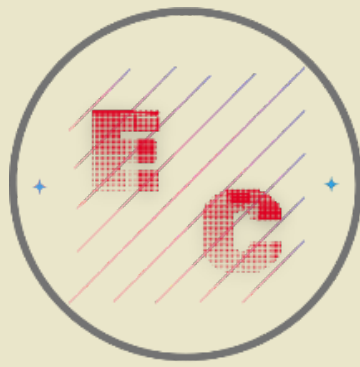




REVISTA MULTIDISCIPLINAR EPISTEMOLOGÍA DE LAS CIENCIAS

Volumen 3, Número 1
Enero-Marzo 2026

Edición Trimestral

CROSSREF PREFIX DOI: 10.71112

ISSN: 3061-7812, www.omniscens.com

Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias

Volumen 3, Número 1
enero-marzo 2026

Publicación trimestral
Hecho en México

La Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias acepta publicaciones de cualquier área del conocimiento, promoviendo una plataforma inclusiva para la discusión y análisis de los fundamentos epistemológicos en diversas disciplinas. La revista invita a investigadores y profesionales de campos como las ciencias naturales, sociales, humanísticas, tecnológicas y de la salud, entre otros, a contribuir con artículos originales, revisiones, estudios de caso y ensayos teóricos. Con su enfoque multidisciplinario, busca fomentar el diálogo y la reflexión sobre las metodologías, teorías y prácticas que sustentan el avance del conocimiento científico en todas las áreas.

Contacto principal: admin@omniscens.com

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación

Se autoriza la reproducción total o parcial del contenido de la publicación sin previa autorización de la Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.



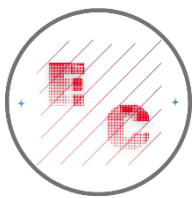
Copyright © 2026: Los autores



9773061781003

Cintillo legal

Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias Vol. 3, Núm. 1, enero-marzo 2026, es una publicación trimestral editada por el Dr. Moises Ake Uc, C. 51 #221 x 16B , Las Brisas, Mérida, Yucatán, México, C.P. 97144 , Tel. 9993556027, Web: <https://www.omniscens.com>, admin@omniscens.com, Editor responsable: Dr. Moises Ake Uc. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2024-121717181700-102, ISSN: 3061-7812, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR). Responsable de la última actualización de este número, Dr. Moises Ake Uc, fecha de última modificación, 1 enero 2026.



Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias

Volumen 3, Número 1, 2026, enero-marzo

DOI: <https://doi.org/10.71112/433cb916>

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE SAPONINAS DE AGAVE MAPISAGA EN
FLUIDOS DE PERFORACIÓN: COMPARACIÓN CON CARBOXIMETILCELULOSA
(CMC) EN EL CONTROL DE FILTRADO**

**EXPERIMENTAL EVALUATION OF SAPONINS FROM AGAVE MAPISAGA IN
DRILLING FLUIDS: COMPARISON WITH CARBOXYMETHYLCELLULOSE (CMC) IN
FILTRATION CONTROL**

Isabel O. Albino-Gutierrez

Nicómedes Saavedra-Arancibia

Héctor F. Durán-Calvetty

Mirna Villegas

Irma C. Ajhuacho-Lopez

Bolivia

Evaluación experimental de saponinas de Agave mapisaga en fluidos de perforación: comparación con carboximetilcelulosa (CMC) en el control de filtrado

Experimental evaluation of saponins from Agave mapisaga in drilling fluids: comparison with carboxymethylcellulose (CMC) in filtration control

Isabel O. Albino-Gutierrez

isabelolgaalbinogutierrez@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0002-3891-7095>

Facultad de Ciencias y Tecnología,
Universidad San Francisco Xavier (USFX),
Sucre, Bolivia

Héctor F. Durán-Calvetty

duran.hector@usfx.bo

<https://orcid.org/0009-0001-9257-9720>

Facultad de Ciencias y Tecnología,
Universidad San Francisco Xavier (USFX),
Sucre, Bolivia

Irma C. Ajhuacho-Lopez

ajhuacho.irma@usfx.bo

<https://orcid.org/0009-0001-2930-9816>

Facultad de Ciencias y Tecnología,
Universidad San Francisco Xavier (USFX),
Sucre, Bolivia

Nicómedes Saavedra-Arancibia

saavedra.nicomedes@usfx.bo

<https://orcid.org/0009-0003-9354-1606>

Facultad de Ciencias y Tecnología,
Universidad San Francisco Xavier (USFX),
Sucre, Bolivia

Mirna Villegas

villegas.mirna@usfx.bo

<https://orcid.org/0009-0000-1039-4259>

Facultad de Ciencias y Tecnología,
Universidad San Francisco Xavier (USFX),
Sucre, Bolivia

RESUMEN

El presente estudio evalúa experimentalmente el desempeño de saponinas extraídas de *Agave mapisaga* como biosurfactante natural, evaluadas como aditivo controlador de filtrado y modificador reológico en lodos de perforación base agua, mediante comparación directa con carboximetilcelulosa (CMC). La metodología incluyó extracción y purificación del material, formulación de lodos con concentraciones equivalentes (0,25 lb/bbl) y evaluación conforme a API RP 13B-1. En condiciones estándar, las saponinas incrementaron el punto cedente en 18% (65 vs. 55 lb/100 ft²), indicando mayor capacidad de suspensión, y mostraron un filtrado API ligeramente mayor que CMC (3,4 vs. 3,1 mL; +9,7%). Bajo evaluación térmica a 350°F, el filtrado con saponinas aumentó 24% (3,4→4,2 mL), mientras que con CMC aumentó 61% (3,1→5.0 mL). Se concluye que las saponinas son técnicamente competitivas y más estables térmicamente para escenarios donde el control de filtrado y la suspensión de sólidos son críticos.

