

Evaluación de pruebas complementarias a la norma API RP 63 para caracterizar soluciones
poliméricas utilizadas en pozos petroleros.

María Fernanda Cobos Espitia, Nayarith Vanessa Olmedo Castilla

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero de Petróleos

Director

Hernando Buendía Lombana

M.Sc. Administración de Empresas

Codirector

Raúl Andrés Martínez López

M.Sc. Ingeniería de Hidrocarburos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Programa Académico

Ingeniería de Petróleos

2025

Dedicatoria

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, quien ha sido mi luz y fortaleza a lo largo de este camino. Gracias por guiarme con tu amor infinito, por darme la fuerza para superar los desafíos y por permitirme llegar hasta aquí con esperanza y determinación.

A mis amados padres, Jesualdo Olmedo Cabrera e Ilsa Mary Castilla, cuyo esfuerzo y sacrificio han sido el pilar de mi formación. Gracias por enseñarme con su ejemplo el valor de la perseverancia, por impulsarme a ser mejor cada día, por su amor incondicional y por sostenerme en los momentos difíciles con palabras de aliento y confianza. Todo lo que soy y lo que he logrado es reflejo de su apoyo infinito e incondicional.

A mi hermana Ruth Merys Olmedo, mi guía y modelo a seguir, por ser mi inspiración y por acompañarme con sabiduría y amor en este proceso, mi hermana Narianys Olmedo y sobrinos Moisés y Roberto quienes alegran e iluminan mis días y me recuerdan que la vida se puede mirar desde una perspectiva distinta..

A mi querida amiga y compañera de tesis, María Fernanda Cobos, por su amistad sincera, por su entrega y por compartir conmigo cada reto y cada logro en este camino.

A mis demás familiares y amigos, les expreso mi más sincera gratitud por haber estado presentes de alguna u otra manera durante este proceso. Gracias por cada gesto de cariño que me impulsó a seguir adelante y por su apoyo incondicional.

Nayarith Olmedo Castilla

Dedico este logro a mi familia, que siempre ha estado a mi lado, apoyándome incondicionalmente y creyendo en mí incluso cuando yo misma dudaba. Su amor y confianza me han impulsado a honrar mi nombre y a convertirme en la mujer que deseo ser.

A Dios, por darme la fortaleza para seguir aprendiendo y avanzando.

A todos los profesionales que conocí a lo largo de mi carrera, quienes compartieron su conocimiento y contribuyeron a mi crecimiento tanto personal como profesional.

A mi amiga Nayarith Olmedo, por su amistad y compromiso. Juntas lo logramos.

A las amigas que la universidad me regaló, gracias por estar ahí cuando más lo necesité y por hacer este camino más llevadero.

A mi novio, por su amor incondicional, su confianza en mí y por recordarme siempre que sí podía.

Y, por último, a mí por no rendirme, por confiar en mis capacidades y por demostrarme que todo esfuerzo vale la pena... ¡lo logré!

María Fernanda Cobos Espitia

Agradecimientos

Expresamos nuestra más profunda gratitud al Grupo de Investigación en Tomografía Computarizada para la Caracterización de Yacimientos, dirigido por el ingeniero Nicolás Santos Santos y a la Universidad Industrial de Santander por permitirnos desarrollar nuestra tesis investigativa en el Parque Tecnológico de Guatigará.

De manera especial, reconocemos el apoyo de nuestro director de tesis, Hernando Buendía Lombana; nuestro codirector, Raúl Martínez López; y a la ingeniera química María Elvira Mendoza, quienes nos brindaron su conocimiento, experiencia y acompañamiento durante la realización de las pruebas. También extendemos nuestros agradecimientos a todos los miembros del grupo de investigación, por su disposición y colaboración, siempre dispuestos a resolver nuestras dudas e inquietudes.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	16
Objetivos	18
1. Antecedentes investigativos.....	19
2. Generalidades de los Geles Poliméricos de estudio.....	21
2.1 Goma Xantana (XG).....	22
2.1.1 Definición de la Goma Xantana (XG)	22
2.2 Goma Guar (GG)	23
2.2.1 Definición de la Goma Guar (GG).....	23
2.3 Propiedades y comparación de los polímeros seleccionados.....	24
3. Propiedades Reológicas	25
5. Metodología	26
5.1 Norma API RP 63:1990	26
5.2 Diseño Experimental.....	27
5.2.1 Fase 1: Caracterización básica	29
5.2.1.1 Caracterización básica de los polímeros	29
5.2.1.1.1 Espectro infrarrojo IR.....	29
5.2.1.1.1.1 Espectro infrarrojo IR Goma Guar (GG).....	29
5.2.1.1.1.2 Espectro infrarrojo IR Goma Xantana (XG)	31
5.2.1.1.2 Porcentaje de Humedad.....	32
5.2.1.2 Caracterización básica del crudo	34

5.2.1.1.1 <i>Gravedad API</i>	34
5.2.1.1.2 <i>Porcentaje de Agua y Sedimentos (BSW)</i>	36
5.2.1.1.3 <i>Viscosidad Dinámica</i>	37
5.2.1.1.4 <i>Resultados de la caracterización básica del crudo</i>	39
5.2.1.2 Preparación de fluidos.....	41
5.2.1.2.1 <i>Preparación de agua de formación sintética</i>	41
5.2.1.2.1.1 Preparación de soluciones.....	43
5.2.1.2.1.2 Soluciones Madres	43
5.2.1.2.1.3 Soluciones Diluidas	45
6. Pruebas complementarias.....	47
6.1 Mojabilidad Visual.....	47
6.1.1 Equipos y materiales.	48
6.1.2 Procedimiento	48
6.2 Detergencia	48
6.2.1 Equipo y Materiales	49
6.2.2 Procedimiento	49
6.3 Slugde	50
6.3.1 Equipos y Materiales.....	50
6.3.2 Procedimiento	50
6.4 Rompimiento de emulsión	50
6.4.1 Equipos y materiales	51
6.4.2 Procedimiento	51

6.5 Olimetría	52
6.5.1 Equipos y materiales	52
6.5.2 Procedimiento	52
6.6 Compatibilidad.....	52
6.6.1 Equipos y materiales	53
6.6.2 Procedimiento	53
7. Resultados	54
7.1 Mojabilidad Visual.....	54
7.1.1 Goma Guar (GG)	54
7.1.2 Goma Xantana (XG)	57
7.2 Detergencia	59
7.2.1 Goma Guar (GG) y Goma Xantana (XG).....	59
7.3 Slugde	64
7.3.1 Goma Xantana (XG) y Goma Guar (GG).....	64
7.4 Rompimiento de emulsión	68
7.4.1 Goma Guar (GG)	68
7.4.2 Goma Xantana (XG)	72
7.5 Olimetría	76
7.5.1 Variaciones de la viscosidad en el tiempo	79
7.6 Compatibilidad.....	82
7.6.1 Goma Guar (GG)	82
7.6.1.1 Goma Guar (GG) 5000 ppm	83

7.6.1.2 Goma Guar (GG) 2500 ppm	84
7.6.1.3 Goma Guar (GG) 500 ppm	85
7.6.2 Goma Xantana (XG)	86
7.6.2.1 Goma Xantana (XG) 5000 ppm.....	87
7.6.2.2 Goma Xantana (XG) 2500 ppm.....	88
7.6.2.3 Goma Xantana (XG) 500 ppm.....	89
8. Conclusiones.....	90
9. Recomendaciones	91
10. Referencias bibliográficas.....	92

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Comparación de los polímeros seleccionados</i>	24
Tabla 2. <i>Resultados de porcentaje de humedad de los polímeros</i>	33
Tabla 3. <i>Relación °API con densidad específica de los petróleos crudos</i>	35
Tabla 4. <i>Resultados de Gravedad API y BSW</i>	39
Tabla 5. <i>Resultados Viscosidad Dinámica</i>	40
Tabla 6. <i>Análisis fisicoquímicos del agua de formación</i>	41
Tabla 7. <i>Composición de la salmuera sintética</i>	41
Tabla 8. <i>Parámetros de Agua Destilada</i>	42
Tabla 9. <i>Parámetros de Salmuera Sintética</i>	43
Tabla 10. <i>Resultados de mojabilidad visual Goma Guar (GG)</i>	55
Tabla 11. <i>Resultados de mojabilidad visual Goma Xantana (XG)</i>	57
Tabla 12. <i>Resultados de detergencia Goma Xantana (XG) y Goma Guar (GG)</i>	60
Tabla 13. <i>Resultados de Slugde de la Goma Xantana (XG) y Goma Guar (GG)</i>	64
Tabla 14. <i>Prueba de rompimiento de emulsiones Goma Guar (GG) 5000</i>	69
Tabla 15. <i>Prueba de rompimiento de emulsiones Goma Guar (GG) 2500</i>	70
Tabla 16. <i>Prueba de rompimiento de emulsiones Goma Guar (GG) 500</i>	71
Tabla 17. <i>Prueba de rompimiento de emulsiones Goma Xantana (XG) 5000 ppm</i>	73
Tabla 18. <i>Prueba de rompimiento de emulsiones Goma Xantana (XG) 2500</i>	74
Tabla 19. <i>Prueba de rompimiento de emulsiones Goma Xantana (XG) 500 ppm</i>	75
Tabla 20. <i>Variaciones de la viscosidad en el tiempo Goma Xantana (XG)</i>	80

Tabla 21. <i>Variaciones de la viscosidad en el tiempo Goma Guar (GG).</i>	81
Tabla 22. <i>Prueba de compatibilidad Goma Guar (GG) 5000 ppm</i>	83
Tabla 23. <i>Prueba de compatibilidad Goma Guar (GG) 2500 ppm.</i>	84
Tabla 24. <i>Prueba de compatibilidad Goma Guar (GG) 500 ppm.</i>	85
Tabla 25. <i>Prueba de compatibilidad Goma Xantana (XG) 5000 ppm.</i>	87
Tabla 26. <i>Prueba de compatibilidad Goma Xantana (XG) 2500 ppm.</i>	88
Tabla 27. <i>Prueba de compatibilidad Goma Xantana (XG) 500 ppm.</i>	89

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Clasificación de los polisacáridos e hidrocoloides.</i>	21
Figura 2. <i>Diseño Experimental de pruebas de interacción Fluido- Fluido.</i>	28
Figura 3. <i>Espectro infrarrojo IR Goma Guar (GG).</i>	30
Figura 4. <i>Espectro infrarrojo IR Goma Xantana (XG).</i>	32
Figura 5. <i>Porcentaje de Agua y Sedimentos (BSW).</i>	37
Figura 6. <i>Viscosímetro Brookfield.</i>	38
Figura 7. <i>Viscosímetro Kohler.</i>	39
Figura 8. <i>Soluciones madres de 5000 ppm de Goma Guar (GG) y Goma Xantana (XG).</i>	45
Figura 9. <i>Soluciones diluidas de Goma Xantana (XG).</i>	46
Figura 10. <i>Soluciones diluidas de Goma Guar (GG).</i>	47
Figura 11. <i>Prueba de mojabilidad Visual Goma Guar (GG) 5000 ppm.</i>	55
Figura 12. <i>Prueba de mojabilidad Visual Goma Guar (GG) 2500 ppm.</i>	56
Figura 13. <i>Prueba de mojabilidad Visual Goma Guar (GG) 500 ppm.</i>	56
Figura 14. <i>Prueba de mojabilidad Visual Goma Xantana (XG) 500 ppm.</i>	58
Figura 15. <i>Prueba de mojabilidad Visual Goma Xantana (XG) 2500 ppm.</i>	58
Figura 16. <i>Prueba de mojabilidad Visual Goma Xantana (XG) 500 ppm.</i>	59
Figura 17. <i>Resultados de Prueba detergencia Goma Guar (GG) 5000 ppm.</i>	61
Figura 18. <i>Resultados de Prueba detergencia Goma Guar (GG) 2500 ppm.</i>	61
Figura 19. <i>Resultados de Prueba detergencia Goma Guar (GG) 500 ppm.</i>	62
Figura 20. <i>Resultados de Prueba detergencia Goma Xantana (XG) 5000 ppm.</i>	62

Figura 21. <i>Resultados de Prueba detergencia Goma Xantana (XG) 2500 ppm.</i>	63
Figura 22. <i>Resultados de Prueba detergencia Goma Xantana (XG) 500 ppm.</i>	63
Figura 23. <i>Resultados de Prueba de slugde Goma Guar (GG) 5000 ppm.</i>	65
Figura 24. <i>Resultados de Prueba de slugde Goma Guar (GG) 2500 ppm.</i>	65
Figura 25. <i>Resultados de Prueba de slugde Goma Guar (GG) 500 ppm.</i>	66
Figura 26. <i>Resultados de Prueba de slugde Goma Xantana (XG) 5000 ppm.</i>	66
Figura 27. <i>Resultados de Prueba de slugde Goma Xantana (XG) 2500 ppm.</i>	67
Figura 28. <i>Resultados de Prueba de slugde Goma Xantana (XG) 500 ppm.</i>	67
Figura 29. <i>Prueba de olímetria Goma Xantana.</i>	77
Figura 30. <i>Prueba de olímetria Goma Guar.</i>	78

Glosario

Adsorción de polímeros: fenómeno en el cual los polímeros se adhieren a las superficies de los poros de una roca, modificando su permeabilidad.

Agente espesante: sustancia que aumenta la viscosidad de una solución sin alterar significativamente sus otras propiedades.

Cizallamiento: tipo de esfuerzo mecánico que se aplica sobre un material, causando deformación.

Condiciones controladas de laboratorio: parámetros de temperatura utilizados en experimentos para garantizar resultados reproducibles.

Decantación: proceso de separación de mezclas en el cual un componente sólido o líquido, de mayor densidad, se deposita en el fondo de un recipiente, permitiendo la extracción del componente superior

Dispersión del polímero: distribución uniforme de un polímero dentro de una solución.

Emulsionantes: compuesto que facilitan la formación y estabilidad de emulsiones, permitiendo la mezcla de sustancias no miscibles, como agua y aceite.

Geles poliméricos: proceso en el cual un polvo se transforma en un líquido y pasa a gel mediante la formación de una red estructural interna.

Higroscópico: propiedad de un material que le permite absorber y retener humedad del ambiente.

Interacción fluido-fluido: ocurre cuando dos fluidos se mezclan, dando lugar a cambios en sus propiedades químicas y físicas.

Agua de formación sintética: solución acuosa con sales disueltas, formulada para simular las propiedades de aguas salinas naturales en aplicaciones industriales.

Resumen

Título: Evaluación de pruebas complementarias a la norma API RP 63 para caracterizar soluciones poliméricas utilizadas en pozos petroleros.

Autor: María Fernanda Cobos Espitia, Nayarith Vanessa Olmedo Castilla.

Palabras Clave: Goma Xantana, Goma Guar, Interacción fluido-fluido, geles, polímeros.

Descripción: En la industria del petróleo y gas, los biopolímeros como la Goma Xantana (XG) y la Goma Guar (GG) desarrollan un papel clave para su aplicación en procesos de recuperación mejorada de petróleo (EOR). Por lo tanto, su origen natural las convierte en una alternativa sostenible frente a los polímeros sintéticos, reduciendo el impacto ambiental.

Las pruebas experimentales incluyeron análisis de mojabilidad visual, detergencia, compatibilidad, rompimiento de emulsiones, formación de sludge y olimetría. Estas se llevaron a cabo a tres concentraciones (5000 ppm, 2500 ppm y 500 ppm) para identificar valores críticos e intermedios para la selección y evaluación de los geles poliméricos. La preparación de las soluciones poliméricas se realizó siguiendo la norma API RP 63:1990 complementada con un conjunto de pruebas adicionales tomadas de la API RP 42:1990, protocolos estandarizados y técnicos del laboratorio, con el fin de obtener una evaluación más integral del comportamiento de los polímeros.

Los resultados demostraron que la respuesta de cada polímero varía según la concentración evaluada, siendo la Goma Guar (GG) la que mostró un mejor rendimiento a bajas concentraciones a diferencia de la Goma Xantana (GX). Estas diferencias permitieron establecer una concentración óptima de uso y una mejor selección del polímero de acuerdo con el yacimiento.

El principal aporte de esta investigación radica en la propuesta de un protocolo experimental complementario que puede ser implementado en campo o laboratorio para mejorar la toma de decisiones en la selección de soluciones poliméricas.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de fisicoquímica. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Ingeniería de Petróleos. Director: Hernando Buendía Lombana. Msc. Administración de Empresas. Codirector: Raúl Andrés Martínez López. Msc. Ingeniería de hidrocarburos.

Abstract

Title: Evaluation of Complementary Tests to the API RP 63:1990 Standard for Characterizing Polymeric Solutions Used in Oil Wells.

Author(s): María Fernanda Cobos Espitia, Nayarith Vanessa Olmedo Castilla.

Key Words: Xanthan gum, Guar gum, Fluid-fluid interaction, Gels, Polymers.

Description: In the oil and gas industry, biopolymers such as Xanthan Gum (XG) and Guar Gum (GG) play a key role in enhanced oil recovery (EOR) processes. Their natural origin makes them a sustainable alternative to synthetic polymers, reducing environmental impact.

The experimental tests included visual wettability analysis, detergency, compatibility, emulsion breaking, sludge formation, and oilmetry. These were conducted at three concentrations (5000 ppm, 2500 ppm, and 500 ppm) to identify critical and intermediate values for the selection and evaluation of polymer gels. The preparation of the polymer solutions followed the API RP 63:1990 standard, complemented by a set of additional tests from API RP 42:1990, as well as standardized and technical laboratory protocols, in order to achieve a more comprehensive assessment of polymer behavior.

The results showed that each polymer's response varied depending on the evaluated concentration, with Guar Gum (GG) performing better at lower concentrations compared to Xanthan Gum (XG). These differences made it possible to establish an optimal concentration for use and better polymer selection based on the reservoir.

The main contribution of this research lies in the proposal of a complementary experimental protocol that can be implemented in the field or laboratory to support improved decision-making in the selection of polymer solutions.

* Degree Work.

** Faculty of chemical and physical Engineering. School of Petroleum Engineering. Director: Hernando Buendia Lombana. Msc. Business Administration. Codirector: Raúl Andrés Martínez López. Msc. Hydrocarbon Engineerin.

Introducción

En la industria del petróleo y gas, los polímeros se utilizan principalmente en aplicaciones de recuperación mejorada de petróleo (EOR), donde se inyectan en el yacimiento para aumentar la viscosidad del agua de inyección y mejorar el desplazamiento del crudo hacia los pozos productores y como uso común, en fluidos de terminación y perforación. Se ha demostrado que es eficiente para proporcionar control de la viscosidad y reducir la pérdida de fluido, mejorando así la estabilidad del pozo y la eficiencia en la perforación (Akpan et al., 2020; Hernán et al., 2022). Irama J. Fernández (2019), Luis (2008) y Sileoni et al. (2015), definen a un polímero como una macromolécula formada por la repetición de unidades monoméricas enlazadas por reacciones químicas, conocidas como enlaces covalentes. Estas cadenas pueden ser lineales, ramificadas o reticuladas (Irama J. Fernández, 2019; Sileoni et al., 2015). Los polímeros pueden ser de origen natural, como la celulosa y las proteínas o sintéticos como las poliacrilamidas (Akpan et al., 2020; Sileoni et al., 2015).

