapp, 1984).
3. **Modulación del modelo de flujo.** La presencia de GX confiere al lodo un comportamiento que se describe con precisión mediante el modelo de Herschel–Bulkley, caracterizado por un esfuerzo de fluencia apreciable (τ_0) y una relación no lineal entre esfuerzo y tasa de corte. El incremento de GX aumenta el índice de consistencia (K) y disminuye el exponente de flujo (n), acentuando la naturaleza no newtoniana del sistema (Khalil y Jan, 2012).

En conjunto, estos mecanismos justifican que las formulaciones con mayor contenido de GX exhiban perfiles reológicos más robustos: elevan el esfuerzo de corte a bajas velocidades, optimizan la capacidad de suspensión de sólidos y mantienen una fluidez adecuada a altas velocidades gracias a su marcada pseudoplasticidad.

2.10.3 Barita

La barita (BaSO_4) es un sulfato de bario ampliamente utilizado como agente densificante en los fluidos de perforación, debido a su elevada densidad, baja solubilidad y estabilidad química. Su función principal es incrementar el peso específico del lodo para asegurar un control adecuado de la presión hidrostática ejercida en el pozo (Caenn, 2017).

Este control de presión es esencial para prevenir problemas operativos como la intrusión de fluidos de formación no deseados (conocidos como *kicks*) o la pérdida de circulación del lodo hacia zonas permeables. Gracias a su inercia química, la barita no altera significativamente otras propiedades del sistema, lo que la convierte en uno de los aditivos más utilizados en lodos de base acuosa y oleosa.

2.10.4 Óxido de grafito

El óxido de grafito es un derivado oxidado del grafito, una forma alotrópica del carbono que se encuentra de manera natural en la corteza terrestre. Se obtiene mediante la oxidación de escamas de grafito utilizando agentes fuertemente oxidantes, lo que introduce grupos funcionales oxigenados en su estructura laminar.

Este material presenta una estructura en capas y es altamente hidrofílico, lo que facilita su dispersión en medios acuosos. Además, posee una gran área superficial, buena estabilidad química y una notable capacidad para interactuar con otras sustancias. Estas propiedades han despertado un creciente interés en su estudio para aplicaciones potenciales en áreas como la purificación de agua, sensores, almacenamiento y conversión de energía.

El óxido de grafito es también un precursor clave en la producción de óxido de grafeno, el cual puede reducirse químicamente o térmicamente para obtener grafeno. Este último es un material bidimensional compuesto por una sola capa de átomos de carbono dispuestos en una red cristalina de tipo hexagonal. Su estructura se debe a la hibridación sp^2 del carbono, lo que deja un electrón libre por átomo en la capa de valencia, generando una nube electrónica delocalizada sobre toda la lámina. Esta particularidad confiere al grafeno propiedades excepcionales, como alta conductividad eléctrica y térmica, gran resistencia mecánica y transparencia óptica.

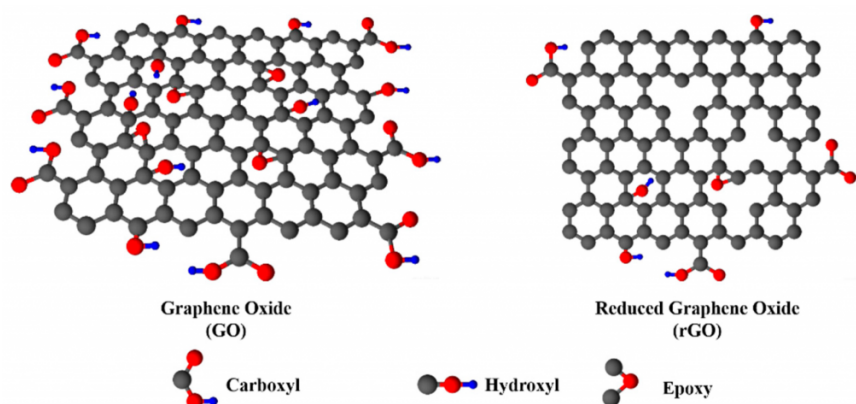
Gracias a estas características, el grafeno y sus derivados, como el óxido de grafito, son considerados materiales prometedores para el desarrollo de tecnologías avanzadas en campos como la electrónica, la energía, los materiales compuestos y los dispositivos biomédicos.

2.11. Óxido de grafeno (GO)

El óxido de grafeno (GO) es una forma funcionalizada del grafeno, obtenida típicamente mediante la oxidación química del grafito natural. Como se observa en la Figura 7 este proceso, se incorporan diversos grupos funcionales que contienen oxígeno, como carboxilos, epóxidos e hidroxilos, sobre la superficie y los bordes de las láminas. Estas modificaciones químicas alteran su estructura electrónica y confieren al GO propiedades únicas, como su alta dispersabilidad en agua y otros disolventes polares (Konios, Stylianakis, Stratakis, y Kymakis, 2014).

Figura 7

Representación gráfica del óxido de grafeno y óxido de grafeno reducido.



Nota Imagen adaptada de Stylianakis et al. (2014).

Aunque el óxido de grafeno conserva algunas propiedades fundamentales del grafeno —como su elevada conductividad térmica y resistencia mecánica—, su comportamiento electrónico cambia notablemente debido a la presencia de los grupos funcionales oxigenados, los cuales interrumpen la conjugación π en la red hexagonal del carbono. No obstante, mediante tratamientos térmicos o químicos es posible reducir parcial o totalmente estos grupos y recuperar, en cierta medida, las propiedades originales del grafeno, obteniéndose así óxido de grafeno reducido (rGO).

Gracias a su estructura funcionalizada y a su elevada relación superficie/volumen, el GO presenta una amplia gama de aplicaciones potenciales en distintos campos científicos y tecnológicos. Entre sus usos más destacados se encuentran:

- Como material activo en cátodos de baterías de iones de litio, mejorando la capacidad de carga y el rendimiento electroquímico.
- En sensores químicos y biológicos, debido a su capacidad de adsorción y funcionalización superficial.

- En la elaboración de materiales compuestos con propiedades mecánicas mejoradas.
- Como base para membranas de filtración selectiva en procesos de purificación de agua.
- En dispositivos optoelectrónicos y películas conductoras.

Estas propiedades hacen del óxido de grafeno un material versátil y estratégico para el desarrollo de tecnologías sostenibles y de alto desempeño.

2.12. Edge-graphene oxide (EGO)

El grafeno oxidado en los bordes (EGO, por sus siglas en inglés: *Edge Graphene Oxide*) es una variante del óxido de grafeno (GO) que se obtiene mediante una oxidación controlada dirigida preferentemente a los bordes del grafito. A diferencia del GO convencional, que resulta de la oxidación del grafito en su totalidad, el EGO presenta una estructura en la que los grupos funcionales oxigenados —como carboxilos, epóxidos e hidroxilos— están principalmente localizados en las regiones periféricas de las láminas.

Una de las hipótesis planteadas sugiere que la distribución específica de grupos funcionales en los bordes del óxido de grafeno funcionalizado (EGO) podría conferirle propiedades diferenciadas respecto al óxido de grafeno convencional (GO). Entre estas propiedades se destacan una mayor estabilidad química y térmica, una capacidad superior de carga superficial y una mejor aptitud para establecer interacciones con otros materiales. Estas características, de comprobarse experimentalmente, representarían un campo de interés para futuras investigaciones orientadas al desarrollo de nanocompuestos con propiedades mejoradas. Su estructura plana, junto con los bordes funcionalizados, lo hacen especialmente adecuado para aplicaciones en catálisis heterogénea, procesos electroquímicos y dispositivos de biosensado (Y. Zhu y cols., 2010).

Otra de las hipótesis es que el grafeno oxidado en los bordes (EGO) tiene elevada afinidad por el agua, atribuida a la abundancia de grupos oxigenados ionizables en su estructura, los cuales inducirían una densidad significativa de carga negativa. Estas funcionalidades, normalmente, permiten la formación de dispersiones coloidales estables en medios acuosos. En solución, el EGO podría adoptar conformaciones de monocapas o pocas capas.

Además, el EGO podría comportarse como una resina de intercambio catiónico de ácido débil gracias a la presencia de grupos carboxilo ionizables. Esta característica le permitiría participar en procesos de intercambio iónico con cationes metálicos o especies orgánicas cargadas positivamente, lo cual amplía sus aplicaciones potenciales en tratamiento de aguas, sensores, y separación de compuestos en fase acuosa.

2.13. Nanomateriales

2.14. Nanomateriales y su definición en el contexto colombiano

La nanotecnología se define como el estudio, comprensión y control de la materia a escalas nanométricas, específicamente en rangos de tamaño entre 1 y 100 nanómetros (nm). Un nanómetro

equivale a una milmillonésima parte de un metro ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Esta definición es respaldada por organismos internacionales como el Comité Técnico ISO/TC 229, que establece la norma *ISO/TS 80004-1:2015*, la Iniciativa Nacional de Nanotecnología de Estados Unidos (NNI) y la Comisión Europea (229, 2015; National Nanotechnology Initiative, 2024; European Commission, 2020).

En Colombia, se han registrado avances significativos en el campo de la nanotecnología, especialmente en investigación y desarrollo. Como parte de estos esfuerzos, se creó el Consejo Nacional Asesor de Nanociencia y Nanotecnología (CNA), adscrito a la Red Colombiana de Nanociencia y Nanotecnología (RedNanoColombia), el cual adoptó una definición operativa de nanomaterial, que considera tanto aspectos dimensionales como funcionales:

“Material natural o intencionalmente sintetizado, manufacturado o fabricado que exhibe propiedades, fenómenos o efectos biológicos no convencionales, atribuibles a sus dimensiones hasta una escala límite de un micrómetro. En el caso específico de materiales nanoparticulados, se consideran así cuando presentan una distribución mayor al 10 % de partículas inferiores o iguales a 100 nm en al menos una de sus dimensiones. Además, se incluyen materiales no necesariamente nanoparticulados, pero que han sido modificados a escala nanométrica en su conformación o interfase para dar lugar a un material con nuevas propiedades” (Santana y Gañán, 2019; Camacho, García, y Patiño, 2016; Rodríguez, 2015).

Esta definición reconoce tanto a los materiales que poseen dimensiones nanométricas como a aquellos que, sin ser nanoparticulados, han sido modificados estructuralmente a escala nanométrica para adquirir propiedades novedosas. Esta visión resulta fundamental para el desarrollo de políticas públicas, regulaciones y estrategias de innovación tecnológica en el país.

2.14.1 Nanopartículas: definición y características generales

Las nanopartículas son estructuras coloidales cuyas dimensiones se encuentran en el rango de 1 a 100 nanómetros (nm) al menos en una de sus dimensiones. Debido a su tamaño extremadamente reducido, presentan propiedades físicas, químicas, electrónicas y biológicas que difieren significativamente de las de los materiales a granel del mismo compuesto. Estas propiedades emergentes incluyen una mayor área superficial específica, efectos cuánticos, reactividad aumentada, y capacidad para interactuar de manera selectiva con sistemas biológicos o moleculares (Salata, 2004; 229, 2015; Camacho y cols., 2016).

Desde el punto de vista morfológico, las nanopartículas pueden presentar diversas formas: esféricas, tubulares, laminares, dendríticas, entre otras. Su clasificación puede realizarse según su origen (naturales o sintéticas), su composición (orgánicas, inorgánicas, híbridas), o su estructura interna (sólidas, huecas, core-shell, etc.).

En contextos industriales y tecnológicos, las nanopartículas se emplean en aplicaciones tan diversas como la catálisis, el desarrollo de sensores, la ingeniería de materiales, la liberación controlada de fármacos, y más recientemente, como aditivos funcionales en fluidos de perforación,

gracias a su capacidad para mejorar la reología, estabilidad térmica y propiedades de sellado de los lodos base agua.

Su comportamiento se encuentra altamente influenciado por su tamaño, carga superficial, composición química y grado de dispersión, lo cual requiere un diseño cuidadoso para evitar efectos no deseados, como la aglomeración o la toxicidad ambiental.

2.14.2 *Nanofluidos*

Los nanofluidos, también conocidos como fluidos inteligentes, son sistemas coloidales compuestos por la dispersión estable de nanopartículas (metales, óxidos metálicos, carburos, nanotubos o nanofibras) en un líquido base. La incorporación de estas partículas a escala nanométrica modifica significativamente las propiedades fisicoquímicas del fluido original, incluyendo su viscosidad, densidad, capacidad de transferencia térmica y comportamiento reológico (Amanullah y Al-Tahini, 2009).

Según lo señalado por Amanullah y Al-Tahini (Amanullah y Al-Tahini, 2009), los nanofluidos pueden clasificarse en dos grandes categorías según la cantidad y tipo de aditivo nanométrico que contienen:

- **Nanofluidos simples:** contienen un único tipo de aditivo a escala nanométrica.
- **Nanofluidos avanzados:** contienen múltiples aditivos nanométricos, lo que les confiere propiedades mejoradas y funciones adicionales.

Desde una perspectiva funcional, los nanomateriales incorporados pueden ser de carácter *funcional único* o *multifuncional*. Un nanoaditivo multifuncional es capaz de cumplir simultáneamente diversas funciones dentro del sistema de lodo de perforación, tales como mejorar la lubricidad, estabilizar la estructura reológica, aumentar la inhibición de arcillas o reducir la pérdida de filtrado.

Esta multifuncionalidad permite optimizar el rendimiento del fluido con una considerable reducción en el contenido total de sólidos y en la cantidad de aditivos químicos convencionales, lo que repercute positivamente en la eficiencia operativa y en el costo total del sistema, a pesar del costo individual elevado de algunos nanomateriales (Amanullah y Al-Tahini, 2009).

2.14.3 *Métodos de síntesis de nanomateriales*

La síntesis de nanomateriales puede abordarse mediante dos enfoques principales: los métodos de tipo *top-down* y los de tipo *bottom-up*. El enfoque *top-down* parte de materiales macroscópicos que son fragmentados progresivamente hasta alcanzar dimensiones nanométricas, mientras que el enfoque *bottom-up* construye los nanomateriales a partir de unidades atómicas o moleculares, favoreciendo una mayor precisión en la morfología y propiedades del producto final.

Estos métodos pueden clasificarse según la fase en la que se desarrollan —sólida o líquida— y según el tipo de energía utilizada para inducir los procesos de formación. A continuación, se

presenta un cuadro sinóptico con los principales métodos empleados en la síntesis de nanomateriales, agrupados por tipo de enfoque, fase y mecanismo de reacción o transformación.

La incorporación de nanopartículas (NPs) en los fluidos de perforación representa una de las innovaciones más prometedoras en el campo de la ingeniería petrolera. Su uso ha demostrado ser efectivo en una amplia variedad de aplicaciones operativas, tales como el control de la pérdida de fluido, la mejora de la viscosidad, la estabilización de pozos, la inhibición de arcillas y la reducción de la fricción y del torque durante las operaciones de perforación (Ponmani, Bhasin, Sen, y Sharma, 2013).

Diversos estudios han explorado el potencial de estas nanopartículas como aditivos funcionales en sistemas de lodo base agua, mostrando que su inclusión puede minimizar de forma significativa el daño inducido por la invasión de filtrado en la formación. En particular, se ha observado que las nanopartículas favorecen la formación de una torta de filtrado delgada, continua y de baja permeabilidad sobre las paredes del pozo, lo que reduce el riesgo de pegado diferencial, pérdidas de circulación y daño a la formación productiva (El-Diasty y Ragab, 2013).

Uno de los desafíos más comunes en la perforación de pozos es la pérdida de fluido hacia las zonas permeables del yacimiento. Este fenómeno no solo compromete la integridad del pozo, sino que también representa un incremento considerable en los costos operativos. Estudios recientes han demostrado que los fluidos enriquecidos con NPs pueden modificar favorablemente las propiedades reológicas del lodo y generar estructuras de tipo micro/nano capaces de sellar las microfracturas o poros en la roca, reduciendo así la migración del fluido hacia la formación (Velásquez, Guevara, y Duarte, 2015).