Palabras clave: biosurfactante; saponinas; agave mapisaga; lodos de perforación; filtrado API; reología; CMC; estabilidad térmica

ABSTRACT

This study experimentally evaluates the performance of saponins extracted from *Agave mapisaga* as a natural biosurfactant, assessed as a fluid-loss control and rheology-modifying additive in water-based drilling fluids, through direct comparison with carboxymethylcellulose (CMC). The methodology included extraction and purification of the material, formulation of drilling fluids at equivalent concentrations (0,25 lb/bbl), and evaluation according to API RP 13B-1 procedures. Under standard conditions, saponins increased yield point by 18% (65 vs. 55 lb/100 ft²), indicating improved solids suspension capacity, and exhibited slightly higher API fluid loss than CMC (3,4 vs. 3,1 mL; +9,7%). Under thermal evaluation at 350°F, fluid loss with

saponins increased by 24% (3,4→4,2 mL), whereas CMC increased by 61% (3,1→5,0 mL). The results indicate that saponins are technically competitive and show greater thermal stability where fluid-loss control and solids suspension are critical.

Keywords: biosurfactant; saponins; agave mapisaga; drilling fluids; API fluid loss; rheology; CMC; thermal stability

Recibido: 24 febrero 2026 | Aceptado: 11 marzo 2026 | Publicado: 12 marzo 2026

INTRODUCCION

Los fluidos de perforación base agua (Water-Based Muds, WBM) cumplen funciones críticas en la construcción del pozo, incluyendo el transporte de recortes, el control de presiones, la estabilización de la pared del pozo y la reducción de problemas operacionales asociados a inestabilidad y daño a la formación (Bourgoyne et al., 1991; Caenn et al., 2011). En estos sistemas, la reología gobierna el comportamiento hidráulico y la capacidad de acarreo en circulación y en reposo, mientras que el control de filtrado determina la invasión de fase líquida hacia la formación y la formación de un revoque (filter cake) delgado, de baja permeabilidad y con suficiente integridad mecánica (American Petroleum Institute [API], 2019; Caenn et al., 2011). Un desempeño inadecuado en filtrado y revoque puede aumentar el riesgo de daño a la formación, problemas de pegadura diferencial y complicaciones que incrementan tiempos no productivos.

Dentro de los aditivos más utilizados para WBM, la carboximetilcelulosa (CMC) destaca por su capacidad de reducir el filtrado API y contribuir a la construcción del revoque mediante mecanismos principalmente asociados al aumento de viscosidad de la fase continua y a la modificación de la estructura del sistema sólido-líquido, con efectos directos sobre la permeabilidad del revoque (Caenn et al., 2011). Sin embargo, se reconoce que diversos

aditivos poliméricos en WBM pueden presentar pérdida de desempeño al incrementarse la temperatura, debido a cambios estructurales y/o degradación térmica que se reflejan en aumentos de filtrado, deterioro del revoque y variaciones indeseadas en PV/YP y parámetros de flujo (Xu et al., 2022). En consecuencia, la estabilidad térmica del aditivo se vuelve determinante para sostener el desempeño del lodo cuando el sistema está sometido a estrés térmico.

En paralelo, existe un interés creciente por aditivos alternativos de origen natural (biopolímeros y biosurfactantes) orientados a mejorar la compatibilidad ambiental y, en algunos casos, aportar desempeño técnico competitivo en operaciones petroleras (Nikolova & Gutierrez, 2021; Sharma et al., 2023). Los biosurfactantes han sido ampliamente estudiados en aplicaciones energéticas debido a su biodegradabilidad, baja toxicidad y eficiencia interfacial (Banat et al., 2021). En este grupo, las saponinas vegetales han sido ampliamente descritas como compuestos anfífilos (biosurfactantes) con actividad superficial, capaces de modificar interacciones interfaciales y comportamientos coloidales en medios acuosos (Güçlü-Üstündağ & Mazza, 2007; Rai et al., 2021). Si bien su aplicación es extensa en industrias alimentaria, farmacéutica y ambiental, su evaluación específica en fluidos de perforación aún es limitada, por lo que se requiere evidencia experimental que clarifique su contribución funcional sobre reología, filtrado y revoque en sistemas bentoníticos (Mulligan, 2009; Rai et al., 2021).

En el caso del género *Agave*, se ha reportado la presencia de saponinas con propiedades bioactivas y potencial para aplicaciones industriales; no obstante, su desempeño aplicado en formulaciones de lodos requiere validación bajo protocolos estandarizados (Güçlü-Üstündağ & Mazza, 2007). La estructura anfífila de las saponinas explica su actividad como biosurfactantes y su capacidad para generar respuestas interfaciales y asociaciones en solución, lo cual puede influir indirectamente en el comportamiento del sistema coloidal del lodo (Tucker et al., 2020; Yang et al., 2013). En este marco, resulta técnicamente razonable evaluar

saponinas no solo por su naturaleza biosurfactante, sino por su desempeño funcional dentro del lodo, particularmente en control de filtrado y modificación reológica bajo condiciones comparables al aditivo polimérico de referencia. El control de filtrado en lodos base agua suele apoyarse en polímeros sintéticos o modificados y su selección se condiciona por estabilidad térmica y salinidad, por lo que la búsqueda de alternativas funcionales y ambientalmente favorables es un tema activo de investigación (Balaga & Kulkarni, 2022; Li et al., 2024). El interés en alternativas poliméricas con mejor perfil ambiental para lodos base agua se ha intensificado, buscando mantener desempeño técnico (p. ej., estabilidad y control de propiedades) con menor impacto ambiental (Abbas et al., 2021).

