

Aplicación de un método experimental para el aumento de la eficiencia de remoción de la torta del lodo en la perforación de formaciones depletadas en el campo Castilla

Alfonso Tadeo Palacios Ramírez

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero de Petróleos

Director:

M.Sc. Néstor F. Saavedra Trujillo

Co-director:

Ing. Jaime A. Loza Castillo

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas
Escuela de Ingeniería de Petróleos
Bucaramanga
2021

Dedicatoria

A Dios, en quien siempre encontré refugio y fortaleza.

A mis padres, quienes incondicionalmente me apoyaron durante todo este proceso.

Agradecimientos

Agradezco a mi familia, a mis hermanos de quienes siempre he querido ser un ejemplo positivo. También a mis tías y tíos que siempre me han brindado una mano durante mi proceso educativo.

A Daniela, por animarme y darme apoyo incondicional durante la realización de este proyecto y durante gran parte de mi etapa universitaria.

A mis amigos y compañeros de ingeniería de petróleos, Johan, Leidy, Mafe, Hiroshi, Julio, Dani, Yamcarlos y demás que me olvido nombrar, porque de alguna u otra manera me ayudaron a culminar esta etapa y de quienes aprendí muchas cosas.

A mis compañeros y amigos del GIEP, por su compañía y ayuda durante la realización de este proyecto.

Al director del proyecto, ingeniero Néstor Saavedra, por su ayuda en este proyecto e impulsarme a investigar y profundizar cada vez más.

Al co-director del proyecto, ingeniero Jaime Loza, por su amable e incondicional ayuda para la realización de esta tesis.

A los ingenieros Haddy Morales y Yesid Orjuela por su colaboración en la fase experimental del proyecto.

Al Grupo de Investigación de Estabilidad de Pozos y al ICP por su confianza y apoyo en este proyecto.

A la doctora Aidé Perea por su colaboración con el uso de los laboratorios de química de la UIS.

A William Cárdenas, por su desinteresada ayuda con la parte química del trabajo.

A la UIS y a la escuela de Ingeniería de Petróleos.

Tabla de contenido

Introducción	10
1. Objetivos.....	11
1.1. Objetivo general	11
1.2. Objetivos específicos.....	11
2. Marco referencial.....	12
2.1. Remoción de lodo.....	12
2.1.1.Preparación del pozo	13
2.1.2.Desplazamiento del lodo	16
2.1.3.Preflujos.....	19
2.1.4.Recomendaciones cualitativas.....	22
2.2. Torta de lodo, revoque o <i>cake</i>	22
2.2.1.Remoción de la torta de lodo.....	23
2.3. Formaciones depletadas.....	29
3. Metodología.....	30
3.1. Lodo de trabajo.....	31
3.2. Tratamiento con peróxido de magnesio	33
3.3. Síntesis del peróxido de magnesio	35
3.3.1.Descripción de la síntesis	35
3.3.2.Procedimiento experimental.....	36

3.3.3. Resultados de la síntesis	38
3.4. Pruebas de remoción de lodo.....	41
3.4.1. Selección de prueba de remoción	41
3.4.2. Diseño experimental.....	43
3.4.3. Descripción de la práctica	45
3.4.4. Procedimiento experimental.....	47
3.4.5. Resultados.....	49
4. Resultados y análisis.....	51
4.1. Remoción.....	51
4.2. Reología.....	56
5. Conclusiones.....	61
6. Recomendaciones	62
Referencias bibliográficas.....	64

Lista de tablas

Tabla 1 Buenas Prácticas de Cementación.....	16
Tabla 2 Fluido de perforación (RDF) Q-MAX	31
Tabla 3 Fluido de perforación (RDF) de WEATHERFORD.....	31
Tabla 4 Fluido de perforación de yacimiento (RDF) de HALLIBURTON.....	32
Tabla 5 Lodo de experimento de Mahapatra y Kosztin	33
Tabla 6 Tabla de experimento factorial de dos factores con tres niveles.....	45
Tabla 7 Tabla de resultados de laboratorio	50
Tabla 8 Peso en gramos de <i>cake</i> removido en cada ensayo del experimento de remoción	52
Tabla 9 Porcentajes de remoción de torta por cada ensayo realizado	52
Tabla 10 ANOVA de remoción	55
Tabla 11 Valores de reología de lodo tomados en laboratorio.....	57

Lista de figuras

Figura 1. Canal de lodo en anular	14
Figura 2. Flujo laminar y flujo turbulento en pozo	25
Figura 3. Raspador reciprocante y raspador rotatorio	26
Figura 4. Síntesis de peróxido de magnesio (MgO_2)	37
Figura 5. Mezcla producto de la reacción siendo filtrada al vacío.....	37
Figura 6. Espectro infrarrojo del óxido de magnesio inicial	38
Figura 7. Espectro infrarrojo del óxido de magnesio	39
Figura 8. Espectro infrarrojo del producto obtenido en la síntesis de peróxido de magnesio.	40
Figura 9. Espectro infrarrojo del peróxido de magnesio.....	41
Figura 10. Remoción con malla metálica y viscosímetro Fann 35	42
Figura 11. Revoque de lodo generado en tela antiluido.	42
Figura 12. Torta de lodo formada en tela antiluido unida al rotor del viscosímetro	43
Figura 13. Diagrama de procedimiento de laboratorio	49
Figura 14. Ampliación de la tabla de resultados.	50
Figura 15. Porcentaje de torta removida vs Concentración de peróxido de magnesio	53
Figura 16. Gráfica de esfuerzo cortante (viscosidad) vs velocidad de corte.....	58
Figura 17. Viscosidad plástica vs concentración de peróxido de magnesio	59
Figura 18. Yield point vs concentración de peróxido de magnesio	60
Figura 19. Esfuerzo de gel vs concentración de peróxido de magnesio	60

Resumen

Título: Aplicación de un método experimental para el aumento de la eficiencia de remoción de la torta del lodo en la perforación de formaciones depletadas en el campo Castilla

Autor: Palacios Ramírez Alfonso Tadeo

Palabras clave: formaciones, depletadas, lodo, remoción, torta, *cake*, pruebas, laboratorio.

Descripción: En Castilla es común el uso de fluidos de perforación de yacimiento, “Drill-in”, en zonas de alta depleción; dichos fluidos se componen principalmente por polímeros y carbonato de calcio. Debido al agotamiento de presión en estas formaciones se forma en ellas un cake de lodo grueso principalmente compuesto por los sólidos en suspensión (polímeros y carbonato). Para asegurar una remoción eficiente del cake en el pozo, previo a la cementación primaria, se hicieron pruebas de laboratorio para adaptar un método de remoción preexistente que se pueda aplicar en el campo. Se modificó la composición del lodo añadiendo peróxido de magnesio para que aumente el porcentaje en masa de torta removida. El Peróxido de magnesio es insoluble en agua, facilitando su disolución en el *cake*. Ya en el agua, al generar un ambiente ácido (efecto del lavador), se ocasiona una reacción de oxidación que libera los polímeros de la torta, aumentando su eficiencia de remoción. Tomando dicho tratamiento como base, se definieron la concentración de peróxido de magnesio y la concentración de ácido cítrico como los factores más influyentes en la remoción de la torta y se probaron a distintos niveles según se estableció en el diseño experimental factorial. Posteriormente se analizaron los resultados mediante un análisis de varianza obteniendo evidentes mejoras de remoción en el tratamiento utilizado y se establecieron condiciones que hay que tener en cuenta para la aplicación del tratamiento en campo.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-químicas. Escuela de ingeniería de petróleos. Director: Néstor Fernando Saavedra Trujillo, M Sc. Co-director: Jaime Alberto Loza, Ingeniero de petróleos.

Abstract

Title: Application of an experimental method to increase the removal efficiency of filter cake in the drilling of depleted formations in Castilla oilfield.

Author: Palacios Ramírez Alfonso Tadeo

Key words: formation, depleted, mud, removal, cake, tests, laboratory.

Description: in Castilla it is common to use reservoir drilling fluids, “RDF” in high depletion zones; these fluids are mainly composed of polymers and calcium carbonate. Due to depletion of pressure in these formations it is formed in them a thick filter cake mainly composed by suspended solids (polymers and carbonate). To ensure an efficient removal of the cake into the wellbore, previous to primary cementation, laboratory tests were carried out to adapt a pre-existing removal method that can be applied in the oil field. The mud composition was modified by adding magnesium peroxide to increase the weight percentage of cake removed. When an acid environment is generated (effect of the washer), it causes an oxidation reaction that releases the polymers from the cake, increasing its removal efficiency. Taking this treatment as a basis, the concentration of magnesium peroxide and the concentration of citric acid were defined as the most influential factors in cake removal and were tested at different levels as established in the factorial experimental design. Subsequently, the results were analyzed by an analysis of variance, obtaining evident removal improvements in the treatment used and conditions that must have in account for the application of the treatment in field were established.

* Thesis

** Physicochemical Faculty. Petrol. Director: Néstor Fernando Saavedra Trujillo, M Sc. Co-director: Jaime Alberto Loza, Ingeniero de petróleos.

Introducción

Para obtener un efectivo fragüe al momento de la cementación primaria, es necesario tener la menor cantidad posible de contaminantes en el pozo. Para esto, se debe tener en cuenta todos los aspectos necesarios que aseguren una efectiva remoción tanto del lodo como el revoque que genera, ya que la lechada de cemento suele ser incompatible con el lodo. El principal factor que asegura una efectiva limpieza de las paredes del pozo es el flujo turbulento al momento de circular los preflujos. Sin embargo, en pozos con formaciones depletadas se presentan problemas asociados como pérdidas de fluido, que impiden la circulación en turbulencia del fluido de perforación y de los preflujos. Consecuentemente se ve afectada la limpieza de pozo previa a la cementación, debido a que queda una gruesa torta de lodo difícil de remover. En Castilla, es común este tipo de problema, por ende se desarrolló en este estudio la manera de probar en laboratorio un tratamiento de remoción que aumente la eficiencia de remoción de la torta de lodo. Teniendo en cuenta la composición del fluido de perforación utilizado en las zonas depletadas de Castilla (Reservoir drill-in fluid) se probó en laboratorio un tratamiento con peróxido de magnesio que aumentase la eficiencia de remoción de la torta de lodo. A su vez, se verificó qué cambios produce el uso de este tratamiento para así determinar su posible aplicación en campo.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Determinar de manera experimental un método o una combinación de métodos y/o productos que permitan mejoras en la remoción de la torta del lodo en pozos con formaciones depletadas.

1.2. Objetivos específicos

Realizar una revisión bibliográfica que permita identificar factores que afectan la torta de lodo, estudiar los fluidos y métodos de remoción de lodo existentes, especialmente en formaciones depletadas.

Plantear un diseño experimental que describa la manera de efectuar las pruebas de laboratorio que determinen el producto (o método) final de remoción.

Realizar las pruebas de laboratorio planteadas y realizar el respectivo reporte de evidencias y resultados.

Realizar un análisis de resultados para verificar las mejoras de remoción y formular conclusiones y sugerencias.

2. Marco referencial

2.1. Remoción de lodo

En la construcción de pozos los procesos de cementación están sumamente ligados a una remoción efectiva del lodo una vez finalizada la perforación. En la cementación primaria es primordial generar un sello hidráulico continuo e impermeable para poder lograr el aislamiento zonal deseado. En este proceso es necesario que el hoyo quede con la menor cantidad de lodo posible; a fin de evitar la contaminación de la lechada de cemento con el fluido de perforación. Las lechadas de cemento suelen ser incompatibles con los lodos de perforación, siendo causantes de fallas en el fragüe del cemento y por tanto en la cementación primaria (Docherty et al., 2016).

La remoción de lodo previa a la cementación está en gran parte relacionada a la calidad del pozo que determina la fase de perforación. El lodo se acondiciona para limpiar el pozo y se circula durante y antes de la extracción de la sarta, posteriormente se toman registros estáticos, se introduce el *casing* y se reacondiciona el lodo para finalmente ser desplazado y comenzar el emplazamiento del cemento en el pozo.

Para la evaluación de la remoción de lodo se tienen ciertas limitantes que generan incertidumbre como carencia de la cuantificación de los efectos del movimiento del *casing*, poca información sobre la interacción entre fluidos y flujo inestable. A pesar de la controversia que hay en la industria acerca del diseño de la cementación primaria, se tienen algunas áreas de consenso al momento de preparar estos procedimientos (Nelson & Guillot, 2006):

- Preparación del pozo
- Desplazamiento del lodo

- Preflujos
- Recomendaciones cualitativas

2.1.1. Preparación del pozo

La manera en que se lleven a cabo procesos de perforación y corrida de revestimiento afectará el trabajo de cementación. Un pozo mal perforado puede tener numerosas patas de perro que dificulta correr los revestimientos con los centralizadores necesarios. En estos pozos se dificulta la remoción del lodo por el lado angosto del anular; lo que puede causar que una porción del lodo quede pobremente tratada, puede inducir *washouts*, gruesos revoques (o tortas) de lodo y camas de asentamiento de sólidos que serían difíciles o imposibles de remover (Sauer, 1987).

2.1.1.1. Calidad del pozo: un pozo con calidad debería cumplir con lo siguiente:

- Presiones controladas a lo largo del pozo
- Paredes suaves con baja severidad de pata de perro
- Estar bien calibrado
- Estable
- Limpio
- Lodo bien tratado y móvil que genere tortas delgadas en las zonas permeables.

En la mayoría de los casos no es posible lograr estas características de pozo ideal, por tanto, las técnicas de cementación deben ser diseñadas para mitigar el impacto de un pozo mal preparado. Fallas en lograr estos parámetros de pozo pueden conllevar a pegs diferenciales, fuerzas de

arrastre que evitan que los revestimientos lleguen a las profundidades deseadas, pérdidas al correr revestimiento y pobre remoción de lodo (Schaaf et al., 2000).

2.1.1.2. Circulación y eficiencia de desplazamiento: la eficiencia de desplazamiento es la capacidad de un fluido para desplazar a otro. Cuando un fluido es utilizado para desplazarse a sí mismo se habla de eficiencia de circulación. En cementación de pozos es importante la eficiencia de desplazamiento y se dice que es 100% cuando el fluido desplazante (espaciadores y lavadores) remueve totalmente del anular el fluido a ser desplazado (lodo). En la práctica, no es posible lograr una eficiencia de desplazamiento de lodo total, ya que el anular siempre contendrá mínimas fracciones de lodo no desplazado.

Cuando se tiene un revestimiento con bajo grado de centralización, habrá un canal de lodo en la parte angosta del anular que no será removido. Esta situación se ilustra en la Figura 1, donde el desplazamiento alrededor de gran parte del *casing* es efectivo, sin embargo, hay un canal continuo de lodo inmóvil. Adicionalmente, una leve capa de lodo queda adherida a las paredes del pozo y del revestimiento (Nelson & Guillot, 2006).