Las pruebas establecidas en la norma API RP 63:1990 permiten una caracterización básica de soluciones poliméricas. Sin embargo, su alcance resulta limitado frente a las condiciones reales de los yacimientos. Por esta razón, la presente investigación propone complementar dichas pruebas con un conjunto de ensayos adicionales que simulan la interacción fluido-fluido, evaluando propiedades como la mojabilidad, detergencia, rompimiento de emulsiones, sludge, compatibilidad y variación de viscosidad en el tiempo.

La eficacia de la aplicación de los polímeros no se condiciona solo a las pruebas descritas en la norma API RP 63:1990 sino que el éxito de estas soluciones poliméricas en el futuro depende

de estudios en laboratorios para encontrar un desarrollo efectivo de un sistema polimérico adecuado, con el propósito de que sea rentable y respetuoso con el medio ambiente y produzca un menor impacto ambiental en la sociedad (Akpan et al., 2020; Cuenca y Córdor, 2016; Muhammed et al., 2020).

El valor de estas pruebas complementarias radica en su capacidad de predecir el comportamiento del polímero en contacto directo con crudo y agua sintética de formación bajo condiciones controladas de laboratorio, permitiendo seleccionar no solo el tipo de polímero más adecuado, sino también su concentración óptima para maximizar su efectividad en campo. A pesar de que algunos laboratorios incluyen ensayos similares. Este trabajo aporta una metodología experimental que combina estos análisis en tres concentraciones (5000, 2500 y 500 ppm), evidenciando el rendimiento de los biopolímeros en diferentes escenarios de operación.

Por lo tanto, el alcance de la investigación se limita a la evaluación de soluciones poliméricas en el contexto de métodos EOR. Esto permitiría ofrecer un estudio experimental útil para la industria petrolera nacional en la toma de decisiones relacionadas con la selección de polímeros.

Objetivos

Evaluar propiedades adicionales a las recomendadas en la NORMA API RP 63:1990 para soluciones poliméricas utilizadas en pozos petroleros.

- ✓ Realizar vigilancia tecnológica para la selección de los polímeros y sus propiedades.
- ✓ Ejecutar un diseño experimental para las pruebas de interacción fluido-fluido que se desarrollarán, evaluando las propiedades relevantes.
- ✓ Analizar los resultados del diseño experimental determinando las propiedades más relevantes.

1. Antecedentes investigativos

La industria de Oil & Gas enfrenta actualmente desafíos significativos en su búsqueda por implementar tecnologías sostenibles y amigables con el medio ambiente y simultáneamente optimizar la extracción de hidrocarburos. Esta necesidad de optimizar la recuperación de hidrocarburos ha motivado el uso de soluciones poliméricas en diferentes etapas operativas. Tradicionalmente, la caracterización de estos polímeros se ha realizado con base en la norma API RP 63:1990, la cual establece pruebas estándar para evaluar el comportamiento en condiciones controladas. Sin embargo, dicha norma no contempla ciertos aspectos clave de desempeño en campo real, como la compatibilidad con el crudo, el comportamiento frente a emulsiones, la formación de residuos o sludge, entre otras.

Investigaciones recientes han demostrado que las pruebas complementarias, como las de mojabilidad, detergencia, rompimiento de emulsión, compatibilidad y formación de sludge, son esenciales para evaluar con mayor precisión el comportamiento de los polímeros bajo condiciones operativas reales (Akpan et al., 2020; Cuenca y Córdor, 2016).

En el trabajo de Cuenca y Córdor (2016) incluyeron pruebas de compatibilidad y estabilidad térmica como parte de su análisis de selección de polímeros, demostrando que algunos polímeros no eran adecuados en entornos salinos o con crudos pesados. Del mismo modo, estudios en Medio Oriente han adoptado metodologías extendidas para garantizar la estabilidad térmica y salina de biopolímeros como la Goma Xantana (Muhammed et al., 2020).

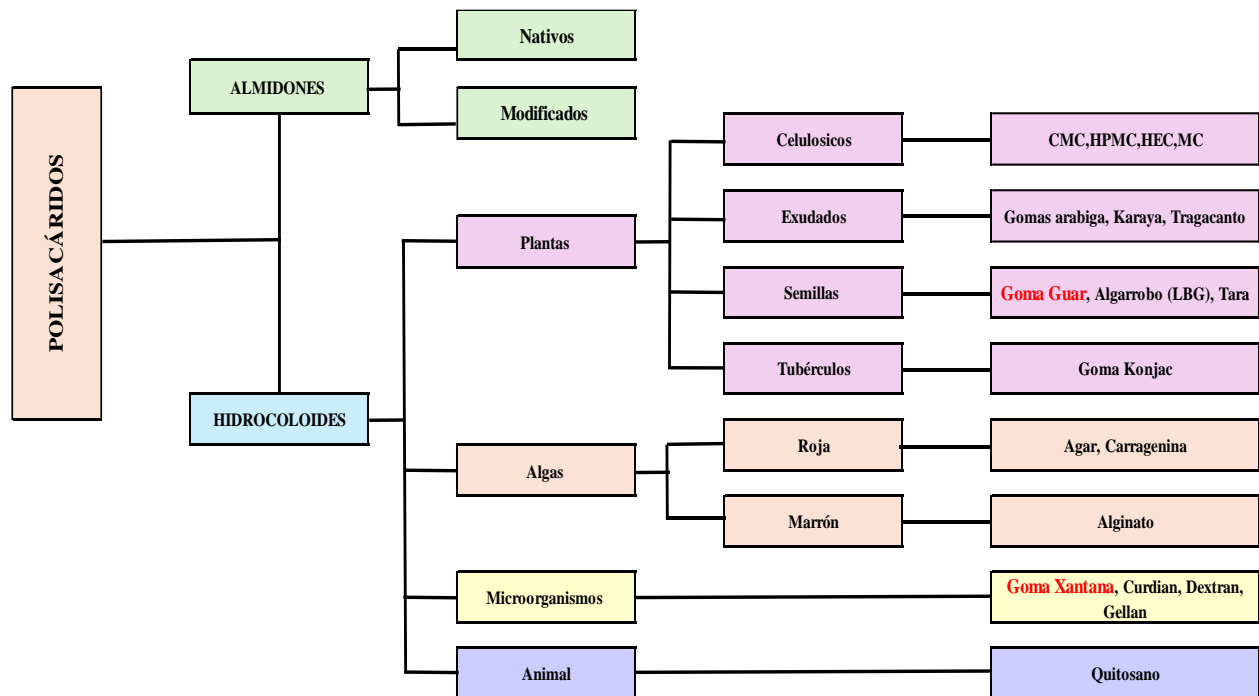
Dado este contexto, el presente trabajo se enfocó en complementar las pruebas documentadas en la norma API RP 63 con un conjunto de ensayos adicionales que permiten evaluar el desempeño integral de las soluciones poliméricas. Así mismo, se busca seleccionar polímeros no solo por sus propiedades físicas, sino también por su comportamiento frente a condiciones operativas reales, asegurando mayor eficiencia, estabilidad y compatibilidad en su aplicación.

2. Generalidades de los Geles Poliméricos de estudio

Los hidrocoloides tienen diferentes clasificaciones, según la forma estructural de la cadena (lineales o ramificados), la unidad monomérica que lo conforma como: triheteroglucanos, monoglucanos y diheteroglucanos, entre otros. También pueden clasificarse según la carga eléctrica (neutros y/o aniónicos) o de acuerdo con su origen, que pueden ser vegetal como las plantas, algas, microorganismos y animales (Ramos, 2020; Roldan, 2015).

Figura 1.

Clasificación de los polisacáridos e hidrocoloides.



Nota. Se presenta un esquema que clasifica los polisacáridos, destacando que tanto las GX como las GG son hidrocoloides, aunque pertenecen a familias distintas, siendo las GX derivadas de microorganismos y las GG provenientes de plantas. Tomado de Estudio del comportamiento reológico de la goma de celulosa, Goma Xantana (XG) y Goma Guar (GG) y sus interacciones en mezclas binarias y ternarias en disoluciones acuosas a diferentes condiciones del medio, Universidad Nacional de Colombia, 2020.

2.1 Goma Xantana (XG)

2.1.1 Definición de la Goma Xantana (XG)

Polímero que se disuelve en agua, que ha encontrado gran aceptación en el campo petrolero. La Goma Xantana (XG) es un carbohidrato de alto peso molecular (José Carmona, 2015). Se trata de un polisacárido producido mediante un proceso de fermentación bacteriana. A nivel industrial su obtención se realiza mediante procesos de fermentación en múltiples etapas dentro de tanques con una adecuada oxigenación, donde se incorpora glucosa y otros oligoelementos. Posteriormente, La Goma Xantana (XG) es separada por medio de procesos de precipitación con alcohol y posterior secado y molienda (Sworn, 2009; José Carmona, 2015). La Goma Xantana (XG) comercial se obtiene a partir de cepas bacterianas mutantes elegidas para rendimiento (cantidad de producto producido durante la fermentación) y funcionalidad polimérica (infectividad y alta viscosidad no newtoniana) (Littmann, 1988).

La Goma Xantana (XG) es un polisacárido con enlaces de hidrógeno intramoleculares únicos mediante cadenas laterales. La estructura, contiene cadenas laterales que mantienen la molécula en una estructura helicoidal rígida (Sileoni et al., 2015). Esta estructura compleja también

mejora la estabilidad térmica. Alguna pérdida de cizalladura permanente de la viscosidad podría ocurrir por poliacrilamida, pero no para polisacárido en el pozo (Nieto, 2016). La sensibilidad a la sal también se reduce en gran medida a pesar de que la molécula es de carácter iónico (Littmann, 1988).

A diferencia de muchas soluciones de polisacáridos, cuya viscosidad disminuye con el aumento de la temperatura, las soluciones de Goma Xantana (XG) muestran solo una ligera disminución de la viscosidad (Nieto, 2016). Esta y otras características lo convierten en un material preferido en aplicaciones EOR a pesar de su origen inusual y su costo bastante alto (Littmann, 1988). La Goma Xantana (XG), ofrecen la mejor relación rendimiento/precio de los muchos tipos de polímeros que se han propuesto para las operaciones de EOR (Littmann, 1988).

2.2 Goma Guar (GG)

2.2.1 Definición de la Goma Guar (GG)

La Goma Guar (GG) es un polisacárido compuesto por una cadena recta de unidades de manosa ligada a los lados con unidades sencillas de galactosa a razón de 2:1 (manosa: galactosa) de elevado peso molecular varía entre 1 y 2 MDa, por lo tanto, se destaca por su notable viscosidad, resultado de su considerable volumen hidrodinámico en solución y las características de sus interacciones intermoleculares (Hasan & Abdel-Raouf, 2018; Ramos, 2020). Cuando se calientan sus soluciones, se observa un efecto de reducción de temperatura, posiblemente por la pérdida de agua de hidratación entorno a las moléculas de polímero. Las soluciones de Goma Guar (GG) son muy viscosas, estables en un rango de pH de 4.5 a 10 (Hasan & Abdel-Raouf, 2018). Aunque es

insoluble en disolventes orgánicos, se disuelve fácilmente en tanto en agua fría como caliente, además de ser resistente a aceites, productos químicos y grasas (Hasan & Abdel-Raouf, 2018).

Presenta una notable capacidad para formar geles y películas, junto con una excelente retención de agua, gracias a sus numerosos grupos hidroxilo que permiten la formación de enlaces de hidrógeno (Hasan & Abdel-Raouf, 2018). Asimismo, la Goma Guar (GG) tiene una alta capacidad de modificación química y reticular, siendo biocompatible, biodegradable y no tóxica (Hasan & Abdel-Raouf, 2018).

2.3 Propiedades y comparación de los polímeros seleccionados

La selección de los polímeros utilizados en este trabajo se fundamentó en sus propiedades fisicoquímicas, desempeño bajo condiciones de salinidad y temperatura, disponibilidad comercial, su aplicabilidad en procesos de recuperación mejorada de petróleo (EOR) y origen natural. Por lo tanto, Se optó por el uso de Goma Xantana (XG) y Goma Guar (GG).

La siguiente tabla compara sus características frente a un polímero sintético de referencia (HPAM), que es comúnmente utilizado en EOR.

Tabla 1.

Comparación de los polímeros seleccionados.

PROPIEDAD	GOMA XANTANA (XG)	GOMA GUAR (GG)	HPAM
Origen	Microbiano (<i>Xanthomonas campestris</i>)	Vegetal (<i>Cyamopsis tetragonoloba</i>)	Sintético (poliacrilamida parcialmente hidrolizada)

Solubilidad en agua	Alta	Alta	Alta
Estabilidad térmica	Alta (hasta 90 °C)	Moderada (hasta 70 °C)	Limitada (50–70 °C)
Tolerancia a salinidad	Alta (Insensible a sales monovalentes)	Moderada (Afectada por iones divalentes)	Limitada (Precipita en alta salinidad)
Viscosidad	Muy alta	Alta	Alta
Biodegradabilidad	Alta	Alta	Baja
Aplicaciones industriales	EOR, perforación, alimentos	Fracturamiento hidráulico, alimentos, cosmética	Principalmente EOR

Nota. Adaptado de Akpan et al. (2020); Muhammed et al. (2020); Ramos (2020); Hasan & Abdel-Raouf (2018); Littmann (1988).

3. Propiedades Reológicas

Son esenciales para comprender su comportamiento durante el procesamiento. Dos aspectos clave son el comportamiento viscoelástico y el envejecimiento, que influyen en la consistencia del producto final (José Carmona, 2015; Torres, 2000). Los geles poliméricos utilizados en la industria del petróleo presentan un comportamiento reológico no newtoniano, lo que significa que su viscosidad cambia con la velocidad de cizallamiento. Este comportamiento, conocido como pseudoplasticidad, permite que los fluidos sean más viscosos en reposo (suspendiendo sólidos) y menos viscosos en movimiento (facilitando el bombeo), lo cual es fundamental en procesos como la inyección de fluidos en EOR (Torres, 2000). Aunque existen diversos tipos de fluidos, el estudio se enfoca en geles reofluidizantes, cuya respuesta reológica

fue clave para interpretar los resultados obtenidos en las pruebas complementarias realizadas a distintas concentraciones de polímero (Torres, 2000).

5. Metodología

La elaboración de las soluciones poliméricas se llevó a cabo siguiendo los lineamientos señalados en el documento técnico *NORMA API RP 63:1990 Recomendad Practices for Evaluation of Polymers Used in Enhanced Oil Recovery Operations*. Este documento proporcionó las bases metodológicas y técnicas necesarias para garantizar la calidad y eficacia de las soluciones desarrolladas.

5.1 Norma API RP 63:1990

La norma API RP 63:1990 es una recomendación práctica emitida por el American Petroleum Institute (API) que establece lineamientos para la selección, uso y evaluación de polímeros. Esta norma proporciona directrices sobre las características técnicas que deben cumplir los fluidos y algunas pruebas bases.

De acuerdo con la Norma API RP 63: 1990, los polímeros solubles en agua están diseñados para ser agentes de control de la movilidad, por lo que se encuentran disponibles en cantidades comerciales dos tipos principales: poliacrilamidas y polisacáridos (Recommended Practices for Evaluation of Polymers Used in Enhanced Oil Recovery Operations, 1990) De la misma forma, se estipulan soluciones de salmuera estándar para permitir a los usuarios evaluar el rendimiento de los polímeros en condiciones controladas de laboratorio (Recommended Practices for Evaluation of Polymers Used in Enhanced Oil Recovery Operations, 1990).

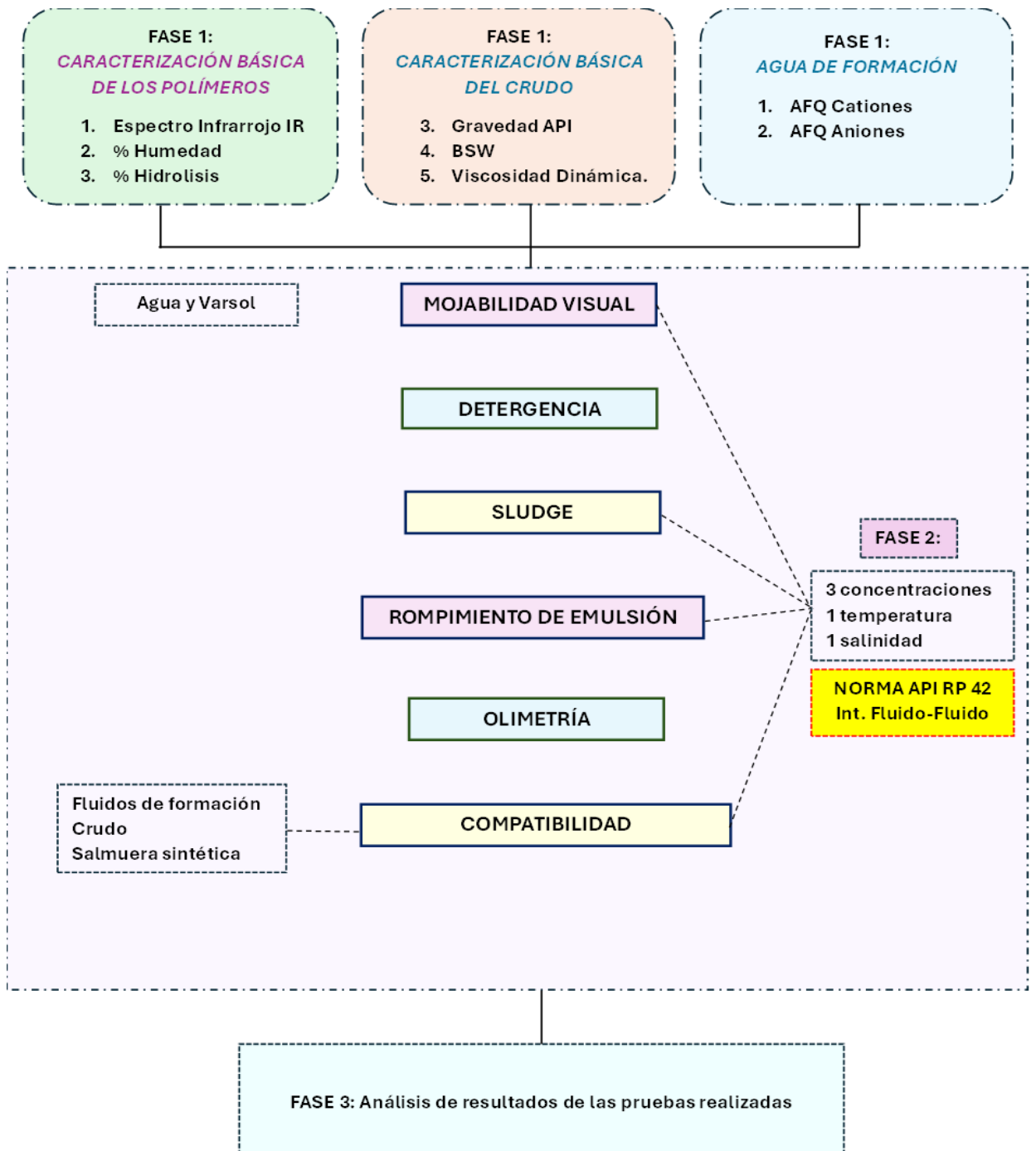
Por otro lado, la norma API RP 63:1990 establece una base sólida para evaluar el desempeño de soluciones poliméricas en operaciones de recobro mejorado, su alcance se limita a pruebas como estabilidad térmica, resistencia al corte, compatibilidad de aditivos, interacción en medios porosos, filtrabilidad y retención de polímeros, las cuales constituyen una base técnica fundamental para la evaluación de soluciones poliméricas bajo condiciones controladas de laboratorio. Por este motivo, el presente trabajo incorporó un conjunto de pruebas complementarias obtenidas de la norma API RP 42:1990, así como de manuales de laboratorio y literatura técnica de evaluación de polímeros, debido a que estos ensayos pueden resultar insuficientes frente a la complejidad de ciertos yacimientos, por lo que se propone complementar estas pruebas para una caracterización más completa del comportamiento de los polímeros.