En el contexto boliviano, *Agave mapisaga* representa un recurso vegetal de acceso local, con potencial de aprovechamiento y extracción en condiciones de laboratorio. Sin embargo, antes de proponerlo como alternativa técnica, es necesario establecer evidencia experimental sobre su comportamiento en WBM bentoníticos: impacto sobre PV, YP, fuerzas de gel, parámetros de adelgazamiento por cizalla y pérdida de filtrado, así como su respuesta frente a exposición térmica controlada (American Petroleum Institute [API], 2019; Caenn et al., 2011). Con este propósito, el presente estudio evalúa experimentalmente saponinas extraídas de *Agave mapisaga* como biosurfactante natural, examinadas funcionalmente como aditivo controlador de filtrado y modificador reológico, en comparación directa con CMC a concentración equivalente (0,25 lb/bbl), siguiendo API RP 13B-1 (American Petroleum Institute [API], 2019). Adicionalmente, se aplica un tamizaje térmico a 200 °F y 350 °F como niveles comparativos internos del estudio para identificar tendencias de estabilidad y límites de desempeño bajo exposición térmica controlada, sin sustituir pruebas HPHT. Este enfoque aporta evidencia inicial para sustentar el potencial del aditivo natural y orientar investigaciones posteriores bajo condiciones operacionales más exigentes. El desarrollo de formulaciones de

perforación ambientalmente responsables constituye una línea prioritaria dentro de la ingeniería moderna de fluidos (Gbadamosi et al., 2021).

METODOLOGIA

La investigación se desarrolló bajo un diseño experimental comparativo a escala de laboratorio, orientado a evaluar el desempeño de saponinas extraídas de *Agave mapisaga* como aditivo natural-evaluadas funcionalmente en control de filtrado y modificación reológica en lodos base agua, en comparación con carboximetilcelulosa (CMC) como aditivo de referencia. La formulación de los sistemas y la medición de propiedades se ejecutaron conforme a los procedimientos de la norma API RP 13B-1 (5th ed., 2019) para lodos base agua (American Petroleum Institute [API], 2019).

Para la obtención del aditivo natural, se empleó material vegetal de *Agave mapisaga* acondicionado mediante limpieza, secado y reducción de tamaño (Ver Figura 1). La extracción de saponinas se realizó por maceración etanólica, seguida de concentración del extracto y purificación por precipitación con acetona para recuperar la fracción sólida rica en saponinas. La confirmación cualitativa de presencia y actividad se efectuó mediante pruebas de espuma persistente, prueba de Hemolisis y ensayo colorimétrico de Liebermann–Burchard (Ver Figura 2), consistentes con el comportamiento reportado para saponinas vegetales (Güçlü-Üstündağ & Mazza, 2007; Rai et al., 2021).

Figura 1

Proceso de obtención del extracto de saponinas a partir de Agave mediante deshidratación, molienda, maceración y concentración.

**Figura 2**

Ensayos cualitativos de identificación de saponinas: prueba de espuma, hemólisis y reacción de Liebermann–Burchard.



Se preparó un lodo base con bentonita comercial (30 lb/bbl) y agua, alcanzando una densidad de 8,75 lb/gal en todas las formulaciones, verificada con balanza de lodos. Todas las muestras se acondicionaron con NaOH para mantener pH alcalino (>9,5). Se formularon cinco sistemas experimentales: lodo base (bentonita + agua); lodo base alcalinizado (bentonita + agua + NaOH); lodo con CMC (bentonita + agua + NaOH + CMC a 0,25 lb/bbl); lodo con

saponinas (bentonita + agua + NaOH + extracto de saponinas a 0,25 lb/bbl); y lodo combinado (bentonita + agua + NaOH + CMC a 0,125 lb/bbl + extracto de saponinas a 0,125 lb/bbl), manteniendo la concentración total de aditivo en 0,25 lb/bbl. La concentración de 0,25 lb/bbl se expresa en unidades de laboratorio considerando que 1 barril equivalente (bbl) corresponde a 350 mL, por lo que dicha concentración equivale a 0,25 g por 350 mL de lodo (0,71 g/L).