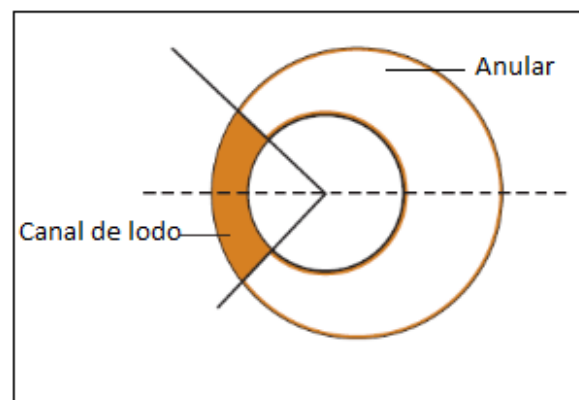


Figura 1. Canal de lodo en anular. Nelson, E. B., & Guillot, D. (Eds.). (2006). *Well cementing* (Second edition). Schlumberger.

2.1.1.3. Acondicionamiento del lodo: los lodos son diseñados para facilitar y llevar a cabo de manera óptima las operaciones de perforación. Por ende, los ingenieros no diseñan los fluidos de perforación pensando en lograr una gran eficiencia en su remoción, en la toma de registros o en operaciones de completamiento. Por lo tanto, se hace necesario el acondicionamiento del lodo. Generalmente se busca reducir la densidad del lodo sin afectar el control del pozo.

Para incrementar la movilidad del lodo se reduce el esfuerzo de gel, punto cedente (*yield point*) y la viscosidad plástica, generando una disminución en las fuerzas motrices necesarias para su desplazamiento. Esta modificación reológica requiere una previa remoción de recortes del pozo y se debe tener sumo cuidado con el asentamiento de agentes densificantes ya que afecta el control del pozo.

La reología del lodo se modifica por medio de aditivos y se debe circular lodo hasta que se alcancen las propiedades deseadas. Posteriormente, la corrida de *casing* debe llevarse a cabo cuidadosamente, de manera que no se fracturen formaciones al momento de su bajada. Al correr el *casing* y llegar a profundidades intermedias se debe hacer fluir lodo, ya que algunos recortes se podrían arrastrar hacia el fluido de perforación gelificado o deshidratado causando un excesivo crecimiento de presión al momento de continuar la circulación. Después que el *casing* está a la profundidad deseada se debe circular lodo, ya que el pozo ha estado estático durante un gran periodo de tiempo, evitando así la formación geles y *cakes*.

Para entender mejor la importancia de cada parámetro, es posible usar modelos matemáticos que predicen la circulación de lodo. Sin embargo, el monitoreo continuo de la circulación del lodo continúa siendo el mejor método para verificar un adecuado acondicionamiento del lodo (Zamora et al., 2000).

2.1.2. Desplazamiento del lodo

Determinar la eficiencia de desplazamiento de lodo es más complejo que determinar la eficiencia de circulación de lodo. A pesar de que se genera una interfase entre dos fluidos distintos (lodo y fluido desplazante), se sigue utilizando un perfil de velocidad de un fluido individual, fluyendo en la misma geometría a la misma tasa de flujo.

2.1.2.1. Prácticas de campo y Observaciones: el régimen del fluido desplazante fue uno de los primeros parámetros que se reconoció que influía en la eficiencia de desplazamiento del lodo. Por experiencias en campo se concluyó que con un flujo laminar se desplazaba únicamente el 60% del lodo circulable, mientras que con un flujo en régimen turbulento se lograba hasta un 95% de desplazamiento (Howard & Clark, 1948).

Posteriormente, en estudios a pozos con fallas en la cementación primaria, se reiteró la necesidad de un flujo turbulento para desplazamiento del lodo y se sugirió que el espacio anular debía estar en contacto con un fluido desplazante en régimen turbulento por suficiente tiempo (Brice & Holmes, 1964). En años subsecuentes numerosos estudios de campos condujeron al establecimiento de ciertas reglas llamadas “buenas prácticas de cementación” Tabla 1.

Tabla 1

Buenas Prácticas de Cementación.

Buenas prácticas de cementación	
Geometría del pozo	Un anular ideal es recto, libre de derrumbes (<i>washouts</i>) y por lo menos de 1,5 pulgadas de ancho

Centralización	El <i>casing</i> debe mantenerse tan centrado como sea posible, una centralización de más del 75% generalmente es aceptable.
Acondicionamiento del lodo	El lodo es circulado antes de la cementación para remover gas y recortes, romper el esfuerzo de gel del lodo y reducir la viscosidad del lodo.
Movimiento del casing	Se prefiere realizar rotación antes que reciprocación. El movimiento debe comenzar durante el acondicionamiento del lodo.
Lavadores químicos y espaciadores	Lavadores y espaciadores son bombeados antes de la lechada de cemento, actuando como amortiguador entre una posible incompatibilidad lodo - cemento. Se recomienda un tiempo de contacto de 10 min.
Tapones de cementación	Tapones superior e inferior son bombeados delante y detrás de la lechada de cemento para separarla del lodo
Otros equipos de casing	En ocasiones se adhieren raspadores (<i>scratchers</i>) al exterior del <i>casing</i> para remover el revoque de lodo.

Nota. Tomado de Bittleston, S., & Guillot, D. (1991). Mud removal: Research improves traditional cementing guidelines. *Oilfield Review*, 3, 44–54.

.Estas prácticas se mantienen como recomendaciones no cuantitativas ya que es difícil concertar valores estándar para todos los casos. Como reglas cuantificables se desarrollaron, a partir de más experimentos, la jerarquía de densidad y viscosidad entre los fluidos que circulan el pozo y gradientes mínimos de presión, que ahora hacen parte de los criterios de diseño para un eficiente desplazamiento del lodo.

2.1.2.2. Desplazamiento laminar de lodo móvil en anular vertical concéntrico: en un anular vertical y centrado con relaciones favorables de densidad y viscosidad entre sus fluidos, va a haber un desplazamiento estable en la dirección azimutal. Cualquier variación de la eficiencia de desplazamiento es causada por la forma del perfil de la interfaz en dirección radial. Por lo tanto, el problema se reduce a coordenadas axiales y radiales.

Estudios teóricos recalcan el papel que desempeñan las fuerzas gravitacionales y viscosas en el desplazamiento laminar de lodo en anular vertical concéntrico. Bajas relaciones de densidad entre fluidos y bajas relaciones de viscosidad de corte mayores que 1, harán que las bajas tasas de flujo contribuyan al aplanamiento del perfil de interfase y conlleven a un desplazamiento eficiente (Nguyen et al., 1992).

2.1.2.3. Remoción de lodo en anular excéntrico: la mayoría de los anulares, en cementación, son excéntricos debido a la dificultad de centralizar los *casings*. Esta excentricidad y la geometría asimétrica de los pozos representan dificultades a la hora de remover el lodo. Estudios donde se intenta entender el rol de la excentricidad del *casing* en la remoción del lodo dieron como resultado que, en flujo laminar, el desplazamiento se optimiza incrementando la relación de esfuerzo de cedencia (*yield-stress*) más que la relación de viscosidad plástica. Es decir, es preferible aumentar el esfuerzo de cedencia del cemento (McLean et al., 1967).

Lo anterior se explica porque el esfuerzo de corte necesario para vencer el esfuerzo de cedencia del cemento es capaz de hacer fluir el lodo en la parte más angosta del anular. Esto es aplicable cuando se tiene una tasa de flujo baja. Cuando se incrementa la tasa de flujo la relación de viscosidad plástica es el parámetro que toma más importancia. Al haber una mayor diferencia de viscosidades será mayor la eficiencia de desplazamiento.

2.1.2.4. Flujo turbulento: en la década de 1960 se volvió muy común el uso de flujo turbulento en la lechada de cemento para tener una buena eficiencia de desplazamiento de lodo. Esto se dio gracias a la introducción de dispersantes en el cemento que permitió tasas de bombeo más altas a las usualmente usadas (Howard & Clark, 1948). Según Brice y Holmes el espacio anular debe estar en contacto con fluido en flujo turbulento durante suficiente tiempo, el cual oscila entre los 4 y 10 minutos (Brice & Holmes, 1964).

El flujo turbulento para remoción de lodo se convirtió en una práctica comúnmente aceptada debido a la gran cantidad de trabajos de cementación reportados con esta técnica. Claramente, el flujo turbulento solo no es suficiente para garantizar una remoción efectiva, hay que tener en cuenta la relación de viscosidad entre el lodo y el fluido desplazante. En experimentos a escala, un fluido viscoso fluyendo laminarmente al intentar ser desplazado por un fluido menos viscoso en flujo turbulento, terminará en una disminución del gradiente de presión (Clark & Carter, 1973). Por esto se debe tener en cuenta una jerarquía de viscosidades entre los fluidos, siendo más viscoso el fluido desplazante.

2.1.3. Preflujos

Debido a la incompatibilidad de la mayoría de fluidos de perforación con las lechadas de cemento, se da el uso de los “preflujos”. Estos son fluidos intermedios que se bombean con el fin de evitar el contacto lodo – cemento; pueden ser lavadores químicos que no contienen sólidos o espaciadores que contienen sólidos y son mezclados a varias densidades.

A pesar de que el propósito principal de los preflujos es evitar que el fluido de perforación y la lechada de cemento se contacten, estos también pueden ayudar al desplazamiento del lodo.

Adicionalmente, los preflujos no deben causar daño a la formación por exceso de filtrado ni alterar la mojabilidad de la roca (Gambino et al., 2001).

2.1.3.1. Lavadores químicos: los lavadores químicos son preflujos con densidad y viscosidad muy cercanas a la del agua o crudo; por esto, pueden ser fácilmente bombeados en flujo turbulento. Estos fluidos dejan las paredes del *casing* y de la formación humedecidas con agua para una óptima adhesión del cemento.

Cuando se usan lodos base agua, la composición del lavador consta de agua con dispersantes y surfactantes diluidos (Evanoff & Cook, 1988). Los dispersantes son similares a los utilizados en las lechadas de cemento, sulfonatos de polinaftaleno, lignosulfonatos, tanatos o compuestos más amigables con el medio ambiente como derivados del ácido policarboxílico. Los surfactantes son fluidos que ayudan a limpiar compuestos aceitosos adsorbidos en superficies sólidas.

Cuando en pozo se aplican lodos base aceite el lavador puede ser una mezcla de agua con solventes mutuos y surfactantes, o un lavado de aceite seguido por un lavador químico base agua (Motley et al., 1974).

La selección de la concentración y el tipo de surfactante y solvente para el lavador se hace a través de pruebas de laboratorio, usando varios métodos complementarios adaptados a los objetivos de este preflujo (diluir el lodo, erosión tangencial, humectar en agua y compatibilidad entre fluidos).

2.1.3.2. Espaciadores: los espaciadores son preflujos con densidades y propiedades reológicas diseñadas cuidadosamente. Estos fluidos son difíciles de diseñar, ya que deben ser

compatibles tanto con la lechada de cemento como con el lodo (Rabia, 2001). A continuación, se muestra una descripción de los ingredientes comúnmente usados para los fluidos espaciadores.

- Viscosificantes: son necesarios para suspender los agentes densificantes y controlar las propiedades reológicas. Se pueden dividir en polímeros solubles en agua y en arcillas. Algunos viscosificantes son: poliacrilamidas, guar o sus derivados, derivados de la celulosa, algunos biopolímeros y/o arcillas.

- Dispersantes: tienen la capacidad de mejorar la compatibilidad del fluido espaciador con los lodos base agua y con las lechadas de cemento. Además de esto dispersan el agente densificante en el espaciador. El dispersante más común es el sulfonato polinaftaleno (Guillot et al., 1986).

- Agentes de control de pérdidas de fluido: son usualmente utilizados polímeros solubles en agua y cumplen la función que dice en su nombre. Estos polímeros suelen ser: la goma guar, polietiliminina, derivados de la celulosa, y sulfonato de poliestireno. En ocasiones un mismo polímero cumple la función de control de pérdidas de fluido y de viscosificante (Wieland & Woods, 1975).

- Agentes densificantes: se usan para obtener la densidad deseada de espaciador. Se suelen usar como densificantes la harina de sílice, ceniza volante, carbonato de calcio, barita, hematita, ilmenita, y tetraóxido de manganeso (Thomas, 1981).

- Surfactantes: incrementan la compatibilidad de los espaciadores con los lodos base aceite y dejan el *casing* humectado con agua. Se pueden usar los mismos surfactantes utilizados para los lavadores (Sauer, 1987).

Los espaciadores, en la mayoría de los casos, se hacen fluir en régimen laminar durante el desplazamiento de lodo debido a sus viscosidades relativamente altas. Sin embargo, su

composición puede ser optimizada para reducir su viscosidad sin necesidad de comprometer la estabilidad, permitiéndose aplicar en flujo turbulento.

2.1.4. Recomendaciones prácticas

Desde hace más de 40 años se identificaron las causas del desplazamiento ineficiente del lodo en la cementación primaria. Por eso, se han venido desarrollando investigaciones que han permitido establecer una serie de prácticas recomendadas que en la mayoría de los casos logran buenas eficiencias de desplazamiento (Nelson & Guillot, 2006).

- Las propiedades reológicas del lodo deben reducirse a valores mínimos, sin que se afecte la capacidad del mismo para mantener suspendidos los agentes densificantes.
- Se debe tratar de obtener la mayor centralización posible.
- En caso de esperar dificultades al momento de remover se debe equipar la tubería de con raspadores que ayuden en la remoción.
- Si la viscosidad del lodo no puede reducirse lo suficiente, el lodo y el espaciador deben ir separados por un preflujo que sea compatible con ambos fluidos.
- De ser posible, se debería bombear un lavador químico y su tiempo mínimo de contacto debería ser de 8 minutos a lo largo de la zona de interés.
- La densidad y reología del fluido espaciador deben estar entre las del lodo y de la lechada de cemento.

2.2. Torta de lodo, revoque o *cake*

Cuando el lodo circula por una formación permeable se da el proceso de filtración, generando una capa de sólidos que recubre la pared del pozo llamada torta de lodo, revoque o *cake*.

La formación absorbe el filtrado de lodo dejando entrar en ella los sólidos disueltos, siendo los sólidos suspendidos en el lodo los que generan el *cake*. Los sistemas de fluidos de perforación se deben diseñar para generar una torta de lodo de baja permeabilidad con el fin de limitar la invasión de filtrado. Esto es favorable para la estabilidad del pozo y evita gran cantidad de problemas de perforación y producción (M-I Swaco, 2001).