De acuerdo con Amanullah y Al-Tahini (Amanullah y Al-Tahini, 2009), los principales mecanismos que inducen daño a la formación durante la perforación son los chorros hidráulicos de alta energía y la invasión del filtrado de lodo. Los nanofluidos, gracias a su capacidad para formar capas delgadas, resistentes y de baja porosidad, constituyen una solución potencial para minimizar o incluso eliminar estos efectos adversos. Las unidades estructurales a escala nanométrica, al estar bien distribuidas y densamente empacadas, promueven la formación de barreras impermeables que protegen la formación y preservan su productividad.

En resumen, la nanotecnología aplicada a los fluidos de perforación no solo mejora la eficiencia del proceso, sino que también ofrece una vía sustentable para reducir el impacto en la formación, optimizando el desempeño productivo del pozo.

2.14.4 Caracterización de las nanopartículas

La caracterización de nanopartículas es una etapa fundamental para comprender sus propiedades fisicoquímicas, funcionalidad y comportamiento en distintas aplicaciones, incluyendo los fluidos de perforación. Dada su escala nanométrica, estas partículas requieren técnicas analíticas sensibles y específicas que permitan evaluar su tamaño, morfología, estructura, distribución y estabilidad coloidal.

Entre las técnicas más empleadas se encuentran los métodos espectroscópicos, los cuales se

basan en las interacciones entre la materia y diversas formas de radiación electromagnética. Estas interacciones son el objeto de estudio de la espectroscopía, una rama de la ciencia analítica que ha desempeñado un papel crucial tanto en el desarrollo de la teoría atómica como en la elucidación estructural de compuestos orgánicos e inorgánicos (Skoog, Holler, y Crouch, 2015).

Los métodos espectroscópicos pueden clasificarse según la región del espectro electromagnético utilizada: rayos gamma, rayos X, ultravioleta (UV), visible, infrarrojo (IR), microondas o radiofrecuencia (RF). En algunos casos, también se consideran técnicas complementarias como la espectroscopía acústica o de electrones, donde no interviene directamente la radiación electromagnética pero que permiten inferencias estructurales o dinámicas sobre los materiales analizados.

Dentro del conjunto de herramientas más utilizadas para la caracterización de nanopartículas destacan las siguientes:

- **Dispersión dinámica de luz (DLS):** técnica que mide el tamaño hidrodinámico de las partículas suspendidas en un medio líquido a partir del análisis de las fluctuaciones en la intensidad de la luz dispersada.
- **Espectroscopía UV–Visible:** útil para determinar la absorción característica de las nanopartículas, evaluar su concentración y monitorear la estabilidad coloidal en suspensión.
- **Microscopía electrónica de transmisión (TEM):** permite obtener imágenes de alta resolución para observar directamente el tamaño, forma y distribución de las nanopartículas.
- **Microscopía electrónica de barrido (SEM):** utilizada para estudiar la morfología superficial de nanopartículas sólidas o depositadas sobre sustratos.
- **Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR):** permite identificar los grupos funcionales presentes en la superficie de las nanopartículas, útil en estudios de funcionalización o interacción química.
- **Difracción de rayos X (XRD):** proporciona información sobre la estructura cristalina y la fase de los nanomateriales.

Estas técnicas permiten realizar una caracterización integral de las nanopartículas, asegurando su idoneidad para aplicaciones específicas en medios complejos como los lodos de perforación, donde propiedades como el tamaño, la estabilidad coloidal y la funcionalización superficial resultan críticas para su desempeño.

2.14.5 Prueba de compatibilidad de aditivos

La prueba de compatibilidad es un ensayo crucial para evaluar la interacción entre diferentes aditivos empleados en la formulación de un fluido de perforación. Su objetivo es determinar si la combinación de dichos aditivos afecta negativamente la estabilidad física, química o reológica

del sistema, a través de fenómenos como la formación de precipitados, la generación de espuma o cambios indeseados en el color del fluido.

En el ámbito de la ingeniería de perforación, los aditivos cumplen funciones esenciales para mejorar el desempeño del lodo, tales como el control reológico, la suspensión de sólidos, la inhibición de arcillas o la reducción de pérdidas por filtrado. Algunos de los aditivos más comúnmente utilizados incluyen la goma xantana, la goma guar, las bentonitas, diversos polímeros sintéticos y nanomateriales como el óxido de grafeno sulfonado.

La prueba se realiza siguiendo estos pasos generales:

1. Se prepara una muestra del fluido base.
2. Se adiciona una cantidad determinada de cada aditivo por separado o en combinación.
3. La mezcla se agita a una velocidad y temperatura controladas durante un periodo específico.

Posteriormente, se evalúan visual y experimentalmente los siguientes criterios:

- **Color:** Se observa si la adición de aditivos provoca cambios significativos en el color del fluido, lo cual puede ser indicativo de reacciones químicas no deseadas o de la formación de productos coloidales o precipitados.
- **Presencia de espuma:** Se analiza la formación de espuma durante y después de la agitación. La aparición de espuma puede interferir con la capacidad del fluido para enfriar y lubricar eficientemente la broca, además de afectar negativamente la circulación del lodo en el pozo.
- **Precipitación:** Se examina si la interacción entre aditivos genera la formación de sólidos sedimentables. La presencia de precipitados puede obstruir tuberías, afectar la estabilidad reológica del sistema y reducir su eficacia en el transporte de recortes.

Este procedimiento permite seleccionar las combinaciones de aditivos más compatibles, optimizando el diseño del fluido de perforación según las condiciones geológicas y operativas del pozo.

2.15. Viscosímetro HAAKE iQ con geometría cilíndrica coaxial

Figura 8

Viscosímetro HAAKE iQ.



Nota Elaboración propia.

El viscosímetro HAAKE iQ es un reómetro rotacional de alta precisión, diseñado para la caracterización reológica de materiales complejos como lodos de perforación, polímeros, emulsiones y suspensiones. Su funcionamiento se basa en la rotación controlada de un cilindro interno dentro de un recipiente cilíndrico externo (estator), generando un campo de cizallamiento sobre el fluido contenido en el espacio anular.

En la geometría cilíndrica coaxial, el cilindro interior (rotor) gira a una velocidad angular constante ω bajo la acción de un torque aplicado M , mientras que el cilindro exterior permanece fijo. El fluido de ensayo llena el espacio entre ambos cilindros, generándose un flujo de corte que puede considerarse análogo al de placas paralelas cuando la distancia radial h entre las superficies es mucho menor que el radio del cilindro r .

Este sistema permite medir de forma simultánea la **tasa de corte** ($\dot{\gamma}$) y el **esfuerzo cortante** (τ) ejercido por el fluido sobre las superficies, lo cual posibilita la obtención de curvas reológicas detalladas. La relación entre esfuerzo y tasa de corte se interpreta con base en modelos constitutivos como el de Herschel–Bulkley, aplicable a fluidos pseudoplásticos con esfuerzo de fluencia:

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n; \quad n < 1 \quad (14)$$

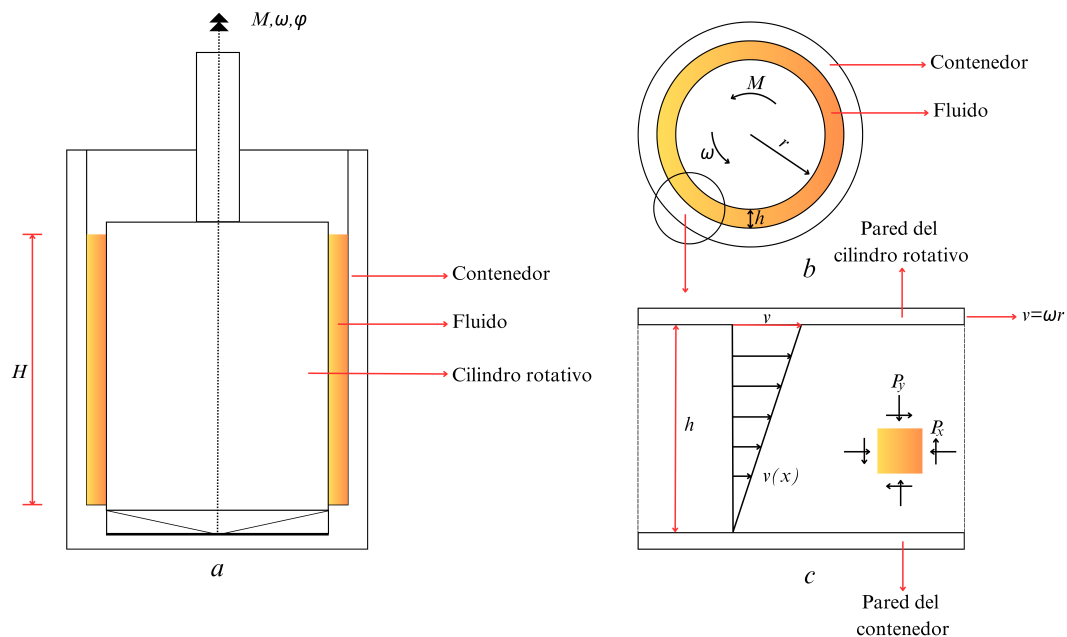
donde τ_0 es el esfuerzo de fluencia, K el índice de consistencia y n el índice de comportamiento del fluido.

El HAAKE iQ está equipado con sensores de torque altamente sensibles y sistemas de control térmico, lo que permite realizar barridos de temperatura, esfuerzo y frecuencia con alta precisión. Además, mediante su software especializado (RheoWin), es posible programar protocolos de prueba personalizados y ajustar los datos experimentales a modelos reológicos como Newton, Bingham, Power Law o Herschel–Bulkley, entre otros. (Thermo Fisher Scientific, 2012)

Este tipo de equipo es fundamental para evaluar la capacidad de transporte de recortes, la estabilidad térmica y la respuesta viscoelástica de los lodos bajo condiciones análogas a las de fondo de pozo.

Figura 9

a. Geometría cilíndrica del viscosímetro. b. Vista superior del sistema cilíndrico. c. Representación del flujo de corte.



Nota Elaboración propia.

2.15.1 Análisis de Varianza (ANOVA)

El Análisis de Varianza (ANOVA) es una técnica estadística inferencial utilizada para comparar los promedios de tres o más grupos experimentales y determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre ellos. Esta herramienta es especialmente útil en contextos de investigación científica donde se desea evaluar el efecto de un factor (o varios) sobre una o más variables de respuesta. En química experimental y análisis de materiales, como en el presente estudio sobre fluidos de perforación, el ANOVA permite cuantificar con solidez estadística el impacto de modificaciones en la concentración de EGO del sistema sobre sus propiedades reológicas.

La lógica del ANOVA parte de una hipótesis nula (H_0) que establece que todos los grupos presentan el mismo valor promedio, y una hipótesis alternativa (H_a) que sostiene que al menos un

grupo difiere del resto. Para contrastar estas hipótesis, el ANOVA calcula un estadístico F , definido como el cociente entre la varianza explicada por el tratamiento (varianza entre grupos) y la varianza no explicada o residual (varianza dentro de los grupos):

$$F = \frac{MS_{\text{tratamiento}}}{MS_{\text{residual}}} \quad (15)$$

donde MS representa los cuadrados medios (*Mean Squares*), calculados como:

$$MS = \frac{SS}{df} \quad (16)$$

Si el valor de F es suficientemente alto y el correspondiente p -valor es menor al umbral de significancia ($\alpha = 0,05$), se rechaza la hipótesis nula y se concluye que el factor bajo estudio (en este caso, la concentración de EGO) tiene un efecto significativo sobre la variable de respuesta (esfuerzo cortante, índice n , volumen de filtrado, etc.).

En el contexto de esta tesis, ANOVA puede aplicarse para analizar si los cambios en la concentración de alizado producen diferencias estadísticamente significativas en las propiedades del lodo de perforación, tales como el esfuerzo cortante a distintas velocidades, el índice de comportamiento del fluido (n) o el volumen acumulado en la prueba de filtrado API. Esta herramienta permite respaldar con evidencia estadística la selección de formulaciones óptimas o la validación de tendencias observadas experimentalmente.

Para su correcta implementación, es necesario verificar supuestos como la normalidad de los datos, homogeneidad de varianzas y la independencia de las observaciones. En caso de encontrar diferencias significativas, se pueden aplicar pruebas post hoc (como Tukey) para identificar específicamente entre qué grupos se presentan dichas diferencias (Miller y Miller, 2010).

3. Parte experimental

3.1. Preparación de los lodos de perforación

Las seis formulaciones de lodo de perforación a base de agua se prepararon utilizando 150 mL de agua como fase continua. En todas las muestras se mantuvo constante la concentración de celulosa polianiónica (PaCL) en 0.50 g y la de barita en 63.33 g, mientras que la variable en estudio fue la cantidad de goma xantana (GX), que se incrementó progresivamente en cada muestra. Las concentraciones de GX fueron las siguientes: 0.40 g para la Muestra 1, 0.50 g para la Muestra 2, 0.666 g para la Muestra 3, 0.8333 g para la Muestra 4, 1.025 g para la Muestra 5 y 1.502 g para la Muestra 6. Esta estrategia permitió evaluar el efecto de la variación de GX sobre las propiedades reológicas del sistema.

El procedimiento de preparación seguido para cada una de las muestras fue el siguiente:

- Medir 150 mL de agua destilada en un vaso de precipitados.

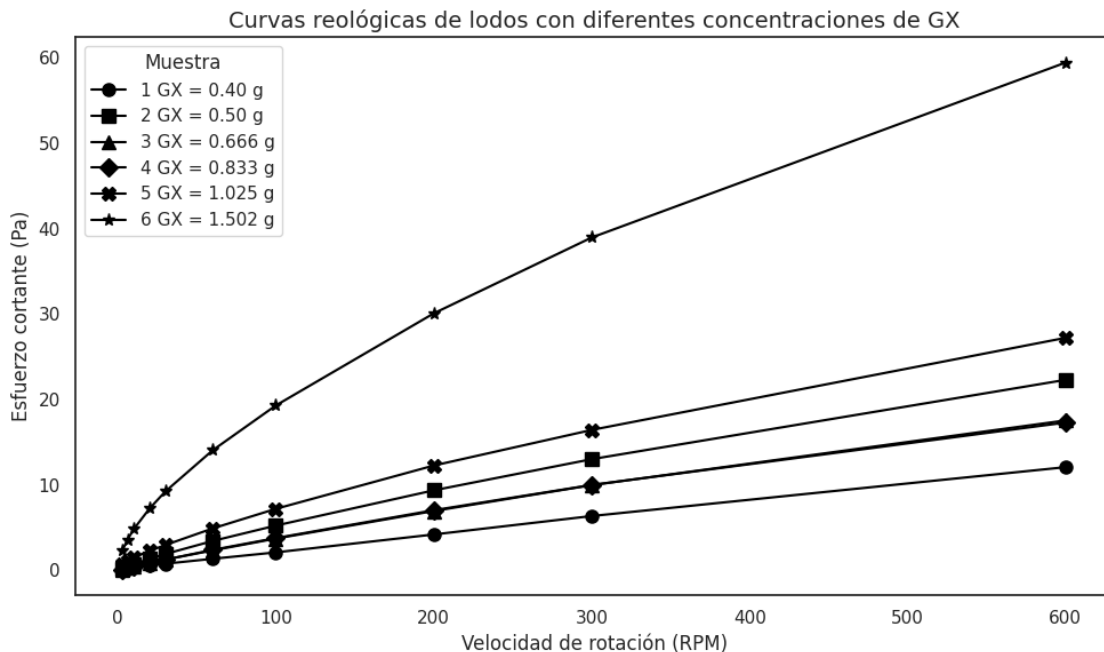
- Incorporar la cantidad fija de PaCL (0.50 g), agitando continuamente hasta su completa disolución.
- Posteriormente, añadir la goma xantana correspondiente a cada formulación, de forma gradual y bajo agitación constante, con el fin de evitar la formación de grumos o aglomerados.
- Una vez lograda la dispersión homogénea del polímero, añadir la barita (63.33 g), manteniendo la agitación para asegurar una distribución uniforme de los sólidos en suspensión.
- La mezcla se debe agitar durante un período de 10 a 15 minutos, hasta obtener un lodo de consistencia homogénea.