Para evaluar la estabilidad térmica mediante un enfoque de tamizaje (screening), las cinco formulaciones (lodo base, base+NaOH, base+NaOH+CMC, base+NaOH+saponinas y combinado) se sometieron a acondicionamiento térmico a 200°F y 350°F. Para 200°F, las muestras se calentaron en baño María hasta alcanzar la temperatura objetivo; para 350°F, se utilizó un horno mufla. La evaluación térmica permite identificar procesos de degradación polimérica que impactan directamente la capacidad de control de filtrado y estabilidad reológica (Noor et al., 2024). En ambos casos, las muestras se colocaron en recipientes tapados (no herméticos) para minimizar pérdidas por evaporación y mantener la composición lo más constante posible. Una vez alcanzada la temperatura objetivo, se mantuvo una condición isoterma durante 30 min y, a continuación, se evaluaron inmediatamente las propiedades reológicas y la pérdida de filtrado, registrando el efecto inmediato de la temperatura sobre el desempeño del sistema. El tamizaje térmico en el rango 250–350°F se usa frecuentemente como evaluación preliminar del comportamiento térmico de sistemas poliméricos antes de pruebas HPHT, para identificar tendencias de estabilidad y degradación (Misbah et al., 2023). Este procedimiento se empleó como evaluación comparativa de estabilidad térmica en laboratorio y no sustituye ensayos HPHT, pero permite identificar tendencias de degradación o pérdida de funcionalidad bajo exposición térmica controlada (American Petroleum Institute [API], 2019).

Las propiedades físicas y reológicas se midieron en condición estándar y tras la evaluación térmica. La densidad se determinó con balanza de lodos, y la viscosidad Marsh se

evaluó como indicador operacional de flujo a baja tasa de corte. La reología se determinó con viscosímetro rotacional tipo Fann, registrando lecturas a 600 y 300 rpm para calcular viscosidad plástica (PV) y punto cedente (YP) mediante el modelo de Bingham, así como fuerzas de gel a 10 segundos y 10 minutos, conforme API RP 13B-1 (American Petroleum Institute [API],2019). Complementariamente, se estimaron los parámetros del modelo Ley de Potencia (índice de comportamiento de flujo n^* e índice de consistencia K) para caracterizar el grado de pseudoplasticidad y el comportamiento de adelgazamiento por cizalla del sistema (Caenn, Darley & Gray, 2011).

Figura 3

Determinación de propiedades reológicas mediante viscosímetro rotacional Fann 35.



El control de filtrado se evaluó mediante el ensayo API (LPLT) con prensa filtro a presión estándar de 100 psi durante 30 minutos, registrando el volumen de filtrado (mL) y observando cualitativamente las características del revoque (continuidad, compactación y cohesión), como se puede observar en la Figura 3, dado que la calidad del revoque se asocia directamente a la pérdida de filtrado y a la interacción del fluido con la formación (American Petroleum Institute [API],2019; Caenn et al., 2011). Adicionalmente, se efectuaron pruebas químicas de control

incluyendo pH, alcalinidad (Pf/Pm) y capacidad de intercambio catiónico (MBT), como indicadores del acondicionamiento del sistema y de la interacción con las arcillas, siguiendo las prácticas descritas en la norma API (American Petroleum Institute [API], 2019).

Figura 4

Evaluación del desempeño en control de filtrado y formación de revoque en sistemas de lodo base agua con y sin aditivo saponínico.



Finalmente, los resultados se analizaron de manera descriptiva y comparativa entre formulaciones, reportando valores medidos y variaciones porcentuales entre condición estándar y condición térmica. Considerando el alcance exploratorio del estudio, no se aplicaron pruebas estadísticas inferenciales; la interpretación se basó en tendencias consistentes de desempeño en filtrado, reología y estabilidad térmica bajo un mismo protocolo (American Petroleum Institute [API], 2019).

RESULTADOS

Los resultados obtenidos en condición estándar y tras el tamizaje térmico a 200°F y 350°F evidencian diferencias entre formulaciones en términos de comportamiento reológico,

control de filtrado y evolución química del sistema. En condición estándar, la densidad se mantuvo constante en 8,75 lb/gal para todas las formulaciones, lo que indica que la incorporación de NaOH, CMC, saponinas y la combinación CMC+saponinas no modificó de forma apreciable este parámetro a temperatura ambiente. Tras el acondicionamiento térmico se observó un incremento de densidad más marcado a 350°F, consistente con una reducción de fase líquida durante el calentamiento y el consecuente aumento relativo de la fracción sólida, aun cuando se emplearon recipientes tapados para minimizar pérdidas. La comparación global de los parámetros de flujo y reología (PV, YP, geles y parámetros n-K) bajo condición estándar y tras 200°F y 350°F se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1*Propiedades reológicas y de flujo*

Tabla 1. Muestra	Densidad (ppg)	VP (cP)	PC (lb/100 ft ³)	VA (cP)	Gel		Índice (n)	Consistencia (K)
		(Rango recomendado) 15 – 50 cP)	(Rango recomendado) 20 – 70 lb/100 ft ³)	(Rango recomendado) 15 – 40 cP)	10 s	10 min	(Rango recomendado 0,4	(Rango recomendado 200 -
Lodo base sin aditivos	8,75	15	31	30,5	13	11	0,41	360
Lodo + NaOH	8,76	26	65	58,5	32	29	0,36	770
Lodo + CMC a T amb.	8,8	50	55	77,5	25	22	0,56	360
Lodo + CMC a 200 °F	8,9	40	55	67,5	22	19	0,51	390
Lodo + CMC a 350 °F	9	35	50	60	18	16	0,5	340
Lodo + Saponina a T amb.	8,75	30	65	62,5	20	18	0,4	610
Lodo + Saponina a 200 °F	8,8	27	61	57,5	18	16	0,39	580
Lodo + Saponina a 350 °F	8,95	25	55	52,5	15	13	0,49	520
Lodo Combinado a T amb.	8,75	40	60	70	22	20	0,44	420
Lodo Combinado a 200 °F	8,75	33	59	62,5	20	18	0,44	460
Lodo Combinado a 350 °F	8,85	30	55	57,5	17	15	0,44	400