Los problemas que pueden llegar a causar un revoque grueso y una filtración excesiva comprenden condiciones de “pozo reducido” es decir, se produce mayor torque y arrastre, aumenta la probabilidad de pega de tubería, pérdida de circulación, mala toma de registros y daño a la formación. Adicionalmente, la torta de lodo debe ser removida en gran parte al momento de cementar, ya que al estar en contacto con el cemento puede deshidratarse y dejar espacios vacíos (Ravi et al., 1992).

2.2.1. Remoción de la torta de lodo

Desde la década de 1930 se evidenció que la canalización de cemento y mal aislamiento de zonas en pozo se debía a una remoción del lodo deficiente que daba como resultado un *cake* residual en las paredes del pozo. Posteriormente, se fueron realizando estudios y prácticas donde se hallaron formas efectivas de remover la torta de lodo, tales como jets de fluido, raspadores, reciprocación del *casing* o bombeo de ácido previo a la lechada de cemento (Jones & Berdine, 1940). Desde entonces se han realizado estudios para mejorar la eficiencia de remoción del revoque que van desde la remoción por flujo de lodo en pozo, métodos mecánicos y métodos químicos.

2.2.1.1. Remoción por flujo: la erosión y remoción del *cake* es función del esfuerzo de corte en la pared de la formación; el grosor de la torta durante la circulación del pozo tiende a ser

mayor en el lado angosto del anular. Esta asimetría en el *cake* también causa que el patrón de flujo en el pozo tenga una disminución de velocidad en la parte angosta del anular, llegando a detener el flujo de lodo en algunos casos (Nelson & Guillot, 2006).

El régimen de flujo también es importante para la remoción del lodo y el *cake*. En condiciones de flujo laminar predominan las fuerzas de fricción viscosas; la velocidad máxima se da en el centro del pozo y se reduce gradualmente hasta ser nula en las paredes de este. En flujo turbulento, predomina la energía del movimiento del fluido, las partículas se desplazan con un movimiento circular errático y la velocidad en las paredes del pozo es casi la misma que en el centro. Figura 2.

En general, se prefiere el flujo turbulento para la remoción efectiva del fluido de perforación. Sin embargo, en pozos depletados o con tamaños estrechos es preferible el flujo laminar, ya que el flujo turbulento puede incrementar las tasas de flujo y las caídas de presión por fricción, aumentando la posibilidad de que se presenten pérdidas de fluido y la inestabilidad del pozo.

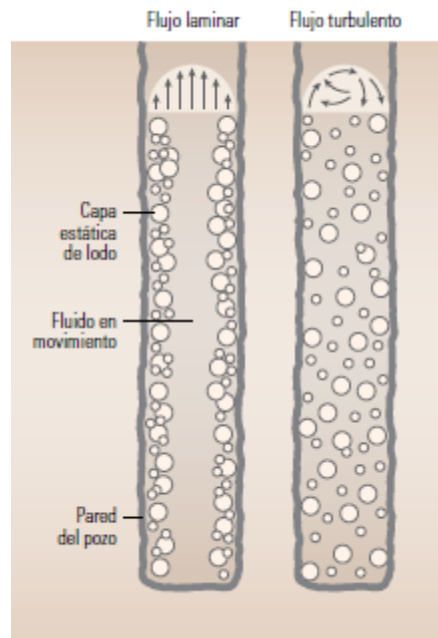


Figura 2. Flujo laminar y flujo turbulento en pozo. Docherty, et al.. (2016). Mud Removal—Clearing the Way for Effective Cementing. Oilfield Review, 28, 20–25.

2.2.1.2. Remoción mecánica: con el fin de preparar eficazmente el pozo para las operaciones de completamiento se intenta incrementar la eficiencia de limpieza y remoción añadiendo herramientas mecánicas llamadas raspadores o “*Scratchers*”. Figura 3. Esta herramienta está diseñada para romper mecánicamente la torta de lodo; el raspador contacta el *cake* y aprovecha el movimiento de la sarta, bien sea rotatorio o de reciprocación, generando de esta manera una mejora en la remoción. Su uso es recomendado en zonas productivas donde es esencial que se genere sello, sin embargo, el uso del raspador no asegura un 100% de eficiencia de remoción del revoque en la pared del pozo (Nguyen et al., 1992).

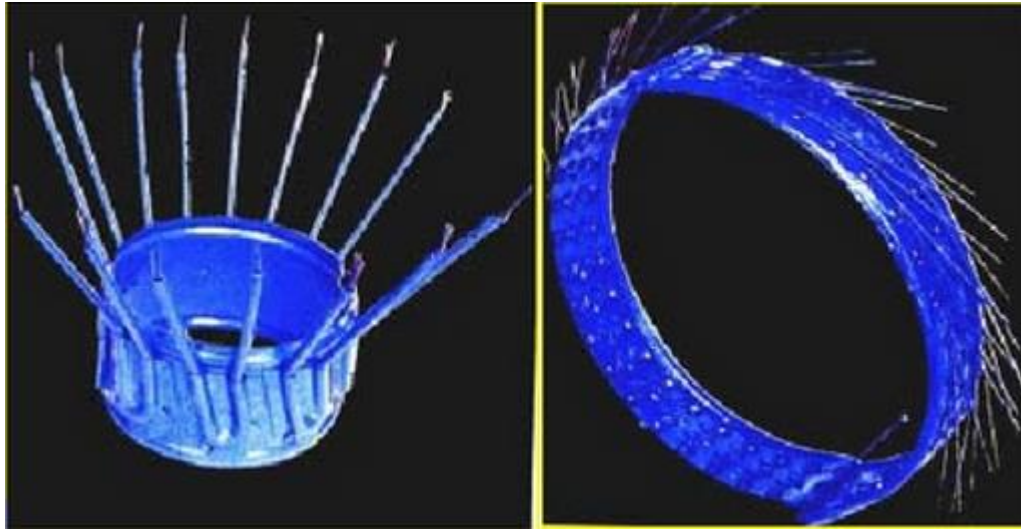


Figura 3. Raspador reciprocante (izquierda) y raspador rotatorio (derecha). (Tomada de <http://www.dthrotarydrilling.com>)

2.2.1.3. Remoción química: generalmente, para remover la torta de lodo se utilizan tratamientos que consisten en contactar la pared del pozo con fluidos de determinada composición química que permitan remover el agente puenteante que compone la torta; usualmente el fluido de contacto es un ácido fuerte. Este método de remoción puede resultar peligroso, ya que el ácido puede corroer superficies metálicas de la tubería de perforación o completamiento. Adicional al uso de ácidos se encuentran en la literatura prácticas de campo que utilizan distintos lavadores químicos que han demostrado ser eficientes (Fink, 2012).

- Agentes puenteantes

Estos aditivos de lodo cumplen la función de hacer un papel obturador, impidiendo el paso de fluidos a una garganta poral o formación fracturada mediante la formación de un revoque de fácil remoción posterior. El agente puenteante es contactado por una solución salina que hará que este, después de determinado tiempo, se disuelva en este fluido (Munoz Jr, 2009).

El uso de los agentes puenteantes es con el fin de sellar los poros de la formación para disminuir considerablemente el filtrado de fluido hacia la misma. En la mayoría de los casos, el *cake* de lodo que se forma al hacer el puenteo es altamente dispersable en el fluido de producción, por lo tanto, es fácilmente removido poniendo el pozo a producir. El principal agente de puenteo es el carbonato de calcio seleccionado según su tamaño de partícula que es capaz de realizar el puenteo a partir de 100 micras.

Entre otros tipos de puenteantes se encuentran los degradables, estos aditivos se componen de material degradable que fácilmente, junto con los demás sólidos suspendidos en el lodo, forman la torta de filtrado en la pared de pozo. Con el tiempo, el puenteante se empieza a degradar desestabilizando el revoque al generar espacios vacíos en él, facilitando su remoción mediante el flujo de pozo o la producción de este (Munoz Jr, 2009).

- Degradación por ácidos

En los procesos de remoción de la torta de lodo y estimulación de pozos es común el uso de un fluido lavador ácido capaz de debilitar los componentes del *cake*, facilitando así su remoción. El tipo de ácido a aplicar dependerá de los componentes del lodo que hagan parte del revoque, de la consolidación y la estabilidad de la formación en la que se quiera utilizar el fluido de remoción, seleccionando así un tratamiento con ácido fuerte o débil.

Es común que en formaciones de carbonatos permeables se utilice ácido clorhídrico (HCl) para remover la torta de lodo y el daño de formación. Por lo general, este tratamiento es evitado en pozos en formaciones blandas o no consolidadas, ya que una remoción del *cake* allí generaría inestabilidad, derrumbes y/o ensanchamiento del pozo.

En yacimientos de carbonato en Arabia se reporta el uso de un tratamiento de remoción de la torta del lodo a base de ácido acético, debido a que en esta formación el uso de HCl causa daño a la formación. El ácido utilizado fue el EDTA (ácido dietileminotetraacético) en solución y posteriormente, con pruebas de *build-up*, se confirmó las mejoras en el daño de formación y remoción del *cake* (Nasr-El-Din et al., 2001).

Otro tratamiento de remoción de torta mediante el uso de ácidos es el uso de ortoésteres. Los ortoésteres tienen la capacidad de generar ácidos en presencia de agua y para este procedimiento es necesario añadir bases inhibidoras que retarden la formación del ácido apenas el ortoéster contacte el lodo. Eventualmente, cuando se ha formado la torta se generará el ácido que ayudará a degradar el carbonato y los polímeros presentes que ayudarán en la remoción del *cake* (Schriener & Munoz Jr, 2009).

- Degradación enzimática

El uso de enzimas suele ser considerado al momento de efectuar un proceso de remoción de la torta de lodo; esto debido a su capacidad de degradar los componentes poliméricos del *cake*. La ventaja de este tipo de tratamiento es que ataca enlaces específicos de la torta de lodo y pueden llevarse a cabo en sistemas con pH desde 2 hasta 10 (Battistel et al., 2010).

- Peróxidos

Varios peróxidos han sido utilizados para realizar una remoción efectiva del *cake*. Bulanov y otros (Bulanov et al., 1992) reportaron como exitoso el uso de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en solución acuosa con carbonato de sodio (Na_2CO_3) para remover depósitos de arcilla.

Otro método efectivo de remoción consiste en una mezcla de polímeros polisacáridos, un agente puenteante y peróxidos alcalinotérreos y de zinc. En remojo esta solución deja una masa adherida a la pared del pozo que posteriormente puede ser removida con facilidad mediante un lavador.

- Peróxido de magnesio

En este tratamiento el peróxido de magnesio permanece inerte en el lodo a bajas y medias temperaturas ($T < 70^{\circ}\text{C}$). Este compuesto en presencia de agua no se diluye y en ambientes básicos no reacciona; esto genera que al añadirse al lodo termine integrándose a los sólidos de la torta del lodo. En ambientes ácidos el peróxido de magnesio actúa como un agente oxidante, liberando oxígeno que ataca a los polímeros presentes en la torta del lodo (goma xantan, almidón, celulosa polianiónica), ayudando así con su remoción.

Para lograr el ambiente ácido se usa un lavador ácido, utilizando como aditivo algún compuesto ácido que reduzca el pH del fluido (ácido clorhídrico, ácido acético, ácido cítrico, entre otros) (Mahapatra & Kosztin, 2011). De perforación; lo que lo hace pasar a formar parte íntegra de la torta del lodo a medida que esta va siendo depositada. En ambientes alcalinos, el peróxido se mantiene estable dentro de la torta; pero en ambientes ácidos, el peróxido reacciona produciendo peróxido de hidrógeno el cual se descompone posteriormente mediante una reacción de oxidación. Esta reacción libera oxígeno que va a atacar polímeros presentes en la torta.

2.3. Formaciones depletadas

Las formaciones depletadas son formaciones que, debido a su producción durante prolongado tiempo, presentan bajo sostenimiento de presión, presión de poro o presión de yacimiento (Schlumberger, 2019b); esta suele estar por debajo del gradiente hidrostático normal;

por esto, los fluidos de perforación allí utilizados deben bajar su peso incluso por debajo del peso del agua, siendo un gradiente subnormal. Las formaciones depletadas suelen ser arenas parcialmente drenadas que tienen diversos problemas, tanto en la perforación, como en su completamiento y producción.

En la perforación, el peso de lodo llega a tener valores muy bajos, ya que la formación puede bajar hasta 6 ppg con relación a su gradiente de presión inicial. En muchos casos estos yacimientos son intercalaciones de *shale* y arena, donde el *shale* conserva su presión de formación inicial, debido a su naturaleza impermeable, mientras que la arena muestra una presión notablemente más baja; esto resulta en problemas con el peso del lodo de perforación que se mitigan con técnicas geomecánicas, perforando en la trayectoria adecuada con base en la relación de esfuerzos presente en las formaciones (El-dabi & Bulgachev, 2011).

En este tipo de formación se utilizan los fluidos de perforación *Reservoir drill-in Fluid* (RDF) o fluidos de yacimiento. Este fluido es un lodo de bajo peso, carente de barita como densificante y compuesto principalmente por polímeros como almidón, goma xántica (entre otros); también tiene en su composición carbonato de calcio como material puenteante (Schlumberger, 2019a). Aunque los fluidos RDF se caracterizan por causar menor daño a la formación y presentar menor filtrado a la formación, estos aún generan tortas de lodo relativamente impermeables en la pared del pozo (Mahapatra & Kosztin, 2011).

3. Metodología

A raíz de la revisión literaria y con base en los lodos de interés utilizados en Castilla, se diseñó el plan de trabajo que parte de la selección de un lodo con el que se va a trabajar en laboratorio. Posteriormente, se seleccionó el tratamiento de remoción química para probar con el

fluido de perforación; para llevarlo a cabo, fue necesario realizar la síntesis del aditivo químico que se utilizó y de esta manera se pudo realizar las pruebas de remoción de la torta del lodo.

3.1. Lodo de trabajo

En Castilla se utilizan tres fluidos de yacimiento (RDF) de distintas empresas, los cuales tienen aditivos muy similares en cuanto a la función que cumplen, sus composiciones se muestran en las Tablas 2, 3 y 4.

Tabla 2

Fluido de perforación (RDF) Q-MAX.

Aditivo	Concentración [lpb]
Goma xantana	2,3
Almidón de alta temperatura	3
PAC LV	2
Mejorador de ROP	1%
Controlador de filtrado	1
Carbonato M 200	16
Carbonato M 325	25
Carbonato M 1200	5
Carbonato M 40-100	5
Soda Cáustica	pH 9,6

Nota. Tomado de ICP-ECOPETROL S.A.

Tabla 3

Fluido de perforación (RDF) de WEATHERFORD.