3.1.1 Curvas reológicas de lodos de perforación a diferentes concentraciones de GX

Cada muestra fue almacenada en recipientes herméticos debidamente rotulados y conservada bajo condiciones ambientales hasta el momento de su caracterización. Las propiedades evaluadas incluyeron el comportamiento reológico, la densidad, el pH y otros parámetros técnicos, descritos en las secciones correspondientes de este documento.

Figura 10

Curvas de esfuerzo cortante en función de la velocidad de rotación para diferentes concentraciones de goma xantana (GX). Se observa un comportamiento pseudoplástico más acentuado con el aumento de la concentración de GX.

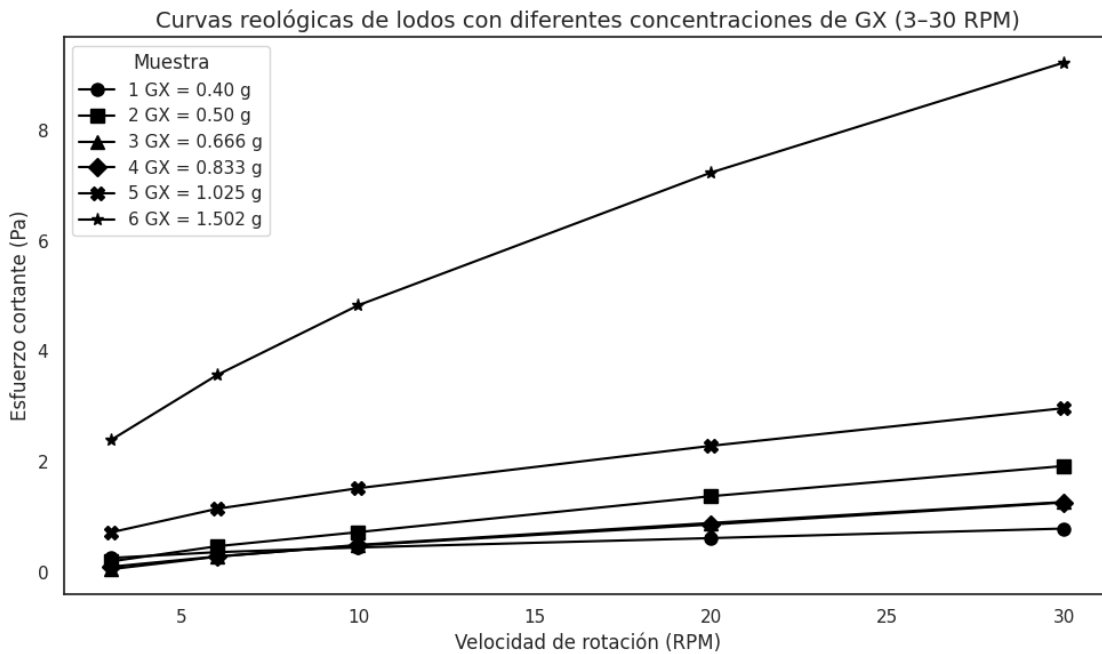


Nota Elaboración propia.

La Figura 10 presenta las curvas de esfuerzo cortante en función de la velocidad de rotación (RPM) para las seis formulaciones de lodo de perforación elaboradas con diferentes concentraciones de goma xantana (GX). Todas las muestras exhiben un comportamiento pseudoplástico, característico de los fluidos no newtonianos utilizados en operaciones de perforación, en los cuales el esfuerzo de corte disminuye progresivamente al reducirse la velocidad de cizallamiento.

Figura 11

Curvas de esfuerzo cortante en función de la velocidad de rotación para diferentes concentraciones de goma xantana (GX), en el rango de 3–30 RPM.



Nota Elaboración propia.

En el rango de bajas velocidades de rotación (3–30 RPM), como se ilustra en la Figura 11, se aprecia que las formulaciones con mayores concentraciones de goma xantana —en particular, la Muestra 6 (equivalente a 6.68 g/L)— presentan los valores más elevados de esfuerzo cortante. Esta respuesta reológica resulta favorable para aplicaciones de perforación, ya que incrementa la capacidad del fluido para mantener en suspensión los sólidos durante las pausas en la circulación, reduciendo así el riesgo de sedimentación de recortes y potenciales obstrucciones del pozo.

A lo largo de todo el intervalo de velocidades explorado (3–600 rpm), las trayectorias de la Figura 10 ponen de relieve que aumentar la fracción de goma xantana (GX) desplaza la respuesta

reológica hacia esfuerzos cortantes (τ) más altos: a una tasa de corte dada ($\dot{\gamma}$), las formulaciones más concentradas exhiben valores superiores de τ , señal de la estructura reticular adicional que aporta el biopolímero. Sin embargo, todas las curvas conservan una pendiente descendente, de modo que la viscosidad aparente ($\eta_a = \tau/\dot{\gamma}$) decrece sistemáticamente al incrementarse $\dot{\gamma}$, manifestando el comportamiento pseudoplástico típico de los lodos de perforación.

Esta dualidad —incremento de τ con la concentración de GX y disminución de η_a con $\dot{\gamma}$ — se describe de manera precisa mediante el modelo de Herschel–Bulkley (Ecuación 8), cuyo índice de comportamiento $n < 1$ y esfuerzo umbral τ_0 permiten que el fluido se autorregule: mantiene una elevada viscosidad en reposo, indispensable para la suspensión de recortes, y fluye con menor resistencia bajo cizallamientos intensos, favoreciendo la circulación hidráulica. En síntesis, la adición progresiva de GX refuerza la capacidad portante sin sacrificar la bombeabilidad, garantizando una adaptación dinámica del lodo a las exigencias operativas del pozo.

Desde la perspectiva reológica, la **Muestra 6** destaca como la formulación de mayor solidez estructural. Su elevado módulo de resistencia y la pronunciada pseudoplasticidad permiten un control especialmente eficaz de los recortes en entornos operativos exigentes. Sin embargo, esta robustez se acompaña de una mayor oposición al flujo, lo que puede traducirse en un incremento del consumo energético durante la circulación. En consecuencia, la selección definitiva del lodo debe ponderar, además de la eficiencia técnica, la viabilidad económica y logística del pozo. Los fundamentos fisicoquímicos que sustentan este comportamiento se analizan con detalle en la Sección 2.10.2.

3.1.2 Evaluación visual de la torta de filtrado: selección de la muestra óptima

Aun cuando los resultados reológicos identificaron a la **Muestra 6** como la formulación con mayor robustez —alto esfuerzo cortante inicial y marcada pseudoplasticidad—, la inspección visual de las tortas obtenidas en la prueba API de filtración arrojó un hallazgo operativo decisivo. La **Muestra 2**, que contiene una concentración intermedia de goma xantana (3.33 g/L), formó una torta *delgada, homogénea y de baja permeabilidad*, cualidades ampliamente reconocidas como óptimas en perforación (Al Jaber, Bageri, Gamal, Elkatatny, y Patil, 2021; W. Zhu y Zheng, 2021). Figura 12 ilustra la diferencia visual entre ambas formulaciones.

Figura 12

Comparación visual de las tortas de filtrado. La Muestra 2 exhibe una torta delgada y homogénea, mientras que la Muestra 6, con mayor concentración de polímero, presenta una torta más gruesa y potencialmente menos permeable.



(a) Muestra 2 – $GX = 3.33$ g/L



(b) Muestra 6 – $GX = 10.01$ g/L

Nota Elaboración propia.

- **Integridad estructural.** La torta mostró una textura compacta, sin fisuras ni desprendimientos; esta continuidad minimiza la invasión de filtrado hacia formaciones permeables y reduce el daño por filtración.
- **Espesor y adherencia.** Su espesor reducido favorece el deslizamiento de la sarta, disminuyendo fricción y torque, mientras que la buena adherencia evita desprendimientos que puedan generar pegado diferencial.
- **Permeabilidad controlada.** La microestructura cerrada contribuye a sellar eficazmente las paredes del pozo, estabilizando el hueco y preservando la presión diferencial.

El desempeño superior de la **Muestra 2** se explica por el equilibrio entre la viscosidad suficiente para suspender sólidos y una concentración polimérica que no incrementa en exceso la resistencia al flujo. Este balance evita sobrecargar el sistema hidráulico y mantiene un consumo energético moderado durante la circulación, a la vez que garantiza un control de filtrado eficiente.

En síntesis, cuando el objetivo operacional combina una hidráulica manejable con un control de filtrado riguroso, la **Muestra 2** se perfila como la alternativa más viable frente a formulaciones más concentradas en polímero. Su torta de filtrado cumple con los criterios de delgadez, uniformidad y baja permeabilidad descritos en la literatura para minimizar daños de formación y optimizar la eficiencia de perforación (Al Jaber y cols., 2021).

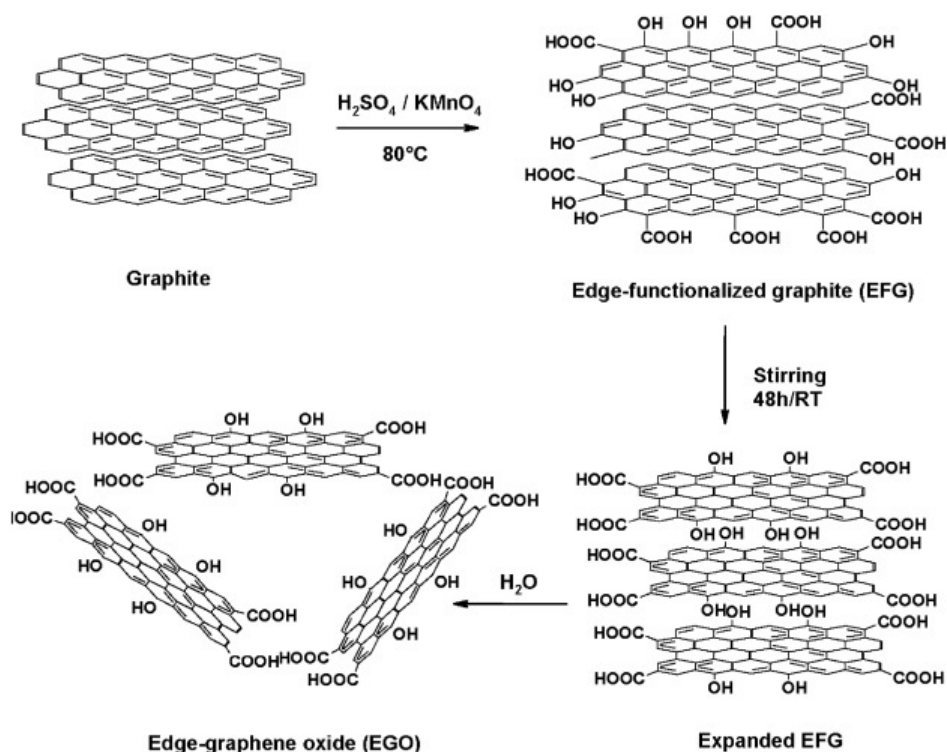
3.2. Obtención del Grafeno oxidado en los bordes (EGO)

En la presente investigación se empleó el método de Tadjarodi *et al.* (2016) para sintetizar grafeno oxidado en los bordes (EGO, *Edge-oxidized Graphene Oxide*). Este procedimiento se distingue por su bajo costo y su ejecución en un solo paso, sin requerir ultrasonido ni agentes reductores o estabilizantes adicionales (Tadjarodi y Ferdowsi, 2016).

A diferencia del protocolo de Hummers y de otras rutas clásicas, el método de Tadjarodi no introduce reactivos novedosos; la clave se halla en la proporción de los oxidantes y en el control de la temperatura. Estas condiciones promueven una *oxidación suave*, de modo que los sitios más susceptibles—los carbonos expuestos en los bordes del grafito—se oxidan preferentemente, mientras que el plano basal permanece mayoritariamente intacto. Así, se minimiza la generación de defectos estructurales y se preserva la integridad cristalina del material resultante, lo que repercute en una mayor calidad y uniformidad del EGO obtenido.

Figura 13

Mecanismo de obtención del óxido de grafeno de borde mediante oxidación selectiva y exfoliación controlada del grafito.



Nota Adaptado de Tadjarodi et. al. 2016

Este procedimiento, al evitar etapas adicionales de reducción o exfoliación mecánica, permite obtener nanosistemas estables y dispersables en agua por más de 12 meses, con concentraciones de hasta 1.6 mg/mL y 0.3 mg/mL en dispersión. La Figura 13 ilustra esquemáticamente el mecanismo de oxidación y exfoliación que da lugar a la obtención del EGO.

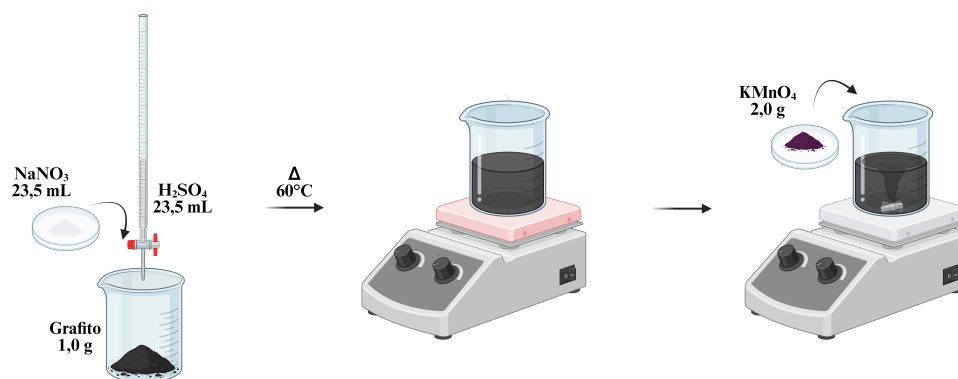
3.2.1 Oxidación suave del grafito

Se pesaron 1.0 g de grafito natural (tamaño de partícula $\sim 50 \mu m$) y se mezclaron con 0.1 g de nitrato de sodio ($NaNO_3$) en 23.5 mL de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4 , 98 %). La mezcla se agitó bajo condiciones controladas de temperatura ($60^\circ C$) durante 30 minutos para permitir la dispersión homogénea de los reactivos. Posteriormente, se añadió lentamente 2.0 g de permanganato de potasio ($KMnO_4$) como agente oxidante, cuidando que la temperatura no superara los $65^\circ C$ para evitar reacciones violentas o la degradación del material.

Este paso permite la inserción de grupos funcionales oxigenados, principalmente en los bordes del grafito, manteniendo la integridad del plano basal. La eficiencia del proceso depende del contenido del oxidante y del tiempo de reacción, parámetros que fueron optimizados por Tadjarodi para maximizar la solubilidad y estabilidad del material resultante en agua.

Figura 14

Protocolo de oxidación suave del grafito para la obtención del grafito funcionalizado en los bordes (EFG).



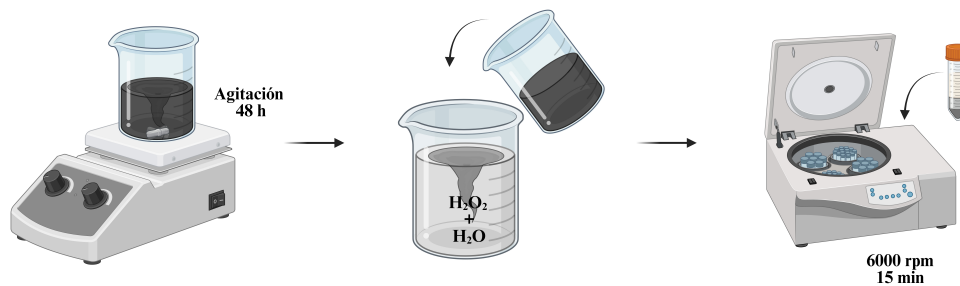
Nota Elaboración propia.