5.2 Diseño Experimental

Para el desarrollo de las pruebas de interacción fluido-fluido en laboratorio, se seleccionaron los procedimientos basados en referencias bibliográficas relevantes, incluyendo la Norma API RP 42 como guía principal. Luego de la revisión previa de la literatura, se determinó implementar tres concentraciones distintas de cada una de las gomas estudiadas (Xantana y Guar). Estas pruebas se llevaron a cabo bajo condiciones controladas de temperatura y salinidad. En la figura 7 se puede observar un resumen esquemático del diseño experimental para el desarrollo de las diferentes pruebas implementadas.

Figura 2.

Diseño Experimental de pruebas de interacción Fluido- Fluido.



Nota. Realizada por autores.

5.2.1 Fase 1: Caracterización básica

5.2.1.1 Caracterización básica de los polímeros

La Goma Xantana (XG) y la Goma Guar (GG) son dos biopolímeros utilizados en la industria del petróleo y gas, debido a que se destacan por su capacidad para modificar la reología de los fluidos, actuando como viscosificadores, emulsionantes y estabilizadores.

5.2.1.1.1 Espectro infrarrojo IR

La espectroscopía infrarroja (IR) es una técnica analítica utilizada para examinar la interacción entre la radiación infrarroja con los materiales, permitiendo la identificación de estructuras moleculares mediante la absorción de energía en frecuencias específicas. La absorción ocurre cuando la radiación infrarroja coincide con las vibraciones de los enlaces atómicos, generando un espectro característico de cada sustancia (Pavia, 2015). El espectro infrarrojo se representa con el número de onda (cm^{-1}) en el eje x y la transmitancia o absorbancia en el eje y. Se divide en tres regiones: infrarrojo cercano ($10,000\text{-}4,000 \text{ cm}^{-1}$), medio ($4,000\text{-}200 \text{ cm}^{-1}$) y lejano ($200\text{-}10 \text{ cm}^{-1}$) (Robert M. Silverstein et al., 2014).

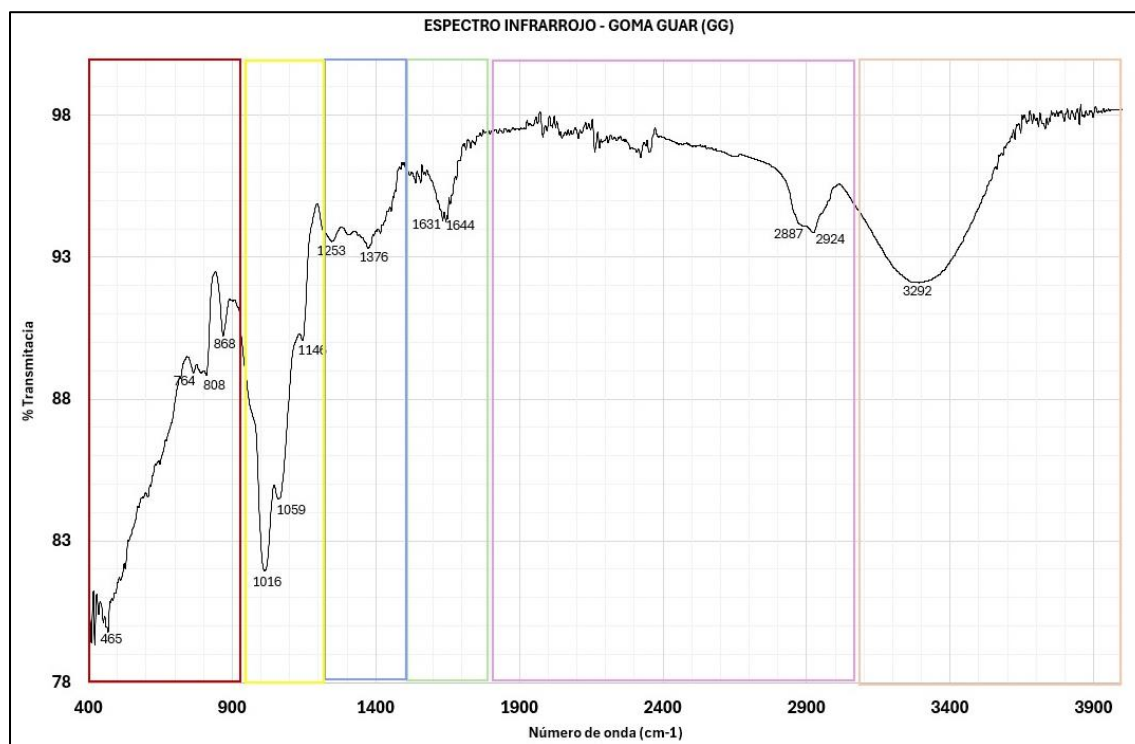
5.2.1.1.1.1 Espectro infrarrojo IR Goma Guar (GG)

El espectro infrarrojo de la Goma Guar (GG) muestra varias bandas características que confirman su estructura de polisacárido. En la región de los 3292 cm^{-1} (marcada en naranja), se observa una banda ancha atribuida a los enlaces O-H, típicos de los grupos hidroxilo en polisacáridos. En la zona de $2924\text{-}2887 \text{ cm}^{-1}$ (morado), aparecen bandas correspondientes a las vibraciones de los enlaces C-H de los grupos metilo y metileno. Las señales en 1644 y 1631 cm^{-1} (azul) se pueden asociar a las vibraciones de estiramiento de grupos carbonilo (C=O) y carboxilatos, los cuales pueden estar presentes en la Goma Guar (GG). Entre 1376 y 1253 cm^{-1}

(verde), se identifican bandas que corresponden a las vibraciones de los enlaces C-O y C-O-C, característicos de los polisacáridos. La señal intensa en 1016 cm^{-1} (amarillo) está asociada a la vibración de los enlaces C-O-C en la estructura de los azúcares. Finalmente, las señales en la región de $868\text{-}465\text{ cm}^{-1}$ (rojo) corresponden a deformaciones fuera del plano de los enlaces C-H y a la estructura del esqueleto del polisacárido. Estos datos confirman la composición química de la Goma Guar (GG) y su similitud con otros polisacáridos, como la Goma Xantana (XG).

Figura 3.

Espectro infrarrojo IR Goma Guar (GG).



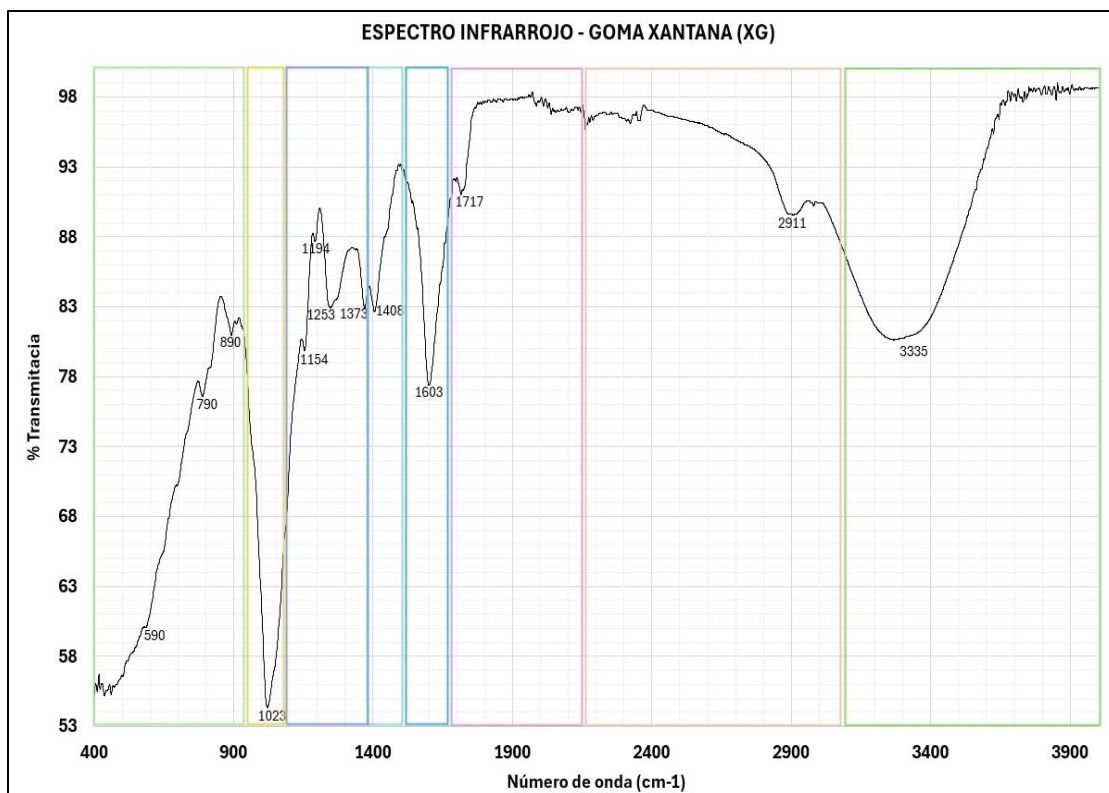
Nota. El espectro infrarrojo de la Goma Guar (GG) muestra bandas en 3292 cm^{-1} , 2924 cm^{-1} y 1644 cm^{-1} , asociadas a O—H, C—H y C=O, confirmando su estructura polisacárido. Realizada por Autores.

5.2.1.1.1.2 Espectro infrarrojo IR Goma Xantana (XG)

El espectro infrarrojo de la Goma Xantana (XG) muestra varias bandas características que permiten identificar sus grupos funcionales. En la región de los 3335 cm^{-1} (marcada en verde), se observa una banda ancha atribuida a los enlaces O-H, típicos de los polisacáridos debido a la presencia de grupos hidroxilo. En la región de los 2911 cm^{-1} (naranja), se identifica una banda correspondiente a los enlaces C-H de los grupos metilo y metileno. La banda en 1717 cm^{-1} (rosa) está relacionada con la vibración de estiramiento C=O, característica de los grupos carbonilo presentes en los ácidos carboxílicos y ésteres. La señal en 1603 cm^{-1} (azul claro) puede atribuirse a las vibraciones de los enlaces C=C o a los grupos carboxilato. Las bandas entre 1408 y 1154 cm^{-1} (azul) corresponden a las vibraciones de estiramiento de los enlaces C-O y C-O-C, comunes en los polisacáridos. Finalmente, la banda intensa en 1023 cm^{-1} (amarillo) está asociada a las vibraciones de los enlaces C-O-C en los anillos de los azúcares. En la región de menor número de onda, las señales entre 890 y 590 cm^{-1} (verde claro) corresponden a deformaciones fuera del plano de los enlaces C-H y a la estructura del esqueleto del polisacárido. Estos datos confirman la estructura de la Goma Xantana (XG) como un polisacárido con grupos funcionales característicos de su naturaleza.

Figura 4.

Espectro infrarrojo IR Goma Xantana (XG).



Nota. El espectro infrarrojo de la Goma Xantana (XG) muestra bandas en 3335 cm⁻¹, 2911 cm⁻¹ y 1603 cm⁻¹, correspondientes a O—H, C—H y C=O, respectivamente, confirmando su estructura polisacárido. Realizada por autores.

5.2.1.1.2 Porcentaje de Humedad

Se refiere a la cantidad de agua presente en el material en relación con su peso total. Este contenido hídrico es crucial para evaluar sus propiedades reológicas y funcionales, ya que la capacidad de absorción y retención de agua afecta directamente su comportamiento en soluciones, su capacidad de gelificación y su rendimiento como agentes espesantes o estabilizantes.

Para la determinación de esta propiedad, se utilizaron materiales y equipos de laboratorio como: Vidrio reloj, balanza, espátula, plancha de calentamiento y desecador.

El procedimiento inició con la limpieza, purificación y secado de cada uno de los equipos de trabajo. Posteriormente, se pesaron 1,5 gramos de cada polímero sólido en la balanza. Las muestras se colocaron en un horno a una temperatura de 100 °C durante 120 minutos (2 horas). Al finalizar este tiempo, las muestras se retiraron del horno y se dejaron enfriar en un desecador durante 30 minutos, teniendo en cuenta sus propiedades higroscópicas. Luego, se realizó nuevamente el pesaje del polímero deshidratado, y finalmente se utilizó la siguiente ecuación para calcular el porcentaje de humedad.

$$\% \text{Humedad} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{peso final}}{\text{Peso Inicial}} * 100 \quad [2]$$

Cabe destacar que, para garantizar la validez de los resultados, se realizó repetibilidad de la prueba.

Tabla 2.

Resultados de porcentaje de humedad de los polímeros.

Nombre	Medición	Peso (vidrio reloj) (g)	Peso (vidrio reloj + polímero) (g)	Peso (polímero) (g)	Peso Seco (vidrio reloj + polímero) (g)	Peso Seco (polímero) (g)	% de Humedad (%)	% de Humedad promedio (%)
Xantana	1	17,1699	18,6724	1,5025	18,5671	1,3972	7,0083	7,0844
Xantana	2	18,5194	20,0235	1,5041	18,5694	0,05	7,1604	
Guar	1	17,1935	18,6944	1,5009	18,5671	1,3736	8,4816	8,4574
Guar	2	17,1937	18,6961	1,5024	19,9158	2,7221	8,4332	

Nota. Se realizaron mediciones para cada polímero, obteniendo porcentajes promedio de humedad de 7.08% para la Goma Xantana (XG) y 8.46% para Goma Guar (GG). Sabiendo que, el máximo porcentaje de humedad de estas gomas son menor del 13%. Realizada por autores.

5.2.1.2 Caracterización básica del crudo

Se seleccionó un crudo representativo de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, región donde se han desarrollado proyectos piloto de inyección de polímeros como los implementados por Ecopetrol en los campos Yariguí-Cantagallo y Casabe con el propósito de evaluar y optimizar estrategias de recuperación mejorada de hidrocarburos. Estos proyectos demostraron incrementos en la producción y eficiencia en la recuperación de hidrocarburos, consolidando esta técnica como una alternativa viable para futuras aplicaciones en el país (Biopolímeros En et al., n.d.; Ecopetrol S.A, 2014).

5.2.1.1.1 Gravedad API

La determinación de la gravedad API se llevó a cabo según la norma ASTM D 1298-12b, utilizando el Método del Hidrómetro. Esta técnica mide la densidad del crudo en comparación con la del agua bajo las mismas condiciones de presión y temperatura. A partir de esta clasificación, es posible categorizar los crudos y sus derivados. Según esta metodología, el petróleo se clasifica en cuatro categorías principales: liviano, mediano, pesado y extrapesado (Rueda-Beauregard et al., n.d.). Esta clasificación se resume en la siguiente tabla:

Tabla 3.

Relación °API con densidad específica de los petróleos crudos.

Crudo	Escala API°	Densidad (g/cm³)
Ligero	30 - 40	0.87-0.83
Mediano	22-29.9	0.92-0.87
Pesado	10-21.9	1.00-0.92
Extrapesado	Menos de 10	>1.00

Nota. Clasificación de petróleos crudos según su escala API y densidad específica, categorizándolos en ligero, mediano, pesado y extrapesado. Tomado de Determinación de la gravedad API por los métodos directo e indirecto (picnometría). Journal of Basic Sciences.

Para llevar a cabo el ensayo, se utilizaron los siguientes instrumentos: una probeta graduada, un hidrómetro de vidrio graduado y un termómetro.

Primero, la muestra representativa de crudo se transfirió a una probeta graduada, evitando la formación de burbujas de aire y minimizando la evaporación de los componentes más volátiles. Una vez acumuladas burbujas en la superficie de la muestra, estas fueron eliminadas tocándolas con un papel de filtro limpio o un medio adecuado. Posteriormente, se procedió a la homogeneización de la muestra. Para ello, se introdujo un termómetro y se agitó la muestra (crudo) con una varilla agitadora para garantizar la uniformidad en la temperatura y densidad en toda la probeta.

En la etapa de medición, se introdujo el hidrómetro adecuado con el líquido, soltándolo en posición de equilibrio sin mojar el vástago por encima del nivel de flotación. Una vez que el hidrómetro se estabilizó flotando libremente, se registró la lectura de su escala. Inmediatamente después, se retiró el hidrómetro y se midió nuevamente la temperatura de la muestra con un

termómetro para registrar cualquier variación. Finalmente, las mediciones obtenidas se corrigieron utilizando tablas estándar para asegurar la exactitud de los resultados.

5.2.1.1.2 Porcentaje de Agua y Sedimentos (BSW).

La prueba de BSW fue realizada bajo la norma ASTM D 4007 – 02 por el Método de la centrífuga. El procedimiento para determinar la cantidad de agua y sedimentos (BSW) se llevó a cabo siguiendo los protocolos del Grupo de Investigación en Tomografía Computarizada para la Caracterización de Yacimientos (GIT). Para realizar esta determinación, se emplearon los siguientes equipos e insumos: una centrífuga marca Koehler, tubos zanahorias graduados, un baño de temperatura, un termómetro ASTM, Solvente, desemulsificante en caso de ser necesario y el formato F060 para registrar la caracterización del crudo.

El procedimiento comenzó con la preparación del equipo. Se encendió la centrífuga y se configuraron las condiciones de operación: temperatura de 140°F, velocidad de 1800 RPM y tiempo de 10 minutos. Paralelamente, se agitó vigorosamente el recipiente con la muestra de crudo para garantizar su homogeneidad. A continuación, se adicionó tolueno hasta completar el 50% de la capacidad de los tubos de centrífuga, y se llenaron con la muestra de crudo hasta alcanzar el volumen total. Los tubos se taparon y agitaron para asegurar una mezcla uniforme.