Aditivo	Concentración [lpb]
Soda cáustica	0,15
Bactericida	0,15
Goma welan	1,5
Almidón	8
PAC	1
Inhibidor de Arcilla	3
Lubricante	6
Carbonato M-600	14
Carbonato M-325	6
Carbonato M-40-100	5

Nota. Tomado de ICP-ECOPETROL S.A.

Tabla 4

Fluido de perforación de yacimiento (RDF) de HALLIBURTON.

Aditivo	Concentración [lpb]
Soda Cáustica	pH 9,5
Bactericida	1,5
Goma Xantana	2
Controlador de Filtrado	10
PAC LV	1
CARBONATO M600	4
CARBONATO M325	4
CARBONATO M200	10
CARBONATO M40 - 100	2
Almidón	5
Lubricante	2%

Nota. Tomado de ICP-ECOPETROL S.A.

Los tres tipos de lodo presentados tienen en común que se componen principalmente por carbonato de calcio, de distintos tamaños de partícula, y diferentes polímeros; estos aditivos cumplen funciones como el control de filtrado, dar viscosidad y densificar el fluido. A su vez, estos son los que van a formar parte de la torta adherida a la pared del pozo, por lo que son en los que se va a enfocar el tratamiento de remoción a aplicar en esta investigación. Basado en la similitud de los componentes influyentes en la remoción de la torta de cada uno de los lodos, el investigador determinó que el tratamiento a aplicar se comportaría de manera semejante en los tres fluidos *RDF*; por tanto se decidió trabajar únicamente con el lodo de Halliburton (Tabla 4).

3.2. Tratamiento con peróxido de magnesio

Para desarrollar un proceso de remoción químico, se realizó una búsqueda bibliográfica de tratamientos previamente aplicados en la industria, teniendo en cuenta que su enfoque fuera hacia elementos similares a los que se tienen en el *cake* que se genera con los fluidos de perforación de yacimiento (*RDF*) utilizados en Castilla.

El experimento realizado por Mahapatra (Mahapatra & Kosztin, 2011), consiste en la remoción de la torta de lodo, en un pozo horizontal, que se forma a partir del uso de un fluido de perforación de yacimiento (*RDF*) Tabla 5. En la composición de este lodo se evidencia la similitud con el lodo a trabajar (*RDF* Halliburton Tabla 4), donde ambos poseen goma xantana, almidón y carbonatos, aditivos que serán los principales componentes de sus respectivos *cakes* de lodo.

Tabla 5

Lodo de experimento de Mahapatra y Kosztin.

Lodo Mahapatra y Kosztin	
Aditivo	Concentración [lb/bbl]
Goma Xantana	1,3
Almidón	4,9
Soda cáustica	0,5
Cloruro de potasio	12,2
Carbonato M25	8,7
Carbonato M10	3,5
Tiosulfato de sodio	0,7
Reductor de fricción	7,0

Nota. Tomado de Mahapatra, S. K., & Kosztin, B. (2011). Magnesium Peroxide Breaker for Filter Cake Removal. Society of Petroleum Engineer.

El peróxido de magnesio (MgO_2) es un compuesto químico con baja solubilidad en agua e inerte (no reacciona) en medios básicos; al añadirse al lodo, el peróxido en polvo no reacciona, sino que sus partículas quedan suspendidas en él para posteriormente integrarse en el revoque. En solución ácida el peróxido de magnesio libera peróxido de hidrógeno (H_2O_2), el cual se oxida liberando oxígeno (O_2). El oxígeno y el peróxido de hidrógeno degradan los polímeros presentes en la torta y la solución ácida aplicada ayuda con la disolución y remoción del carbonato de calcio en el *cake*, aumentando así su eficiencia de remoción (Mahapatra & Kosztin, 2011).

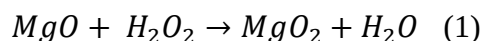
Con el fin de realizar un estudio que sea aplicable para el campo Castilla, la solución ácida que se empleó en este estudio fue la misma que allí se utiliza, que consta de ácido cítrico diluido en agua; cuya concentración va a variar según el nivel del experimento que se esté evaluando.

3.3. Síntesis del peróxido de magnesio

Para realizar el experimento, se analizaron distintas opciones de compra del reactivo principal del tratamiento a aplicar. En Colombia no se comercializa peróxido de magnesio y su importación no es viable ya que solo es posible hacerse en una cantidad mucho mayor a la que se usaría en el experimento. Es por esto por lo que se decidió realizar la síntesis del reactivo en los laboratorios de química de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

3.3.1. Descripción de la síntesis

Esta síntesis se da por la reacción entre el óxido de magnesio (MgO) sólido y peróxido de hidrógeno (H₂O₂) líquido, ocurre a temperatura ambiente, es sumamente exotérmica y consiste en remojar el óxido de magnesio con el peróxido de hidrógeno en exceso, para así producir peróxido de magnesio (MgO₂) y agua (H₂O); tal como lo muestra la reacción (Giamello et al., 1993):



La descomposición del peróxido de hidrógeno y la formación del peróxido de magnesio se observó durante el tiempo de contacto entre el sólido y el líquido. La reacción se llevó a cabo en una cabina de extracción, utilizando como reactor un vaso de precipitados de 1000 ml, bajo agitación constante, se utilizó un baño de hielo con el fin de mantener la temperatura ambiente, ya que la reacción es fuertemente exotérmica. Después de 30 min de reacción, la mezcla se filtró al vacío y el sólido residual se secó en una estufa a 353 K (80 °C).

Según la ecuación de la reacción, anteriormente mostrada, por cada mol de óxido de magnesio (MgO) y peróxido de hidrógeno (H₂O₂) se produce un mol de peróxido de magnesio (MgO₂) y un mol de agua (H₂O). Se destaca en la bibliografía consultada que esta reacción tiene

un rendimiento de 35% aproximadamente (Giamello et al., 1993), por lo tanto la cantidad en masa de peróxido de magnesio producido en la reacción por cada mol de reactivo es de 19,7 gramos. Estos cálculos se muestran a continuación:

$$\text{Peso del Mg} = 24,3 \text{ g/mol}$$

$$\text{Peso del O} = 15,99 \approx 16 \text{ g/mol}$$

$$\text{Peso del MgO}_2 = 56,3 \text{ g/mol}$$

$$1 \text{ mol MgO}_2 = 56,3 \text{ g MgO}_2 = \text{rendimiento teórico de reacción.}$$

$$\text{rendimiento real} = \% \text{ rendimiento} \times \text{rendimiento teórico}$$

$$\text{rendimiento real} = 35\% \times 56,3 \text{ g MgO}_2$$

$$\text{rendimiento real} = 19,7 \text{ g MgO}_2$$

3.3.2. Procedimiento experimental

1. Pesar en un vaso de precipitados y con una balanza de precisión un mol de óxido de magnesio (MgO), 40,3 g.
2. Someter a baño de hielo el vaso de precipitados con el óxido de magnesio al tiempo que es llevado a la cabina de extracción.
3. Añadir al vaso de precipitados el peróxido de hidrógeno (H₂O₂) líquido en exceso. Una cantidad mayor a los 57,14 ml ya que esto es el exceso de peróxido de hidrógeno al 50% necesario para la reacción.
4. Agitar la mezcla en el vaso con un agitador durante 30 minutos.

5. Llevar la mezcla resultante al embudo Büchner con el papel filtro introducido en un matraz aforado.
6. Encender el compresor que está conectado al matraz para empezar a generar el vacío dentro del matraz.
7. Retirar la mezcla del embudo 5 minutos después (al estar visualmente seca) con una espátula y poner en un vidrio de reloj.
8. Llevar el vidrio de reloj con la mezcla a la estufa de secado previamente calentada a 80°C (373 K) y dejar secar durante 30 minutos.
9. Llevar la muestra a pesar en la balanza y registrar la cantidad obtenida.



Figura 4. Síntesis de peróxido de magnesio (MgO_2). Reactor en cámara de gases, durante baño de hielo.

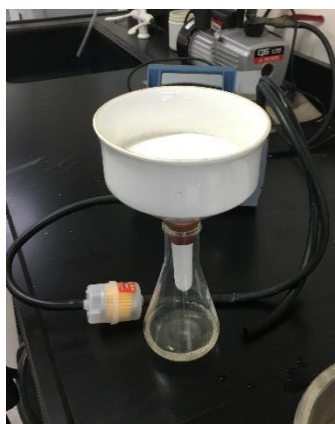


Figura 5. Mezcla producto de la reacción siendo filtrada al vacío.

3.3.3. Resultados de la síntesis

Para conocer si la reacción se efectuó, fue necesario llevar a cabo una espectroscopía infrarroja mediante una celda de reflectancia totalmente atenuada (ATR-IR). Se tomó un espectro infrarrojo del óxido de magnesio (MgO) inicial y posteriormente un espectro del sólido obtenido. La aparición de bandas adicionales en el espectro del sólido con respecto al del óxido de magnesio inicial indicará la formación de enlaces, los cuales pueden corresponder a la formación de especies como peróxido de magnesio (MgO_2) e hidróxido de magnesio (Mg(OH)_2). A continuación (Figura 6) se muestra el espectro infrarrojo obtenido de la muestra de óxido de magnesio utilizada para la síntesis de peróxido de magnesio.

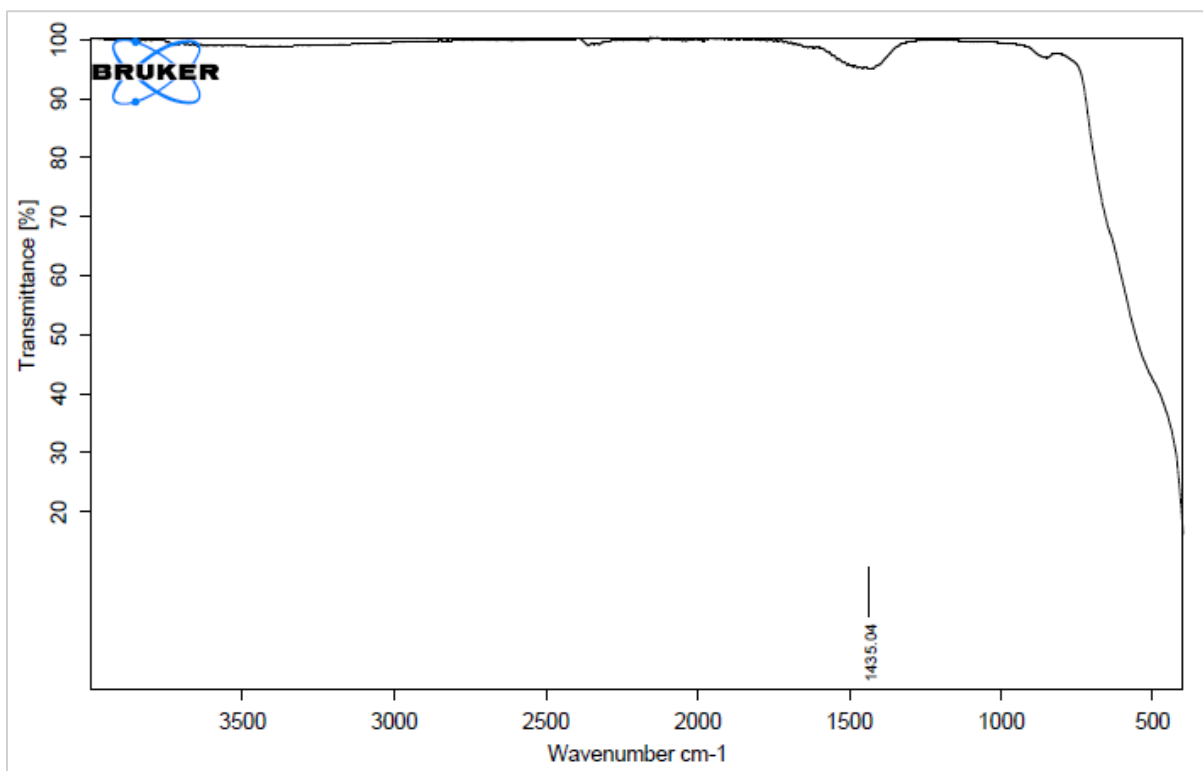


Figura 6. Espectro infrarrojo del óxido de magnesio inicial.

En la Figura 6 se puede observar que en un número de onda menor a 500 cm^{-1} comienza un aumento en la transmitancia, llegando a valores cercanos al 100% y siendo prácticamente

constante hasta el número de onda de 1300; allí disminuye nuevamente a valores cercanos a 90% y vuelve a aumentar para ser constante. En la Figura 7 se muestra la gráfica del espectro de óxido de magnesio tomada de SpectraBase y su gran similitud con la Figura 6 corrobora que la muestra utilizada como reactivo para la síntesis sí corresponde al óxido de magnesio.

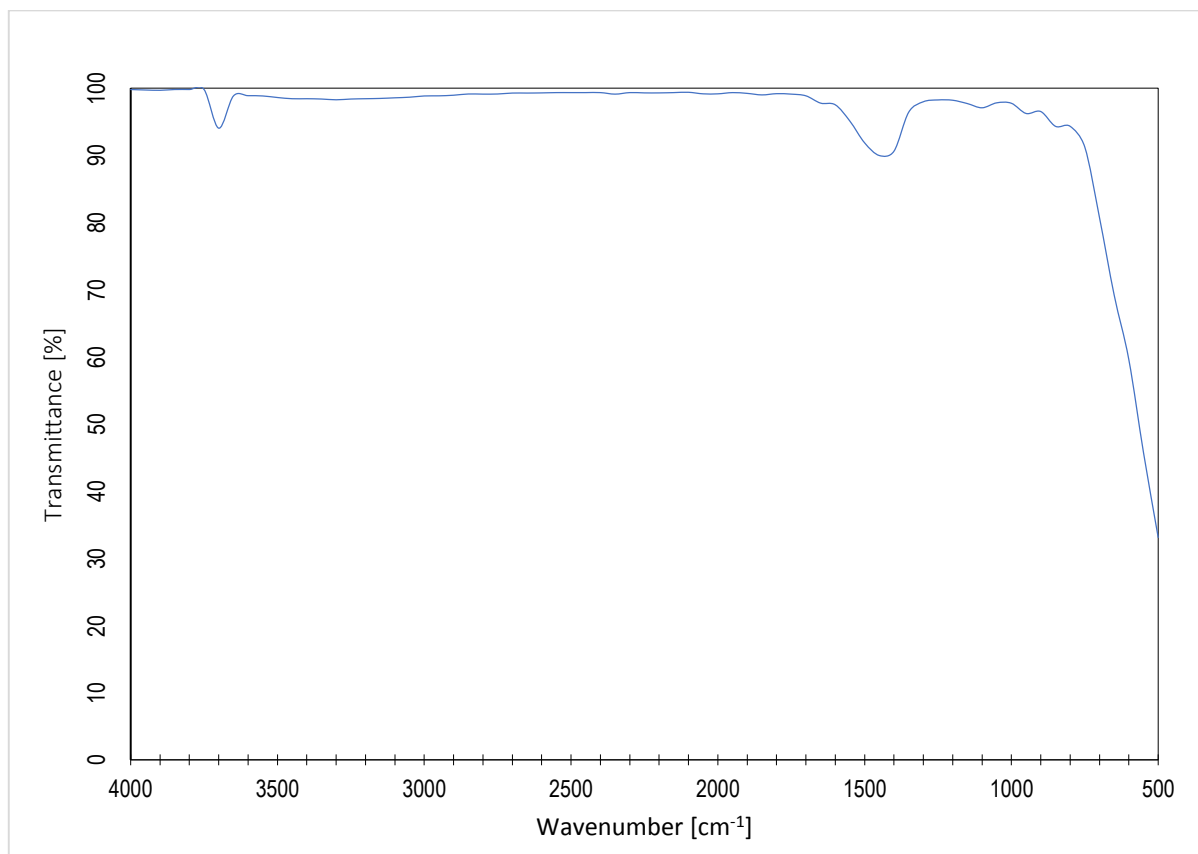


Figura 7. Espectro infrarrojo del óxido de magnesio. Tomado de la base de datos SpectraBase (Wiley & Sons, 2020a).