3.2.2 Expansión del grafito funcionalizado en los bordes (EFG)

Tras la oxidación, la mezcla se mantuvo bajo agitación magnética a temperatura ambiente durante 48 horas. Finalizado este periodo, se adicionó una mezcla de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y agua destilada (relación 1:30 v/v) para detener completamente la reacción oxidativa y reducir los restos de permanganato a dióxido de manganeso insoluble (MnO_2), el cual fue eliminado en los pasos posteriores de lavado. El precipitado resultante, de color negro intenso, se lavó con una solución diluida de ácido clorhídrico (0.1 M) para eliminar iones metálicos residuales.

Figura 15

Protocolo de expansión y terminación del proceso oxidativo del grafito funcionalizado.



Nota Elaboración propia.

3.2.3 Exfoliación y obtención del EGO

Finalmente, el material oxidado se lavó sucesivamente con agua desionizada hasta alcanzar un pH neutro. La incorporación selectiva de grupos oxigenados en los bordes genera suficiente repulsión electrostática para inducir la separación espontánea de las láminas, dando lugar a nanosistemas de óxido de grafeno funcionalizado en los bordes (EGO), dispersables en medios acuosos sin adición de surfactantes.

Figura 16

Protocolo de exfoliación asistida del grafito funcionalizado para la obtención del EGO.



Nota Elaboración propia.

El procedimiento de síntesis descrito anteriormente fue repetido en ocho ocasiones consecutivas, con el objetivo de escalar la producción. Como resultado, se obtuvieron aproximadamente 1.4 L de solución final, con una concentración promedio de 2.12g/L del material de interés. En este caso, la **solución resultante** es el producto deseado, ya que contiene el óxido de grafeno disperso en fase acuosa tras el proceso de purificación. Este método representa una vía eficiente y reproducible para la obtención de óxido de grafeno con baja densidad de defectos estructurales, elevada dispersabilidad en agua y propiedades fisicoquímicas adecuadas para su aplicación en fluidos de perforación, sistemas catalíticos, sensores y otros dispositivos funcionales.

3.3. Caracterización del EGO

En la Figura 17 se presenta el espectro FTIR del óxido de grafeno funcionalizado en los bordes (EGO), obtenido mediante el protocolo de Tadjarodi *et al.* (2016). El análisis se centra en las bandas asociadas a grupos oxigenados—O—H, C=O, C—O—C y C—O—comunes a los derivados del grafeno (GO, rGO y EGO). La diferencia esencial radica en la *relación de intensidades*: en EGO las señales atribuibles a hidroxilos y carboxilos dominan el espectro, mientras que la banda de epóxidos es comparativamente débil. Este patrón respalda la hipótesis de una oxidación preferencial en la periferia de las láminas, donde se concentran los grupos —COOH y —OH, y una menor densidad de defectos epoxídicos en el plano basal.

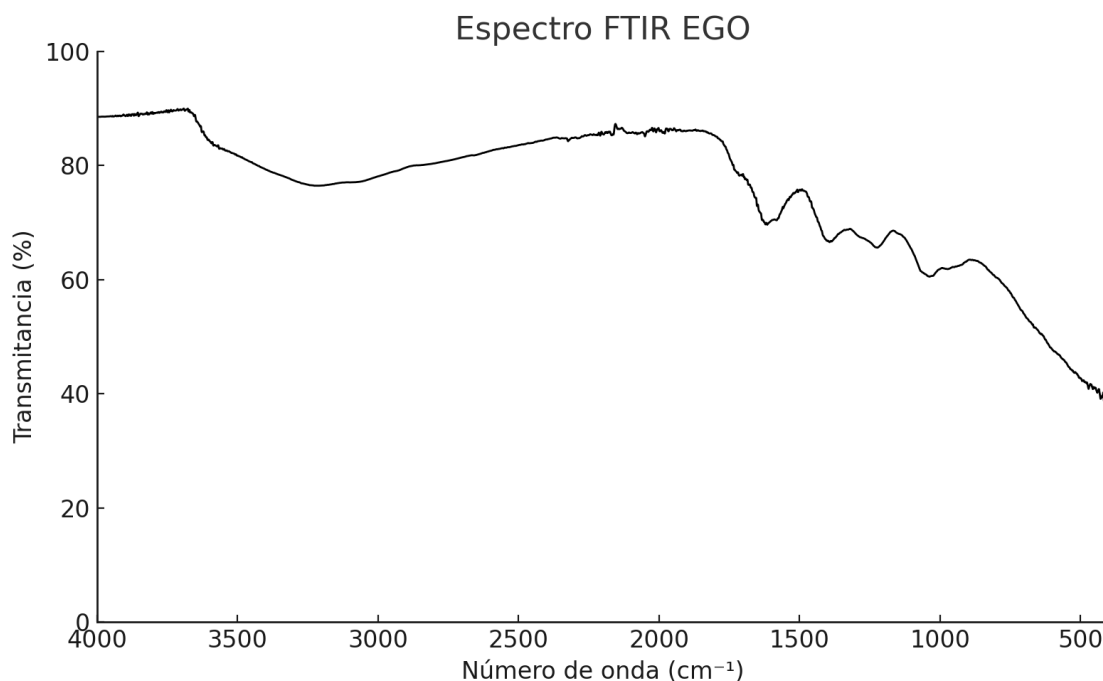
3.3.0.1 Discusión objetiva de las bandas.

- **O—H (3225 cm^{-1})**. La mayor intensidad y el desplazamiento hacia frecuencias menores en EGO indican una red más extensa de hidroxilos interconectados por puentes de hidrógeno en la periferia, coherente con el mecanismo de oxidación selectiva de bordes.
- **C=O (1704 cm^{-1})**. La presencia de carbonilos confirma la introducción de carboxilos terminales; la reducción parcial de su intensidad respecto a GO sugiere que el plano basal permanece menos funcionalizado.
- **C—O—C (1220 cm^{-1})**. La atenuación de la banda epoxídica sustenta la baja densidad de defectos basales y sirve como indicio espectroscópico de la selectividad borde/plano.
- **C—OH/C—O (1390–1050 cm^{-1})**. El incremento de estas señales revela una superficie enriquecida en grupos ácidos y fenólicos, cruciales para la dispersabilidad acuosa y la reactividad del EGO.

En síntesis, la comparación entre GO y EGO demuestra que todos los derivados comparten los mismos tipos de grupos funcionales, pero difieren en su *distribución espacial*. El predominio de carboxilos e hidroxilos, junto con la casi ausencia de epóxidos, constituye un criterio FTIR confirmatorio de la funcionalización localizada en bordes, distintiva del EGO.

Figura 17

Espectro FTIR del óxido de grafeno funcionalizado en los bordes (EGO). Se destacan las regiones características: banda ancha O–H (3225 cm^{-1}), estiramiento C=O (1704 cm^{-1}), vibraciones esqueléticas C=C/H–O–H (1620 cm^{-1}) y estiramientos C–O/C–O–C ($1050\text{--}1250\text{ cm}^{-1}$).



Nota Elaboración propia.

3.4. Determinación de la concentración

La concentración de grafeno oxidado en los bordes (EGO) en dispersión se cuantificó mediante un procedimiento indirecto basado en liofilización. Se tomaron 25 mL de la dispersión acuosa del nanomaterial, los cuales se congelaron y posteriormente se sometieron a secado por sublimación; se obtuvo así un residuo sólido de 0.053 g. Con dicho valor se calculó una concentración efectiva de 2.12 g/L, empleada posteriormente para dosificar con exactitud cada una de las formulaciones de lodo. Este método garantiza la trazabilidad del material y demuestra la pertinencia de estrategias experimentales accesibles, reproducibles y compatibles con los criterios de viabilidad económica.

3.5. Adición del grafeno oxidado en los bordes a un fluido de perforación base agua

La incorporación de grafeno oxidado en los bordes (EGO) al fluido base se llevó a cabo siguiendo el protocolo detallado en las secciones 3.1 y 3.2.3. Se partió de un lodo base previamente formulado

Cuadro 1. Comparación cualitativa de bandas FTIR entre GO y EGO.

N.º de onda (cm ⁻¹)	GO (oxidación extensiva)	EGO (oxidación en bordes)
~3420–3445	Banda O–H amplia: hidroxilos basales y agua interlaminar	O–H intensa y desplazada (3225): predominio de –OH/–COOH en bordes
~1730	C=O (carboxilos distribuidos)	Señal moderada (1704): concentración localizada de –COOH en periferia
~1620	Vibración C=C + flexión H–O–H	Persistencia del dominio aromático; posible solapamiento con agua
~1390	Deformación C–OH (fenoles/-carboxilatos)	Mayor intensidad (1393): densidad elevada de grupos ácidos en bordes
~1220	Estiramiento C–O–C (epóxidos)	Banda débil; la mínima señal epoxídica sugiere baja oxidación basal
~1050	Estiramiento C–O (alcoxilos/fenoles)	Banda persistente; funcionalización oxigenada adicional en bordes
~2920 / 2850	C–H sp ³ (contaminantes orgánicos)	No observable; ausencia de cadenas alquílicas injertadas

con 3.33 g/L de goma xantana (GX), según lo descrito en la Sección 3.1.2. Una vez exfoliado el EGO, su dispersión acuosa se dosificó directamente sobre la suspensión durante la etapa de homogeneización en el agitador mecánico (*mixer*), garantizando así una distribución uniforme del nanomaterial en la matriz fluida.

Con el fin de evaluar la influencia del EGO sobre la respuesta reológica del sistema, se prepararon cuatro concentraciones —0.1 ppb, 0.2 ppb, 0.4 ppb y 0.6 ppb— —y se sometió cada formulación a ensayos de esfuerzo cortante (τ) en el mismo rango de velocidades de rotación usado para la elección del lodo base. Este procedimiento permitió cuantificar la relación entre el contenido de EGO y el comportamiento del lodo bajo distintas condiciones de cizallamiento.

3.6. Determinación de la densidad de los lodos a estudiar

La densidad de los lodos de perforación se determinó mediante una balanza de lodo (mud balance), siguiendo los lineamientos del procedimiento estándar API RP 13B-1. Este equipo permite obtener la densidad del fluido expresada en unidades de g/cm³ o lb/gal, a partir del principio de equilibrio de masas.

El protocolo empleado fue el siguiente:

1. Se llenó completamente la taza de la balanza con la muestra de lodo, asegurando que no quedaran burbujas de aire atrapadas.
2. Se colocó la tapa herméticamente, permitiendo que el exceso de fluido escapara por el orificio superior para garantizar el volumen exacto.
3. Se limpió cuidadosamente la parte externa de la balanza y se posicionó sobre el soporte nivelador.
4. Se deslizó el contrapeso a lo largo del brazo de la balanza hasta alcanzar el punto de equilibrio, indicado por la nivelación de la burbuja.
5. Se registró el valor de densidad directamente de la escala graduada.

Este procedimiento se repitió para cada una de las formulaciones de lodo preparadas, asegurando condiciones constantes de temperatura y agitación previa a la medición y se resume en la Cuadro 2

Cuadro 2. Densidades de las muestras con diferentes concentraciones de EGO agregadas al lodo con $[GX] = 3.33 \text{ g/L}$

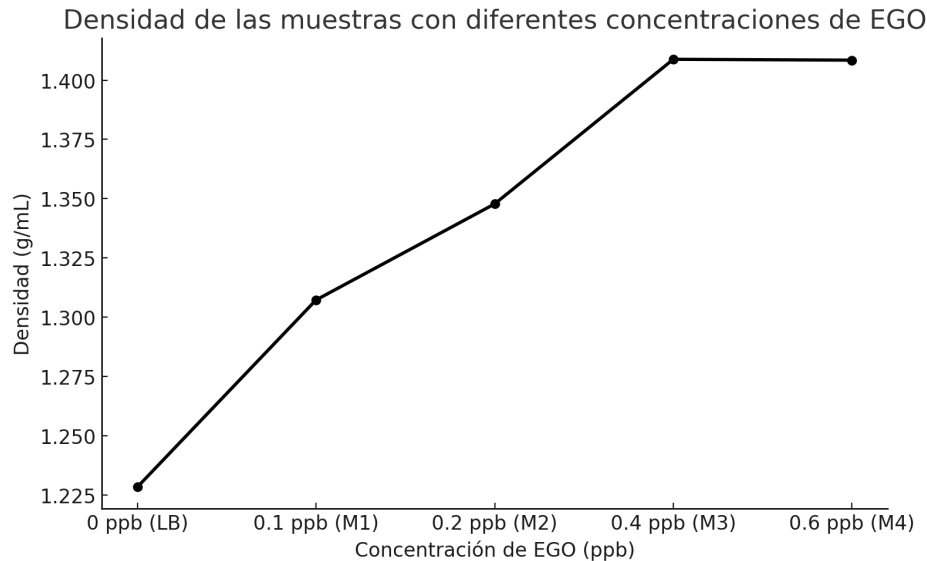
Concentración de EGO (ppb)	Densidad (g/mL)
0 ppb (LB)	1.22842
0.1 ppb (M1)	1.30728
0.2 ppb (M2)	1.34780
0.4 ppb (M3)	1.40878
0.6 ppb (M4)	1.40842

La Cuadro 2 muestra claramente una relación directa entre el aumento en la concentración de EGO y la densidad de los lodos de perforación. Este comportamiento puede explicarse por las características intrínsecas del EGO y sus interacciones fisicoquímicas dentro del medio acuoso del lodo.

La incorporación del EGO, aumenta la masa por unidad de volumen, lo cual se refleja en el incremento de la densidad. Estas partículas, debido a su estructura bidimensional con grupos funcionales polares en los bordes (principalmente carboxilos, hidroxilos y epóxidos), presentan una elevada área superficial específica que facilita interacciones fuertes con las moléculas de agua y otros componentes del fluido base, lo que demostraría el cambio de la densidad, modificando el fluido de perforación a bajas concentraciones (ppb).

Figura 18

Densidad de las fluidos de perforación con diferentes concentraciones de EGO. Se observa un incremento progresivo en la densidad con el aumento de la concentración de EGO, alcanzando una estabilización entre 0,4 y 0,6 ppb.



Nota Elaboración propia.

Esta tendencia creciente puede observarse también en la Figura 18, donde se grafica la variación de la densidad en función de la concentración de EGO. Se aprecia un incremento sostenido desde 0 hasta 0,4 ppb; sin embargo, entre 0,4 y 0,6 ppb, la curva se estabiliza, mostrando apenas una diferencia marginal en el valor de densidad.

Este comportamiento sugiere la proximidad de un punto de saturación, a partir del cual la incorporación adicional de EGO no produce un aumento significativo en la densidad del sistema. Tal estabilización podría deberse a la formación de agregados o aglomerados que limitan la dispersión efectiva del nanomaterial en el medio, reduciendo su influencia sobre la densidad global (Aftab, Ismail, Ibupoto, y Bakhsh, 2017). En este sentido, la Figura 18 permite identificar visualmente el umbral de eficiencia del aditivo, siendo 0,4 ppb una posible concentración óptima.

Desde un punto de vista operativo, esta información resulta crucial, ya que permite optimizar la formulación del fluido evitando sobrecostos innecesarios y minimizando el riesgo de generar propiedades densimétricas no deseadas. Un aumento controlado en la densidad del fluido puede mejorar la presión hidrostática y prevenir influjos, pero un exceso puede favorecer pérdidas de circulación en formaciones sensibles (“Drilling Fluids Manual”, 1998).