Posteriormente, los tubos se colocaron en un baño de temperatura durante 10 minutos, asegurando que la temperatura de la muestra no bajara de 135°F. Una vez retirados del baño, los tubos se invirtieron para garantizar la uniformidad de la mezcla y se ubicaron en posiciones opuestas dentro del plato de la centrífuga, previamente precalentada. La centrífuga se cerró y se inició el primer ciclo de centrifugado durante 10 minutos a 1800 RPM.

Tras el primer centrifugado, se registró el volumen combinado de agua y sedimentos depositados en el fondo de cada tubo. Luego, los tubos se calentaron nuevamente a $140^{\circ}\text{F} \pm 5^{\circ}\text{F}$, sin agitarlos, y se sometieron a un segundo ciclo de centrifugado durante 5 minutos.

Figura 5.

Porcentaje de Agua y Sedimentos (BSW).



Nota. Determinación del contenido de agua y sedimentos (BSW) en muestras de crudo mediante el método de centrifugación en tubo graduado, siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM D-4007. Fotografía María Cobos, Nayarith Olmedo, 2024.

5.2.1.1.3 Viscosidad Dinámica

La medición de la viscosidad dinámica se realizó con el equipo Brookfield (Viscosímetro rotacional), que determina la resistencia de un fluido al movimiento de un husillo giratorio. Este procedimiento permite calcular la viscosidad en función de la velocidad de cizallamiento.

Para llevar a cabo la medición, primero se ensambla el husillo giratorio y se coloca la solución en las camisas correspondientes. Luego, se ajusta la velocidad del equipo, considerando que su rango operativo es de 1 a 30,000 cP. Una vez que el fluido alcanza la estabilidad, se procede con la medición.

En este proceso, se utilizaron dos equipos: Brookfield, el cual se basa en la ley de Newton para fluidos viscosos de acuerdo con su principio de operación, determinando la viscosidad dinámica (η) a partir del torque necesario para mantener la rotación a una velocidad constante.

Figura 6.

Viscosímetro Brookfield.



Nota. Tomada de Viscosímetro original Brookfield

Koehler, mide la viscosidad a través del flujo de la muestra por un capilar, siguiendo el principio de los viscosímetros cinemáticos.

Figura 7.*Viscosímetro Kohler.*

Nota. Tomada de Baño de viscosidad cinemática KV4000 con temporizador digital integrado - Grupo Comsurlab.

5.2.1.1.4 Resultados de la caracterización básica del crudo

Se realizó la caracterización básica de una muestra representativa de crudo del Valle medio de magdalena. El objetivo fue determinar las principales propiedades físicas del crudo para evaluar su calidad y especificaciones:

Tabla 4.*Resultados de Gravedad API y BSW.*

Muestra	Gravedad API @60°F	BSW (%) v/v
Crudo	28,6	0.05

Nota. Realizado por autores.

El análisis del contenido de agua y sedimentos básicos (BSW) de la muestra de crudo de campo arrojó un resultado de 0,05% v/v. Dado que este valor se encuentra por debajo del límite máximo aceptable para procesos posteriores, no fue necesario someter la muestra a un proceso adicional de deshidratación para reducir aún más su contenido de agua y sedimentos. Para garantizar la calidad de los análisis, se decidió filtrar la muestra a través de una membrana de 0,45 micrómetros de tamaño de poro. Este proceso de filtración permitió remover cualquier partícula o impureza suspendida que pudiera estar presente en el crudo, evitando así posibles interferencias en los resultados de los demás ensayos.

La muestra de crudo de campo presenta una gravedad API de 28,6 a 60°F. De acuerdo con la clasificación API, este tipo de crudo se considera de gravedad media. La literatura científica de (Rueda-Beauregard et al., n.d.).

Tabla 5.

Resultados Viscosidad Dinámica.

Viscosidad Dinámica		
Temperatura	Velocidad	Viscosidad Dinámica
(°C)	(RPM)	(cP)
30	13	404,1
40	22	219,9
60	35	124,1

Nota. Realizado por autores.

5.2.1.2 Preparación de fluidos

5.2.1.2.1 Preparación de agua de formación sintética

La preparación del agua de formación sintética se efectuó mediante la incorporación de aniones y cationes específicos tomando como referencia un campo del Valle Medio del Magdalena. Adicionalmente, se requirió de instrumentos de laboratorios como: una balanza calibrada, vidrio reloj y un multiparámetro.

A continuación, se evidencian los resultados del análisis fisicoquímico del agua permitiendo identificar y medir la concentración de distintos cationes (Mg^{2+} , Na^+ , Fe^{2+} , K^+ , Ba^{2+} , Ca^{2+} , Sr^{2+}) y aniones (SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^-).

Tabla 6.

Análisis fisicoquímicos del agua de formación.

Muestra	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Fe^{2+}	Ba^{2+}	Sr^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-
Salmuera Sintética	2872	71	1533.2	181.8	0.489	41.055	16.77	288.22	1	8576

Nota. Aniones y cationes empleados para los análisis fisicoquímicos de la salmuera sintética. Tomada de la base de datos del software del Grupo de Investigación en Tomografía Computarizada Para Caracterización de Yacimiento (GIT).

Tabla 7.

Composición de la salmuera sintética.

ANIONES Y CATIONES DE AGUA SINTÉTICA		
NaCl	g/L	7,3007
KCl	g/L	0,1357
CaCl₂*2H₂O	g/L	5,624
MgCl₂*6H₂O	g/L	1,522

BaCl₂*2H₂O	g/L	0,073
SrCl₂*6H₂O	g/L	0,051

Nota. Composición iónica del agua sintética preparada para los ensayos, mostrando las concentraciones de sales inorgánicas en g/L y su equivalencia en ppm. Tomada de la base de datos del software del Grupo de Investigación en Tomografía Computarizada Para Caracterización de Yacimiento (GIT).

Como control de calidad, se realizó la verificación de los parámetros fundamentales como el pH, la conductividad, la resistividad, la salinidad y los sólidos disueltos totales (TDS), empleando un medidor multiparámetro de la marca HANNA INSTRUMENT, con el propósito de asegurar que cumplieran con las especificaciones requeridas. Esta medición se efectuó tanto en el agua destilada como en la salmuera sintética resultante, permitiendo así validar la correcta preparación de la solución.

Tabla 8.

Parámetros de Agua Destilada.

Parámetros		
Agua destilada		
pH		5,78
Temperatura	°C	26,5
Conductividad	us/cm	1,85
Resistividad	Ω*m	0.000185
TDS	mg/L	0,794
Salinidad	%	0.0

Nota. Caracterización fisicoquímica del agua destilada utilizada en los experimentos. Realizada por Autores.

Tabla 9.*Parámetros de Salmuera Sintética.*

Parámetros		
Salmuera		
pH		5,3
Temperatura	°C	27,9
Conductividad	us/cm	18,51
Resistividad	Ω *m	52,6
TDS	g/L	10,60
Salinidad	%	11,30

Nota. Caracterización fisicoquímica de la de Salmuera Sintética utilizada en los experimentos.

Realizada por Autores.

5.2.1.2.1.1 Preparación de soluciones

Las soluciones se desarrollaron siguiendo el paso a paso y recomendaciones presentadas en la norma API RP 63:1990 Cabe resaltar, que la Goma Xantana (XG) y la Goma Guar (GG) son productos secos.

5.2.1.2.1.2 Soluciones Madres

El procedimiento comenzó con la preparación de soluciones madre a una concentración de 5000 ppm. En primer lugar, se calculó y pesó la cantidad necesaria de polímero seco utilizando una balanza de precisión y considerando el porcentaje de humedad del material, ya que este factor influye al incorporarlo en la solución. Posteriormente, se calculó y midió la cantidad de salmuera sintética requerida por medio de una probeta graduada, luego, se restó el peso del polímero (Goma Xantana (2.69 g) y Goma Guar (2.73 g)) para la preparación de la solución madre.

Una vez obtenidos los pesos de los componentes, se colocó un Beaker sobre una plancha magnética con un agitador. Se vertió la salmuera sintética en el Beaker, generando un vórtice que alcanzara aproximadamente el 70% del volumen total. A continuación, se agregó el polímero de manera gradual y continua sobre el borde del vórtice para facilitar su incorporación. La mezcla se agitó durante una hora, tras lo cual se verificó la homogenización de la solución y la ausencia de aglomerados (conocidos como "ojos de pescado"). Finalmente, la solución se dejó en reposo durante 12 horas para completar el proceso de hidratación antes de ser almacenada en un frasco schott para su posterior uso.

A continuación, se evidencia los calculados realizado para la preparación de las soluciones madres.

$$5000 \text{ ppm} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 5000 \text{ mg/L} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 5 \text{ g/L}$$

2,5 g / para 500 ml de solución madre

$$\% \text{ humedad del polímero} - 100\% = \% \text{ polímero seco} \quad [3]$$

$$\frac{2,5 \text{ gr}}{X} = \frac{\% \text{ polímero seco}}{100\%}$$

X= Peso del polímero (g)

$$\text{Peso de agua sintética} = \text{Peso a preparar de la solución (g)} - [4]$$

Peso del polímero (g).

Figura 8.

Soluciones madres de 5000 ppm de Goma Guar (GG) y Goma Xantana (XG).



Nota. Preparación de soluciones madre de los biopolímeros Goma Guar (GG) y Goma Xantana (XG) a concentración de 5000 ppm. Fotografía María Cobos, Nayarith Olmedo, 2024.

5.2.1.2.1.3 Soluciones Diluidas

El proceso de dilución comienza con el cálculo del volumen de salmuera sintética necesario para ajustar la solución madre a la concentración objetivo. Este cálculo se realiza considerando las concentraciones inicial y deseada, así como el volumen final requerido, aplicando las ecuaciones pertinentes. Una vez obtenido el volumen de salmuera sintética necesario, se procede a medir la cantidad requerida de solución madre. Esta medición se realiza utilizando un beaker colocado sobre una balanza de precisión para asegurar que el peso registrado corresponda a los valores calculados. A continuación, se adiciona gradualmente la salmuera sintética al beaker que contiene la solución madre. Durante este proceso, se emplea un agitador magnético con barra para mezclar de manera constante y uniforme. La velocidad de agitación se ajusta para generar un vórtice

estable, el cual facilita la incorporación eficiente de la salmuera sintética y asegura una homogenización completa de la mezcla.

A continuación, se evidencia los calculados realizado para la preparación de las soluciones madres, donde, W_i : Peso de solución madre (g) C_i : Concentración de la solución madre (5000 ppm) W_f : Peso a preparar de la solución diluida (g) C_f : Concentración de la solución diluida (ppm).

$$W_i = \frac{w_f * C_f}{C_i} \quad [6]$$

$$W_i = \frac{500g * 2500ppm}{5000 ppm} = 250 \text{ g de solución madre}$$

500 g de solución diluida – 250 g de solución madre = 250 g salmuera sintética.

$$W_i = \frac{500g * 500ppm}{5000 ppm} = 50 \text{ g de solución madre}$$

500 g de solución diluida – 50 g de solución madre = 450 g salmuera sintética.

Figura 9.

Soluciones diluidas de Goma Xantana (XG).



Nota. Preparación de soluciones diluidas de la Goma Xantana (XG) a concentración de 2500 ppm y 500 ppm. Fotografía María Cobos, Nayarith Olmedo, 2024.

Figura 10.

Soluciones diluidas de Goma Guar (GG).



Nota. Preparación de soluciones diluidas de la Goma Guar (GG) a concentración de 2500 ppm y 500 ppm. Fotografía María Cobos, Nayarith Olmedo, 2024.

6. Pruebas complementarias

6.1 Mojabilidad Visual

Este método se destaca por ser un procedimiento cualitativo sencillo y rápido, diseñado para analizar las tendencias de humectación de las soluciones que contienen agentes tensioactivos. Cuando la afinidad hacia el agua o el aceite es significativa, resulta fácil identificarla. Sin embargo, los niveles intermedios de humectación no se logran apreciar con facilidad según lo indicado en los lineamientos de la norma API RP 42:1990, sección 3, numerales 60 al 68.

6.1.1 Equipos y materiales.

Probetas graduadas calibradas de 100 ml, Fluido de prueba acuoso (salmuera sintética), Partículas de arena y/o calizas limpias, malla 40-60, Beaker de 5 ml y Producto (Solución polimérica).

6.1.2 Procedimiento

Este procedimiento tiene como objetivo evaluar la mojabilidad de la arena de formación tratada con soluciones poliméricas (Goma Xantana (XG) y Goma Guar (GG)) y su comportamiento en presencia de diferentes líquidos, Varsol y salmuera sintética. Primero, se coloca 10 cm³ de arena de formación en un frasco schott de 50 mL y se agrega 20 mL de solución de Goma Xantana (XG), dejándola reposar durante media hora para que el polímero modifique las propiedades de mojabilidad de la arena. Este procedimiento se repite con la Goma Guar (GG) para comparar su efectividad. Después de la media hora, se realiza un proceso de decantación, con el propósito de eliminar el exceso de solución polimérica dejando la arena tratada lista para la siguiente fase. En esta etapa, se preparan dos probetas de 100 ml, una con Varsol (fase oleosa) y otra con salmuera sintética (Fase acuosa). Ambas probetas se completan hasta 100 mL y se añade una pequeña cantidad de la arena tratada para observar si se dispersa o forma aglomerados en los líquidos.

6.2 Detergencia

La prueba de detergencia tiene como objetivo evaluar la capacidad de un agente químico, para reducir la tensión interfacial entre dos fases inmiscibles, como petróleo y agua. Este proceso

facilita la emulsificación, mejora la interacción entre los fluidos y favorece el desplazamiento de petróleo adherido en superficies o formaciones porosas.

6.2.1 Equipo y Materiales

Arena de formación 40 mesh, Solución polimérica (Xantana y Guar), Salmuera sintética, Crudo y frasco schott de 10 ml.

6.2.2 Procedimiento

Esta prueba consistió en agregar 5 cm³ de arena de 40 micras a un frasco schott, luego se adicionó 20 ml de la solución polimérica de Goma Xantana (XG). La mezcla se dejó en remojo durante una hora, permitiendo que la solución interactúe con la arena. Este procedimiento se repitió utilizando la solución de Goma Guar (GG). Después de la hora de remojo, se realizó la decantación del exceso de solución en ambos casos. En un segundo frasco schott, se colocó la arena decantada y/o mojada con la solución y se agregó una mezcla en proporción 50:50 de crudo y salmuera sintética. Esta mezcla se agitó levemente para asegurar una distribución uniforme de los componentes. Se lleva al horno a 50°C durante una hora permitiendo simular las condiciones de yacimiento. Al finalizar el tiempo de exposición, se extrajo el frasco y se registraron fotográficamente los resultados, lo que permite observar y analizar visualmente los efectos de la interacción entre la arena, las soluciones poliméricas, el crudo y la salmuera sintética.

6.3 Sludge

Algunos crudos, al interactuar con ciertos productos, pueden generar precipitados conocidos como sludge. Por esta razón, la prueba es clave para evaluar la propensión a la formación de sludge en condiciones de laboratorio y determinar si dicha tendencia se presenta en situaciones reales de campo. El procedimiento se describe en detalle en la norma técnica API RP 42:1990, sección 1, numerales 17 al 21.

6.3.1 Equipos y Materiales

Soluciones poliméricas (Xantana y Guar), Crudo, Baño de agua, Frascos schott 10 ml, Malla 100, redonda, Frasco de lavado lleno de Soltrol y Frasco de lavado lleno de agua.

6.3.2 Procedimiento

El procedimiento consiste en mezclar en un frasco schott, en proporción 50:50, la solución polimérica y crudo. La mezcla se agita vigorosamente durante 60 segundos para garantizar la homogeneización. Posteriormente, se colocó en un horno a 50 °C durante 24 horas, simulando las condiciones de formación y permitiendo observar fenómenos como sedimentación, separación de fases. Finalmente, se pasa la mezcla por una malla de 100 mesh limpia adicionando agua caliente o Sostrol para permitir una mejor visualización en la malla, lo que facilita el análisis del comportamiento del sude y su impacto en la calidad del crudo.

6.4 Rompimiento de emulsión

El propósito de la prueba de emulsión en geles poliméricos es evaluar su capacidad para influir en la formación o reducción de emulsiones en sistemas específicos, como aceite-salmuera o ácido-aceite. Estas pruebas permiten identificar la tendencia del sistema a generar emulsiones,

pero no determinan con certeza si la emulsificación ocurrirá o se mantendrá durante las operaciones de estimulación de pozos. El procedimiento se describe en detalle en la norma técnica Norma API RP 42:1990, sección 1 numeral 1 al 16.

6.4.1 Equipos y materiales

Agitador (mezclador) de alta velocidad, Vasos altos de 400 ml para mezclar, Probetas graduadas de 100 ml, Cronómetro, crudo y Soluciones poliméricas (Xantana y Guar).

6.4.2 Procedimiento

La prueba se llevó a cabo utilizando tres proporciones distintas (25:75, 50:50 y 75:25) para evaluar la interacción entre las soluciones poliméricas (Goma Xantana (XG) y Goma Guar (GG)) y el crudo, donde el primer valor representa la cantidad de muestra (Goma Xantana (XG) y Goma Guar (GG)) y el segundo la de crudo. Este procedimiento se aplicó tanto a la solución madre como a las diluciones de 2500 y 500 ppm de Goma Guar (GG) y Goma Xantana (XG). Se utilizaron 2,5 g de una mezcla de arena representativa con partículas de 200 mesh, simulando las condiciones del yacimiento. La mezcla de fluido y crudo, junto con los finos, se emulsionó en un agitador a 1400 RPM durante 30 segundos. Posteriormente, se transfirió a una probeta graduada de 100 mL y se mantiene a temperatura ambiente, registrándose el rompimiento de la fase acuosa a los 15 minutos, 1 y 24 horas.

6.5 Olimetría

La prueba de olimetría no se encuentra definida en normas API, ya que este tipo de evaluación sensorial y fisicoquímica suele estar más relacionada con estudios de estabilidad de polímeros en la industria petrolera. Sin embargo, la evaluación de parámetros como pH, conductividad, salinidad y viscosidad se encuentra en normas y estudios previos.

6.5.1 Equipos y materiales

Soluciones Poliméricas, Frascos schott 100 ml y multiparámetros HANNA instrumets.

6.5.2 Procedimiento

Para realizar la prueba de olimetría en las soluciones poliméricas de Goma Xantana (XG) y Goma Guar (GG), se prepararon soluciones a diferentes concentraciones en agua sintética, asegurando una mezcla homogénea mediante agitación constante. Posteriormente, se almacenaron las muestras en condiciones controladas de temperatura y humedad para simular condiciones ambientales y evaluar su estabilidad en el tiempo. En intervalos predefinidos, se realizaron mediciones de olor, pH, resistividad, conductividad y salinidad utilizando equipos calibrados. Estas mediciones permitieron analizar la evolución de las propiedades fisicoquímicas de las soluciones y detectar posibles signos de degradación.