Posteriormente, se tomó un espectro del producto obtenido en la síntesis de peróxido de magnesio y se muestra en la Figura 8. Allí se ve que en 1300 cm⁻¹ presenta una disminución en la transmitancia, que alcanza a llegar por debajo del 80%; en 1700 cm⁻¹ vuelve a aumentar la transmitancia a valores cercanos al 90% manteniéndose en ese rango hasta 2600 cm⁻¹ aproximadamente.

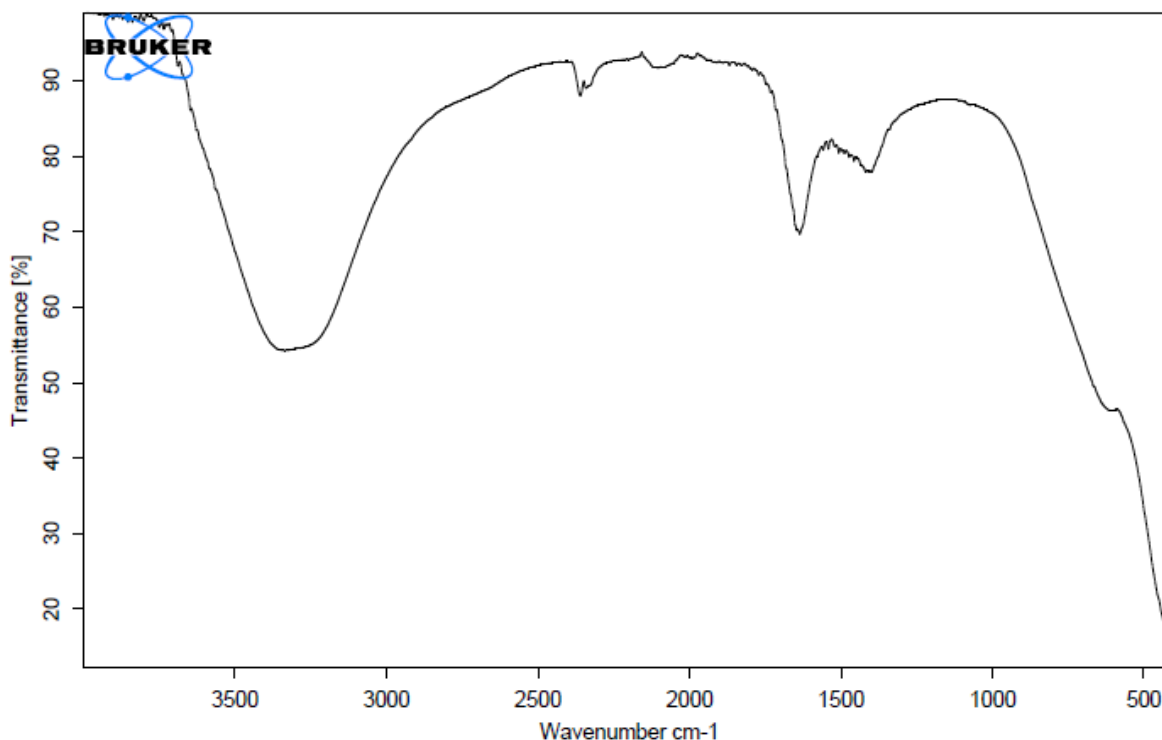


Figura 8. Espectro infrarrojo del producto obtenido en la síntesis de peróxido de magnesio.

Al observar la Figura 9, espectro estándar del peróxido de magnesio (SpectraBase, 2020), se puede ver que tiene gran similitud con el espectro del producto obtenido en la síntesis; por lo que se puede afirmar que esta se efectuó de manera satisfactoria obteniendo así peróxido de magnesio. En la parte izquierda de la gráfica, a partir de 2700 cm^{-1} , se observa que inicia una reducción en la transmitancia que puede indicar que junto con el peróxido de magnesio se formó hidróxido de magnesio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). Esto se debe a que en con el producto queda óxido de magnesio sin reaccionar pero que al estar en presencia del agua (producto de la reacción) forma en cierta cantidad de hidróxido de magnesio.

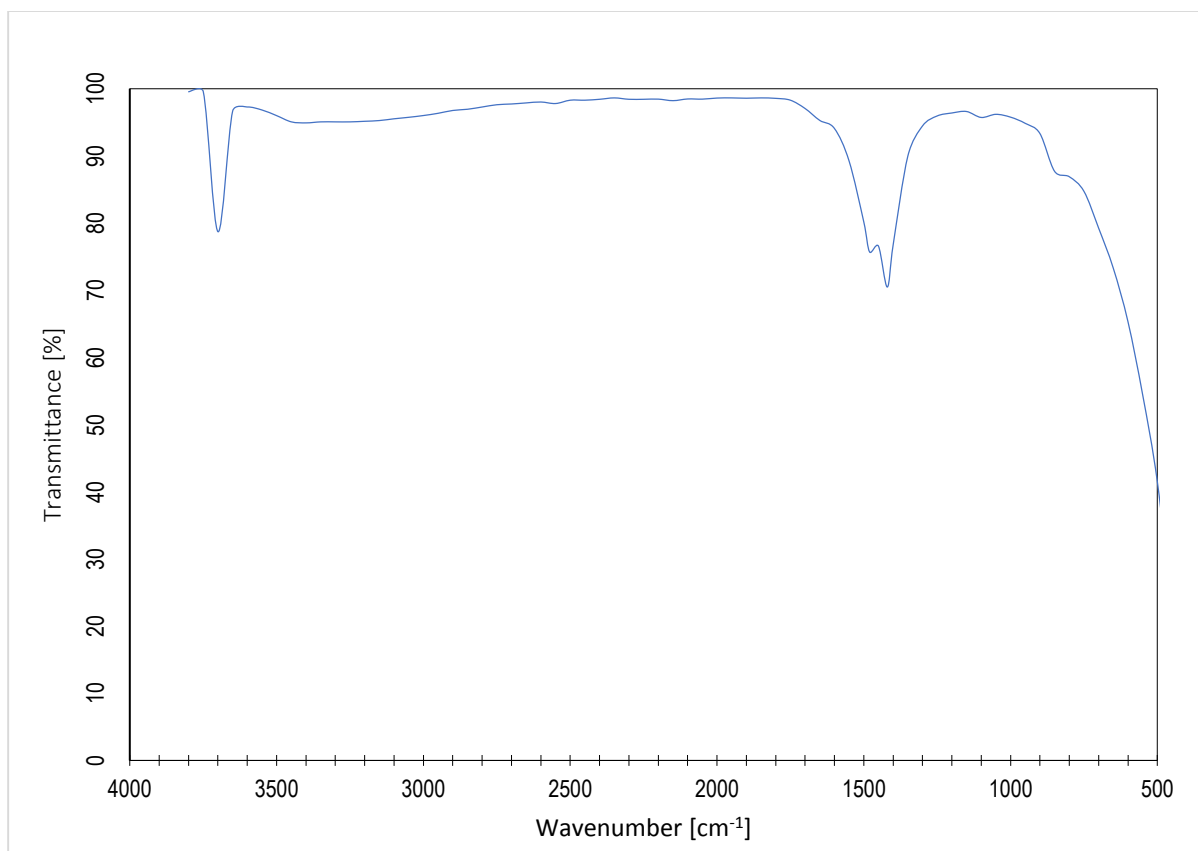


Figura 9. Espectro infrarrojo del peróxido de magnesio. Tomado de la base de datos SpectraBase (Wiley & Sons, 2020b).

3.4. Pruebas de remoción de lodo

3.4.1. Selección de prueba de remoción

Para determinar con qué prueba de remoción se llevaría a cabo el experimento, se analizó cuál de las que se podían realizar en laboratorio representa mejor las condiciones que enfrenta el lodo y su torta en el pozo.

La primera prueba que se tuvo en cuenta fue la prueba de remoción con el viscosímetro Fann 35 y malla metálica. Esta prueba consiste en remojar una malla metálica en el lodo de trabajo y dejarla secar; ya con el lodo seco en ella, se ata al rotor del viscosímetro y se sumerge en el fluido lavador. Figura 10. Esta prueba representa adecuadamente las condiciones de flujo que se dan en

pozo, sin embargo, se consideró que la malla con el lodo no representa el revoque formado por la filtración de fluido, por tanto se desestimó esta práctica.



Figura 10. Remoción con malla metálica y viscosímetro Fann 35. Tomado de: Instructivo de cementación. Gerencia general de perforación y completamiento well delivery process. Ecopetrol S.A.

Con el objetivo de hallar una prueba que represente tanto las condiciones de flujo de pozo como el revoque provocado por la filtración de fluido en un medio poroso, se ideó un tipo de prueba que consta en la generación de una torta de lodo en la filtro-prensa API y posteriormente el sometimiento de esta al flujo del lavador con el uso del viscosímetro Fann 35.

Para formar el *cake* y poder manipularlo con facilidad, fue necesario cambiar el medio poroso que se utiliza en la filtro-prensa, ya que el tradicional papel filtro Whatmann no es lo suficientemente resistente a un flujo de lavador. El nuevo medio de filtrado fue tela antifluido. Al filtrarse el lodo en este medio, deja a su paso un revoque de muy buenas características, perfecto para su posterior uso. Figura 11.

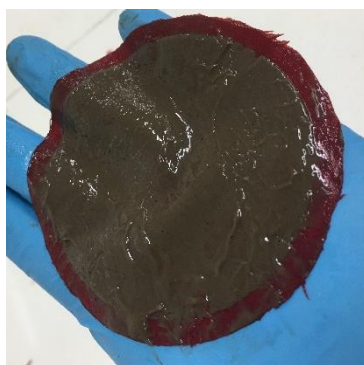


Figura 11. Revoque de lodo generado en tela antifluido.

Al formar el *cake* en la tela antifluído se debe unir al rotor del viscosímetro y de esta manera sumergirlo en el lavador y comenzar la rotación que simula el flujo de fluido en el pozo. Para lograr unir la tela con el rotor, sin alterar la torta con algún tipo de contacto indeseado, previamente se cosió por el respaldo de cada círculo de tela un trozo de velcro. Así, para poder unir y separar fácilmente el revoque y al rotor, la otra parte del velcro se deja fija atada a la camisa del rotor.

Figura 12.



Figura 12. Torta de lodo formada en tela antifluído unida al rotor del viscosímetro mediante velcro.

3.4.2. Diseño experimental

El experimento para probar la eficiencia de remoción consta de preparar el lodo previamente seleccionado, añadiéndole una concentración de peróxido de magnesio, para después generar la torta de lodo con la filtro prensa API y posteriormente someter dicho *cake* a una etapa de remojo en solución de ácido cítrico que actúa como fluido lavador. Con base en esto se realizó un diseño experimental para trabajar. Cabe añadir que el lodo será sometido a pruebas reológicas para verificar que la adición de peróxido de magnesio no altere significativamente sus propiedades.

Para seleccionar el tipo de diseño experimental a trabajar se tuvieron en cuenta los factores del experimento que influyen en los resultados y que son factibles variar en laboratorio y en campo. Los factores que afectan principalmente la remoción de la torta del lodo son la concentración de peróxido de magnesio en el lodo, la concentración del ácido cítrico en el fluido lavador y el tiempo de remojo en el fluido lavador.

Con objeto de facilitar la investigación y reducir la cantidad de factores a trabajar, se decidió dejar como valor fijo el tiempo de remojo, siendo este de diez minutos, ya que el tiempo de remoción en la prueba debe ser el mismo que demora un flujo de lavador en campo (Ecopetrol S.A., 2018). Así, se planeó entonces tener dos factores experimentales: la concentración de peróxido de magnesio en el lodo y la concentración de ácido cítrico en el fluido lavador.

En el diseño experimental factorial se puede tener en cuenta la variación de más de un factor a la vez, siendo este en el que se tiene certeza de la influencia de cada uno de los factores y de la interacción de estos sobre el resultado del tratamiento. Por esta razón se seleccionó este tipo de diseño factorial.

La cantidad de combinaciones del experimento está determinada por el número de factores a variar y por la cantidad de niveles en los que se varía cada factor. Esto está dado por la siguiente fórmula:

$$\#ensayos = n^k \quad (2)$$

Donde “n” es la cantidad de niveles y “k” la cantidad de factores.

Para obtener una mayor confiabilidad en el experimento, se decidió realizar con tres niveles analizados por factor, siendo nueve la cantidad de combinaciones ($3^2 = 9$). Adicionalmente, se

debe ejecutar una réplica de cada ensayo para poder hacer un análisis del error y con esto, un análisis de varianza (ANOVA) adecuado (Montgomery, 2004) ; por tanto el total de ensayos del experimento fue de 18. En la Tabla 6 se visualiza la cantidad de ensayos y las combinaciones de los tres niveles por cada factor.

Tabla 6

Tabla de experimento factorial de dos factores con tres niveles.

		Factor A		
		Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Factor B	Nivel 1	1.1	2.1	3.1
		1.1 R	2.1 R	3.1 R
	Nivel 2	1.2	2.2	3.2
		1.2 R	2.2 R	3.2 R
	Nivel 3	1.3	2.3	3.3
		1.3 R	2.3 R	3.3 R

La concentración de peróxido de magnesio en cada nivel se determinó de acuerdo a la razón entre la concentración del mismo y la concentración de los polímeros y carbonatos presentes en el lodo del experimento de Mahapatra; debido a que los polímeros y carbonatos son los elementos presentes en el revoque sobre los que actúa el peróxido de magnesio. Asimismo, la concentración de ácido cítrico para los niveles del experimento está determinada por la concentración utilizada en el lavador utilizado en campo.