En resumen, la incorporación progresiva de EGO permite modular de forma eficiente la densidad de los fluidos base agua, y la evidencia experimental sugiere que concentraciones superiores a

0,4 ppb no aportan mejoras sustanciales, por lo cual la selección óptima de la dosis es fundamental para garantizar el desempeño y la economía del sistema.

3.7. Protocolos de medición de las propiedades del lodo

La caracterización reológica de los lodos de perforación se llevó a cabo utilizando un reómetro rotacional modelo ViscoTester iQ (Thermo Scientific), equipado con geometría de cilindros concéntricos (coaxial). Esta configuración permite simular condiciones de corte controladas y obtener parámetros clave que describen el comportamiento viscoelástico del fluido. Las mediciones se realizaron conforme a las recomendaciones del estándar API RP 13B-1.

El procedimiento experimental se desarrolló de la siguiente manera:

1. Se homogenizó previamente cada muestra de lodo y se transfirió al compartimiento del reómetro correspondiente.
2. Se insertó el cilindro rotacional (bob) en la muestra y se alineó el sensor coaxial interior con el eje del instrumento.
3. Las mediciones se realizaron a dos temperaturas: 25 °C (condiciones ambientales) y 65 °C (condiciones simuladas de fondo de pozo).
4. Se aplicó un barrido de velocidad angular descendente, desde 600 rpm hasta 3 rpm, registrando los valores de esfuerzo cortante y tasa de corte en cada punto.

3.7.1 Análisis reológico de las curvas de esfuerzo de corte con EGO

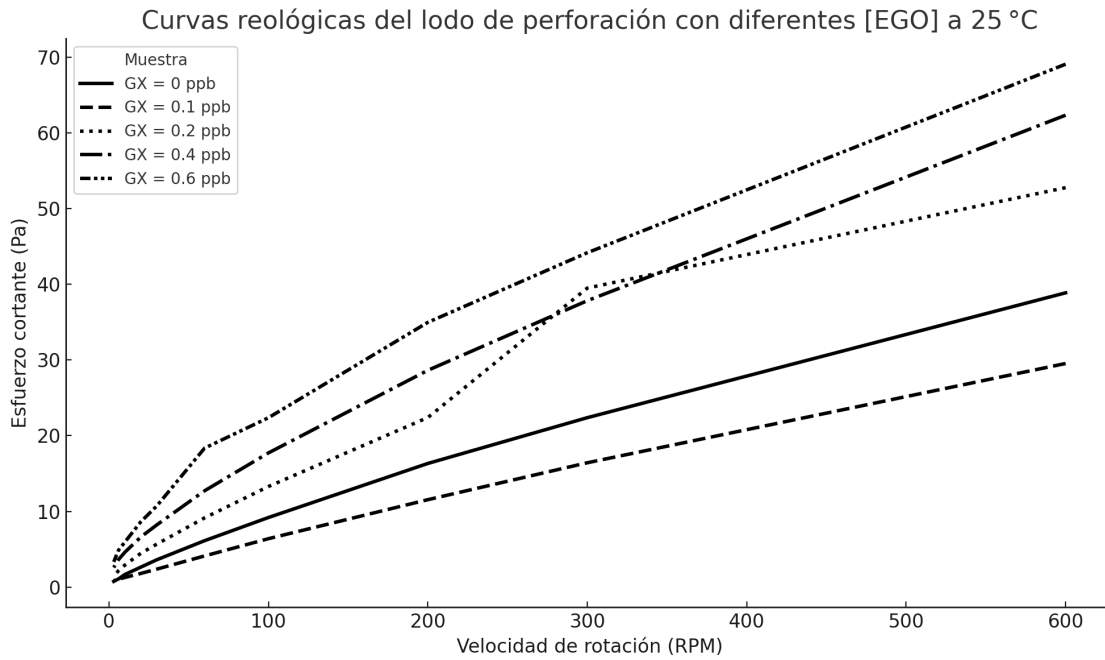
En la Figura 19 se observa que el esfuerzo cortante aumenta de forma casi lineal con la concentración de EGO —de 0 a 0.6 ppb— tanto a 25 °C como a 65 °C; este comportamiento se atribuye a la elevada dispersabilidad del nanomaterial, cuyas láminas, ricas en grupos hidroxilo, epoxi y carboxilo, establecen enlaces de hidrógeno y asociaciones electrostáticas con arcillas, polímeros (PAC, GX) e iones disueltos, originando una red tridimensional que conserva su integridad térmica (Zhang, Bai, Zhao, y Wang, 2019; Fair, 2015). Del análisis de las curvas puede deducirse un efecto claramente dosis-dependiente entre 0.2 y 0.6 ppb, donde se multiplica la probabilidad de formar puentes entre láminas de EGO y partículas arcillosas, reforzando la red interna del fluido y elevando el esfuerzo cortante, sobre todo a altas velocidades. Además, la mayor disponibilidad de láminas oxidadas favorece el recubrimiento de bentonita y otros sólidos, estabilizando la suspensión y elevando tanto la viscosidad aparente como la plástica. Adicionalmente, la presencia de espesantes (PAC, GX, etc.) potencia el efecto del EGO: los grupos oxigenados actúan como centros de nucleación que refuerzan la malla polimérica, intensificando la respuesta reológica (Torsaeter, 2013).

La tendencia observada entre 0.2 y 0.6 ppb revela que a partir de 0.4 ppb la pendiente de aumento de τ comienza a suavizarse, indicando un equilibrio óptimo entre refuerzo estructural y manejabilidad hidráulica. Este criterio —basado en la relación dosis-respuesta y en la capacidad de

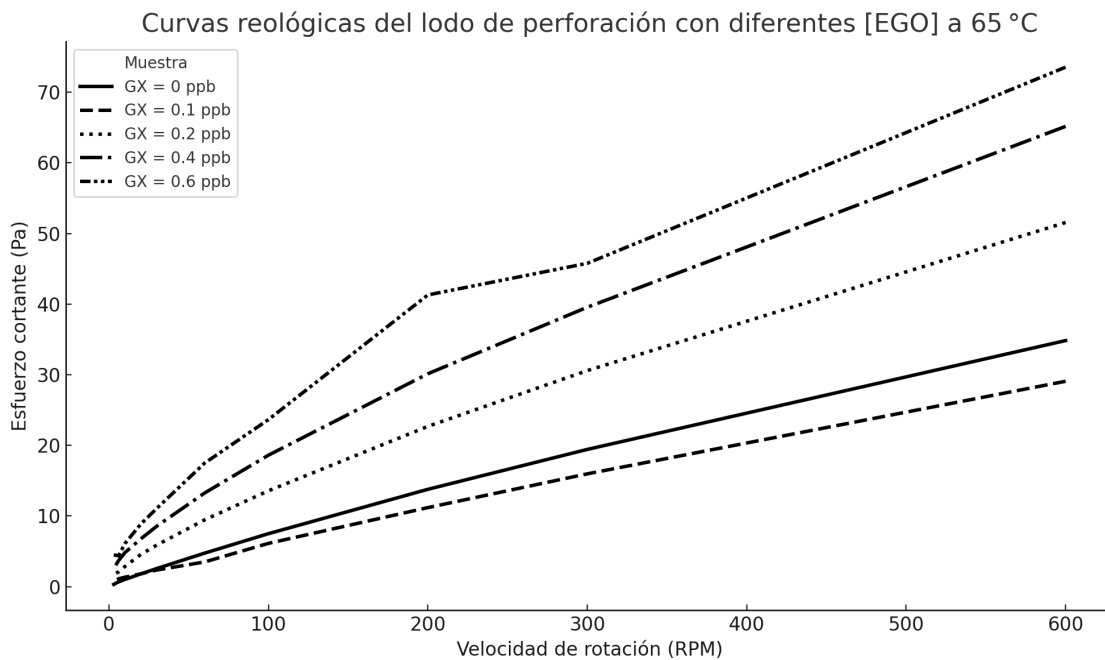
bombeo bajo cizallamientos elevados— fundamenta la elección de 0.4 ppb como la concentración operativamente más adecuada.

Figura 19

Comparación de curvas de esfuerzo cortante en función de la velocidad de rotación para distintas dosis de EGO a 25 °C y 65 °C.



(a) Curvas de esfuerzo cortante para diferentes concentraciones de EGO a 25 °C



(b) Curvas de esfuerzo cortante para diferentes concentraciones de EGO a 65 °C

Nota Elaboración propia.

En la Figura 20 se compara la respuesta reológica de la muestra con 0.4 ppb de EGO a 25 °C (temperatura superficial) y 65 °C (temperatura representativa de fondo de pozo en formaciones intermedias). Si bien el incremento de esfuerzo cortante con la temperatura es una tendencia observable en todas las formulaciones, el efecto resulta más pronunciado a 0.4 ppb, lo que sugiere que esta dosificación maximiza simultáneamente el refuerzo estructural del lodo y su manejabilidad hidráulica.

Por *condiciones operativas exigentes* se entienden aquellos escenarios in-situ que combinan: (i) temperaturas superiores a 60 °C, capaces de debilitar enlaces no covalentes en polímeros convencionales; (ii) gradientes de presión elevados que obligan a bombear el fluido a altas tasas de circulación; (iii) altas concentraciones instantáneas de recortes, derivadas de velocidades de perforación agresivas; y (iv) secciones desviadas o horizontales que demandan una elevada capacidad de limpieza y bajo coeficiente de fricción. Bajo estas condiciones, el lodo debe conservar suficiente viscosidad en reposo para suspender sólidos, pero reducir su resistencia al flujo en la anular para evitar sobrepresiones y un consumo energético excesivo.

Los resultados muestran que la formulación con 0.4 ppb de EGO mantiene un comportamiento pseudoplástico estable y un esfuerzo cortante ligeramente superior incluso a 65 °C, evidenciando estabilidad térmica mejorada, optimización hidráulica, control de sólidos.

En conjunto, estos atributos confirman que una dosificación de 0.4 ppb permite operar el pozo con un margen de seguridad ampliado frente a variaciones térmicas y mecánicas, al tiempo que mantiene los requisitos de bombeabilidad y eficiencia energética. Por lo tanto, se propone esta concentración como el punto óptimo de compromiso entre desempeño reológico y viabilidad operativa para aplicaciones en condiciones de campo exigentes.

Estos resultados subrayan la importancia de la adición de EGO como agente modificador efectivo, con potencial para mejorar sustancialmente las propiedades reológicas críticas en fluidos de perforación.

Con base en las lecturas obtenidas a 600 y 300 rpm (θ_{600} y θ_{300}), se calcularon los parámetros reológicos según las siguientes relaciones:

3.7.2 Viscosidad plástica (VP)

La viscosidad plástica representa la resistencia interna al flujo debida a las interacciones mecánicas entre los sólidos suspendidos y el fluido. Se calcula como:

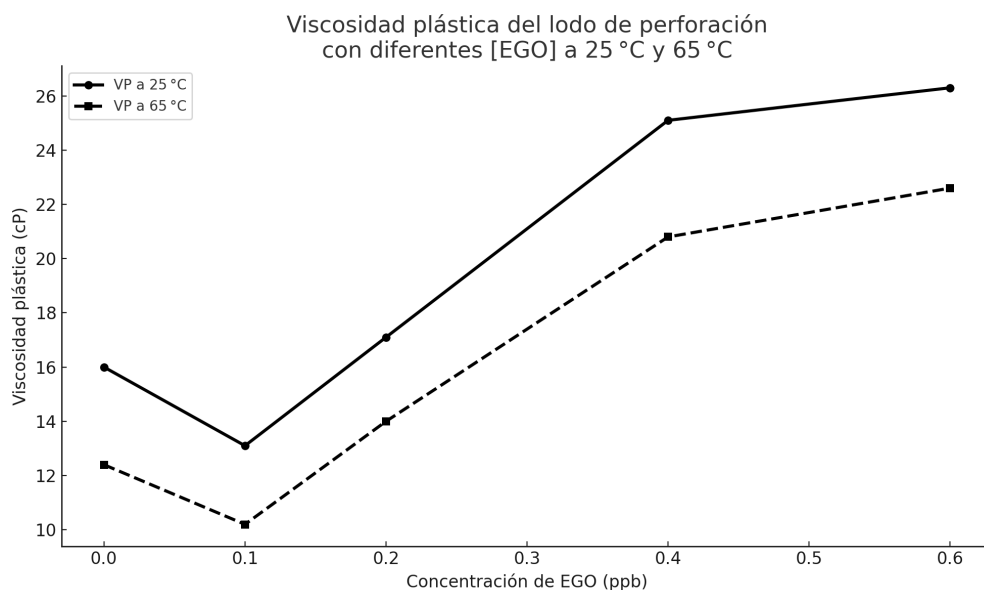
$$VP \text{ (cP)} = \theta_{600} - \theta_{300} \tag{17}$$

Cuadro 3. Viscosidad plástica (VP) a 25°C y 65°C para diferentes concentraciones de EGO

Concentración (ppb)	0	0.1	0.2	0.4	0.6
VP a 25°C (cP)	16.0	13.1	17.1	25.1	26.3
VP a 65°C (cP)	12.4	10.2	14.0	20.8	22.6

Figura 20

Variación de la viscosidad plástica (VP) con la concentración de alizado a dos temperaturas. Se observa un incremento progresivo con la concentración en ambas condiciones, siendo más pronunciado a 65°C.



Nota Elaboración propia.

La Figura 20 presenta la evolución de la viscosidad plástica (VP) del *lodo base* (0 ppb) y de los lodos con EGO a 25 °C y 65 °C. En todos los casos el incremento de temperatura provoca un adelgazamiento térmico de 2.9–4.3 cP, consistente con la tendencia de los lodos base agua (Lee, Al-Mahrooqi, y Al-Yami, 2020). El efecto es máximo en el lodo base, cuya VP cae un 22.5 % (16.0 → 12.4 cP); una dosis ínfima de 0.1 ppb apenas mitiga esa pérdida (22.1 %).

Por encima de 0.2 ppb la red laminar del EGO comienza a compensar el calentamiento: la reducción relativa de VP se atenúa del 18.1 % (0.2 ppb) al 14.1 % (0.6 ppb). Este comportamiento se atribuye a los enlaces de hidrógeno y asociaciones electrostáticas que estabilizan la malla grafénica incluso a mayor temperatura (Abdulkareem, Ismail, y Aftab, 2019). Además, frente al lodo base, las formulaciones de 0.4–0.6 ppb incrementan la VP en +57–64 % a 25 °C y +68–82 % a 65 °C, manteniendo valores superiores a 20 cP en fondo de pozo.

En conjunto, el EGO resulta realmente efectivo a 0.2 ppb y garantiza una VP operativa (>20 cP) en condiciones profundas cuando se dosifica entre 0.4 y 0.6 ppb.

3.7.3 Viscosidad aparente (VA)

La viscosidad aparente (VA) proporciona una medida global de la resistencia del fluido al movimiento en un régimen de flujo laminar. Tal como se expresa en la ecuación 18

$$VA \text{ (cP)} = \frac{\theta_{600}}{2} \tag{18}$$

se calcula a partir de la lectura τ del viscosímetro a 600 RPM, dividiendo dicho valor entre dos.