6.6 Compatibilidad

Consiste en un ensayo diseñado para evaluar la interacción entre un fluido específico y su entorno, con el objetivo de prevenir reacciones no deseadas. Estas pruebas pueden incluir la verificación de compatibilidad con fluidos de tratamiento, fluidos presentes en el pozo, fluidos del yacimiento y de la formación geológica. En escenarios críticos, la combinación de fluidos que

inicialmente parecen compatibles puede generar reacciones adversas, lo que podría comprometer la permeabilidad del yacimiento de manera irreversible.

6.6.1 Equipos y materiales

Probetas de ensayo de vidrio graduados de 100 ml, Frasco schott, Horno Convencional y Fluidos de evaluación (Soluciones Poliméricas y crudo).

6.6.2 Procedimiento

Se realizaron mezclas en diferentes proporciones de solución polimérica y crudo: 25:75, 50:50 y 75:25, donde el primer número representa la proporción de solución polimérica y el segundo la de crudo. Este procedimiento se repitió tanto para la Goma Xantana (XG) como para la Goma Guar (GG) con el fin de comparar sus efectos en la compatibilidad con el crudo. El proceso comenzó con la adición de las soluciones de polímero y crudo en probetas separadas, donde se median los volúmenes correspondientes. Luego, ambos fluidos se vertían en un frasco schott y se mezclan manualmente durante 1 minuto, asegurando una mezcla homogénea. A continuación, el frasco se llevaba a un horno a 50°C para simular las condiciones de yacimiento y se registra fotográficamente la evolución del proceso en intervalos de tiempo: 30 minutos, 1, 2, 4, 6, 12 y 24 horas. Estos tiempos permiten observar el comportamiento del crudo y la solución polimérica a medida que la mezcla se estabiliza y las fases comienzan a separarse. Al finalizar la prueba, se mide el volumen de las fases separadas en el frasco y se calculan los porcentajes.

7. Resultados

7.1 Mojabilidad Visual

7.1.1 Goma Guar (GG)

El análisis de los resultados de mojabilidad visual revela que las partículas de Goma Guar (GG) presentan una marcada tendencia a ser completamente mojadas por el agua, lo que se manifiesta en su fácil dispersión en la fase acuosa. Este fenómeno es evidente en las concentraciones de 5000, 2500 y 500 ppm, donde el polímero demuestra una preferencia por interactuar con el agua. La dispersión uniforme en el agua sugiere que la Goma Guar (GG) posee características hidrofílicas dominantes, facilitando su integración en soluciones acuosas. Por el contrario, en una fase oleosa, las partículas de Goma Guar (GG) tienden a aglomerarse, indicando una baja afinidad hacia el aceite y una resistencia a mezclarse uniformemente en esta fase. Este comportamiento tiene implicaciones significativas para su uso en sistemas donde la interacción con el agua es crítica, como en procesos de recuperación mejorada de petróleo o formulaciones de fluidos de Fracturamiento hidráulico. La capacidad del polímero para mantenerse estable y disperso en ambientes acuosos asegura una mejor eficiencia en aplicaciones que requieren control de la viscosidad y estabilidad.

Tabla 10.

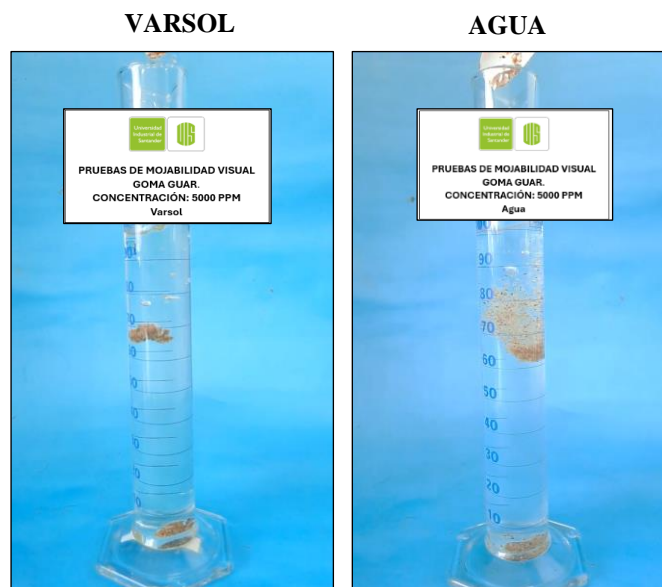
Resultados de mojabilidad visual Goma Guar (GG).

GOMA GUAR (GG)		
Concentraciones	Varsol	Agua
ppm	ml	ml
5000	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2500	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
500	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Nota. Resultados de mojabilidad visual de la Goma Guar (GG) a diferentes concentraciones (5000, 2500 y 500 ppm) con Varsol y agua. Realizado por Autores.

Figura 11.

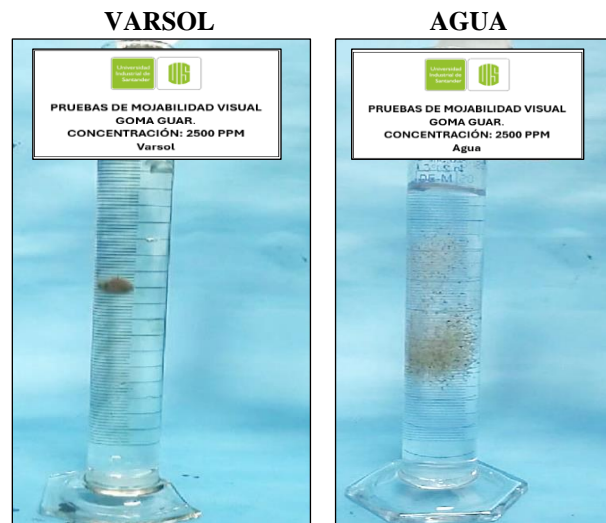
Prueba de mojabilidad Visual Goma Guar (GG) 5000 ppm.



Nota. Fotografía María Cobos, Nayarith Olmedo, 2024.

Figura 12.

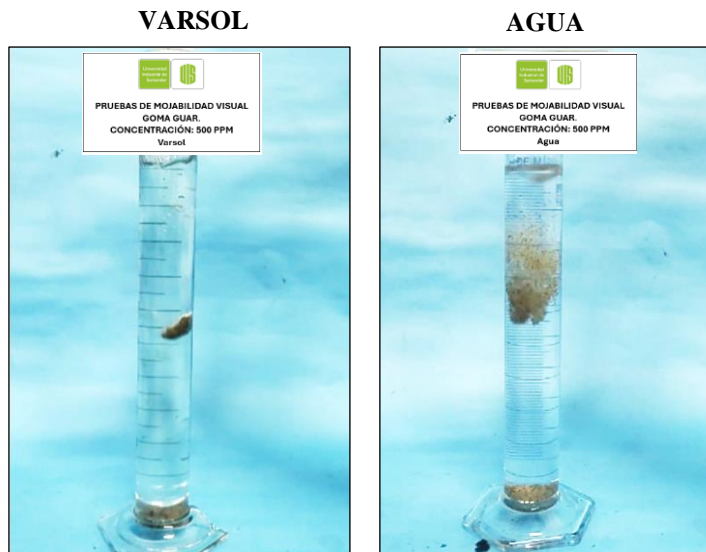
Prueba de mojabilidad Visual Goma Guar (GG) 2500 ppm.



Nota. Fotografía María Cobos, Nayarith Olmedo, 2024.

Figura 13.

Prueba de mojabilidad Visual Goma Guar (GG) 500 ppm.



Nota. Fotografía María Cobos, Nayarith Olmedo, 2024.

7.1.2 Goma Xantana (XG)

El análisis de la prueba de mojabilidad visual para la Goma Xantana (XG) muestra variaciones dependiendo de la concentración utilizada. A una concentración de 5000 ppm, se observó una marcada aglomeración tanto en Varsol como en agua, lo que sugiere que, a niveles elevados, la Goma Xantana (XG) tiende a formar estructuras más densas o geles, dificultando su dispersión en ambos medios. Sin embargo, a concentraciones de 2500 ppm y 500 ppm, el polímero muestra una buena dispersión en agua, indicando una mayor afinidad por la fase acuosa en estos niveles. En contraste, en Varsol, se mantiene la aglomeración en ambas concentraciones, evidenciando una preferencia por el agua. La capacidad de la Goma Xantana (XG) para dispersarse eficientemente en agua a concentraciones más bajas asegura una viscosidad óptima sin la formación de geles indeseados, lo cual es esencial en procesos como la recuperación mejorada de petróleo, donde la estabilidad y el desempeño constante del fluido son cruciales. para la eficiencia y el éxito de la operación.

Tabla 11.

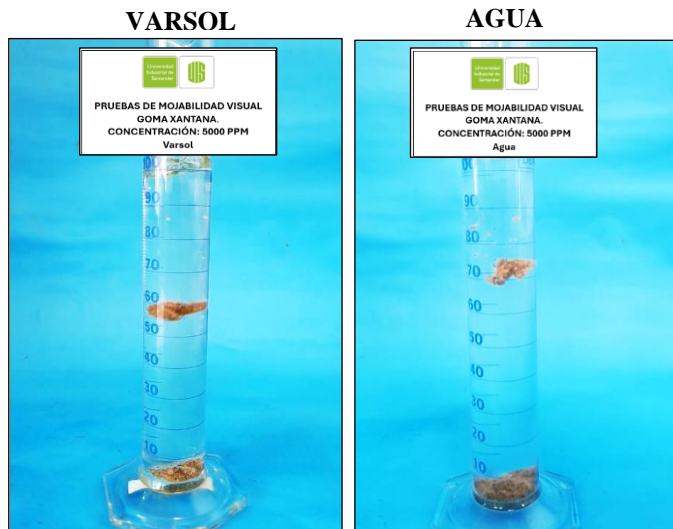
Resultados de mojabilidad visual Goma Xantana (XG).

Goma Xantana (XG)		
Concentraciones	Varsol	Agua
ppm	ml	ml
5000	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2500	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
500	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Nota. Resultados de mojabilidad visual de la Goma Xantana (XG) a diferentes concentraciones (5000, 2500 y 500 ppm) con Varsol y agua. Realizado por Autores.

Figura 14.

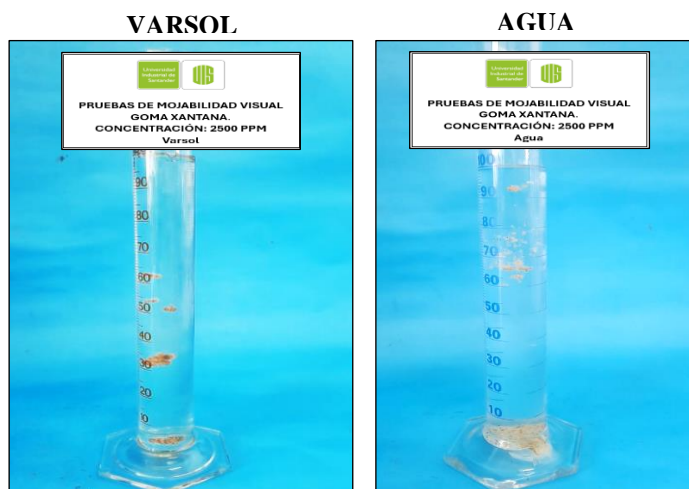
Prueba de mojabilidad Visual Goma Xantana (XG) 500 ppm.



Nota. Fotografía María Cobos, Nayarith Olmedo, 2024.

Figura 15.

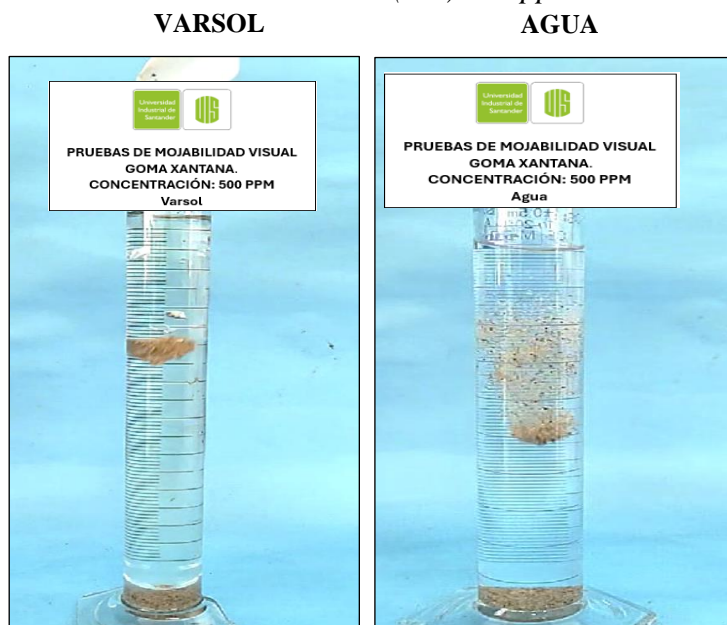
Prueba de mojabilidad Visual Goma Xantana (XG) 2500 ppm.



Nota. Fotografía María Cobos, Nayarith Olmedo, 2024.

Figura 16.

Prueba de mojabilidad Visual Goma Xantana (XG) 500 ppm.



Nota. Fotografía María Cobos, Nayarith Olmedo, 2024.

7.2 Detergencia

7.2.1 Goma Guar (GG) y Goma Xantana (XG)

Las soluciones poliméricas de Goma Guar (GG) y Goma Xantana (XG) demostraron una buena capacidad de detergencia en todas las concentraciones evaluadas, lo que indica su efectividad en la remoción de residuos orgánicos o inorgánicos en tuberías y equipos y la interacción con fluidos en ambientes complejos.

No se observó precipitación de los polímeros durante las pruebas, lo que confirma su estabilidad química y su capacidad para mantener sus propiedades como las encontradas en sistemas de formación.

La estabilidad y capacidad detergente de las gomas la posicionan como una alternativa funcional, económico y sostenible, con bajo impacto ambiental, debido a que podría emplearse en

operaciones de limpieza de pozos, optimización del flujo de fluidos o dispersión de contaminantes en sistemas de perforación y producción, su comportamiento asegura que su uso no genere problemas adicionales, como obstrucciones o sedimentación.

Tabla 12.

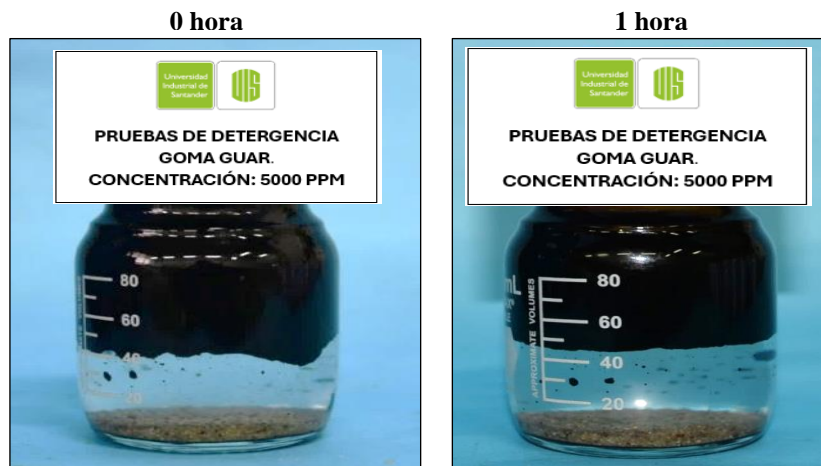
Resultados de detergencia Goma Xantana (XG) y Goma Guar (GG).

DETERGENCIA DE LAS GOMAS			
Concentraciones	GOMA GUAR (GG)		
	Buena	Aceptable	Deficiente
5000	<input checked="" type="checkbox"/>		
2500	<input checked="" type="checkbox"/>		
500	<input checked="" type="checkbox"/>		
GOMA XANTANA (XG)			
5000	<input checked="" type="checkbox"/>		
2500	<input checked="" type="checkbox"/>		
500	<input checked="" type="checkbox"/>		

Nota. Resultados de la evaluación de la detergencia de la Goma Guar (GG) y Goma Xantana (XG) a diferentes concentraciones (5000, 2500 y 500 ppm). Los símbolos indican un rendimiento clasificado como bueno, aceptable o deficiente. Realizado por Autores.

Figura 17.

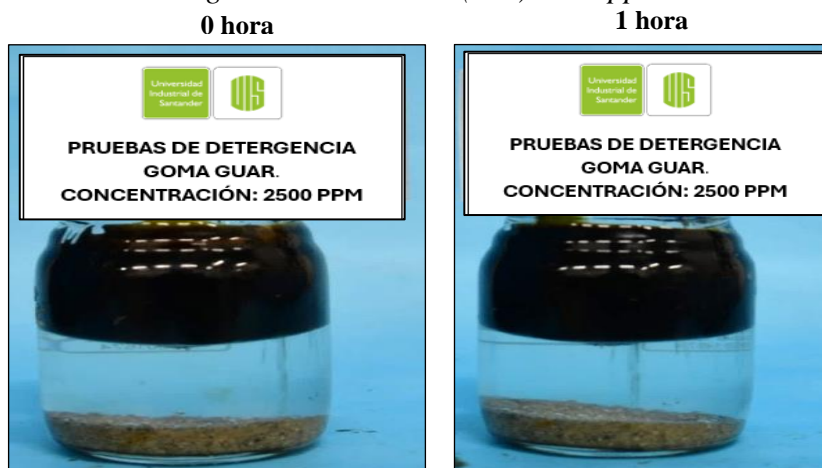
Resultados de Prueba detergencia Goma Guar (GG) 5000 ppm.



Nota. Realizado por Autores.

Figura 18.

Resultados de Prueba detergencia Goma Guar (GG) 2500 ppm.



Nota. Realizado por Autores.

Figura 19.

Resultados de Prueba detergencia Goma Guar (GG) 500 ppm.



Nota. Realizado por Autores.

Figura 20.

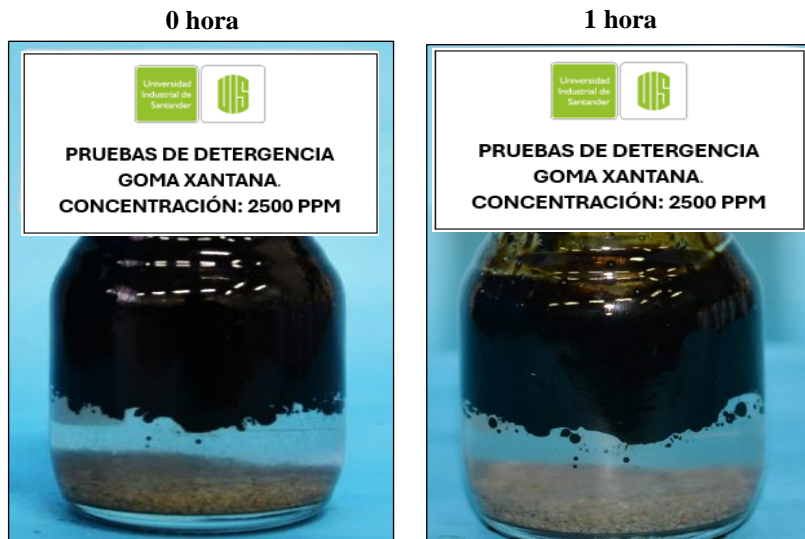
Resultados de Prueba detergencia Goma Xantana (XG) 5000 ppm.