3.4.3. Descripción de la práctica

El proceso que se llevó a cabo en el laboratorio de lodos de la Universidad Industrial de Santander, UIS, consta principalmente de tres partes. La primera parte consiste en medir las propiedades reológicas del lodo con el viscosímetro, la segunda es la formación de la torta de lodo

en la filtro prensa API y la tercera es la de someter la torta al fluido lavador por medio del viscosímetro Fann 35, vertiendo la solución en el vaso y poniendo a rotar la torta en él, uniéndola al rotor del viscosímetro.

En pro de generar la torta, se usó la formulación de lodo seleccionada, *RDF* Halliburton, con el peróxido de magnesio ya añadido (la cantidad de peróxido de magnesio variaba según el nivel que se estuviese ejecutando), se preparó el fluido de trabajo y se sometió a las pruebas de reología. Posteriormente, se realizó la prueba de filtrado API; con la tela antifluido en lugar del papel filtro, ya que esto permite manipular el revoque sin que se dañe el papel al sumergirse en el lavador. Posteriormente se pesó la torta de lodo en una balanza.

Para poder simular en laboratorio las condiciones de flujo que se enfrentan, se ató la torta del lodo al rotor del viscosímetro y así se puso a girar a 100 rpm mientras es sumergida en el vaso, que va lleno de una solución de ácido cítrico de concentración variable en cada réplica. El tiempo de remojo con el que se trabajó es el recomendado en Castilla (10 minutos). Una vez se terminó este tiempo de remojo, se procedió a pesar nuevamente la torta de lodo, para así poder calcular el porcentaje de remoción efectuado. Los resultados de la remoción fueron registrados en la Tabla 7.

Con el fin de poder hacer una adecuada interpretación de los datos, se debió tomar registro previo del peso de la tela antifluido mojada (en agua) a utilizar en cada uno de los ensayos, ya que este valor se sustrae del valor registrado de la tela con el *cake* (que también sale mojada mayormente por agua del lodo) para poder hacer el cálculo de peso neto del *cake* y posteriormente calcular

3.4.4. Procedimiento experimental

1. Llenar de agua el vaso del mixer del lodo hasta la marca de 1 barril equivalente (350 ml).
2. Pesar y añadir, uno por uno cada aditivo, al vaso del mixer (con el mixer encendido) en el orden especificado en la Tabla 4.
3. Pesar y añadir el peróxido de magnesio según la concentración deseada del nivel a probar.
4. Verter el lodo en el vaso del viscosímetro Fann 35.
5. Acomodar el vaso en la base del viscosímetro y ajustar la altura del mismo, de manera que la camisa del rotor quede sumergida en el lodo.
6. Encender el viscosímetro y tomar las respectivas medidas de viscosidad a diferentes velocidades.
7. Medir el peso de la tela antiluido (mojada) que se usará en la filtro-prensa API. (Esto se explica en la Figura 14).
8. Armar la celda de la filtro-prensa API, con tela antiluido en vez del papel filtro Whatman y verter el lodo en ella.
9. Asegurar el arreglo de la celda y montarla en su puesto correspondiente en el arreglo de válvulas.
10. Cerrar todas las válvulas de la filtro prensa.
11. Colocar el cilindro graduado debajo del orificio de la tapa inferior de la celda para recoger el filtrado.
12. Encender el compresor que provee presión a la celda y mantener cerradas las válvulas un minuto mientras el sistema se presuriza.
13. Abrir la válvula a la que está conectada la celda, esperar 7,5 minutos mientras ocurre el filtrado.

14. Apagar el compresor y abrir todas las válvulas para aliviar la presión.
15. Retirar el cilindro graduado con el filtrado y desarmar la celda retirando la tapa superior.
16. Desechar el lodo de la celda y terminar de desarmar la celda.
17. Retirar la tela antifluido, donde va a estar la torta de lodo, y retirar cuidadosamente el exceso de lodo que moja la torta.
18. Pesar la torta en la balanza y registrar el peso.
19. Preparar la solución de fluido lavador en el mixer de lodo, con ácido cítrico (según la concentración del nivel a probar) y agua.
20. Verter la solución de fluido lavador en el vaso del viscosímetro.
21. Acomodar la torta en el arreglo realizado en la camisa del rotor para que quede sujeta a esta.
22. Sumergir la camisa del rotor, con la torta de lodo, en el fluido lavador.
23. Encender el viscosímetro a 100 rpm y dejar activo durante 10 minutos.
24. Apagar el viscosímetro y retirar la torta de lodo del arreglo del manguito rotador.
25. Pesar la torta de lodo en la balanza y registrar su peso.

El proceso anterior se resume en el siguiente diagrama. Figura 13.

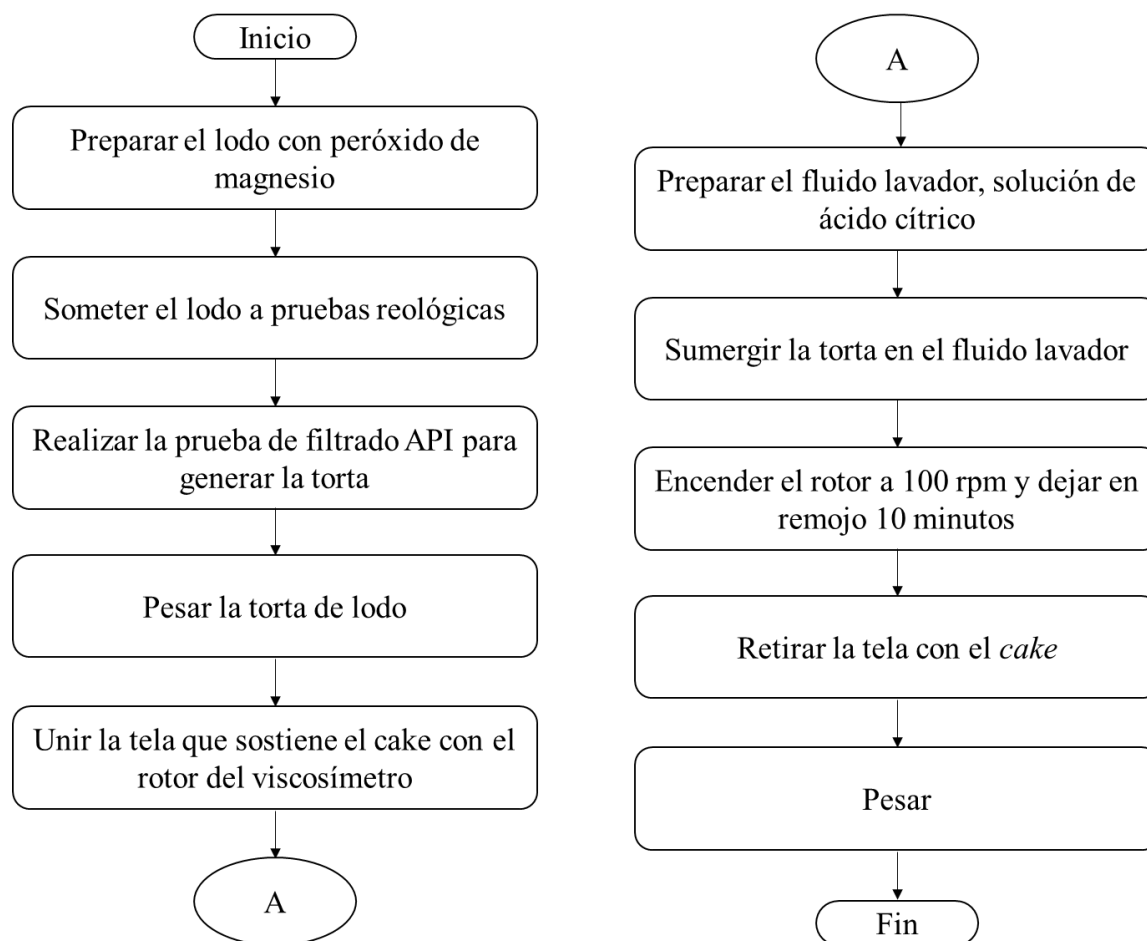
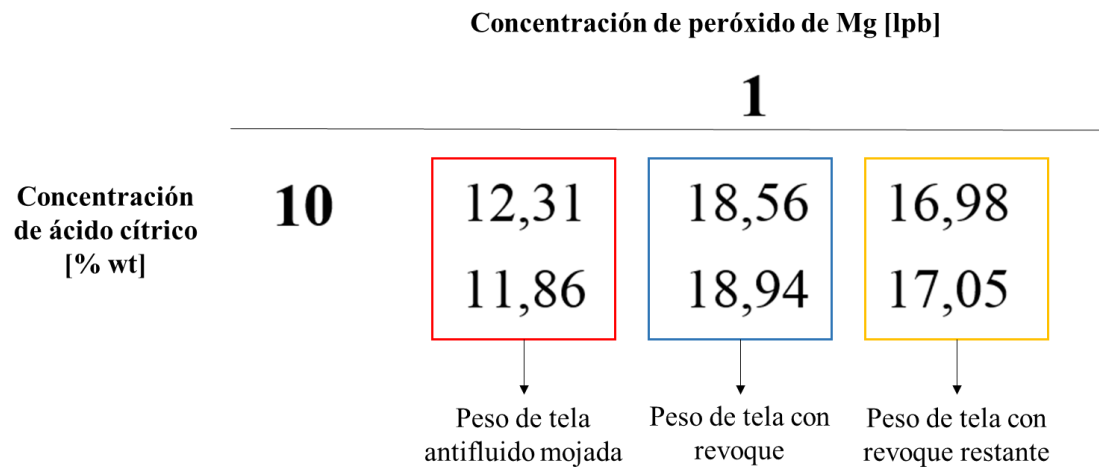


Figura 13. Diagrama de procedimiento de laboratorio.

3.4.5. Resultados

Las medidas tomadas en el laboratorio de lodos se registraron como se muestra en la Tabla 7. Para cada uno de las nueve combinaciones de niveles que se presentan se tomaron seis valores, tres son del ensayo inicial y los tres restantes de su repetición. El primero de cada triada es el valor de la tela antilíquido mojada, el segundo es de la tela con el revoque en ella y el tercero es de la tela con el revoque restante posterior al tratamiento de remoción. En la Figura 14 se muestra una ampliación del primer registro de la tabla de resultados, donde se explica a qué corresponde cada valor.



Nota. En cada recuadro se encuentran las dos repeticiones del tratamiento

Figura 14. Ampliación de la tabla de resultados.

Tabla 7

Tabla de resultados de laboratorio.

		Concentración de Peróxido de Mg [lpb]								
		1			1,5			2		
Concentración de Ácido Cítrico %wt	10	12,31	18,56	16,98	10,72	16,76	14,78	11,83	18,51	15,90
		11,86	18,94	17,05	10,79	17,67	15,54	10,43	17,22	14,69
	15	11,39	17,92	15,89	10,41	16,71	14,33	11,61	18,9	15,60
		12,21	18,65	16,71	10,81	17,5	14,94	10,55	17,45	14,16
	20	10,93	17,62	15,20	11,64	18,06	15,16	11,01	17,61	14,07
		11,67	17,54	15,33	10,86	17,12	14,33	10,55	17,76	13,77

Nota. Los valores tomados son peso en gramos de tela mojada, tela con torta y tela con residuos de torta después de remoción, respectivamente.

Los valores registrados en la Tabla 7 permiten conocer el peso de la torta antes de su remoción y el peso de la torta después del tratamiento de remoción aplicado, permitiendo así

comparar la eficiencia de remoción de cada combinación de niveles. El peso del *cake* y la cantidad removida se calculan de la siguiente manera.

$$\text{Peso Cake} = \text{Tela con Cake} - \text{Tela Mojada} \quad (3)$$

$$\text{Peso Removido} = \text{Tela con cake} - \text{Tela con Residuos de Cake} \quad (4)$$

La eficiencia de remoción se calculará hallando la razón entre el peso de *cake* removido y el peso neto del *cake*. Estos valores son los que se utilizan posteriormente para el Análisis de varianza (ANOVA).

También se usaron los datos de reología tomados para, mediante gráficas, observar los cambios que proporciona en estas propiedades la adición de peróxido de magnesio al lodo.

4. Resultados y análisis

Con el fin de obtener conclusiones acertadas acerca de las mejoras de remoción obtenidas y la aplicabilidad en campo del tratamiento seleccionado, se realiza un análisis de resultados que evidencia la influencia del tratamiento en la eficiencia de remoción; también, se realiza un análisis que muestre la variación en la reología del lodo al aplicar peróxido de magnesio en su composición inicial, con el objeto de verificar la viabilidad de replicar el tratamiento en campo.

4.1. Remoción

Con los valores registrados en el laboratorio se hizo el procesamiento de los datos para realizar una adecuada interpretación de los resultados. Inicialmente se hallaron los valores de remoción del *cake* mediante las ecuaciones 3 y 4, estos fueron tabulados en la Tabla 8.

Tabla 8

Peso en gramos de cake removido en cada ensayo del experimento de remoción.

		Concentración de peróxido [lpb]		
		1	1,5	2
Concentración de ácido cítrico %wt	10	1,58	1,98	2,61
		1,89	2,13	2,53
	15	2,03	2,38	3,30
		1,94	2,56	3,29
	20	2,42	2,90	3,54
		2,21	2,79	3,99

Sin embargo, un registro de los pesos removidos en cada ensayo del experimento no muestra un valor comparable o significativo de la remoción efectuada en la torta de cada lodo preparado, ya que valores de dos combinaciones de niveles distintos pueden ser muy similares pero representan diferentes proporciones de remoción con respecto al peso original de su respectiva torta. Por tanto, se decidió reportar los datos del experimento de remoción en porcentaje de torta removida, hallado con la ecuación 5 y reportado en la Tabla 9. Estos valores representan la eficiencia de remoción del tratamiento aplicado.

$$\% \text{ de torta removida} = \frac{\text{Peso de torta removida}}{\text{Peso original de la torta}} \times 100 \quad (5)$$

Tabla 9

Porcentajes de remoción de torta por cada ensayo realizado.

		Concentración de peróxido [lpb]		
		1	1,5	2
Concentración de ácido cítrico %wt	10	25,3 %	32,8 %	39,1 %
		26,7 %	30,9 %	37,2 %
	15	31,1 %	37,8 %	45,2 %

	30,2 %	38,3 %	47,7 %
20	36,2 %	45,2 %	53,6 %
	37,7 %	44,5 %	55,4 %

Para visualizar la manera en que varía la eficiencia de remoción se graficó el porcentaje de remoción de torta promedio de cada respuesta al tratamiento. Figura 15. Es decir, se promediaron los valores registrados en cada combinación y se graficó este porcentaje de remoción en relación a la variación de la concentración de peróxido de magnesio en el lodo.