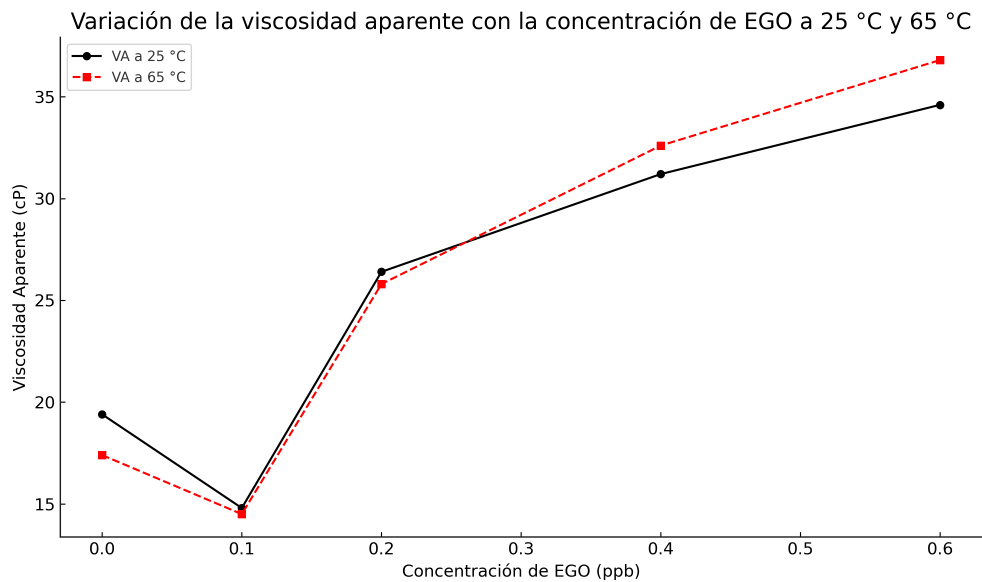
La Figura 21 y la Cuadro 4 muestran la evolución de la viscosidad aparente (VA) a 25°C y 65°C en función de la concentración de EGO.

Cuadro 4. Viscosidad aparente (VA) a 25°C y 65°C para diferentes concentraciones de EGO

Concentración (ppb)	0	0.1	0.2	0.4	0.6
VA a 25 °C (cP)	19.4	14.8	26.4	31.2	34.6
VA a 65 °C (cP)	17.4	14.5	25.8	32.6	36.8

Figura 21

Variación de la viscosidad aparente (VA) con la concentración de EGO a 25 °C y 65 °C.



Nota Elaboración propia.

A diferencia de la VP, la VA exhibe un comportamiento térmico dual: a bajas dosis (0–0.2ppb) el incremento de temperatura reduce ligeramente la VA (1–2cP), mientras que a 0.4ppb y 0.6ppb la VA a 65°C supera a la obtenida a 25°C (32.6 cP frente a 31.2 cP y 36.8 cP frente a 34.6 cP, respectivamente). Este cruce puede atribuirse a la mayor movilidad térmica del fluido base, que favorece la alineación de las láminas de EGO y la formación de dominios ordenados de mayor

tamaño a concentraciones elevadas, incrementando la fricción hidrodinámica efectiva (Lee y cols., 2020). El hecho de que la diferencia entre ambas temperaturas sea mínima (2 cP) a 0 ppb y 0.1 ppb indica que, en ausencia de una red de nanopartículas robusta, el calentamiento ejerce un simple efecto de adelgazamiento. Sin embargo, a dosis 0.4 ppb domina el carácter estructurante del EGO: el calentamiento intensifica las interacciones entre láminas oxidadas y agua, fortaleciendo la microred y compensando la fluidificación térmica (Abdulkareem y cols., 2019). Operativamente, esto implica que la VA se mantiene en un rango de 25–37 cP en todo el intervalo de temperatura evaluado, garantizando una capacidad de transporte de sólidos adecuada incluso bajo gradientes térmicos profundos; no obstante, la formulación con 0.4 ppb equilibra el incremento reológico con una respuesta térmica estable, posicionándose como la concentración más eficiente desde el punto de vista de control de viscosidad aparente.

3.7.4 Punto Cedente (YP):

El punto cedente (YP) cuantifica las fuerzas de atracción entre las partículas del lodo; y se calcula con la ecuación 19

$$\begin{aligned} \theta_{600} &= 2 VA, \\ \theta_{300} &= \theta_{600} - VP, \\ YP &= \theta_{300} - VP = 2 VA - 2 VP. \end{aligned} \tag{19}$$

El comportamiento del punto cedente (YP), cuantificado en la Cuadro 5 y mostrado en la Figura 22, confirma que el EGO actúa principalmente como agente estructurante del fluido: en ambas temperaturas el YP permanece bajo en 0–0.1 ppb, pero se dispara a 0.2 ppb (18.6 lb/100 ft² a 25°C y 23.6 lb/100 ft² a 65°C), lo que indica la formación de una red interparticular capaz de soportar esfuerzo cortante antes de fluir.

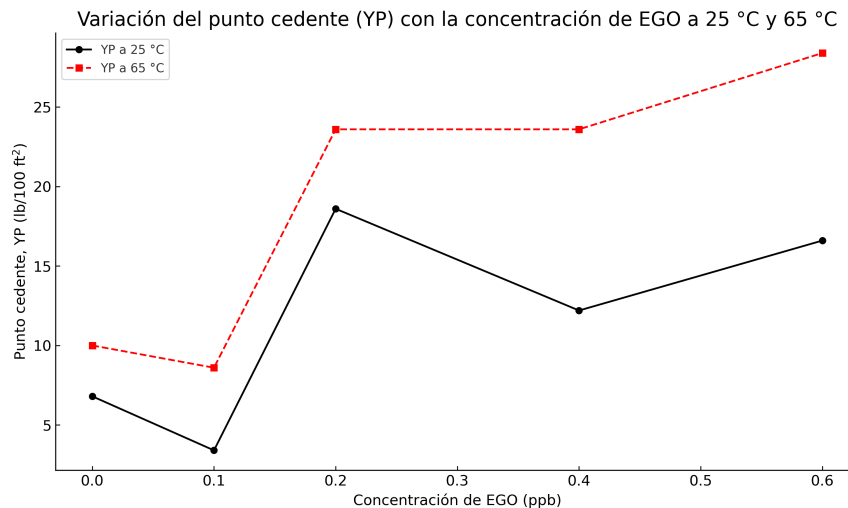
Cuadro 5. Punto cedente (YP) a 25 °C y 65 °C para diferentes concentraciones de EGO

Concentración (ppb)	0	0.1	0.2	0.4	0.6
YP a 25 °C (lb/100 ft²)	6.8	3.4	18.6	12.2	16.6
YP a 65 °C (lb/100 ft²)	10.0	8.6	23.6	23.6	28.4

A 25°C la red presenta un máximo local en 0.2 ppb, disminuye a 0.4 ppb y vuelve a incrementarse a 0.6 ppb, reflejando un equilibrio entre aglomeración y redistribución de las láminas funcionalizadas; en cambio, a 65 °C la tendencia es marcadamente ascendente a partir de 0.2 ppb, lo que sugiere que el calentamiento favorece la consolidación de la microestructura generada por las interacciones electrostáticas y los puentes de hidrógeno del EGO (Abdulkareem y cols., 2019).

Figura 22

Variación del punto cedente (YP) con la concentración de alizado a 25 °C y 65 °C. Se aprecia un aumento pronunciado de YP a partir de 0.2 ppb, siendo más elevado a 65 °C debido a la mayor contribución de interacciones interparticulares en condiciones térmicas altas.



Nota Elaboración propia.

El hecho de que el YP sin EGO aumente con la temperatura (de 6.8 a 10.0 lb/100 ft²) concuerda con la ligera concentración de sólidos a medida que el agua se dilata y con la mayor movilidad que facilita contactos entre partículas (Lee y cols., 2020). Operativamente, valores de YP superiores a 20 lb/100 ft² (logrados con 0.4 ppb a 65°C) garantizan la suspensión efectiva de recortes en condiciones estáticas, pero podrían aumentar las presiones de bombeo; por ello, la dosificación de EGO debe optimizarse considerando el compromiso entre capacidad de suspensión y requisitos hidráulicos, siendo 0.2–0.4 ppb una ventana adecuada para mantener YP moderado a superficie y suficientemente alto en fondo de pozo.

3.8. Prueba de filtrado API

La evaluación de la capacidad de filtración de los lodos de perforación se llevó a cabo mediante la prueba de filtrado API, según el protocolo establecido en la norma API RP 13B-1. Este ensayo permite cuantificar la cantidad de fluido que se pierde a través de una membrana semipermeable (papel filtro) bajo condiciones estandarizadas de presión y tiempo, así como observar las características de la torta de filtración formada.

El procedimiento consistió en aplicar una presión constante de 100 psi sobre una muestra de lodo durante 30 minutos, midiendo el volumen de fluido filtrado (en mL) y caracterizando visualmente la

torta obtenida (espesor, uniformidad y adherencia).

Selección del fluido de perforación basado en la prueba de filtrado

La elección del fluido de perforación más adecuado se fundamentó en los resultados de la prueba de filtrado API. De acuerdo con Caenn et al. (2017), las formulaciones más efectivas son aquellas que presentan:

- Un volumen de filtrado bajo (usualmente menor a 15 mL en 30 minutos a 100 psi).
- Formación de una torta de filtración delgada, uniforme, adherente y de baja permeabilidad.

Estos criterios son esenciales para minimizar fenómenos operativos adversos como el pegado diferencial, la pérdida de circulación, la invasión de fluidos y la inestabilidad en las paredes del pozo.

Por tanto, la prueba de filtrado API constituye una herramienta fundamental en la evaluación comparativa de formulaciones de lodo, aportando información directa sobre el desempeño operativo y la eficiencia del fluido frente a distintos escenarios de presión y permeabilidad.

Cuadro 6. Volumen filtrado (mL) en función del tiempo para diferentes concentraciones de EGO

Tiempo (min)	0 ppb	0.1 ppb	0.2 ppb	0.4 ppb	0.6 ppb
0	0	0	0	0	0
0.5	0.1	0.1	0.1	0	0
1	0.6	0.3	0.1	0	0
1.5	1.0	1.0	1.1	0	0
2	1.4	2.0	0.2	0	0
2.5	1.9	2.6	0.4	0	0
3	2.6	3.4	1.0	0	0
3.5	2.6	3.8	1.4	0	0
4	3.6	4.5	1.8	0	0
4.5	3.6	4.9	2.2	0.4	0
5	4.4	5.3	2.4	0.9	0.1
7.5	6.2	7.4	4.4	2.3	1.4
10	7.8	9.2	5.7	3.4	2.6
12.5	8.4	10.6	6.9	4.3	3.4
15	10	11.8	7.9	5.2	4.2
20	12	14.2	9.6	6.8	5.9
25	13.8	16.2	11.4	7.9	7.5
30	15.5	18.0	12.8	9.0	8.4

El ensayo de filtrado API (Cuadro 6) muestra que el volumen acumulado de filtrado tras 30min disminuye significativamente al incrementar la concentración de EGO: de 15.5mL en el lodo base (0ppb) a 18.0mL con 0.1ppb (formación deficiente de la torta) y, posteriormente, a 12.8mL, 9.0mL

y 8.4mL con 0.2, 0.4 y 0.6ppb, respectivamente. Sólo las formulaciones con ≈ 0.2 ppb satisfacen el criterio API de “filtrado bajo” (<15mL en 30min), siendo la muestra de 0.6ppb la que presenta la menor pérdida de fluido.

La cinética revela que las diferencias aparecen a partir de los 5min: el lodo con 0.4–0.6ppb genera una torta temprana que ralentiza la pendiente de filtrado; ello sugiere que las láminas de EGO, al adsorberse y solaparse sobre el papel filtro, forman una barrera de baja permeabilidad que obstruye los poros y reduce la permeabilidad efectiva. En contraste, la dosis de 0.1ppb resulta insuficiente para crear una red continua, de modo que el volumen filtrado supera incluso al testigo.

Figura 23

Formación de la torta con [EGO] = 0.4 ppb



Nota Elaboración propia.

Desde la perspectiva operativa, 0.4ppb constituye la concentración óptima: reduce el filtrado en un 42 % respecto al lodo base (9.0mL vs. 15.5mL) con una ganancia marginal frente a 0.6ppb (apenas 0.6mL), lo que racionaliza el consumo de aditivo sin sacrificar desempeño. Además, al minimizar la invasión del filtrado y producir una torta más delgada, como se observa en la Figura 23, esta formulación contribuye a disminuir riesgos de pegado diferencial y pérdida de circulación, mejorando la estabilidad del pozo en formaciones sensibles.

3.8.1 *Análisis estadístico de la viscosidad plástica vs. concentración de EGO y temperatura*

Para comprender en profundidad cómo varía la viscosidad plástica (VP) de los lodos de perforación base agua ante diferentes concentraciones de óxido de grafeno funcionalizado en los bordes (EGO), se realizó inicialmente un análisis de varianza (ANOVA) de un solo factor. Este primer enfoque se centró en las condiciones ambientales (25°C), considerando los valores promedio de VP obtenidos a partir de mediciones triplicadas para cada concentración ensayada: 0, 0.1, 0.2, 0.4 y 0.6ppb.

El modelo estadístico aplicado fue:

$$VP_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij}$$

donde μ representa la media global de la viscosidad plástica, α_i el efecto de la i -ésima concentración de EGO, y ε_{ij} el error aleatorio asociado. Los resultados del ANOVA revelaron diferencias altamente significativas entre los tratamientos ($p < 0.001$), lo que permitió confirmar, con base estadística, que la incorporación de EGO modifica de manera consistente el comportamiento reológico del fluido.

El análisis post-hoc de Tukey HSD corroboró que todas las comparaciones por pares resultaron estadísticamente distintas ($p < 0.05$). La tendencia fue clara: a mayor concentración de EGO, mayor viscosidad plástica. La formulación con 0.6ppb presentó un aumento de +10.27cP respecto al lodo base (0ppb), equivalente a un incremento relativo del 64

Sin embargo, como los fluidos de perforación están expuestos a gradientes térmicos considerables en condiciones reales de operación, se consideró necesario extender el análisis incorporando la temperatura como segundo factor. Para ello se desarrolló un ANOVA bifactorial (5×2), evaluando simultáneamente el efecto de la concentración de EGO y la temperatura (25°C vs. 65°C), así como la interacción entre ambas variables:

$$VP_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

donde β_j representa el efecto de la temperatura y $(\alpha\beta)_{ij}$ la posible interacción entre concentración y temperatura. Este modelo permitió no solo determinar si el EGO es eficaz, sino también si su efecto se mantiene bajo el estrés térmico típico del fondo de pozo.

Los resultados fueron reveladores: todos los efectos —concentración, temperatura e interacción— resultaron estadísticamente significativos ($p < 0.001$). Se confirmó que la temperatura reduce la viscosidad plástica en todas las formulaciones, como era de esperarse; sin embargo, este descenso es menos pronunciado en los lodos con mayores concentraciones de EGO, evidenciando su capacidad para sostener la estructura interna del fluido incluso bajo condiciones térmicas adversas. El análisis de comparaciones múltiples (Tukey HSD) reveló diferencias significativas entre casi todas las combinaciones concentración–temperatura. En particular, las formulaciones con 0.4ppb y 0.6ppb mantuvieron valores de VP superiores a 20cP incluso a 65°C, lo que es fundamental para garantizar una adecuada suspensión de recortes y evitar la sedimentación en tramos profundos. Además, el gráfico de interacción mostró una pendiente negativa más suave para estas dos

concentraciones, lo que sugiere que el EGO no solo incrementa la viscosidad, sino que también modula la pérdida asociada al calentamiento, aportando estabilidad térmica al sistema.

Cuadro 7. ANOVA para la viscosidad plástica (VP) según la concentración de EGO a 25°C.

	sum_sq	df	F	PR(>F)
C(Concentracion)	409.002667	4.0	2289.19403	9.261325e-15
Residual	0.446667	10.0	NaN	NaN

Cuadro 8. Resultados de la prueba post-hoc de Tukey HSD para la VP según concentración de EGO.

group1	group2	meandiff	p-adj	lower	upper	reject
0	0.1	-2.9333	0.0	-3.5013	-2.3654	True
0	0.2	1.0667	0.0008	0.4987	1.6346	True
0	0.4	9.0667	0.0	8.4987	9.6346	True
0	0.6	10.2667	0.0	9.6987	10.8346	True
0.1	0.2	4.0	0.0	3.4321	4.5679	True
0.1	0.4	12.0	0.0	11.4321	12.5679	True
0.1	0.6	13.2	0.0	12.6321	13.7679	True
0.2	0.4	8.0	0.0	7.4321	8.5679	True
0.2	0.6	9.2	0.0	8.6321	9.7679	True
0.4	0.6	1.2	0.0003	0.6321	1.7679	True

Como se observa en la Cuadro 7, el análisis ANOVA muestra que la concentración de EGO tiene un efecto altamente significativo sobre la viscosidad plástica ($p < 0.001$). Las comparaciones múltiples mediante la prueba de Tukey (Cuadro 8) confirman que todas las concentraciones difieren entre sí con significancia estadística ($p < 0.05$).