Nota. Realizado por Autores.

Figura 21.

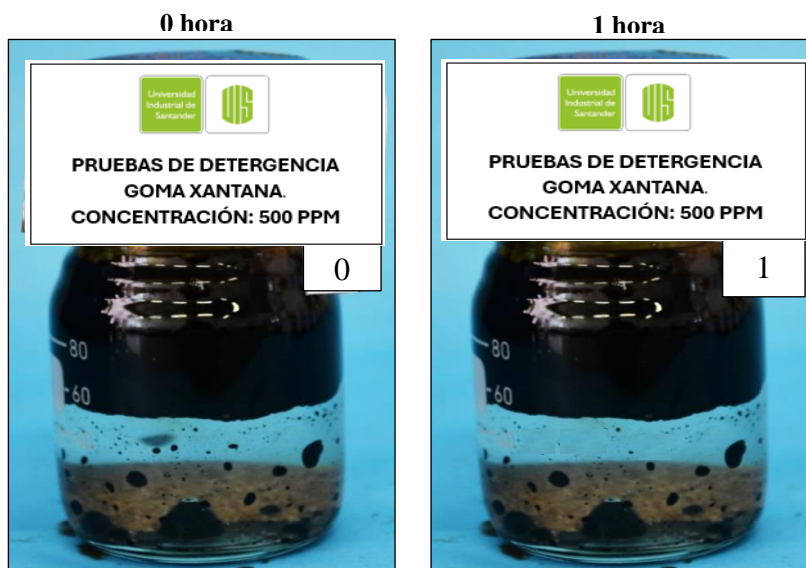
Resultados de Prueba detergencia Goma Xantana (XG) 2500 ppm.



Nota. Realizado por Autores.

Figura 22.

Resultados de Prueba detergencia Goma Xantana (XG) 500 ppm.



Nota. Realizado por Autores.

7.3 Sludge

7.3.1 Goma Xantana (XG) y Goma Guar (GG).

La ausencia de sludge indica que no se están formando sólidos o depósitos significativos en la interacción entre el crudo y la solución polimérica (Goma Guar (GG) y Goma Xantana (XG)). Esto puede interpretarse como una señal positiva, ya que el sistema está libre de material sólido o semisólido que podría obstruir equipos, afectar la calidad del crudo o complicar los procesos de transporte, separación y refinación del crudo.

Por otro lado, el hecho de que no se forme sludge contribuye a mejorar la integridad de los equipos y tuberías, al evitar la acumulación de depósitos que podrían causar corrosión o desgaste prematuro. También facilita el manejo del crudo en las etapas posteriores, al mantener las propiedades físicas y químicas necesarias para un procesamiento eficiente.

Tabla 13.

Resultados de Sludge de la Goma Xantana (XG) y Goma Guar (GG).

GOMA GUAR (GG)	
Concentraciones	Sludge
ppm	ml
5000	<input checked="" type="checkbox"/>
2500	<input checked="" type="checkbox"/>
500	<input checked="" type="checkbox"/>
GOMA XANTANA (XG)	
5000	<input checked="" type="checkbox"/>
2500	<input checked="" type="checkbox"/>
500	<input checked="" type="checkbox"/>

Nota. Los resultados de la prueba para la Goma Guar (GG) y la Goma Xantana (XG) a diferentes concentraciones (500, 2500 y 5000 ppm). El símbolo de rechazo (X) indica que no hubo formación de sludge en ninguna de las condiciones evaluadas, lo que sugiere que estos aditivos no generan sólidos significativos al interactuar con el petróleo crudo. Realizada por autores.

Figura 23.

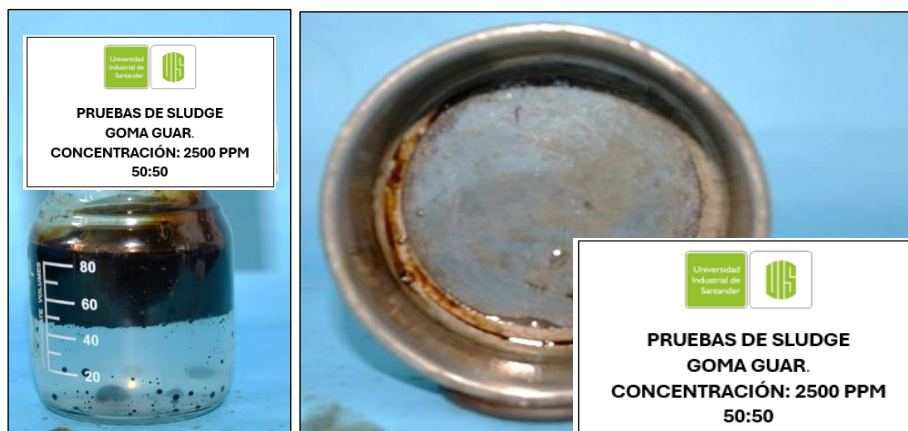
Resultados de Prueba de sludge Goma Guar (GG) 5000 ppm.



Nota. Realizado por Autores.

Figura 24.

Resultados de Prueba de sludge Goma Guar (GG) 2500 ppm.



Nota. Realizado por Autores.

Figura 25.

Resultados de Prueba de sludge Goma Guar (GG) 500 ppm.



Nota. Realizado por Autores.

Figura 26.

Resultados de Prueba de sludge Goma Xantana (XG) 5000 ppm.



Nota. Realizado por Autores.

Figura 27.

Resultados de Prueba de sludge Goma Xantana (XG) 2500 ppm.



Nota. Realizado por Autores.

Figura 28.

Resultados de Prueba de sludge Goma Xantana (XG) 500 ppm.



Nota. Realizado por Autores.

7.4 Rompimiento de emulsión

7.4.1 Goma Guar (GG)

La prueba de rompimiento de emulsión con Goma Guar (GG) se realizó a concentraciones de 500, 2500 y 5000 ppm, evaluando proporciones 25:75, 50:50 y 75:25. A las 24 horas, los resultados mostraron comportamientos similares dentro de cada concentración, con porcentajes de rompimiento de 68,96 % a 98,28 %, evidenciando que mayores concentraciones no siempre implican mayor eficiencia. En todos los casos, se observó que la homogenización fue imperfecta, dificultando la diferenciación clara entre fases, y la presencia de sólidos finos en el fondo de las pruebas indicó una mayor afinidad por la fase acuosa, lo cual coincide con los resultados de la prueba de mojabilidad visual. Aunque hubo variabilidad en las mediciones por la presencia de aire generado durante la agitación, se realizaron ajustes en los cálculos para lograr una evaluación más precisa. Estos hallazgos resaltan la tendencia de la GG a favorecer la fase acuosa, lo que resulta relevante para optimizar procesos de separación en el manejo de emulsiones dentro de la industria petrolera

Tabla 14.

Prueba de rompimiento de emulsiones Goma Guar (GG) 5000.




GOMA GUAR (GG)		
Tiempo: 24 horas		
Concentración: 5000 ppm		
Revoluciones Por Minutos (RPM): 14.000 rpm		
Proporción: 25:75	Proporción: 50:50	Proporción: 75:25
 <p>PRUEBAS DE ROMPIMIENTO DE EMULSIÓN GOMA GUAR. CONCENTRACIÓN: 5000 PPM 25:75</p>	 <p>PRUEBAS DE ROMPIMIENTO DE EMULSIÓN GOMA GUAR. CONCENTRACIÓN: 5000 PPM 50:50</p>	 <p>PRUEBAS DE ROMPIMIENTO DE EMULSIÓN GOMA GUAR. CONCENTRACIÓN: 5000 PPM 75:25</p>
%Rompimiento de emulsión de la fase acuosa	%Rompimiento de emulsión de la fase acuosa	%Rompimiento de emulsión de la fase acuosa
66,67	65,88	66,67
Volumen Emulsión Final	Volumen Emulsión Final	Volumen Emulsión Final
22,5 ml	42,5 ml	67,5 ml
Sólidos	Sólidos	Sólidos
Finos en el fondo	Finos en el fondo	Finos en el fondo
Interfase	Interfase	Interfase
Imperfecta	Imperfecta	Imperfecta

Tabla 15.

Prueba de rompimiento de emulsiones Goma Guar (GG) 2500.


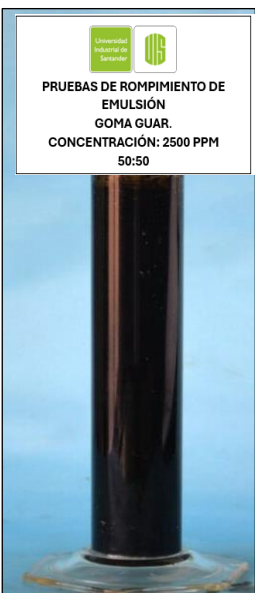
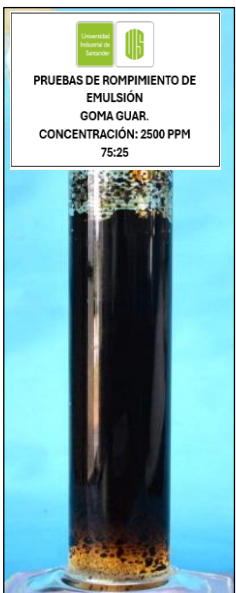


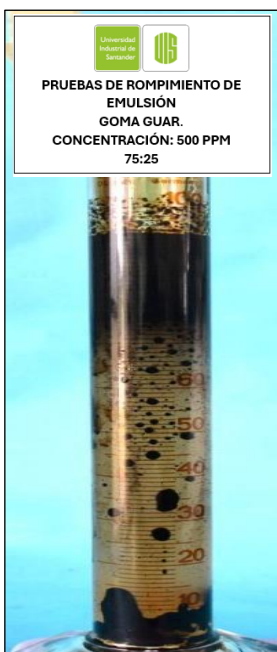
GOMA GUAR (GG)		
Tiempo: 24 horas		
Concentración: 2500 ppm		
Revoluciones Por Minutos (RPM): 14.000 rpm		
Proporción: 25:75	Proporción: 50:50	Proporción: 75:25
 <p>PRUEBAS DE ROMPIMIENTO DE EMULSIÓN GOMA GUAR. CONCENTRACIÓN: 2500 PPM 25:75</p>	 <p>PRUEBAS DE ROMPIMIENTO DE EMULSIÓN GOMA GUAR. CONCENTRACIÓN: 2500 PPM 50:50</p>	 <p>PRUEBAS DE ROMPIMIENTO DE EMULSIÓN GOMA GUAR. CONCENTRACIÓN: 2500 PPM 75:25</p>
%Rompimiento de emulsión de la fase acuosa	%Rompimiento de emulsión de la fase acuosa	%Rompimiento de emulsión de la fase acuosa
88,89	84,44	88,89
Volumen Emulsión Final	Volumen Emulsión Final	Volumen Emulsión Final
22,5 ml	45 ml	67,45 ml
Sólidos	Sólidos	Sólidos
Finos en el fondo	Finos en el fondo y suspendidos	Finos en el fondo
Interfase	Interfase	Interfase
Imperfecta	Imperfecta	Imperfecta

Tabla 16.

Prueba de rompimiento de emulsiones Goma Guar (GG) 500.

GOMA GUAR (GG)		
Tiempo: 24 horas		
Concentración: 500 ppm		
Revoluciones Por Minutos (RPM): 14.000 rpm		
Proporción: 25:75	Proporción: 50:50	Proporción: 75:25
 <p>PRUEBAS DE ROMPIMIENTO DE EMULSIÓN GOMA GUAR. CONCENTRACIÓN: 500 PPM 25:75</p>	 <p>PRUEBAS DE ROMPIMIENTO DE EMULSIÓN GOMA GUAR. CONCENTRACIÓN: 500 PPM 50:50</p>	 <p>PRUEBAS DE ROMPIMIENTO DE EMULSIÓN GOMA GUAR. CONCENTRACIÓN: 500 PPM 75:25</p>
%Rompimiento de emulsión de la fase acuosa 68,96	%Rompimiento de emulsión de la fase acuosa 96,77	%Rompimiento de emulsión de la fase acuosa 98,25
Volumen Emulsión Final 21,75 ml	Volumen Emulsión Final 46,5 ml	Volumen Emulsión Final 71,25 ml
Sólidos Finos en el fondo	Sólidos Finos en el fondo	Sólidos Finos en el fondo
Interfase Imperfecta	Interfase Imperfecta	Interfase Imperfecta

7.4.2 Goma Xantana (XG)

Las pruebas de rompimiento de emulsión con Goma Xantana (XG) se realizaron a concentraciones de 500, 2500 y 5000 ppm en proporciones 75:25, 50:50 y 25:75. A 500 ppm se obtuvo una alta eficiencia de rompimiento, con porcentajes entre 93,8 % y 95,5 %. Sin embargo, al aumentar la concentración a 2500 y 5000 ppm los porcentajes disminuyeron, evidenciando una ausencia total de separación (0 %) a 2500 ppm y valores mínimos de 0 % a 4 % a 5000 ppm, lo que evidencia un comportamiento opuesto al observado con Goma Guar (GG), que mostró altos porcentajes de rompimiento en las mismas condiciones. En todas las concentraciones se observó la formación de una interfase difusa producto de la alta viscosidad de la XG, así como una acumulación notable de sólidos en el fondo de las probetas, lo que indica afinidad por la fase acuosa. Además, el volumen final en las probetas no alcanzó los 100 mL en varias proporciones, atribuido a la entrada de aire durante la agitación y la adherencia del crudo a las paredes por la viscosidad del polímero. Estos resultados sugieren que la Goma Xantana puede favorecer la estabilización de emulsiones, dificultando su rompimiento, lo que es relevante para evaluar su efecto en la eficiencia de separadores trifásicos y unidades de tratamiento de emulsiones en campo.

Tabla 17.

Prueba de rompimiento de emulsiones Goma Xantana (XG) 5000 ppm.




GOMA XANTANA (GX)		
Tiempo: 24 horas		
Concentración: 5000 ppm		
Revoluciones Por Minutos (RPM): 14.000 rpm		
Proporción: 25:75	Proporción: 50:50	Proporción: 75:25
 <p>PRUEBAS DE ROMPIMIENTO DE EMULSIÓN GOMA XANTANA. CONCENTRACIÓN: 5000 PPM 25:75</p>	 <p>PRUEBAS DE ROMPIMIENTO DE EMULSIÓN GOMA XANTANA. CONCENTRACIÓN: 5000 PPM 50:50</p>	 <p>PRUEBAS DE ROMPIMIENTO DE EMULSIÓN GOMA XANTANA. CONCENTRACIÓN: 5000 PPM 75:25</p>
%Rompimiento de emulsión de la fase acuosa	%Rompimiento de emulsión de la fase acuosa	%Rompimiento de emulsión de la fase acuosa
0	4	3
Volumen Emulsión Final	Volumen Emulsión Final	Volumen Emulsión Final
25 ml	50 ml	75 ml
Sólidos	Sólidos	Sólidos
Finos en el fondo	Finos en el fondo	Finos en el fondo
Interfase	Interfase	Interfase
Difusa	Difusa	Difusa

Tabla 18.

Prueba de rompimiento de emulsiones Goma Xantana (XG) 2500.







GOMA XANTANA (GX)		
Tiempo: 24 horas		
Concentración: 2500 ppm		
Revoluciones Por Minutos (RPM): 14.000 rpm		
Proporción: 25:75	Proporción: 50:50	Proporción: 75:25
 <p>PRUEBAS DE ROMPIMIENTO DE EMULSIÓN GOMA XANTANA. CONCENTRACIÓN: 2500 PPM 25:75</p>	 <p>PRUEBAS DE ROMPIMIENTO DE EMULSIÓN GOMA XANTANA. CONCENTRACIÓN: 2500 PPM 50:50</p>	 <p>PRUEBAS DE ROMPIMIENTO DE EMULSIÓN GOMA XANTANA. CONCENTRACIÓN: 2500 PPM 75:25</p>
%Rompimiento de emulsión de la fase acuosa	%Rompimiento de emulsión de la fase acuosa	%Rompimiento de emulsión de la fase acuosa
0	0	0
Volumen Emulsión Final	Volumen Emulsión Final	Volumen Emulsión Final
21,25 ml	50 ml	67,5 ml
Sólidos	Sólidos	Sólidos
Finos en el fondo	Finos en el fondo	Finos en el fondo
Interfase	Interfase	Interfase
Difusa	Difusa	Difusa

Tabla 19.

Prueba de rompimiento de emulsiones Goma Xantana (XG) 500 ppm.

GOMA XANTANA (GX)		
Tiempo: 24 horas		
Concentración: 500 ppm		
Revoluciones Por Minutos (RPM): 14.000 rpm		
Proporción: 25:75	Proporción: 50:50	Proporción: 75:25
 <p>PRUEBAS DE ROMPIMIENTO DE EMULSIÓN GOMA XANTANA. CONCENTRACIÓN: 500 PPM 25:75</p>	 <p>PRUEBAS DE ROMPIMIENTO DE EMULSIÓN GOMA XANTANA. CONCENTRACIÓN: 500 PPM 50:50</p>	 <p>PRUEBAS DE ROMPIMIENTO DE EMULSIÓN GOMA XANTANA. CONCENTRACIÓN: 500 PPM 75:25</p>
%Rompimiento de emulsión de la fase acuosa	%Rompimiento de emulsión de la fase acuosa	%Rompimiento de emulsión de la fase acuosa
93,8	95,5	94,7
Volumen Emulsión Final	Volumen Emulsión Final	Volumen Emulsión Final
24,5 ml	45 ml	71,25 ml
Sólidos	Sólidos	Sólidos
Finos en el fondo	Finos en el fondo	Finos en el fondo
Interfase	Interfase	Interfase
Difusa	Difusa	Difusa

7.5 Olimetría

Durante la prueba de olimetría realizada a los polímeros de origen natural Goma Xantana (XG) y Goma Guar (GG), se observó que ambos experimentaron fermentación con el paso del tiempo, reflejada principalmente en el cambio de olor, el pH y, en menor medida, en la resistividad. Inicialmente, ambos polímeros presentaban un olor neutro o bueno, pero conforme avanzaron los días, la Goma Xantana (XG) mostró una fermentación más gradual, pasando a "olor medio" después de 10 días y a "olor fuerte" después de 18 días. En contraste, la Goma Guar (GG) fermentó más rápidamente, presentando "olor fuerte" desde el día 6 y alcanzando "olor muy fuerte" en las últimas mediciones. El pH también disminuyó con el tiempo, especialmente en la Goma Guar (GG), lo que sugiere una mayor actividad microbiana y producción de ácidos orgánicos. Sin embargo, la conductividad y la salinidad se mantuvieron relativamente estables en ambos polímeros, indicando que la fermentación no alteró significativamente la concentración de iones disueltos.