En condición estándar, el sistema con CMC presentó la mayor viscosidad plástica (PV = 50 cP), mientras que la formulación con saponinas mostró una PV menor (30 cP). El punto cedente fue superior en el sistema con saponinas (65 lb/100 ft²) en comparación con CMC (55 lb/100 ft²), y la formulación combinada mostró un comportamiento intermedio. El análisis mediante Ley de Potencia confirmó un comportamiento pseudoplástico en todas las formulaciones ($n < 1$). En particular, el sistema con saponinas presentó un índice n menor (0,40) frente al CMC (0,56) y un índice K mayor (610 vs. 360) en condición estándar. Luego del tamizaje térmico, el sistema con saponinas conservó valores cercanos de $n = 0,39$ y presentó una disminución moderada de K (610 a 520) a 350°F, mientras que el sistema con CMC mostró variaciones más pronunciadas en los parámetros reológicos. La viscosidad Marsh se registró únicamente para el lodo base (84 s) y el lodo base alcalinizado con NaOH (108 s); en las formulaciones con CMC, saponinas y combinado no fue posible obtener descarga medible en las condiciones del ensayo, por lo que se reporta como no registrable (NR) en la Tabla 1.

El desempeño de control de filtrado y las observaciones de revoque se resumen en la Tabla 2. En condición estándar, el sistema con CMC presentó un filtrado de 3,1 mL, mientras que el sistema con saponinas registró 3,4 mL. Tras el acondicionamiento térmico, el filtrado aumentó con mayor intensidad en el sistema con CMC, alcanzando 5,0 mL a 350°F, mientras que el sistema con saponinas mostró un incremento menor (3,4 a 4,2 mL). La formulación combinada mantuvo un filtrado de 4,0 mL en el rango evaluado, evidenciando un comportamiento más estable frente al estrés térmico de tamizaje. En paralelo, las observaciones cualitativas del revoque indicaron pérdida de cohesión e incremento de fragilidad a 350°F respecto a condición estándar, con mejor consistencia relativa en el sistema combinado.

Tabla 2*Control de filtrado y calidad del revoque*

Muestra	Temp. (°F)	Vol. Filtrado (ml) (Rango < 6,0 (máx.) / < 4,0 (óptimo)	Espesor (mm) (1mm a 2 mm óptimo)	Características del revoque
Lodo base	Estándar	7,0	1,5	Lustroso, uniforme, sin grumos, plástico
Lodo + NaOH	Estándar	4,0	2	Lustroso, uniforme, plástico
Lodo + NaOH + CMC	Estándar	3,1	2	Lustroso, gelatinoso, uniforme
Lodo + NaOH + CMC	200 °F	4,4	2	Lustroso, gelatinoso, heterogéneo
Lodo + NaOH + CMC	350 °F	5	2,5	Lustroso, grueso, poroso, heterogéneo
Lodo + NaOH + Saponina	Estándar	3,4	1,5	Lustroso, Plástico, uniforme
Lodo + NaOH + Saponina	200 °F	3,8	2,2	Lustroso, heterogéneo semi poroso
Lodo + NaOH + Saponina	350 °F	4,2	2,2	Poroso, quebradizo, heterogéneo
Lodo Combinado CMC + Saponina	Estándar	3,5	2	Lustroso, gelatinoso, uniforme, plástico
Lodo Combinado CMC + Saponina	200 °F	4,0	2	Lustroso, heterogéneo, plástico
Lodo Combinado CMC + Saponina	350 °F	4,0	2,3	Poroso, heterogéneo

Los parámetros fisicoquímicos y la capacidad de azul de metileno (MBT) se resumen en la Tabla 3. En condición estándar, el pH se mantuvo alcalino en las formulaciones con aditivos (10,91-11,70), mientras que el lodo base presentó un valor menor (pH = 9,30). Tras el tamizaje térmico, el pH disminuyó en todos los sistemas evaluados, con un descenso de 11,13 a 10,80 en el lodo con CMC y de 11,20 a 10,50 en el lodo con saponina, mientras que el sistema combinado mostró el pH más alto en condición estándar (11,70) y una reducción moderada hasta 10,90 a 350°F. En cuanto a alcalinidad, los valores de Pm y Pf se mantuvieron en rangos similares con variaciones puntuales por formulación y temperatura; el sistema combinado presentó el mayor Pm a 350°F (9,80 mL). Los valores de MBT mostraron diferencias entre formulaciones: en condición estándar, el sistema con CMC registró 4,50 mL y el sistema con saponina 3,50 mL, mientras que el combinado presentó 3,00 mL; tras el tamizaje térmico, el MBT tendió a incrementarse en los sistemas con saponina y combinado, alcanzando 4,00 mL y

4,50 mL a 350°F, respectivamente (Tabla 3). Este incremento en la capacidad de azul de metileno sugiere una mayor dispersión o hidratación de arcillas tras la exposición térmica, particularmente en presencia de saponinas.