En conjunto, estos hallazgos confirman que el EGO actúa como un aditivo reológico robusto, capaz de generar una red interna resistente, eficaz tanto a temperatura ambiente como en condiciones térmicas de fondo de pozo. La evidencia experimental y estadística coincide en señalar que una concentración de 0.4ppb representa un punto de equilibrio ideal: incrementa significativamente la viscosidad plástica, conserva una buena estabilidad térmica y evita el uso excesivo de nanomaterial, lo cual repercute positivamente en términos operativos y económicos.

Este análisis permite, así, no solo describir un fenómeno, sino comprenderlo en su complejidad técnica y contextual. La inclusión del EGO, en la concentración adecuada, no solo mejora las propiedades del lodo, sino que lo hace confiablemente, incluso cuando las condiciones se vuelven más exigentes.

3.8.2 Consideraciones operativas en la formulación de lodos de perforación con EGO

El sistema base empleado en esta investigación estuvo compuesto por 150mL de agua, 0.50g de celulosa polianiónica (PaCL), 63.33g de barita como agente densificante y una concentración de 3.33 g/L goma xantana (GX), a la cual se añadió óxido de grafeno funcionalizado en los bordes (EGO) como aditivo reológico. Esta formulación base se diseñó buscando un equilibrio entre rendimiento técnico, simplicidad operativa y factibilidad de escalamiento.

En ese contexto, la incorporación del EGO —si bien representa un insumo de mayor valor unitario en comparación con los polímeros convencionales— se ha demostrado que al añadir entre 0.2 a 0.4ppb son suficientes para incrementar significativamente la viscosidad plástica, reducir el volumen de filtrado y estabilizar la estructura del fluido bajo gradientes térmicos. Esto se traduce en beneficios directos durante la perforación, como mayor capacidad de suspensión de sólidos, menor riesgo de sedimentación, mayor estabilidad del pozo y menor necesidad de ajustes correctivos en tiempo real.

Una formulación con 0.4ppb de EGO podría representar una alternativa eficiente en términos de costo-beneficio. Además, al mejorar las propiedades del lodo sin necesidad de aumentar excesivamente la concentración de polímeros viscosificantes, como se observó 3.33 g/L de GX en lugar de >10 g/L, se reducirían también otros costos asociados, como el incremento de presión de bombeo, el desgaste de equipos o los tiempos muertos por fallos en el control de sólidos.

Una de las principales ventajas de trabajar con esta formulación es su versatilidad. Al tratarse de un sistema modular, es posible ajustar la concentración de EGO (y, en menor medida, de GX o barita) según las condiciones específicas del pozo, en particular su profundidad y el gradiente geotérmico esperado. En tramos superficiales, donde la temperatura es baja y las demandas mecánicas son menores, una dosis de 0.2ppb puede ser suficiente para mantener la reología dentro de rangos funcionales. A medida que se incrementa la profundidad —y con ella la temperatura y los requerimientos de transporte de sólidos—, se puede optar por concentraciones de 0.4ppb o incluso 0.6ppb, ajustando el perfil reológico del lodo sin necesidad de cambiar su composición base.

Esta capacidad de adaptación permite no solo una mejor respuesta técnica, sino también una gestión más eficiente de los recursos durante la operación. En lugar de preparar un solo tipo de lodo para todo el pozo —concentrado desde el inicio—, se propone una estrategia de formulación dinámica, donde las propiedades del fluido se modulan en función de las necesidades reales a lo largo de la perforación. Esta aproximación permite optimizar el uso de materiales, reducir costos acumulados y mejorar la eficiencia del proceso en general.

En síntesis, la incorporación del EGO en lodos de perforación no solo mejora el rendimiento técnico del sistema, sino que ofrece una vía realista para personalizar la formulación del fluido según el perfil del pozo. La combinación de bajo consumo, alto impacto funcional y facilidad de ajuste convierte a este nanomaterial en una herramienta prometedora para operaciones que buscan eficiencia, adaptabilidad y control sin comprometer el rendimiento.

4. Conclusiones y perspectivas

Este estudio tuvo como propósito central evaluar el efecto de incorporar grafeno oxidado en los bordes (EGO) a un fluido de perforación *overburden* a base de agua, con el fin de analizar su influencia sobre las propiedades reológicas y de filtración del sistema. Para ello, se sintetizaron nanopartículas de EGO a partir de grafito natural mediante un protocolo de oxidación selectiva, y se formularon distintos lodos en los que se dosificó el nanomaterial en concentraciones progresivas. A partir de los resultados obtenidos se establecen las siguientes conclusiones:

- Se realizó la elección del lodo base teniendo en cuenta el esfuerzo cortante y en particular la evaluación visual de las tortas de filtrado, obteniendo que la mejor formulación es con [GX]= 3.33 g/L.
- Las nanopartículas de EGO se obtuvieron exitosamente mediante una oxidación suave y controlada. El espectro FTIR corroboró la presencia de grupos oxigenados característicos; en comparación con GO y rGO, el EGO exhibió bandas de carboxilo (1720 cm^{-1}) e hidroxilo (3400 cm^{-1}) relativamente más intensas y una señal epóxido apenas perceptible, patrón consistente con la funcionalización predominante en los bordes de la lámina. La concentración del nanomaterial en la dispersión acuosa, determinada por liofilización, fue de 2.12 g/L.
- La incorporación progresiva de EGO en el lodo base, produjo un incremento sostenido en la viscosidad plástica (VP), la viscosidad aparente (VA) y el punto cedente (YP), especialmente en concentraciones iguales o superiores a 0.2 ppb. A 25 °C, la formulación con 0.6 ppb alcanzó un aumento del 64 % en la VP respecto al lodo base. A su vez, el comportamiento pseudoplástico se intensificó conforme aumentó la dosis del aditivo, favoreciendo la suspensión de sólidos en condiciones de baja velocidad.
- El análisis estadístico (ANOVA) confirmó que tanto la concentración de EGO como la temperatura influyen significativamente sobre las propiedades reológicas del lodo. La interacción entre ambos factores también resultó significativa, evidenciando que el nanomaterial no solo mejora la viscosidad, sino que además atenúa su disminución bajo condiciones térmicas simuladas de fondo de pozo. Formulaciones con 0.4 ppb y 0.6 ppb de EGO mantuvieron valores de VP superiores a 20 cP incluso a 65 °C, lo cual es clave para la operatividad en zonas profundas.
- En términos de filtración, la incorporación de EGO redujo drásticamente el volumen de fluido filtrado a través del papel semipermeable en la prueba API. Solo las formulaciones con ≥ 0.2 ppb cumplieron con el criterio de filtrado bajo establecido (< 15 mL en 30 minutos), siendo la muestra con 0.4 ppb la que mostró el mejor equilibrio entre desempeño reológico y eficiencia hidráulica. La cinética del filtrado mostró que el EGO forma rápidamente una torta

delgada, adherente y de baja permeabilidad, lo cual contribuye al sellado del pozo y minimiza riesgos operacionales como pérdida de circulación o pegado diferencial.

- Desde el punto de vista económico y operativo, la formulación con 0.4 ppb de EGO se perfila como la opción más eficiente. Este nivel de dosificación permite alcanzar propiedades comparables a concentraciones mayores, pero con menor consumo de nanomaterial, facilitando su implementación en campo sin comprometer el presupuesto. Además, la naturaleza modular del sistema permite ajustar la dosis de EGO en función de la profundidad y condiciones térmicas del pozo, optimizando recursos y adaptando el perfil reológico del lodo a las exigencias de cada tramo.

Perspectivas

- Este trabajo abre nuevas posibilidades para el diseño de lodos de perforación inteligentes, en los que se pueda modular la reología en tiempo real mediante el ajuste controlado de aditivos nanométricos como el EGO. La flexibilidad y eficiencia de este enfoque permite adaptar la formulación a medida que avanza la perforación, mejorando la eficiencia global del proceso.
- Futuras investigaciones pueden explorar la incorporación combinada de EGO con otros nanomateriales (como sílice coloidal, óxidos metálicos o nanotubos funcionalizados), evaluando sinergias que potencien aún más el control reológico, la estabilidad térmica y la eficiencia de filtrado.
- También se sugiere evaluar el comportamiento de estos sistemas en lodos de perforación base aceite o sistemas híbridos, donde el comportamiento interfacial de las láminas de grafeno puede generar nuevos efectos reológicos y tribológicos aún poco explorados.
- Finalmente, sería pertinente validar estas formulaciones en condiciones de pozo reales o en simuladores avanzados a escala piloto, integrando variables de corte, presión diferencial, interacciones con la roca y ciclos térmicos. Esto permitiría cerrar la brecha entre la validación en laboratorio y su aplicación operativa en el campo petrolero.

Referencias Bibliográficas

- 229, I. (2015). *Nanotechnologies – vocabulary – part 1: Core terms (iso/ts 80004-1:2015)*. (<https://www.iso.org/standard/68058.html>)
- Abdulkareem, L., Ismail, A., y Aftab, A. (2019). Thermal stability and rheological behavior of graphene-oxide-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 176, 189–198. doi: 10.1016/j.petrol.2019.01.032
- Aftab, A., Ismail, A., y Ibupoto, Z. (2017). Enhancing the rheological properties and shale inhibition behavior of water-based mud using nanosilica, multi-walled carbon nanotube, and graphene nanoplatelet. *Egyptian journal of petroleum*, 26(2), 291–299.
- Aftab, A., Ismail, A., Ibupoto, Z., y Bakhsh, T. (2017). Graphene nanoplatelets-enhanced drilling fluids for unconventional shale formations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 149, 721–730. doi: 10.1016/j.petrol.2016.11.030
- Al Jaber, J., Bageri, B. S., Gamal, H., Elkatatny, S., y Patil, S. (2021). The role of drilled formation in filter cake properties utilizing different weighting materials. *ACS Omega*, 6(37), 24039–24050. doi: 10.1021/acsomega.1c03210
- Alomair, O., Matar, K., y Alshaikh, M. (2017). Rheological properties of water-based drilling fluids under high pressure and high temperature conditions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 156, 623–630. doi: 10.1016/j.petrol.2017.06.062
- Amador-Díaz, A., Veliz-Lorenzo, E., y Bataller-Venta, M. (2015). Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 46(1), 16–25.
- Amanullah, M., y Al-Tahini, A. (2009). Nanotechnology—its significance in smart fluid development for oil and gas field application. *Society of Petroleum Engineers (SPE) Saudi Arabia Section Technical Symposium*. Descargado de <https://doi.org/10.2118/126102-MS> (SPE-126102-MS)
- American Petroleum Institute. (2019). *ANSI/API Recommended Practice 13B-1: Recommended Practice for Field Testing Water-Based Drilling Fluids* (5th ed.). Standard. Washington, DC: API Publishing Services. (Standard No. API RP 13B-1)
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (2020). *Términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental para proyectos de perforación exploratoria de hidrocarburos*. <https://www.anla.gov.co/sites/default/files/publicacion/2020/tdr-perforacion-exploratoria.pdf>. (Documento técnico de referencia, ANLA)
- Caenn, D. H. C. H. . G. G. R., R. (2017). *Composition and properties of drilling and completion fluids* (7.^a ed.). Houston, TX: Gulf Professional Publishing.
- Caili Dai, F. Z. (2018). *Oilfield chemistry*.
- Camacho, G., García, M., y Patiño, A. (2016). Avances y perspectivas de la nanotecnología en Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería*(78), 83–91.
- CIED, y PDVSA. (2002). *Manual de fluidos de perforación*. Venezuela: PDVSA-CIED. Descargado de <https://www.academia.edu/20265052/>

- Manual_de_Fluidos_de_Perforacion_PDVSA_CIED
- Contreras, J. M. (2015). *Síntesis de óxido de grafeno como plataforma nanoscópica para materiales funcionales* (Tesis de pregrado). Universidad Simón Bolívar. (Disponible en línea)
- Darley, H. C. H., y Gray, G. R. (1988). *Composition and properties of drilling and completion fluids* (5th ed.). Houston, TX: Gulf Publishing Company. (Prepared and published for the American Petroleum Institute)
- Drilling fluids manual [Manual de software informático]. (1998). Houston, TX. (Available from Schlumberger Oilfield Services)
- El-Diasty, A. I., y Ragab, A. M. S. (2013). Applications of nanotechnology in the oil & gas industry: Latest trends worldwide & future challenges in egypt. *Egyptian Journal of Petroleum*, 22(1), 1–9. doi: 10.1016/j.ejpe.2012.06.004
- European Commission. (2020). *Nanomaterials definition and legislation*. (https://ec.europa.eu/environment/chemicals/nanotech/faq/definition_en.htm)
- Fair, R. M. (2015). *Petroleum engineer's guide to oil field chemicals and fluids*. Gulf Professional Publishing.
- García, L. A., y Pérez, M. F. (2021). Evaluación del desempeño de la goma xantana en fluidos de perforación base agua. *Revista Ingeniería Petrolera*, 62(4), 312–324. doi: 10.1016/j.rinpe.2021.56789
- Hawker, D., Robinson, A., y Vogt, K. (2002). *Manual de perforación: Procedimientos y operaciones en el pozo*. Calgary, Canadá: PetroSkills. Descargado de https://www.academia.edu/6472755/PROCEDIMIENTOS_Y_OPERACIONES_EN_EL_POZO_002
- Hernandez Pedreros, M. M., y Manrique Osorio, A. (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* (Tesis de pregrado, Fundación Universidad de América). Descargado de <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6721/1/6112774-2018-1-IQ.pdf> (Tesis de pregrado en Ingeniería Química)
- Hewitt, D. (2017). Advances in rheology of drilling fluids and completion fluids. *Journal of Petroleum Engineering and Technology*, 7(3), 115–129.
- Hossain, M. E., y Al-Majed, A. A. (2015). *Fundamentals of sustainable drilling engineering*. John Wiley Sons.
- Khalil, M., y Jan, B. M. (2012). Herschel–bulkley rheological parameters of a novel environmentally friendly lightweight biopolymer drilling fluid from xanthan gum and starch. *Journal of Applied Polymer Science*, 124(1), 595–606. doi: 10.1002/app.35004
- Khan, Y., S. % , Yusuf, M., y Sardar, N. (2018). Studies on rheological behavior of xanthan gum solutions in presence of additives. *Petroleum & Petrochemical Engineering Journal*, 2(5), 165. doi: 10.23880/ppej-16000165
- Konios, D., Stylianakis, M. M., Stratakis, E., y Kymakis, E. (2014). Dispersion behaviour of graphene oxide and reduced graphene oxide. *Journal of Colloid and Interface Science*, 430, 108–112. doi: 10.1016/j.jcis.2014.05.033
- Lee, J., Al-Mahrooqi, F., y Al-Yami, H. (2020). Temperature-induced rheological changes in