Figura 29.*Prueba de olimetría Goma Xantana.*

Producto	Fecha de Preparación	Hora	Olimetría	Ph	TDS g/l	Resistividad $\Omega^{\circ}\text{cm}$	Conductividad ms/cm	Salinidad %	Concentración	Observación
Xantana	7-feb-25	4:00 P.M	Buena	5.5	11.5	50.1	20.01	11.92	5000	-
	10-feb-25	4:00 P.M	Buena	4.71	10.9	46	21.75	13.05	5000	-
	10-feb-25	4:00 P.M	Buena	4.89	10.7	47	21.29	12.74	2500	-
	10-feb-25	4:00 P.M	Buena	4.89	10.5	48	20.89	12.49	500	-
	12-feb-25	4:00 P.M	Olor medio	4.71	10.9	46	21.78	13.05	5000	-
	12-feb-25	4:00 P.M	Olor medio	5.01	10.5	47	21.11	12.71	2500	-
	12-feb-25	4:00 P.M	Olor medio	5	10.6	47	21.14	12.62	500	-
	14-feb-25	4:00 P.M	Olor medio	4.64	10.8	46	21.54	12.01	5000	-
	14-feb-25	4:00 P.M	Olor medio	4.4	10.7	47	21.31	12.76	2500	-
	14-feb-25	4:00 P.M	Olor medio	4.63	10.2	49	20.43	12.2	500	-
	17-feb-25	4:00 P.M	Olor medio	4.76	10.7	47	21.60	12.82	5000	-
	17-feb-25	4:00 P.M	Olor medio	5.1	10.8	46	21.63	12.94	2500	-
	17-feb-25	4:00 P.M	Olor medio	4.83	10.5	48	21.03	12.54	500	-
	25-feb-25	4:00 P.M	Olor Fuerte	5.18	10.6	58	17.38	10.39	5000	-
	25-feb-25	4:00 P.M	Olor Fuerte	5.42	10.6	47	21.22	12.71	2500	-
25-feb-25	4:00 P.M	Olor Fuerte	5.22	10.1	49	20.28	12.09	500	-	

Nota. Se analiza la variación de los parámetros de la Goma Xantana (XG) para evaluar su comportamiento en etapas iniciales, intermedias y finales. Realizado por autores

Figura 30.*Prueba de olímetría Goma Guar.*

Producto	Fecha de Preparación	Hora	Olimetria	Ph	TDS g/l	Resistividad Ω^*cm	Conductividad ms/cm	Salinidad %	Concentración	Observación
Guar	7-feb-25	4:00 P.M	Buena	5	11.3	51.1	19.58	11.65	5000	-
	10-feb-25	4:00 P.M	Buena	4.56	10.5	48	20.93	12.52	5000	-
	10-feb-25	4:00 P.M	Buena	5.29	10.5	48	20.95	12.51	2500	-
	10-feb-25	4:00 P.M	Buena	4.39	10.1	49	20.29	11.9	500	-
	12-feb-25	4:00 P.M	Olor Fuerte	4.24	10.6	47	21.93	12.73	5000	-
	12-feb-25	4:00 P.M	Olor Fuerte	4.35	10.3	50	19.97	11.99	2500	-
	12-feb-25	4:00 P.M	Olor Fuerte	4.8	10.3	49	20.48	12.35	500	-
	14-feb-25	4:00 P.M	Olor Fuerte	4.28	10.7	47	21.44	12.83	5000	Precipitación
	14-feb-25	4:00 P.M	Olor Fuerte	4.4	10.3	49	20.53	12.24	2500	Precipitación
	14-feb-25	4:00 P.M	Olor Fuerte	4.3	10.2	48	20.63	12.32	500	-
	17-feb-25	4:00 P.M	Olor Fuerte	4.39	10.7	47	21.41	12.81	5000	-
	17-feb-25	4:00 P.M	Olor Fuerte	4.51	10.4	48	20.79	12.42	2500	-
	17-feb-25	4:00 P.M	Olor Fuerte	4.94	10.2	49	20.47	12.21	500	-
	25-feb-25	4:00 P.M	Olor muy fuerte	3.94	10.5	48	17.38	10.39	5000	Aumento de Precipitado
	25-feb-25	4:00 P.M	Olor muy fuerte	4.4	10.3	49	21.22	12.71	2500	Aumento de Precipitado
	25-feb-25	4:00 P.M	Olor muy fuerte	5.16	10.1	49	20.22	12.09	500	-

Nota. Se analiza la variación de los parámetros de la Goma Guar (GG) para evaluar su comportamiento en etapas iniciales, intermedias y finales. Realizado por autores.

7.5.1 Variaciones de la viscosidad en el tiempo

A partir de los resultados obtenidos de la viscosidad en función de la concentración para ambas temperaturas (30°C y 50°C), La viscosidad disminuye con el aumento de la temperatura para todas las concentraciones analizadas, la viscosidad es menor a 30°C (temperatura ambiente) que a 50°C (temperatura de yacimiento). Esto indica que el polímero sufre una reducción en su resistencia al flujo con el incremento de la temperatura, lo que es consistente con el comportamiento típico de los polímeros en solución. A 30°C, la viscosidad muestra una mayor variación con la concentración, aumentando significativamente a medida que se incrementa la cantidad de polímero. A 50°C, aunque la viscosidad sigue aumentando con la concentración, el efecto es menor. Esto sugiere que la temperatura reduce la capacidad del polímero para formar estructuras que aumenten la viscosidad.

En concentraciones altas (5000 ppm), la viscosidad a temperatura ambiente es mayor que a 50°C, lo que indica que el polímero tiene mayor estabilidad y efecto espesante a temperaturas bajas, En concentraciones bajas (500 ppm), la diferencia de viscosidad entre 30°C y 50°C es menor, lo que implica que el polímero pierde su efecto espesante más rápidamente en soluciones diluidas cuando la temperatura aumenta.

El fluido de Goma Xantana (XG) se comporta de manera flexible según las condiciones a las que se expone. Su viscosidad cambia con la temperatura y la concentración del polímero: a mayor concentración, el fluido se vuelve más viscoso, como ocurre a 5000 ppm en comparación con 500 ppm. Sin embargo, cuando la temperatura aumenta, la viscosidad disminuye, lo que indica que el fluido es tixotrópico, es decir, se vuelve más fluido con el movimiento o el calor, pero recupera su espesor cuando está en reposo.

Tabla 20.*Variaciones de la viscosidad en el tiempo Goma Xantana (XG).*

Goma Xantana (GX)			
Fecha dd/mm/aaaa	Viscosidad ambiente cP	Temperatura °C	Concentración ppm
	26560	30	5000
7/02/2025	103.7	30	2500
	2.629	30	500
	27050	30	5000
18/02/2025	278	30	2500
	4.19	30	500
	28.65	30	5000
28/02/2025	55.81	30	2500
	2.699	30	500
	Viscosidad de yacimiento cP	Temperatura °C	Concentración ppm
	5266	50	5000
7/02/2025	69.90	50	2500
	2.60	50	500
	5304	50	5000
18/02/2025	77.95	50	2500
	3.17	50	500
	5339	50	5000
28/02/2025	35.75	50	2500
	1.589	50	500

Nota. Se analiza la variación de temperatura y concentración de la Goma Xantana (GX) para evaluar cómo cambia la viscosidad en el transcurso del tiempo. Realizado por autores.

El fluido de Goma Guar (GG) muestra un comportamiento sensible tanto a la concentración como a la temperatura. A mayores concentraciones, su viscosidad es más alta, como se observa a 5000 ppm en comparación con 500 ppm. Sin embargo, cuando la temperatura aumenta, la viscosidad disminuye notablemente, lo que indica que es un fluido no newtoniano con tendencia a shear thinning. Esto significa que se vuelve más fluido cuando se le aplica movimiento o calor, pero recupera parte de su espesor en reposo.

Tabla 21.

Variaciones de la viscosidad en el tiempo Goma Guar (GG).

Goma Guar (GG)			
Fecha dd/mm/aaaa	Viscosidad ambiente cP	Temperatura °C	Concentración ppm
7/02/2025	172.3	30	5000
	13.31	30	2500
	1.366	30	500
18/02/2025	3.29	30	5000
	1.2	30	2500
	1.4	30	500
28/02/2025	1.115	30	5000
	0.996	30	2500
	50.83	30	500
Viscosidad de yacimiento			
	cP	Temperatura °C	Concentración ppm
7/02/2025	80.93	50	5000
	6.29	50	2500
	1.14	50	500
18/02/2025	2.65	50	5000
	0.97	50	2500
	1.14	50	500
28/02/2025	0.697	50	5000
	0.625	50	2500
	1.079	50	500

Nota. Se analiza la variación de temperatura y concentración de la Goma Guar (GG) para evaluar cómo cambia la viscosidad en el transcurso del tiempo. Realizado por autores.

7.6 Compatibilidad


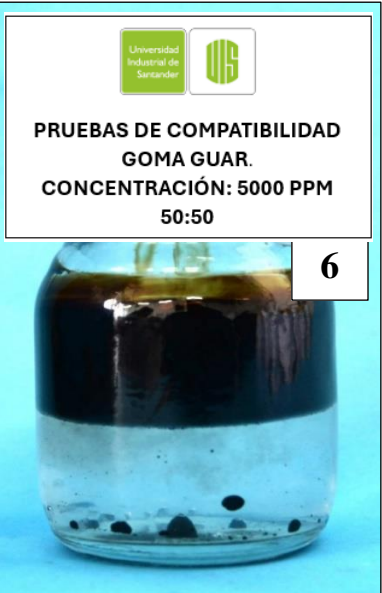
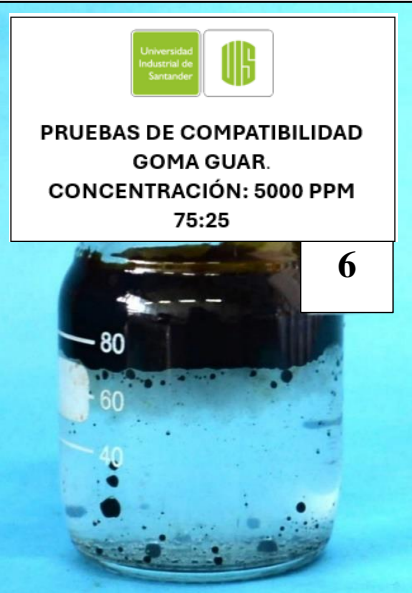
7.6.1 Goma Guar (GG)

Los resultados obtenidos indican que la Goma Guar (GG) es compatible con el crudo en todas las proporciones y concentraciones evaluadas. En la mayoría de los casos, se observará una interfaz bien definida y una adecuada dispersión del polímero en la mezcla. Sin embargo, se identificó una excepción en la concentración de 5000 ppm con una proporción de 25:75, donde la Goma Guar (GG) presentó irregularidades visuales, manifestándose en forma de manchas dentro de la solución polimérica. En esta condición específica, la interfaz no mostraba una definición clara y la separación de fases era ligeramente deficiente. A pesar de esta anomalía, no se evidencia la formación de emulsiones dentro del sistema, lo que sugiere que la compatibilidad observada podría deberse a una distribución no homogénea del polímero; por lo tanto, podría estar relacionada con una mala detergencia a estas condiciones con el medio, Cabe resaltar, que, a concentraciones más altas, la viscosidad del sistema incrementa de manera significativa, generando agregación o formación de microestructuras que alteran la homogeneidad de la mezcla.

7.6.1.1 Goma Guar (GG) 5000 ppm

Tabla 22.

Prueba de compatibilidad Goma Guar (GG) 5000 ppm


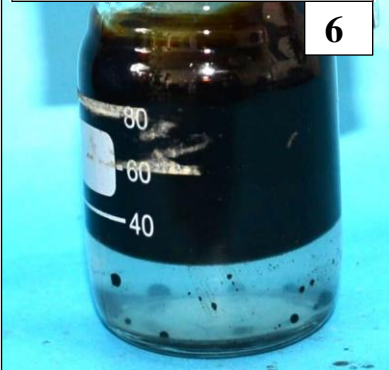

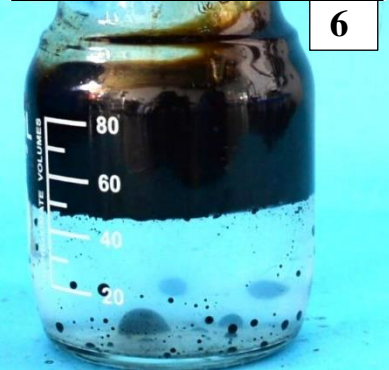

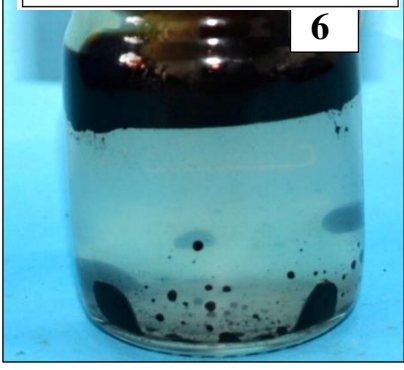
GOMA GUAR (GG)		
Temperatura: 50 °C		
Tiempo: 24 horas		
Concentración: 5000 ppm		
Proporción: 25:75	Proporción: 50:50	Proporción: 75:25
		
Compatibilidad Compatible	Compatibilidad Compatible	Compatibilidad Compatible
% de Separación: 20	% de Separación: 50	% de Separación: 66
% de miscibilidad: 80	% de miscibilidad: 50	% de miscibilidad: 34

Nota. Realizado por autores.

7.6.1.2 Goma Guar (GG) 2500 ppm

Tabla 23.


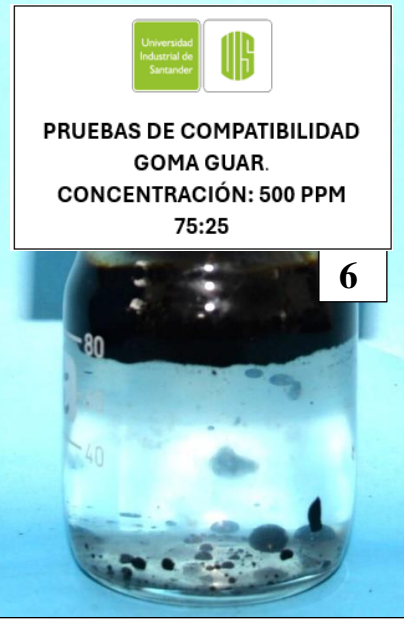
Prueba de compatibilidad Goma Guar (GG) 2500 ppm.

GOMA GUAR (GG)		
Temperatura: 50 °C		
Tiempo: 24 horas		
Concentración: 2500 ppm		
Proporción: 25:75	Proporción: 50:50	Proporción: 75:25
 <p>PRUEBAS DE COMPATIBILIDAD GOMA GUAR. CONCENTRACIÓN: 2500 PPM 25:75</p> 	 <p>PRUEBAS DE COMPATIBILIDAD GOMA GUAR. CONCENTRACIÓN: 2500 PPM 50:50</p> 	 <p>PRUEBAS DE COMPATIBILIDAD GOMA GUAR. CONCENTRACIÓN: 2500 PPM 75:25</p> 
Compatibilidad	Compatibilidad	Compatibilidad
Compatible	Compatible	Compatible
% de Separación:	% de Separación:	% de Separación:
30	44	78
% de miscibilidad:	% de miscibilidad:	% de miscibilidad:
70	56	22

7.6.1.3 Goma Guar (GG) 500 ppm

Tabla 24.

Prueba de compatibilidad Goma Guar (GG) 500 ppm.

GOMA GUAR (GG)		
Temperatura: 50 °C		
Tiempo: 24 horas		
Concentración: 500 ppm		
Proporción: 25:75	Proporción: 50:50	Proporción: 75:25
		
Compatibilidad	Compatibilidad	Compatibilidad
Compatible	Compatible	Compatible
% de Separación:	% de Separación:	% de Separación:
30	50	80
% de miscibilidad:	% de miscibilidad:	% de miscibilidad:
70	50	20

7.6.2 Goma Xantana (XG)

Los resultados obtenidos indican que la Goma Xantana (XG) presentó una adecuada compatibilidad con el crudo en diversas concentraciones y proporciones evaluadas. En particular, en la concentración de 5000 ppm con una proporción de 50:50, se observará una buena interacción entre las fases, con una separación bien definida y sin alteraciones significativas.



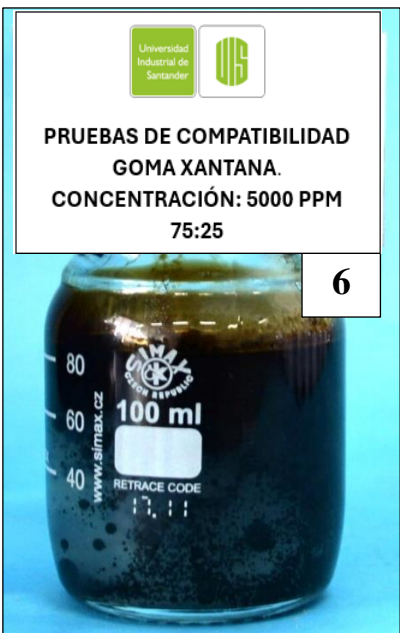
Sin embargo, en la concentración de 5000 ppm, la Goma Xantana (XG) mostró incompatibilidades en la proporciones específicas: 25:75 y 75:25. En estas condiciones, la interfaz no presentó con la claridad esperada, observándose una distribución irregular de las partículas de crudo dentro del gel. La presencia de estas partículas dispersas provocó un aspecto opaco en la mezcla, reduciendo la transparencia y homogeneidad de la solución. Además, la separación de fases fue menos definida en comparación con otras proporciones, lo que sugiere una menor estabilidad en estas condiciones específicas generando emulsión.

A pesar de estas variaciones en la estabilidad de la mezcla, en ninguna de las muestras analizadas se evidencia la formación de precipitados predominantes en la solución. Esto confirma que, aunque ciertas concentraciones y proporciones pueden presentar diferencias en la definición de la interfaz y en la distribución del crudo dentro del gel, la Goma Xantana (XG) mantiene en general una adecuada compatibilidad con el crudo en la mayoría de las proporciones y concentraciones.

7.6.2.1 Goma Xantana (XG) 5000 ppm.

Tabla 25.

Prueba de compatibilidad Goma Xantana (XG) 5000 ppm.