Tabla 3

Propiedades Fisicoquímicas del lodo medidas en laboratorio

Muestra	Temp (°F)	pH	Pm (ml)	Pf (ml)	MBT (ml)
Lodo base	Estándar	9,3	8,7	3,4	3,5
Lodo + NaOH	Estándar	10,91	8,9	4,1	4
Lodo + CMC	Estándar	11,13	9,2	4,6	4,5
Lodo + CMC	200 °F	11	9	4	4
Lodo + CMC	350 °F	10,8	9,1	4,3	4
Lodo + Saponina	Estándar	11,2	8,7	4	3,5
Lodo + Saponina	200 °F	10,9	9,2	4	3,5
Lodo + Saponina	350 °F	10,5	8,7	4,2	4
Lodo Combinado	Estándar	11,7	9	4,2	3
Lodo Combinado	200 °F	11,1	9,2	4,1	4
Lodo Combinado	350 °F	10,9	9,8	3,9	4,5

DISCUSION

El comportamiento reológico obtenido evidencia diferencias funcionales entre el aditivo de referencia (CMC) y las saponinas de *Agave mapisaga*. En lodos base agua, la viscosidad plástica (PV) se asocia principalmente a la fricción mecánica y a la viscosidad de la fase continua, mientras que el punto cedente (YP) refleja la contribución de interacciones electroquímicas que sostienen sólidos en suspensión (Caenn, Darley, & Gray, 2011; American Petroleum Institute [API], 2019). Los surfactantes pueden modificar las interacciones arcilla-

fluido, afectando la estructura coloidal y el comportamiento del punto cedente (Ahmed & Elkatatny, 2022). Resultados previos muestran que variaciones en concentración y tipo de viscosificante modifican simultáneamente PV/YP y propiedades de filtración, por cambios en microestructura y en la formación del revoque, especialmente en sistemas con CMC/xantano y suspensiones con distinta distribución de sólidos (Ajieh, 2023; Soares et al., 2020).

Bajo esta lectura, el sistema con saponinas mostró un perfil técnicamente favorable al combinar una PV menor con un YP mayor respecto al CMC, lo que sugiere una estructura más efectiva a bajo esfuerzo sin penalizar el flujo bajo cizalla alta, condición relevante para el transporte de recortes y la eficiencia hidráulica.

La caracterización mediante Ley de Potencia confirmó el carácter pseudoplástico de las formulaciones ($n < 1$). El menor índice n en el sistema con saponinas indica mayor adelgazamiento por cizalla frente a CMC, coherente con un fluido que reduce su viscosidad aparente a altas tasas de corte. En términos operativos, este comportamiento suele considerarse deseable porque permite mantener capacidad de suspensión en reposo y reducir resistencia al bombeo durante circulación, sin necesidad de incrementar excesivamente la viscosidad plástica (Caenn et al., 2011; American Petroleum Institute [API], 2019). En este estudio, la conservación relativa de n y K tras el tamizaje térmico sugiere que la formulación con saponinas retuvo mejor su patrón reológico bajo exposición térmica en comparación con el sistema con CMC.

En control de filtrado, el CMC presentó el menor filtrado en condición estándar, consistente con su uso extendido como controlador de filtrado en lodos base agua. Sin embargo, bajo el tamizaje a 350°F, el incremento del filtrado en el sistema con CMC fue más pronunciado, mientras que el sistema con saponinas mostró una variación menor. En literatura, el desempeño de control de filtrado en WBM bajo exposición térmica se atribuye a la integridad del polímero y a su capacidad de formar revoques de baja permeabilidad (Zhang et al., 2023),

por lo que se han propuesto polímeros modificados y agentes de sellado resistentes a temperatura para mitigar degradación y pérdida de eficiencia (Aghdam et al., 2020; Zhu & Zheng, 2021; Zhu et al., 2024). Además de polímeros, se ha investigado el uso de aditivos avanzados (p. ej., basados en nanomateriales) para modificar reología y reducir filtrado, destacando la necesidad de comparar alternativas por desempeño y sostenibilidad (Rafieefar et al., 2021). Este resultado es relevante porque el aumento de filtrado con temperatura suele asociarse a pérdida de desempeño del aditivo y deterioro de la calidad del revoque (Caenn et al., 2011; American Petroleum Institute [API], 2019). Aunque el procedimiento aplicado no constituye un ensayo HPHT, sí permite comparar tendencias de estabilidad relativa bajo un protocolo controlado. La formulación combinada mostró un comportamiento más estable en el rango térmico, lo cual sugiere un posible efecto complementario entre ambos aditivos en la respuesta térmica del sistema. La microestructura y compactación del revoque influyen directamente en la tasa de filtración, especialmente bajo variaciones térmicas (Li et al., 2022).

Los parámetros fisicoquímicos aportan contexto para interpretar la estabilidad del sistema. Todas las formulaciones se mantuvieron en rango alcalino, condición necesaria para el desempeño de WBM y la estabilidad de arcillas. El descenso de pH con temperatura fue consistente en los sistemas evaluados, mientras que la variación de MBT entre formulaciones evidencia diferencias en la demanda de azul de metileno bajo el método aplicado. No obstante, debido a la ausencia de mediciones directas de tensión interfacial, potencial zeta o distribución granulométrica, la atribución de mecanismos fisicoquímicos debe considerarse preliminar y se limita a inferencias basadas en tendencias observadas (American Petroleum Institute [API], 2019; Caenn et al., 2011).