- water-based drilling fluids containing nanographene additives. *Energy & Fuels*, 34(5), 6201–6210. doi: 10.1021/acs.energyfuels.0c00512
- María Nuñez, J. S., María Méndez. (2001). *Introducción a la reología*. Instituto Politecnico Nacional.
- Miller, J. N., y Miller, J. C. (2010). *Statistics and chemometrics for analytical chemistry* (6th ed.). Harlow, England: Pearson Education.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). *Resolución 0855 de 2022*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/05/Resolucion-0855-de-2022.pdf>. (Por la cual se establecen lineamientos sobre licenciamiento ambiental para actividades del sector hidrocarburos)
- Molina, J. (s.f.). *Escuela superior politecnica del litoral, guayaquil, ecuador, 2017, 306 p.*
- National Nanotechnology Initiative. (2024). *What is nanotechnology?* (<https://www.nano.gov/you/nanotechnology-benefits>)
- Pakdaman, E., Osfouri, S., Azin, R., Niknam, K., y Roohi, A. (2019). Improving the rheology, lubricity, and differential sticking properties of water-based drilling muds at high temperatures using hydrophilic gilsonite nanoparticles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 582, 123930.
- Pei, S., y Cheng, H.-M. (2012). The reduction of graphene oxide. *Carbon*, 50(9), 3210–3228.
- Perween, S., Thakur, N. K., Beg, M., Sharma, S., y 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.
- Ponmani, S., Bhasin, M., Sen, D., y Sharma, C. (2013). Application of nanotechnology in drilling fluids: A review. *Petroleum Science and Technology*, 31(19), 2151–2160. doi: 10.1080/10916466.2011.637096
- Rodríguez, L. (2015). *Nanomateriales y medio ambiente: enfoque normativo en américa latina* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad Nacional de Colombia.
- Ryen Caenn, H. C. H. D., y Gray, G. R. (2011). *Composition and properties of drilling and completion fluids*. Elsevier.
- Salas, R. (2000). *Manual de fluidos de perforación*. Venezuela: Editorial Ingeniería Petrolera.
- Salata, O. V. (2004). Applications of nanoparticles in biology and medicine. *Journal of Nanobiotechnology*, 2(1), 3. doi: 10.1186/1477-3155-2-3
- Santana, A., y Gañán, P. (2019). Nanotecnología: oportunidades y desafíos para colombia. *Revista Colombiana de Química*, 48(1), 15–30.
- Sierra Baena, M. A. (2000). Lecturas sobre lodos de perforación. *Facultad de Minas*.
- Skoog, D. A., Holler, F. J., y Crouch, S. R. (2015). *Principios de análisis instrumental* (6.ª ed.). Cengage Learning.
- Smith, J., y Johnson, M. (2020). Polyanionic cellulose in drilling fluids: Properties and performance. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 45(3), 225–238. doi: 10.1016/j.petrol.2020.123456
- Stefan Z. Miska, E. M. O., Robert F. Mitchell. (2022). *Ingeniería de perforación: aplicaciones y*

- tecnología avanzadas*. Colina McGraw.
- Tadjarodi, A., y Ferdowsi, S. M. (2016). The novel synthesis of highly water-soluble few-layer graphene nanosheets by a simple one-pot chemical route and without any modification. *Materials Chemistry and Physics*, 183, 297–305.
- Thermo Fisher Scientific. (2012). Haake rheostress 1 rheometer: Operating manual [Manual de software informático]. Karlsruhe, Germany. Descargado de <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/MSD/Manuals/Haake-RheoStress-1-User-Manual.pdf> (Consultado en 2024)
- Torsaeter, O. (2013). *Drilling fluid engineering*. (Teaching material, Norwegian University of Science and Technology (NTNU))
- Velásquez, J., Guevara, M., y Duarte, D. (2015). Aplicación de nanopartículas como aditivo en fluidos de perforación para reducir la pérdida por filtración. *Revista Fuentes: El Reventón Energético*, 13(1), 41–50.
- Zatz, L., J. % , y Knapp, S. (1984). Viscosity of xanthan gum solutions at low shear rates. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 73(4), 468–471. doi: 10.1002/jps.2600730410
- Zhang, R., Bai, X., Zhao, L., y Wang, Q. (2019). Graphene oxide as a high-performance additive in water-based drilling fluids. *Journal of Molecular Liquids*, 285, 9–18.
- Zhu, W., y Zheng, X. (2021). Effective modified xanthan gum fluid loss agent for high-temperature water-based drilling fluid and the filtration control mechanism. *ACS Omega*, 6(37), 23788–23801. doi: 10.1021/acsomega.1c02617
- Zhu, Y., Murali, S., Cai, W., Li, X., Suk, J. W., Potts, J. R., y Ruoff, R. S. (2010). Graphene and graphene oxide: Synthesis, properties, and applications. *Advanced Materials*, 22(35), 3906–3924. doi: 10.1002/adma.201001068

Apéndice A - Tablas de resultados y datos reológicos

Cuadro 9. Resultados reológicos: esfuerzo cortante (τ) e índice de comportamiento (n) para cada muestra a diferentes velocidades de rotación (RPM).

RPM	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3		Muestra 4		Muestra 5		Muestra 6	
	τ	n	τ	n	τ	n	τ	n	τ	n	τ	n
600	25.28	0.025	46.62	0.046	36.66	0.036	36.18	0.035	56.90	0.059	124.20	0.122
300	13.30	0.026	27.20	0.053	20.86	0.041	20.90	0.041	34.36	0.071	81.35	0.159
200	8.80	0.026	19.59	0.058	14.52	0.043	14.74	0.043	25.63	0.089	62.89	0.185
100	4.42	0.026	10.97	0.064	7.79	0.046	8.02	0.047	15.07	0.101	40.35	0.237
60	2.85	0.028	7.21	0.071	4.90	0.048	5.03	0.049	10.27	0.122	29.38	0.288
30	1.64	0.032	4.02	0.079	2.65	0.052	2.63	0.052	6.20	0.122	19.29	0.378
20	1.28	0.037	2.87	0.084	1.86	0.055	1.80	0.053	4.78	0.140	15.14	0.445
10	0.93	0.055	1.51	0.089	1.02	0.060	1.00	0.059	3.17	0.186	10.10	0.593
6	0.75	0.073	0.97	0.095	0.58	0.057	0.59	0.057	2.40	0.234	7.46	0.730
3	0.53	0.108	0.40	0.102	0.11	0.021	0.20	0.038	1.50	0.294	5.00	0.979

Cuadro 10. Datos reológicos para diferentes concentraciones de EGO (25°C)

RPM	Línea Base (0 ppb)		0.1 ppb EGO		0.2 ppb EGO		0.4 ppb EGO		0.6 ppb EGO	
	T	n	T	n	T	n	T	n	T	n
600	38,88	0,03804	29,54	0,02890	52,78	0,05164	62,36	0,06101	69,10	0,06762
300	22,38	0,04379	16,42	0,03213	39,51	0,05970	37,84	0,07405	44,18	0,08646
200	16,33	0,04793	11,54	0,03388	22,40	0,06570	28,64	0,08409	34,98	0,10270
100	9,183	0,05392	6,383	0,03748	13,28	0,07780	17,72	0,10400	22,37	0,13140
60	6,123	0,05991	4,107	0,04019	9,142	0,08945	12,72	0,12440	18,36	0,17960
30	3,600	0,07053	2,362	0,04628	5,667	0,11100	8,209	0,16080	10,71	0,20990
20	2,629	0,07719	1,791	0,05257	4,452	0,13070	6,608	0,19400	8,626	0,25330
10	1,656	0,09724	1,257	0,07381	2,903	0,17050	4,602	0,27020	5,946	0,34920
6	1,073	0,10500	1,049	0,10260	2,159	0,21120	3,621	0,35430	4,865	0,47600
3	0,7422	0,14520	0,861	0,15970	1,405	0,27500	2,581	0,50500	3,319	0,64950

Cuadro 11. Datos reológicos para diferentes concentraciones de EGO (65°C)

RPM	Línea Base (0 ppb)		0.1 ppb EGO		0.2 ppb EGO		0.4 ppb EGO		0.6 ppb EGO	
	T	n	T	n	T	n	T	n	T	n
600	34,83	0,03408	29,07	0,02844	51,55	0,05044	65,16	0,06376	73,54	0,07196
300	19,42	0,03800	15,96	0,03124	30,58	0,05985	39,55	0,07740	45,77	0,09153
200	13,77	0,04042	11,18	0,03283	22,68	0,06658	30,13	0,08846	41,29	0,12120
100	7,489	0,04398	6,116	0,03591	13,56	0,07964	18,60	0,10920	23,64	0,13880
60	4,735	0,04633	3,487	0,03901	9,446	0,09243	13,25	0,12960	17,48	0,17100
30	2,557	0,05010	2,344	0,04593	5,875	0,11510	8,551	0,16750	11,07	0,21690
20	1,796	0,05274	1,806	0,05302	4,549	0,14100	6,761	0,19850	8,857	0,26000
10	1,009	0,05928	1,330	0,07810	2,843	0,16690	4,805	0,28210	6,086	0,35740
6	0,6612	0,06470	1,097	0,10740	2,067	0,20220	3,669	0,35900	4,365	0,42710
3	0,3095	0,06056	0,7410	0,14500	1,760	0,33660	2,562	0,50140	4,484	0,97530

Apéndice B - Códigos

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

df = pd.read_csv('/content/EGO.CSV', header=None,
                 names=['Wavenumber_cm-1', 'Transmittance_%'])

plt.figure(figsize=(8, 5))
plt.plot(df['Wavenumber_cm-1'], df['Transmittance_%'], linewidth=1)

# Solo esta línea basta para que el eje quede descendente
plt.xlim(4000, 400) # 4000 cm a la izquierda, 400 cm a
la derecha

plt.ylim(0, 100)
plt.xlabel('Número de onda (cm-1)')
plt.ylabel('Transmitancia (%)')
plt.title('Espectro FTIR de EGO')
plt.show()
```

Listing 1. Script en Python para graficar el espectro FTIR de EGO

```
# Configuración visual
sns.set(style="white")
plt.rcParams["figure.figsize"] = (10, 6)
plt.rcParams["axes.labelsize"] = 12
plt.rcParams["axes.titlesize"] = 14

# --- Datos de las muestras ---
```

```

rpm = [600, 300, 200, 100, 60, 30, 20, 10, 6, 3]

muestras = {
    "GX = 0.40 g": [12.09, 6.369, 4.211, 2.115, 1.364, 0.787, 0.614, 0.444,
        0.359, 0.254],
    "GX = 0.50 g": [22.31, 13.025, 9.377, 5.252, 3.448, 1.922, 1.374, 0.722,
        0.466, 0.192],
    "GX = 0.666 g": [17.56, 9.987, 6.956, 3.728, 2.343, 1.269, 0.889, 0.491,
        0.276, 0.051],
    "GX = 0.833 g": [17.31, 10.005, 7.052, 3.788, 2.408, 1.260, 0.861, 0.480,
        0.281, 0.095],
    "GX = 1.025 g": [27.23, 16.447, 12.281, 7.211, 4.919, 2.971, 2.288, 1.519,
        1.146, 0.719],
    "GX = 1.502 g": [59.45, 38.975, 30.096, 19.314, 14.067, 9.239, 7.244,
        4.836, 3.571, 2.395],
}

# --- Crear figura y graficar ---
plt.figure()

for nombre, tau in muestras.items():
    plt.plot(rpm, tau, marker='o', label=nombre)

plt.xlabel("Velocidad de rotación (RPM)")
plt.ylabel("Esfuerzo cortante (Pa)")
plt.title("Curvas reológicas de lodos con diferentes concentraciones de GX")
plt.legend(title="Muestra")

plt.tight_layout()

# --- Guardar como PNG ---
plt.savefig("curvas_reologicas_lodos.png", dpi=300)

# --- Mostrar en pantalla ---
plt.show()

```

Listing 2. Script en Python para graficar curvas reológicas

```

import pandas as pd
import scipy.stats as stats
import statsmodels.api as sm
from statsmodels.formula.api import ols
from statsmodels.stats.multicomp import pairwise_tukeyhsd
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
import ace_tools as tools

# Crear DataFrame con datos de VP (Viscosidad Plástica) a 25 C

```

```

# Datos simulados con pequeñas variaciones alrededor de los promedios
proporcionados
data = {
  "Concentracion": ["0", "0", "0",
                    "0.1", "0.1", "0.1",
                    "0.2", "0.2", "0.2",
                    "0.4", "0.4", "0.4",
                    "0.6", "0.6", "0.6"],
  "VP": [15.8, 16.1, 16.2,
         13.0, 13.2, 13.1,
         16.9, 17.3, 17.1,
         24.8, 25.4, 25.1,
         26.1, 26.5, 26.3]
}

df = pd.DataFrame(data)

# Ajustar modelo ANOVA
model = ols('VP ~ C(Concentracion)', data=df).fit()
anova_table = sm.stats.anova_lm(model, typ=2)

# Prueba post-hoc de Tukey
tukey = pairwise_tukeyhsd(endog=df['VP'], groups=df['Concentracion'], alpha
                          =0.05)

# Gráfico de cajas para visualizar diferencias
plt.figure(figsize=(8, 5))
sns.boxplot(x='Concentracion', y='VP', data=df, palette="Set2")
plt.title('VP según concentración de EGO')
plt.xlabel('Concentración de EGO (ppb)')
plt.ylabel('Viscosidad Plástica (cP)')
plt.tight_layout()
plt.grid(False)
plt.show()

# Mostrar tabla ANOVA y resultados post-hoc
tools.display_dataframe_to_user(name="Tabla ANOVA y Tukey HSD", dataframe=
    anova_table)
tukey_summary = pd.DataFrame(data=tukey.summary().data[1:], columns=tukey.
    summary().data[0])
tools.display_dataframe_to_user(name="Resultados Post-Hoc (Tukey HSD)",
    dataframe=tukey_summary)

# ----- 1. Construir dataset con réplicas (3 por combinación) -----
# Promedios dados en la tabla de VP
means_25 = {"0": 16.0, "0.1": 13.1, "0.2": 17.1, "0.4": 25.1, "0.6": 26.3}
means_65 = {"0": 12.4, "0.1": 10.2, "0.2": 14.0, "0.4": 20.8, "0.6": 22.6}

```

```

np.random.seed(1) # reproducible
rows = []
for conc, mean in means_25.items():
    reps = mean + np.random.normal(0, 0.25, 3) # 0.25 cP variación
    for val in reps:
        rows.append({"Concentracion": conc, "Temperatura": "25", "VP": val})

for conc, mean in means_65.items():
    reps = mean + np.random.normal(0, 0.25, 3)
    for val in reps:
        rows.append({"Concentracion": conc, "Temperatura": "65", "VP": val})

df = pd.DataFrame(rows)

# ----- 2. ANOVA de dos factores (con interacción) -----
model = ols('VP ~ C(Concentracion) * C(Temperatura)', data=df).fit()
anova_table = sm.stats.anova_lm(model, typ=2)

# ----- 3. Posthoc: Tukey HSD sobre combinaciones (Concentracion-
# Temperatura) -----
df['Grupo'] = df['Concentracion'] + "_" + df['Temperatura']
tukey = pairwise_tukeyhsd(endog=df['VP'], groups=df['Grupo'], alpha=0.05)
tukey_df = pd.DataFrame(tukey.summary().data[1:], columns=tukey.summary().data
[0])

# ----- 4. Visualización: gráfico de interacción -----
plt.figure(figsize=(6,4))
means_plot = df.groupby(['Temperatura', 'Concentracion'])['VP'].mean().unstack
()
for conc in means_plot.columns:
    plt.plot(means_plot.index, means_plot[conc], marker='o', label=f"{conc}
ppb")
plt.xlabel('Temperatura ( C )')
plt.ylabel('Viscosidad Plástica (cP)')
plt.title('Interacción: Concentración de EGO vs Temperatura')
plt.legend(title='Concentración')
plt.tight_layout()
plt.show()

# ----- 5. Mostrar tablas al usuario -----
tools.display_dataframe_to_user(name="ANOVA 2 factores (VP)", dataframe=
anova_table)
tools.display_dataframe_to_user(name="Posthoc Tukey HSD (VP, conc temp)",
dataframe=tukey_df)

```

Listing 3. Script en Python para modelo ANOVA