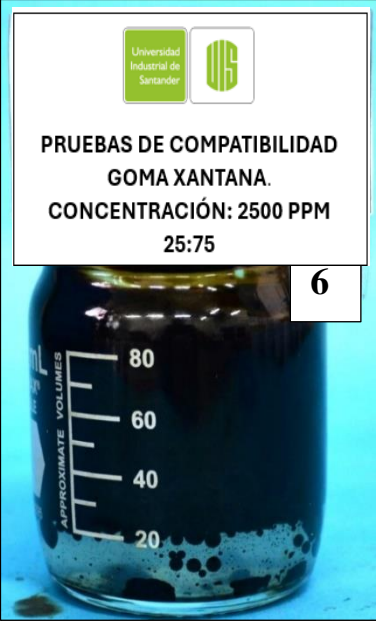

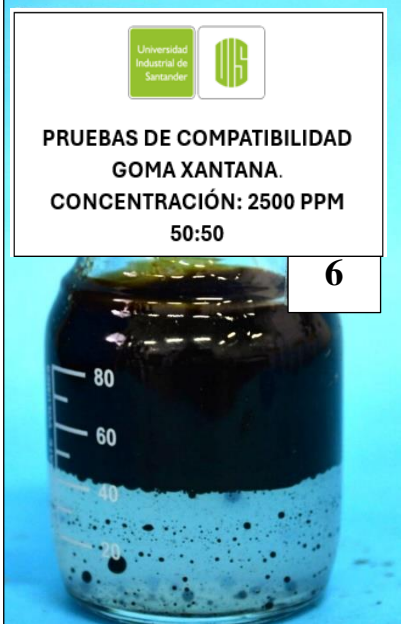

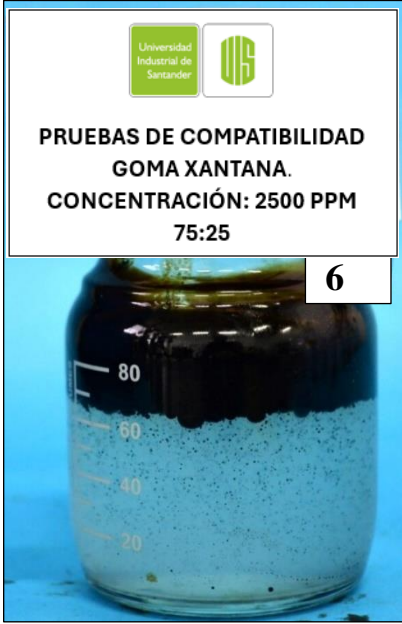

GOMA XANTANA (GX)		
Temperatura: 50 °C		
Tiempo: 24 horas		
Concentración: 5000 ppm		
Proporción: 25:75	Proporción: 50:50	Proporción: 75:25
 <p>PRUEBAS DE COMPATIBILIDAD GOMA XANTANA. CONCENTRACIÓN: 5000 PPM 25:75</p> <p>6</p>	 <p>PRUEBAS DE COMPATIBILIDAD GOMA XANTANA. CONCENTRACIÓN: 5000 PPM 50:50</p> <p>6</p>	 <p>PRUEBAS DE COMPATIBILIDAD GOMA XANTANA. CONCENTRACIÓN: 5000 PPM 75:25</p> <p>6</p>
Compatibilidad Incompatible	Compatibilidad Compatible	Compatibilidad Compatible
% de Separación: 10	% de Separación: 40	% de Separación: 40
% de miscibilidad: 90	% de miscibilidad: 60	% de miscibilidad: 60

Nota. Realizado por autores.

7.6.2.2 Goma Xantana (XG) 2500 ppm

Tabla 26.


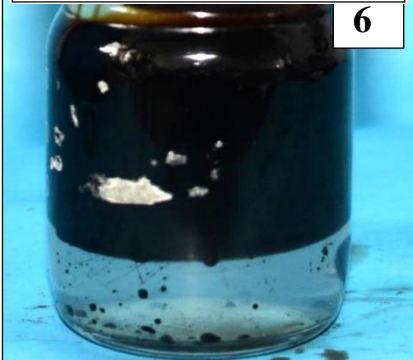

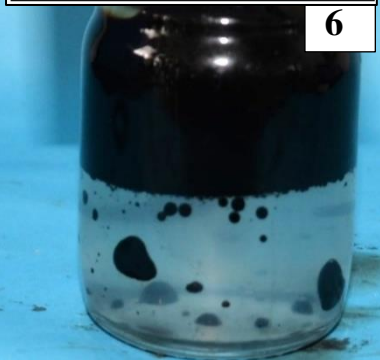


Prueba de compatibilidad Goma Xantana (XG) 2500 ppm.

GOMA XANTANA (GX)		
Temperatura: 50 °C		
Tiempo: 24 horas		
Concentración: 5000 ppm		
Proporción: 25:75	Proporción: 50:50	Proporción: 75:25
 <p>  PRUEBAS DE COMPATIBILIDAD GOMA XANTANA. CONCENTRACIÓN: 2500 PPM 25:75 </p> <p>6</p>	 <p>  PRUEBAS DE COMPATIBILIDAD GOMA XANTANA. CONCENTRACIÓN: 2500 PPM 50:50 </p> <p>6</p>	 <p>  PRUEBAS DE COMPATIBILIDAD GOMA XANTANA. CONCENTRACIÓN: 2500 PPM 75:25 </p> <p>6</p>
<p>Compatibilidad Compatible</p>	<p>Compatibilidad Compatible</p>	<p>Compatibilidad Compatible</p>
<p>% de Separación: 18</p>	<p>% de Separación: 40</p>	<p>% de Separación: 65</p>
<p>% de miscibilidad: 82</p>	<p>% de miscibilidad: 60</p>	<p>% de miscibilidad: 35</p>

7.6.2.3 Goma Xantana (XG) 500 ppm

Tabla 27.

Prueba de compatibilidad Goma Xantana (XG) 500 ppm.

GOMA XANTANA (GX)		
Temperatura: 50 °C		
Tiempo: 24 horas		
Concentración: 5000 ppm		
Proporción: 25:75	Proporción: 50:50	Proporción: 75:25
 <p>PRUEBAS DE COMPATIBILIDAD GOMA XANTANA. CONCENTRACIÓN: 500 PPM 25:75</p> 	 <p>PRUEBAS DE COMPATIBILIDAD GOMA XANTANA. CONCENTRACIÓN: 500 PPM 50:50</p> 	 <p>PRUEBAS DE COMPATIBILIDAD GOMA XANTANA. CONCENTRACIÓN: 500 PPM 75:25</p> 
Compatibilidad Compatible	Compatibilidad Compatible	Compatibilidad Compatible
% de Separación: 20	% de Separación: 40	% de Separación: 65
% de miscibilidad: 80	% de miscibilidad: 60	% de miscibilidad: 35

8. Conclusiones

Las pruebas de interacción fluido-fluido (mojabilidad visual, detergencia, formación de sludge, rompimiento de emulsiones, olimetría y compatibilidad) aplicadas en esta investigación, permitieron una evaluación más representativa del comportamiento de las soluciones poliméricas en procesos EOR. Su incorporación complementa la norma API RP 63, mejorando la selección del tipo y concentración del polímero.

El daño a la formación que puede generarse por las soluciones poliméricas de Goma Xantana y Goma Guar es mínimo cuando se evalúan con fluidos representativos del yacimiento. Ambas soluciones no generaron precipitados, mantuvieron la mojabilidad en medio acuoso y mostraron buena capacidad de limpieza, lo que confirma su potencial de aplicación en procesos de recuperación mejorada de petróleo (EOR).

La Goma Guar (GG), en concentraciones de 2500 ppm y 500 ppm, presentó un mejor comportamiento en pruebas como mojabilidad visual, detergencia y compatibilidad, lo que, a diferencia de la Goma Xantana, la posiciona como una alternativa más eficiente y sostenible para condiciones operativas en procesos de recuperación mejorada de petróleo (EOR).

9. Recomendaciones

La selección del polímero debe realizarse según las necesidades específicas de cada aplicación.

Se recomienda usar un preservante en la Goma Guar (GG) en futuras investigaciones, debido a su rápida fermentación, evaluado su efecto en yacimiento y así prolongar la vida útil del producto.

La prueba de rompimiento de emulsión debe realizarse a menos de 14.000 RPM para facilitar la visualización del rompimiento de los polímeros.

Se recomienda estudiar el comportamiento a diferentes velocidades que sean características o similares al fenómeno en el yacimiento.

10. Referencias bibliográficas

- 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. In *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* (Vol. 10, Issue 5, pp. 1933–1948). Springer. <https://doi.org/10.1007/s13202-020-00837-0>
- Biopolímeros En, Y., De, P., Químico, R., Rosmar, A., Arocha, B., Escobar, S. J., Doctora, L., & Químicas, C. (n.d.). *POLÍMEROS SINTÉTICOS*.
- Born, K., L. V., & B. P. (2012). *Xanthan*. 259–291.
- Bourdarot, G., & Ghedan, S. (2011). *SPE 148323 Modified EOR Screening Criteria as Applied to a Group of Offshore Carbonate Oil Reservoirs*. <http://onepetro.org/SPERCSC/proceedings-pdf/11RCSC/All-11RCSC/SPE-148323-MS/1678739/spe-148323-ms.pdf/1>
- Carcoana, A. (1992). *Applied enhanced oil recovery*. Prentice Hall.
- Choppe, E., Puaud, F., Nicolai, T., & Benyahia, L. (2010). Rheology of xanthan solutions as a function of temperature, concentration and ionic strength. *Carbohydrate Polymers*, 82(4), 1228–1235. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.06.056>
- Cuenca y Cóndor. (2016). *Diseño experimental de una solución polimérica para mejorar la relación de movilidad de los fluidos en un yacimiento previo a la implementación de un proyecto piloto de recuperación mejorada de petróleo*. https://www.researchgate.net/publication/320993104_Disenio_experimental_de_una_solucion_polimerica_para_mejorar_la_relacion_de_movilidad_de_los_fluidos_en_un_yacimiento

_previo_a_la_implementacion_de_un_proyecto_piloto_de_recuperacion_mejorada_de_petro
ol

Dário, A. F., Hortêncio, L. M. A., Sierakowski, M. R., Neto, J. C. Q., & Petri, D. F. S. (2011). The effect of calcium salts on the viscosity and adsorption behavior of xanthan. *Carbohydrate Polymers*, 84(1), 669–676. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.12.047>

Ecopetrol S.A. (2014). *Dirección de Relacionamento con el Inversionista Ecopetrol presenta sus resultados para el primer trimestre del año 2014*. www.ecopetrol.com.co

Espinosa Carlos, K. J. (2014). *Técnicas de recobro y recobro mejorado en yacimientos con crudos livianos, pesados y extra-pesados*.

Gallino, G., Guarneri, A., Maglione, R., Nunzi, P., Xiao, L., & Agip Division, E. S. P. A. /. (1999). *New Formulations of Potassium Acetate and Potassium Formate Polymer Muds Greatly Improved Drilling and Waste Disposal Operations in South Italy*. <http://onepetro.org/DC/article-pdf/14/01/64/2589653/spe-55055-pa.pdf/1>

Garcó Âa-Ochoa, F., Santos, V. E., Casas, J. A., & Go Âmez, E. (n.d.). *Xanthan gum: production, recovery, and properties*.

Ghosh, K., & Maiti, S. N. (1997). Melt rheological properties of silver-powder-filled polypropylene composites. *Polymer - Plastics Technology and Engineering*, 36(5), 703–722. <https://doi.org/10.1080/03602559708000656>

Hasan, A. M. A., & Abdel-Raouf, M. E. (2018). Applications of guar gum and its derivatives in petroleum industry: A review. In *Egyptian Journal of Petroleum* (Vol. 27, Issue 4, pp. 1043–1050). Egyptian Petroleum Research Institute. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.03.005>

- Hernán, R., García, C., & Daza Ibagué, J. A. (2022). *TECNOLOGÍAS DE INYECCIÓN DE POLÍMERO HPAM: REVIEW COLOMBIA*.
<https://oilproduction.net/reservorios/eor/item/3700-eorcolombia#:~:text=Este%20art%C3%ADculo%20es%20una%20revisi%C3%B3n%20de%20los%20art%C3%ADculos,pol%C3%ADmero%20HPAM%20ejecutadas%20en%20diferentes%20campos%20del%20pa%C3%ADs.>
- Holzwarth, G., & Prestridge, E. B. (1977). Multistranded Helix in Xanthan Polysaccharide. In *New Series* (Vol. 197, Issue 4305).
- Iraima J. Fernández. (2019). *POLÍMEROS EN SOLUCIÓN Y APLICACIÓN DE LOS POLÍMEROS EN LA INDUSTRIA PETROLERA*. <https://reviberpol.org/wp-content/uploads/2019/08/previos-fernandez.pdf>
- Jang, H. Y., Zhang, K., Chon, B. H., & Choi, H. J. (2015). Enhanced oil recovery performance and viscosity characteristics of polysaccharide xanthan gum solution. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 21, 741–745. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.04.005>
- José Carmona. (2015). *REOLOGÍA DE DISPERSIONES ACUOSAS DE GOMA XANTANA DE PRESTACIONES AVANZADAS FACULTAD DE QUÍMICA*.
- Kaith, B. S., Sharma, R., & Kalia, S. (2015). Guar gum based biodegradable, antibacterial and electrically conductive hydrogels. *International Journal of Biological Macromolecules*, 75, 266–275. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.01.046>
- Littmann, W. (1988). *Polymer Flooding*. Elsevier Science.
- Luis, V. (2008). *INYECCIÓN DE POLÍMEROS EN YACIMIENTOS PETROLEROS COMO MÉTODO DE RECUPERACIÓN MEJORADA*. [UNIVERSIDAD NACIONAL

AUTÓNOMA DE MÉXICO.].

http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/7997/Tesis_Completa.pdf?sequence=1

Mahto, V., & Sharma, V. P. (2004). Rheological study of a water based oil well drilling fluid.

Journal of Petroleum Science and Engineering, 45(1–2), 123–128.

<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2004.03.008>

MI SWACO. (2001). *MANUAL DE FLUIDOS DE PERFORACION*.

[https://es.scribd.com/document/685689085/Mtorres1-MI-Swaco-Ingenieria-de-](https://es.scribd.com/document/685689085/Mtorres1-MI-Swaco-Ingenieria-de-Lodos#:~:text=Mtorres%20-%20MI%20Swaco%20-%20Ingenieria%20de%20Lodos)

[Lodos#:~:text=Mtorres%20-%20MI%20Swaco%20-%20Ingenieria%20de%20Lodos](https://es.scribd.com/document/685689085/Mtorres1-MI-Swaco-Ingenieria-de-Lodos#:~:text=Mtorres%20-%20MI%20Swaco%20-%20Ingenieria%20de%20Lodos)

Milas, M., & Rinaudo, M. (1979). Conformational investigation on the bacterial polysaccharide

xanthan. *Carbohydrate Research*, 76(1), 189–196. [https://doi.org/10.1016/0008-](https://doi.org/10.1016/0008-6215(79)80017-8)

[6215\(79\)80017-8](https://doi.org/10.1016/0008-6215(79)80017-8)

MOORHOUSE, R., WALKINSHAW, M. D., & ARNOTT, S. (1977). *Xanthan Gum—Molecular*

Conformation and Interactions (pp. 90–102). <https://doi.org/10.1021/bk-1977-0045.ch007>

Mudgil, D., Barak, S., & Khatkar, B. S. (2014). Guar gum: Processing, properties and food

applications - A Review. In *Journal of Food Science and Technology* (Vol. 51, Issue 3, pp.

409–418). <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0522-x>

Muhammed, N. S., Haq, M. B., Al-Shehri, D., Rahaman, M. M., Keshavarz, A., & Zakir Hossain,

S. M. (2020). Comparative study of green and synthetic polymers for enhanced oil recovery.

In *Polymers* (Vol. 12, Issue 10, pp. 1–32). MDPI AG.

<https://doi.org/10.3390/polym12102429>

- Nieto, L. O. B. (2016). *EVALUACIÓN TÉCNICO FINANCIERA PARA UN PROYECTO DE INYECCIÓN DE POLÍMEROS EN EL BLOQUE RIO ARIARI EN LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA DE YACIMIENTOS*.
<https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/626>
- Palaniraj, A., & Jayaraman, V. (2011). Production, recovery and applications of xanthan gum by *Xanthomonas campestris*. In *Journal of Food Engineering* (Vol. 106, Issue 1, pp. 1–12).
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.03.035>
- Pavia, D. L. , L. G. M. , K. G. S. , & V. J. R. (2015). *Introduction to Spectroscopy*. *Cengage Learning*.
- Pelletier, E., V. C., M. J., & W. P. A. (2001). 22. *Estudio reológico de la transición conformacional orden-desorden de la goma xantana _ Solicitar PDF*.
- Petri, D. F. S. (2015). Xanthan gum: A versatile biopolymer for biomedical and technological applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(23).
<https://doi.org/10.1002/app.42035>
- polyexcel. (2021, April 8). *Polímero biodegradable: una alternativa sostenible*.
- Prajapati, V. D., Jani, G. K., Moradiya, N. G., Randeria, N. P., Nagar, B. J., Naikwadi, N. N., & Variya, B. C. (2013). Galactomannan: A versatile biodegradable seed polysaccharide. In *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 60, pp. 83–92). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2013.05.017>
- Ramos, F. (2020). *Estudio del comportamiento reológico de la goma de celulosa, goma xantana y goma guar y sus interacciones en mezclas binarias y ternarias en disoluciones acuosas a*

diferentes condiciones del medio [Universidad Nacional de Colombia].

<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78486>

Recommended Practices for Evaluation of Polymers Used in Enhanced Oil Recovery Operations (1990).

Robert M. Silverstein, Francis X. Webster, David J. Kiemle, & David L. Bryce. (2014). *Spectrometric Identification of Organic Compounds* (8th ed.).

Roldan. (2015). UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA “CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DEL HIDROCOLOIDE PROVENIENTE DEL NOSTOC (*Nostoc sphaericum* V.).”

Rueda-Beaurregard, J. M., Alegría-Hernández, B. A., Vázquez-Vázquez, L. L., Vargas-González, R. E., López-Martínez, S., Fuentes-Domínguez, I., Lobato-García, C. E., & Morales-Bautista, C. M. (n.d.). Determinación de la gravedad API por los métodos directo e indirecto (picnometría). *Journal of Basic Sciences*, 9(25), 19–26. <http://revistas.ujat.mx/index.php/jobs>

Sileoni, A., María, L., Almandoz, R., & Díaz, I. R. (2015). *Polímeros -Guía didáctica*. <https://www.studocu.com/co/document/universidad-santo-tomas-colombia/ciencia-de-los-materiales/guia-didactica-de-polimeros/13776723>

Standnes, D. C., & Skjevraak, I. (2014). Literature review of implemented polymer field projects. In *Journal of Petroleum Science and Engineering* (Vol. 122, pp. 761–775). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.08.024>

Thombare, N., Jha, U., Mishra, S., & Siddiqui, M. Z. (2016). Guar gum as a promising starting material for diverse applications: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 88, 361–372. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.04.001>

- Torres, F. G. (2000). *REOLOGÍA DE POLÍMEROS: PARTE I. NOCIONES BÁSICAS Y MODELOS REOLÓGICOS*.
- Wang, Z., Le, X., Feng, Y., & Zhang, C. (2013). The role of matching relationship between polymer injection parameters and reservoirs in enhanced oil recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, *111*, 139–143. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.07.011>
- Wientjes, R. H. W., Duits, M. H. G., Jongschaap, R. J. J., & Mellema, J. (2000). Linear rheology of guar gum solutions. *Macromolecules*, *33*(26), 9594–9605. <https://doi.org/10.1021/ma001065p>
- Zhou, G., W. J. L., & C. C. J. (2000). 23. *Temperature dependence of the viscosity of highle starch-filled poly*. <https://sci-hub.st/10.1007/s003970000096>