Desde una perspectiva ambiental, las saponinas son ampliamente descritas como biosurfactantes vegetales con biodegradabilidad y potencial menor persistencia ambiental en comparación con aditivos sintéticos, aunque su perfil de seguridad depende de la estructura

química y dosis (Güçlü-Üstündağ & Mazza, 2007; Sparg, Light, & van Staden, 2004; Mulligan, 2009). El uso de biopolímeros y aditivos ambientalmente compatibles para mejorar desempeño reológico y estabilidad de WBM ha sido reportado como una ruta viable para reducir dependencia de aditivos convencionales, manteniendo propiedades funcionales para operación (Akpan et al., 2020). Alternativamente, se han incorporado nanomateriales para mejorar simultáneamente reología y filtrado, aunque con mayores costos y complejidad de formulación (Abdullah et al., 2022). En consecuencia, los resultados técnicos obtenidos respaldan el interés de continuar con etapas de validación orientadas a condiciones más representativas de campo (salinidad, contaminación iónica, envejecimiento en celda, y ensayos HPHT), junto con evaluación ambiental específica. En conjunto, el estudio aporta evidencia experimental inicial de que las saponinas de *Agave mapisaga* pueden funcionar como alternativa o complemento al CMC en escenarios donde la estabilidad térmica y el balance reológico sean prioritarios, manteniendo un desempeño competitivo en filtrado bajo las condiciones ensayadas.

CONCLUSIONES

Se extrajeron saponinas a partir de *Agave mapisaga* con un rendimiento de 11,5% y se confirmó su presencia/actividad biosurfactante mediante pruebas cualitativas (formación de espuma persistente y ensayo de Liebermann-Burchard).

Se formularon lodos base agua bentoníticos con saponinas y con carboximetilcelulosa (CMC) a una concentración equivalente de 0,25 lb/bbl, siguiendo un protocolo de evaluación comparativa a escala de laboratorio conforme a API RP 13B-1 (American Petroleum Institute [API], 2019).

Bajo condición estándar, el análisis reológico por el modelo de Bingham mostró que el lodo con saponinas desarrolló un punto cedente de 65 lb/100 ft², superior al del sistema con CMC (55 lb/100 ft²), y una viscosidad plástica de 30 cP, inferior a la del sistema con CMC (50

cP). La caracterización complementaria por Ley de Potencia indicó un comportamiento más pseudoplástico para el lodo con saponinas ($n = 0,40$) frente al lodo con CMC ($n = 0,56$), consistente con un mayor adelgazamiento por cizalla bajo las condiciones de evaluación realizadas.

En control de filtrado API (LPLT), el sistema con saponinas presentó 3,4 mL en condición estándar, valor ligeramente mayor al del sistema con CMC (3,1 mL, +9.7%). En el tamizaje térmico a 350°F, el sistema con saponinas mostró una variación menor del filtrado (de 3,4 a 4,2 mL, +24%) en comparación con el sistema con CMC (de 3,1 a 5,0 mL, +61%). En conjunto, bajo las condiciones evaluadas, las saponinas de *Agave mapisaga* presentaron un desempeño competitivo respecto a CMC, con ventajas específicas en capacidad de suspensión (mayor YP) y mayor estabilidad térmica relativa en filtrado a 350°F, por lo que se identifican como una alternativa técnica prometedora para aplicaciones donde estos atributos sean prioritarios.

Declaración de conflicto de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés relacionado con esta investigación.

Declaración de contribución a la autoría

Las contribuciones de autoría se describen conforme a la taxonomía CRediT, que contempla 14 roles, reportando únicamente aquellos efectivamente desempeñados por cada autor en la investigación.

Isabel Olga Albino Gutierrez: Conceptualización, Metodología, Análisis formal, Visualización, Escritura-borrador original, Redacción-revisión y edición.

Nicómedes Saavedra-Arancibia: Conceptualización, Metodología, Visualización, Escritura-borrador original, Redacción-revisión y edición.

Héctor Fernando Durán-Calvetty: Curación de datos, Análisis formal, Conceptualización.

Mirna Villegas: Curación de datos, Conceptualización, Análisis formal.

Irma Corina Ajhuacho-López: Curación de datos, Análisis formal, Conceptualización.

Declaración de uso de inteligencia artificial

Los autores declaran que utilizaron inteligencia artificial como apoyo para la elaboración de este artículo y que dicha herramienta no sustituye de ninguna manera el proceso intelectual. Tras rigurosas revisiones con diferentes herramientas, en las que se comprobó la inexistencia de plagio, tal como consta en las evidencias, los autores manifiestan y reconocen que este trabajo es producto de un esfuerzo intelectual propio, que no ha sido escrito ni publicado previamente en ninguna plataforma electrónica ni mediante herramientas de inteligencia artificial.

REFERENCIAS

- Abbas, M. A., Zamir, A., Elraies, K. A., Mahmood, S. M., & Rasool, M. H. (2021). A critical parametric review of polymers as shale inhibitors in water-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 204, 108745. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108745>
- Abdullah, A. H., Al-Yaseri, A., & Yekeen, N. (2022). Experimental investigation of graphene oxide nanoparticles in water-based drilling fluids for enhanced rheology and filtration control. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208, 109363. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109363>
- Aghdam, S. B., Moslemizadeh, A., Kowsari, E., & Asghari, N. (2020). Synthesis and performance evaluation of a novel polymeric fluid loss controller in water-based drilling