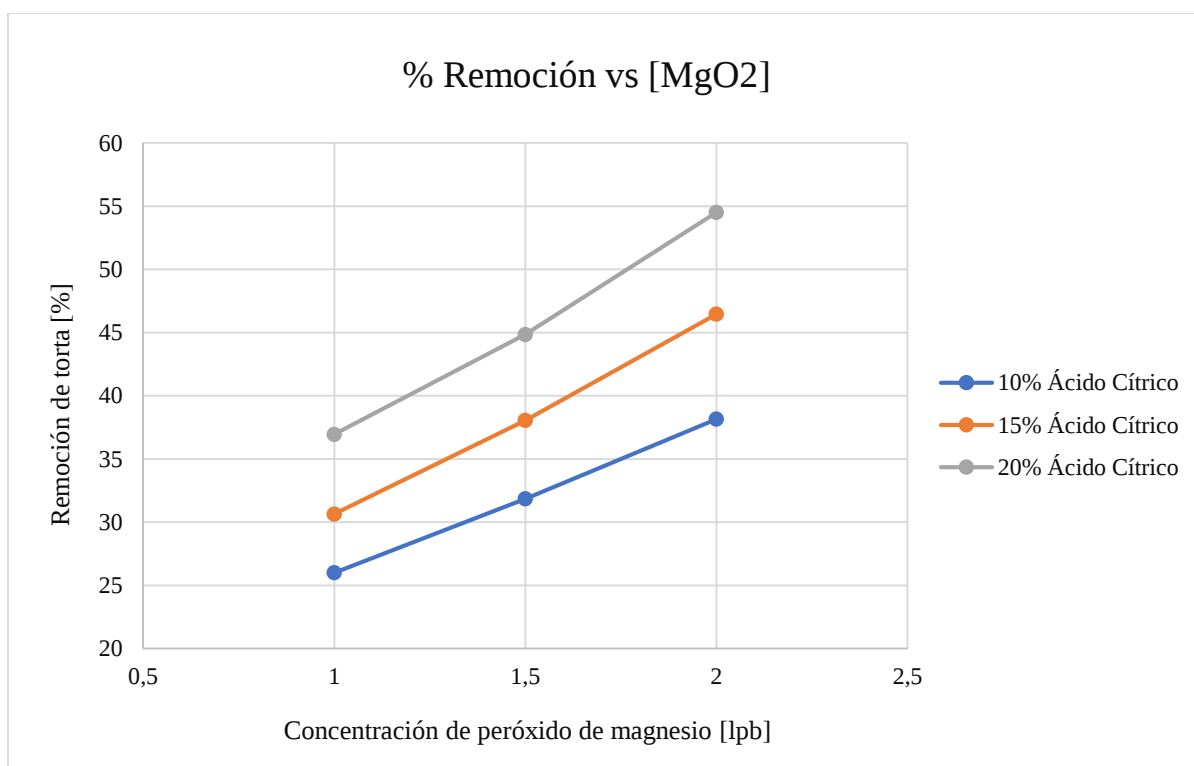


Figura 15. Porcentaje de torta removida vs Concentración de peróxido de magnesio

En la Figura 15 se evidencia que a medida que aumenta la concentración de peróxido de magnesio también aumenta la eficiencia (o porcentaje) de remoción; del mismo modo, se observa que estos aumentos se hacen mayores a medida que se incrementa la concentración de peróxido de magnesio; es decir, para cada recta de concentración de ácido cítrico el aumento es mayor entre 2 y 1,5 que entre 1,5 y 1 libras por barril.

También cabe resaltar que a medida que se aumenta la concentración de ácido cítrico en cada ensayo del experimento, es notorio un aumento en la eficiencia de remoción, ya que los valores de cada recta son mayores a medida que aumenta la concentración de ácido cítrico del fluido lavador. La influencia de ambos factores en la respuesta del tratamiento y el hecho de que cada vez las rectas de los resultados tienen pendientes mayores, denotan una posible influencia de la interacción de ambos factores y encaminan el análisis a un análisis de varianza (ANOVA) para un diseño experimental factorial. (Montgomery, 2004).

Un método de análisis adecuado para un experimento de dos factores donde se infiere que hay interacción entre ambos factores es el modelo con efectos fijos. Este modelo tiene en cuenta el efecto del factor A, el efecto del factor B y el efecto de la interacción AB en la respuesta del experimento. Con el fin de probar la evidencia numérica obtenida, se plantea un par de hipótesis por cada uno de los factores, concentración de ácido cítrico en el lavador y concentración de peróxido de magnesio en el lodo, así como de la interacción de ambos.

Se plantea la hipótesis nula H_0 acerca de la igualdad de los efectos de los tratamientos, es decir, que los tratamientos del factor A es igual a 0.

$$H_0: A_1 = A_2 = A_3 = 0$$

$$H_1: \text{al menos un } A_i \neq 0 \quad (6)$$

En la ecuación 6 se muestran las dos hipótesis a probar, la hipótesis nula H_0 y la hipótesis alternativa H_1 , la cual afirma que el efecto del factor a variar va a ser distinto de 0, es decir este factor tendrá una influencia estadísticamente significativa en la respuesta del tratamiento. De la

misma manera, se plantea una hipótesis nula y una hipótesis alternativa para el factor B y para la interacción AB de los factores, ecuaciones 7 y 8.

$$H_0: B_1 = B_2 = B_3 = 0$$

$$H_1: \text{al menos un } B_j \neq 0 \quad (7)$$

$$H_0: AB_{11} = \dots = AB_{33} = 0$$

$$H_1: \text{al menos un } AB_{ij} \neq 0 \quad (8)$$

Posteriormente, se realizaron los cálculos correspondientes con los valores de la eficiencia de remoción de la torta obtenidos, para generar la tabla del análisis de varianza del experimento.

Tabla 10

ANOVA de remoción

	Suma cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado medio	F ₀	F	Resultado
SS_A	541,808	2	270,904	217,01	4,26	Se rechaza H ₀
SS_B	691,221	2	345,611	276,85	4,26	Se rechaza H ₀
SS_{AB}	15,466	4	3,866	3,09	3,63	Se acepta H ₀
SS_E	11,235	9	1,248			
SS_T	1259,729	17				

En la Tabla 10 se denotan los siguientes valores:

- SS_A: suma de cuadrados debida al factor A (ácido cítrico).
- SS_B: suma de cuadrados debida al factor B (peróxido de magnesio).
- SS_{AB}: suma de cuadrados debida a la interacción AB.
- SS_E: suma de cuadrados debida al error.
- SS_T: suma de cuadrados total.

- F_0 : estadístico experimental de la prueba.
- F : valor de la distribución F .

Para realizar la prueba de las hipótesis se comparan los valores F y F_0 , de forma que se rechaza la hipótesis nula cuando $F_0 > F$ y se acepta cuando $F_0 < F$. En el caso del factor A (ácido cítrico), $F_0 = 217,01 > F = 4,26$, por tanto se rechaza la hipótesis nula y se concluye que hay un efecto significativo de A en el tratamiento. Para el factor B (peróxido de magnesio), $F_0 = 276,85 > F = 4,26$, por tanto se rechaza la hipótesis nula y se concluye que un efecto significativo de B en el tratamiento. Finalmente, para la interacción de los factores AB, $F_0 = 3,09 < F = 3,63$, por tanto, se acepta la hipótesis nula y se concluye que el efecto de la interacción entre A y B no es significativo para el tratamiento.

4.2. Reología

Con el fin de verificar la aplicabilidad del tratamiento de remoción en campo, se hizo un estudio de reología con los lodos preparados y usados en el experimento de remoción realizado en el laboratorio de lodos y cementos de la UIS. Este estudio consistió en tomar medidas de viscosidad con el viscosímetro Fann 35 a diferentes velocidades para las distintas composiciones de lodo utilizadas en el experimento, cuya única variación era la adición de una concentración de peróxido de magnesio que variaba entre 1, 1,5 y 2 libras por barril. De esta manera, se evidencia cómo influye el peróxido de magnesio en la reología del lodo.

Los datos tomados en laboratorio se tabularon como se muestra en la Tabla 11, leyendo para cada lodo el valor de esfuerzo de corte, en libra por 100 pies cuadrados ($\text{lb}/100 \text{ pie}^2$), a las velocidades permitidas por el viscosímetro, 3, 6, 100, 200, 300 y 600 rpm. Al preparar cada lodo para el experimento 6 veces, se tomaron 4 veces las medidas de reología del viscosímetro, para así

promediar los valores registrados y poder obtener gráficas comparativas de esfuerzo cortante, viscosidad plástica, *yield point* y punto de gel.

Tabla 11

Valores de reología de lodo tomados en laboratorio.

	Concentración de MgO ₂ [lpb]			
	0	1	1,5	2
600	32	37	49	47
	40	40	46	44
	44	43	47	45
	46	44	52	49
300	24	29	38	35
	30	30	34	34
	36	34	37	33
	36	32	39	38
200	27	24	34	30
	32	27	33	28
	30	29	32	29
	20	29	36	34
100	21	19	28	25
	16	22	26	22
	24	22	25	22
	24	24	26	27
6	8	10	13	12
	11	11	10	11
	11	11	14	11
	10	11	10	14
3	8	9	13	10
	11	9	12	9
	9	10	11	9
	8	9	11	12

Con estos valores registrados en la Tabla 11, se graficó la Figura 16. Allí se evidencia un tipo de gráfica típica del comportamiento reológico del lodo (M-I Swaco, 2001). A medida que se aumenta la velocidad de corte, se hace mayor el esfuerzo cortante registrado. Las líneas de la graficadas denotan un aumento en los valores de esfuerzo cortante a medida que se aumenta la concentración de peróxido de magnesio en el lodo.

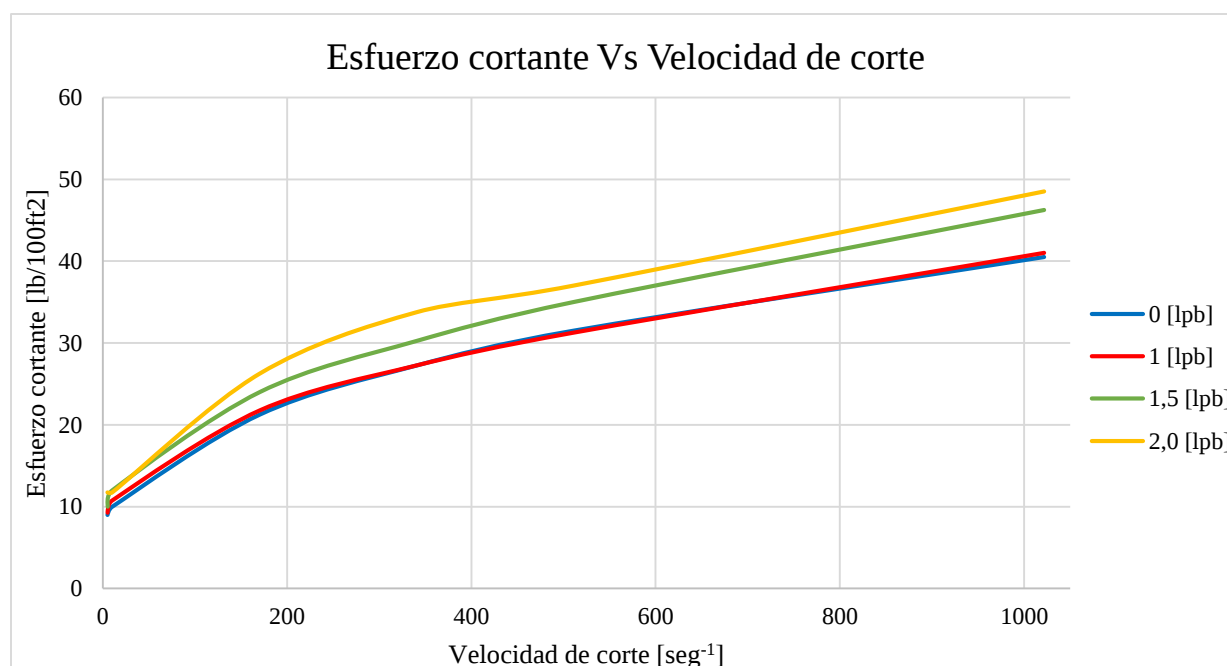


Figura 16. Gráfica de esfuerzo cortante (viscosidad) vs velocidad de corte.

Se puede ver que la línea de 0 libras por barril de peróxido de magnesio es muy similar a la de 1 libra por barril, tanto, que logran sobreponerse entre sí. Por otro lado, las líneas de 1,5 y 2 libras por barril denotan un evidente aumento en sus valores de esfuerzo cortante, sobre todo cuando se hacen mayores los valores de velocidad, lo que indica un ligero aumento en la viscosidad del fluido.

Como se menciona anteriormente, a partir de la Tabla 11 se hicieron las gráficas de viscosidad plástica y de *yield point*.

En la gráfica de viscosidad plástica (Figura 17) se ve un ligero aumento de los valores registrados a medida que aumenta la concentración de peróxido de magnesio en el lodo. Sin embargo, los valores de viscosidad plástica se mantienen en un rango estrecho, entre 9 (valor con 0 lbp de peróxido de magnesio) y 11,25 cP.

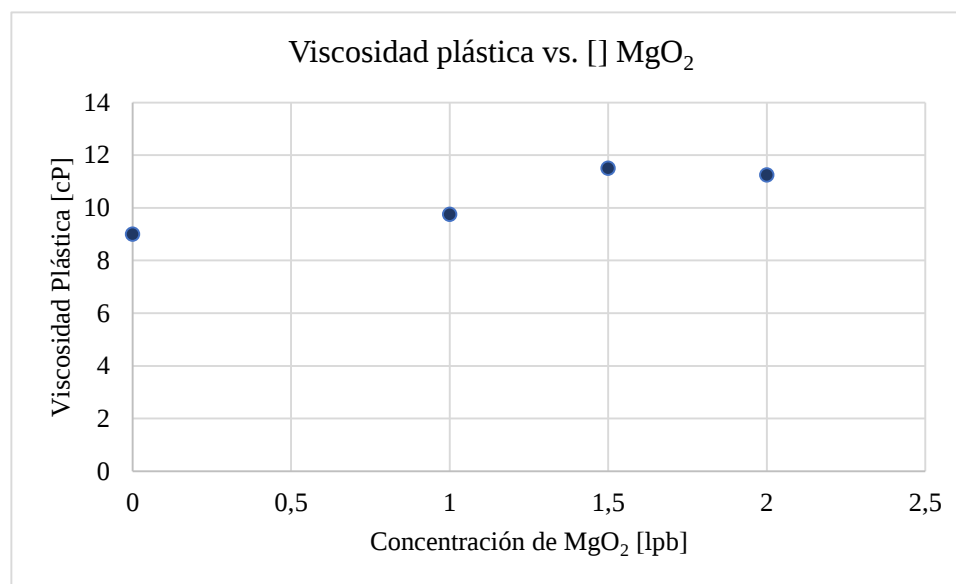


Figura 17. Viscosidad plástica vs concentración de peróxido de magnesio.