- fluids: High-temperature and high-salinity conditions. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 83, 103576. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103576>
- Ahmed, R. M., & Elkatatny, S. (2022). Surfactant-based additives for clay swelling inhibition in water-based drilling fluids. *ACS Omega*, 7(12), 10231–10242. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00456>
- Ajieh, M. U. (2023). Effect of excess viscosifier and fluid loss control additive on the rheological characteristics of water-based drilling fluid. *Petroleum Science and Technology*, 41(14), 1434–1455. <https://doi.org/10.1080/10916466.2022.2092636>
- Akpan, E. U., Enyi, G. C., & Nasr, G. G. (2020). Enhancing the performance of xanthan gum in water-based mud systems using an environmentally friendly biopolymer. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 10, 1933–1948. <https://doi.org/10.1007/s13202-020-00837-0>
- American Petroleum Institute. (2019). *API recommended practice 13B-1: Field testing water-based drilling fluids* (5th ed.). American Petroleum Institute.
- Balaga, D. K., & Kulkarni, S. D. (2022). A review of synthetic polymers as filtration control additives for water-based drilling fluids for high-temperature applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 215, 110712. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110712>
- Banat, I. M., Satpute, S. K., Cameotra, S. S., Patil, R., & Nyayanit, N. (2021). Cost effective technologies and renewable substrates for biosurfactants' production. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 682893. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.682893>
- Bourgoyne, A. T., Millheim, K. K., Chenevert, M. E., & Young, F. S. (1991). *Applied drilling engineering*. Society of Petroleum Engineers.
- Caenn, R., Darley, H. C. H., & Gray, G. R. (2011). *Composition and properties of drilling and completion fluids* (6th ed.). Gulf Professional Publishing.

- Gbadamosi, A. O., Junin, R., Manan, M. A., & Agi, A. (2021). Recent advances and future prospects of environmentally friendly drilling fluids. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126686. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126686>
- Güçlü-Üstündağ, Ö., & Mazza, G. (2007). Saponins: Properties, applications and processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 47(3), 231–258. <https://doi.org/10.1080/10408390600698197>
- Li, A., Gao, S., & Zhang, G. (2024). A review in polymers for fluid loss control in drilling operations. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 225(8), 2300390. <https://doi.org/10.1002/macp.202300390>
- Li, X., Sun, J., & Zhao, Y. (2022). Microstructural characterization of filter cake formed by water-based drilling fluids and its impact on filtration performance. *Energy Reports*, 8, 1234–1243. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.045>
- Misbah, M., Rahman, M. A., & Hussain, S. (2023). Thermal stability evaluation of polymer-based drilling fluids: Experimental investigation in the 250–350°F range. *Journal of Molecular Liquids*, 380, 121789. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121789>
- Mulligan, C. N. (2009). Recent advances in the environmental applications of biosurfactants. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 14(5), 372–378. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2009.06.005>
- Nikolova, C., & Gutierrez, T. (2021). Biosurfactants and their applications in the oil and gas industry: Current state of knowledge and future perspectives. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 626639. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.626639>
- Noor, A. A., Khan, M. A., Zhang, Y., Lv, K., Sun, J., Liu, C., & Li, M.-C. (2024). Modified natural polymers as additives in high-temperature drilling fluids: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 287, 138556. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138556>

- Rafieefar, A., Aftab, A., & Ismail, I. (2021). Rheological behavior and filtration of water-based drilling fluids containing graphene oxide: Experimental measurement, mechanistic understanding, and modeling. *ACS Omega*, 6(44), 29905–29920. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04398>
- Rai, S., Acharya-Siwakoti, E., Kafle, A., Devkota, H. P., & Bhattarai, A. (2021). Plant-derived saponins: A review of their surfactant properties and applications. *Sci*, 3(4), 44. <https://doi.org/10.3390/sci3040044>
- Sharma, N., Lavania, M., & Lal, B. (2023). Biosurfactant: An emerging tool for the petroleum industries. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1254557. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1254557>
- Soares, A. S. F., Scheid, C. M., Marques, M. R. C., & Calçada, L. A. (2020). Effect of solid particle size on the filtration properties of suspension viscosified with carboxymethylcellulose and xanthan gum. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 185, 106615. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106615>
- Sparg, S. G., Light, M. E., & Van Staden, J. (2004). Biological activities and distribution of plant saponins. *Journal of Ethnopharmacology*, 94(2–3), 219–243. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2004.05.016>
- Tucker, I. M., Burley, A., Petkova, R. E., Hosking, S. L., Thomas, R. K., Penfold, J., Li, P. X., Ma, K., Webster, J. R. P., & Welbourn, R. (2020). Surfactant/biosurfactant mixing: Adsorption of saponin/nonionic surfactant mixtures at the air–water interface. *Journal of Colloid and Interface Science*, 574, 385–392. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.04.061>
- Xu, P., Xu, M., & Zhang, X. (2022). Thermal degradation mechanisms of polymeric additives in water-based drilling fluids and their impact on filtration and filter cake properties. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 215, 110678. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110678>

- Yang, Y., Leser, M. E., Sher, A. A., & McClements, D. J. (2013). Formation and stability of emulsions using a natural small molecule surfactant: Quillaja saponin (Q-Naturale®). *Food Hydrocolloids*, 30(2), 589–596. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.08.008>
- Zhang, T., Liu, Y., Chen, H., & Wang, S. (2023). High-temperature-resistant filtrate loss reducer for water-based drilling fluids under high-salinity conditions. *Petroleum Science*, 20(4), 2103–2116. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2023.03.018>
- Zhu, J., Liang, H., Liu, Y., Yu, B., & Ma, C. (2024). Synthesis and evaluation of high-temperature resistant polymer plugging agent for water-based drilling fluids. *ACS Omega*, 9(44), 44616–44623. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c07145>
- Zhu, W., & 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. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02617>