Los valores hallados para *yield Point* (o punto cedente) Figura 18 muestran que el peróxido de magnesio afecta levemente estos mismos; causándoles un leve y progresivo aumento, el cual se debe al efecto que puede tener el químico añadido en las fuerzas de atracción electroquímicas del fluido.

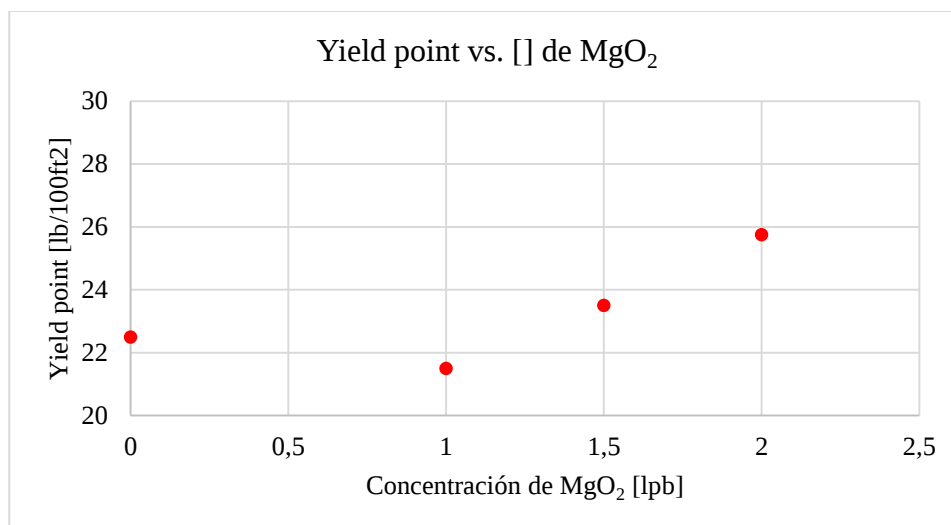


Figura 18. Yield point vs concentración de peróxido de magnesio.

Finalmente, el esfuerzo de gel hallado en laboratorio se grafica en la Figura 19, se evidencia que el cambio que sufre el fluido al añadirse distintas concentraciones de peróxido de magnesio es mínimo, a tal punto que se puede afirmar que la influencia en el esfuerzo de gel por parte del peróxido de magnesio en el lodo es despreciable.

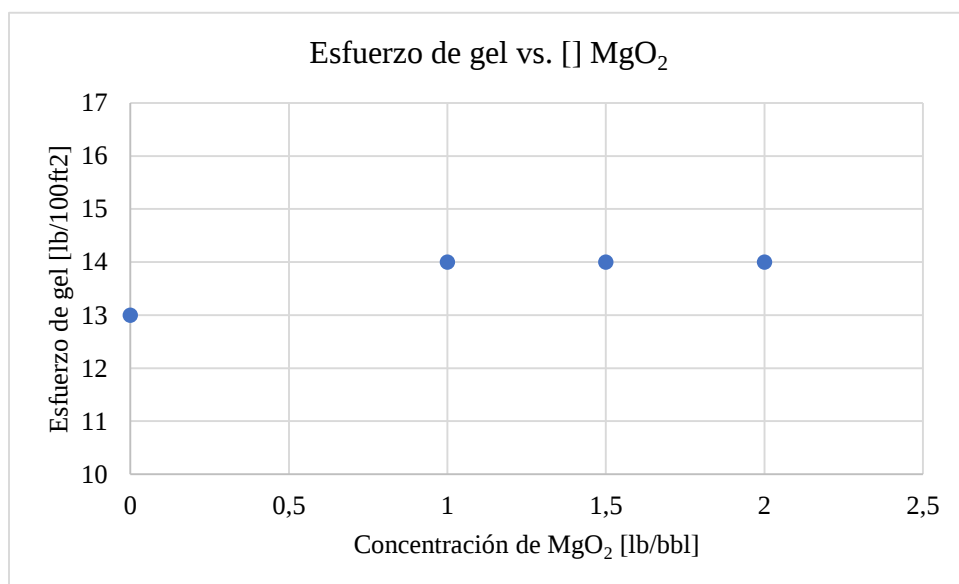


Figura 19. Esfuerzo de gel vs concentración de peróxido de magnesio.

5. Conclusiones

De los tratamientos estudiados y recopilados para el abordaje de este trabajo de investigación, se seleccionó y aplicó el tratamiento con peróxido de magnesio debido a que las condiciones que se necesitan para su aplicación se asemejan a las presentadas en campo.

La manera más apropiada de realizar el experimento fue hacer un diseño experimental factorial, debido a que tiene en cuenta los efectos de los factores seleccionados a probar (concentración de ácido cítrico y de peróxido de magnesio) y la interacción de estos en la respuesta al tratamiento de remoción.

Con los datos obtenidos en laboratorio, posteriormente procesados, se puede concluir que el tratamiento de remoción con peróxido de magnesio aumentó la eficiencia de remoción de la torta de lodo, registrando valores de hasta el 55%; este aumento depende tanto de la concentración de peróxido de magnesio como de la concentración de ácido cítrico.

Del análisis de varianza efectuado (ANOVA) para el experimento factorial de remoción se concluye que hay efecto del ácido cítrico y efecto del peróxido de magnesio estadísticamente significativo. En contraste, el efecto de la interacción de ambos factores no es estadísticamente significativo. Sin embargo, no se debe desestimar en la práctica que el adecuado funcionamiento del tratamiento con peróxido de magnesio depende de la aplicación en conjunto de los dos factores que influyen en la remoción.

La síntesis del peróxido de magnesio provee un buen producto para las pruebas realizadas en laboratorio. Sin embargo, con peróxido de magnesio comercial, se pueden lograr eficiencias de

remoción más altas ya que al tener mayor concentración del reactivo se obtiene mayor velocidad de reacción (Izquierdo & Torres, 2004).

La reología del lodo se ve levemente afectada por la adición de peróxido de magnesio en su composición con un aumento del esfuerzo a aplicado de hasta 7,5 lb/100ft² en el valor de mayor velocidad de corte y teniendo variaciones despreciables en las demás propiedades reológicas como el yield point, esfuerzo de gel y viscosidad plástica. lo que hace viable la aplicación del tratamiento en campo. Sin embargo, en caso de ser necesario conservar propiedades reológicas exactas en campo, se debe considerar los aditivos requeridos.

6. Recomendaciones

El tratamiento con peróxido de magnesio debe tener un especial cuidado en su manipulación para laboratorio, ya que es un comburente (propicia condiciones para la ignición de compuestos inflamables) y puede llegar a generar accidentes debido a sus condiciones de almacenamiento. Es necesario tener en cuenta las recomendaciones de su hoja de seguridad.

Se sugiere para futuros trabajos contar con peróxido de magnesio de pureza comercial (mayor) con objeto de comparar el aumento de eficiencia de remoción que esto aporta. También, para su aplicación en otros estudios, se puede hacer pruebas con otros tipos de lavadores ácidos y verificar su funcionamiento.

Para futuros trabajos se sugiere realizar un estudio de viabilidad económica para aplicación del tratamiento en campo, con el fin de complementar esta investigación.

Adicionalmente, hay que tener especial cuidado con las condiciones del pozo al momento de aplicar el tratamiento de remoción con peróxido de magnesio, ya que si hay influjos de ácido

sulfhídrico (H_2S) o dióxido de carbono (CO_2) (que forma ácido carbónico (H_2CO_3)) en presencia de agua), ya que el ambiente ácido que se genere podría liberar oxígeno (O_2) del peróxido de magnesio en zonas indeseadas y comprometer la estabilidad del pozo.

Referencias bibliográficas

- Battistel, E., Bianchi, D., Cobianco, S., & Fornaroli, M. (2010). *Process for the enzymatic removal of filter-cakes produced by water-based drilling and completion fluids* (Patent Núm. 20100069266).
- Brice, J. W. J., & Holmes, B. C. (1964). Engineered Casing Cementing Programs Using Turbulent Flow Techniques. *Journal of Petroleum Technology*, 16(05), 503–508. <https://doi.org/10.2118/742-PA>
- Bulanov, N. I., Monastirev, V. A., Balakin, V. V., Pavlenko, A. N., & Voropanov, V. E. (1992). *Well bottom zone treatment with improved efficiency – includes injection of reagent breaking up clay crust for removal by flush solution stream*. (Patent Núm. 1761944).
- Clark, C. R., & Carter, G. L. (1973). Mud Displacement with Cement Slurries. *Journal of Petroleum Technology*, 25 (07), 775–783. <https://doi.org/10.2118/4090-PA>
- Docherty, K., Kefi, S., Khalfallah, I., Taoutaou, S., Offenbacher, M., & Ravitz, R. (2016). Mud Removal—Clearing the Way for Effective Cementing. *Oilfield Review*, 28, 20–25.
- El-dabi, F., & Bulgachev, R. V. (2011). Gravel Packing Depleted Reservoirs. *SPE European Formation Damage Conference*. SPE European Formation Damage Conference, Noordwijk, The Netherlands. <https://doi.org/10.2118/143929-MS>
- Evanoff, J. I., & Cook, C. (1988). *Optimizing Cement Design for Improved Job Results*. Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/17441-MS>
- Fink, J. K. (2012). *Petroleum engineer's guide to oil field chemicals and fluids* (1st ed.). Elsevier ; Gulf Professional Publishing.

- Gambino, F. E., Guimerans, R., Galarraga, F. A., Pestana, D. C., & Rojas, E. (2001). Experimental Study of Fluid/Rock interaction Caused by Drilling and Cementing Filtrates in Carito Field. *Society of Petroleum Engineers*. <https://doi.org/10.2118/65004-MS>
- Giamello, E., Calosso, L., Fubini, B., & Geobaldo, F. (1993). Evidence of Stable Hydroxyl Radicals and Other Oxygen Radical Species Generated by Interaction of Hydrogen Peroxide with Magnesium Oxide. *The Journal of Physical Chemistry*, 97(21), 5735–5740. <https://doi.org/10.1021/j100123a045>
- Guillot, D. J., Parcevaux, P., & Jennings, D. B. (1986). *Aqueous Composition for Universal Spacer and Its Use in the Field of Drilling Wells, Notably Oil and Gas wells* (Patent Núm. 273,471).
- Howard, G. C., & Clark, J. B. (1948). Factors to be Considered in Obtaining Proper Cementing of Casing. En *API Drilling and Production Practices*.
- Izquierdo, J. F., & Torres, J. F. I. (2004). *Cinética de las reacciones químicas* (Vol. 16). Edicions Universitat Barcelona.
- Jones, P. H., & Berdine, D. (1940). Oil Well Cementing: Factors Influencing Bond Between Cement and Formation. *API Drilling and Production Practices*, 45–63.
- Mahapatra, S. K., & Kosztin, B. (2011). Magnesium Peroxide Breaker for Filter Cake Removal. *Society of Petroleum Engineers*. <https://doi.org/10.2118/142832-MS>
- McLean, R. H., Manry, C. W., & Whitaker, W. W. (1967). Displacement Mechanics in Primary Cementing. *Journal of Petroleum Technology*, 19(02), 251–260. <https://doi.org/10.2118/1488-PA>
- M-I Swaco. (2001). *Manual de Fluidos de Perforación*.
- Montgomery, D. (2004). *Diseño y Análisis de Experimentos* (Segunda Edición). Limusa Wiley.

- Motley, H. R., Morris, E. F., & Pavlich, J. P. (1974). *Use of a Spacer Composition in Well Cementing* (Patent Núm. 3820602).
- Munoz Jr, T. (2009). *In-situ filter cake degradation compositions and methods of use in subterranean formations* (Patent Núm. 7553800).
- Nasr-El-Din, H. A., Lynn, J. D., & Taylor, K. C. (2001). Lab Testing and Field Application of a Large-Scale Acetic Acid-Based Treatment in a Newly Developed Carbonate Reservoir. *Society of Petroleum Engineers*. <https://doi.org/10.2118/65036-MS>
- Nelson, E. B., & Guillot, D. (Eds.). (2006). *Well cementing* (Second edition). Schlumberger.
- Nguyen, D., Kagan, M., & Rahman, S. S. (1992). Evaluation of drilling fluid removal by cement slurry from horizontal wells with the use of an accurate mathematical model. 3, 8, 191–204.
- Rabia, H. (2001). *Well Engineering and Construction* (Entrac Consulting). Entrac Petroleum.
- Ravi, K. M., Beirute, R. M., & Covington, R. L. (1992). Erodability of Partially Dehydrated Gelled Drilling Fluid and Filter Cake. *Society of Petroleum Engineers*. <https://doi.org/10.2118/24571-MS>
- Sauer, C. W. (1987). Mud Displacement During Cementing: A State of the Art. *Journal of Petroleum Technology*.
- Schaaf, S., Mallery, C. R., & Pafitis, D. (2000). *Point-the-Bit Rotary Steerable System: Theory and Field Results*.
- Schlumberger. (2019a). Drill-in Fluid. En *Schlumberger Oilfield Glossary*.
- Schlumberger. (2019b). Pressure Depletion. En *Schlumberger Oilfield Glossary*.
- Schriener, K., & Munoz Jr, T. (2009). *Methods of degrading filter cakes in a subterranean formation* (Patent Núm. 7497278).

- Thomas, D. C. (1981). *A Spacer System Useful in Brine Completion of Wellbores* (Patent Núm. 2073284A).
- Wieland, D. R., & Woods, B. L. (1975). *Cement Preflush Method* (Patent Núm. 3878895).
- Wiley, J., & Sons. (2020a). SpectraBase Magnesium Oxide. En *Inc. SpectraBase*.
<https://spectrabase.com/spectrum/CEDdwZMT4Kl>
- Wiley, J., & Sons. (2020b). SpectraBase Magnesium peroxide. En *Inc. SpectraBase*.
<https://spectrabase.com/compound/8qEQ5UHBSBW>
- Zamora, M., Roy, S., Caicedo, H. Y., Froitland, T. S., & Ting, S. T. (2000). Major Advancements in True Real-Time Hydraulics. *Society of Petroleum Engineers*.
<https://doi.org/10.2118/62960-MS>