

**EVALUACIÓN DEL USO DE ENZIMAS EMPLEADAS EN EL SISTEMA
ROMPEDOR DE REVOQUE PARA LA DEGRADACIÓN DE POLÍMEROS
PRESENTES EN EL FLUIDO DE PERFORACIÓN DRILL-IN A ESCALA
LABORATORIO**

**MAYRA ALEJANDRA BALLESTEROS GUIO
JULIETH MARCELA JARA ROMERO**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2016**

**EVALUACIÓN DEL USO DE ENZIMAS EMPLEADAS EN EL SISTEMA
ROMPEDOR DE REVOQUE PARA LA DEGRADACIÓN DE POLÍMEROS
PRESENTES EN EL FLUIDO DE PERFORACIÓN DRILL-IN A ESCALA
LABORATORIO**

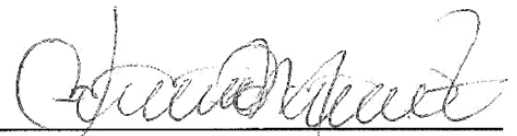
**MAYRA ALEJANDRA BALLESTEROS GUIO
JULIETH MARCELA JARA ROMERO**

**Proyecto integral de grado para optar el título de:
INGENIERO QUÍMICO**

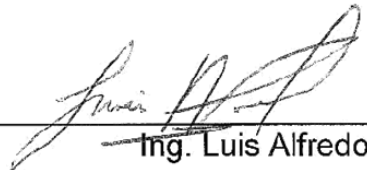
**Director
MARIO ALBERTO JARA ROMERO
Ingeniero de Petróleos**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2016**

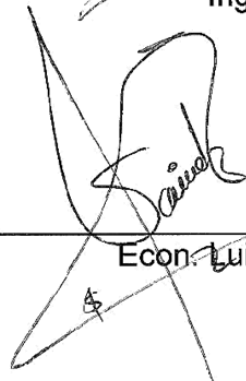
Nota de aceptación



Ing. Edgar Fernando Moreno Torres
Presidente del Jurado



Ing. Luis Alfredo Pérez
Jurado



Econ. Luis Jaime López Díez
Jurado

Bogotá, D.C., Noviembre de 2016

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro.

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos.

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados.

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Secretario General.

Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA-PEÑA

Decano Facultad de Ingenierías.

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de Ingeniería Química.

Ing. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIERREZ

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo de docentes no son responsables por los criterios ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

Quiero agradecer a Dios por guiarme siempre hacia el camino correcto y darme la sabiduría para culminar esta etapa de la vida. A mis padres quienes me acompañaron en todo momento, me brindaron la oportunidad de crecer profesionalmente, por su amor y confianza absoluta. A mi hermano por su compañía en este largo camino, por su colaboración y su interés en mí para verme cumplir este sueño. A mi novio por alegrar cada uno de mis días, estar junto a mí y ser un apoyo incondicional en este largo camino. A mis amigos, a quienes conocí durante la carrera, y me llenaron de conocimientos, en especial a mi compañera de trabajo de grado quien fue fundamental para que finalizáramos juntas esta etapa.

Julieth Marcela Jara Romero.

Primero quiero agradecerle a DIOS, quien ha sido mi todo en este camino, y quien me puso aquí. a mi MAMA que ha sido mi guía en esta lucha, mi admiración, mi soporte. A mi PAPA que siempre estuvo apoyándome y dando sus sabios consejos. A mis hermanos, sin ellos no tendría las fuerzas que tuve, para luchar cada día en este camino. Gracias familia por siempre creer en mí.

A mi novio, nadie más que él sabe lo que luche por llegar acá, fue todo en este camino, no solo fue mi apoyo emocional sino intelectual. A mi compañera, que fue un apoyo incondicional, fue la más fuerte en este camino, a su hermano, ingeniero, a mis amigos, familia y demás!!

No fue un camino fácil, pero llego la recompensa de tantos esfuerzos, sin duda no lo hubiera logrado sin el granito de arena de cada uno de ellos

Mayra Alejandra Ballesteros Guio

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este proyecto de grado quieren manifestar su agradecimiento a:

Lo más importante es agradecer a Dios, por brindarnos la sabiduría necesaria durante la elaboración de este proyecto de grado, porque de la mano con él todo es posible.

A nuestros padres, por brindarnos la posibilidad de obtener un título profesional, con cariño, amor y apoyo incondicional.

A la empresa National Oilwell Varco (NOV), por darnos la oportunidad de plantear y desarrollar el proyecto de investigación con todo el apoyo posible, por el préstamo de sus laboratorios, equipos, materiales y personal para el desarrollo del proyecto.

Al Ingeniero y director del proyecto Mario Alberto Jara Romero, Field Service Coordinator de National Oilwell Varco (NOV) por la orientación, dedicación, asesorías y recomendaciones que nos brindó en el transcurso del proyecto.

Al ingeniero Daniel Felipe Duarte Algarra, OilField And Productivity Engineer de National Oilwell Varco (NOV), por la asesoría y dedicación brindada a la elaboración del proyecto.

A la Universidad de América, por formarnos como ingenieros y darnos las bases para desarrollar el proyecto.

Y a todas las personas que de una u otra forma colaboraron para que el desarrollo de este proyecto fuera posible su realización.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	20
OBJETIVOS	22
1. GENERALIDADES DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN DRILL-IN Y LOS SISTEMAS ROMPEDORES DE REVOQUE	23
1.1 GENERALIDADES DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN DRILL-IN	23
1.1.1 Definición de sistema DRILL-IN	23
1.1.2 Características del sistema DRILL-IN	23
1.1.3 Componentes del sistema DRILL-IN	24
1.1.4 Funciones del fluido de perforación	26
1.1.5 Caracterización de las propiedades del fluido de perforación DRILL-IN	27
1.1.5.1 Densidad	28
1.1.5.2 Viscosidad Embudo	28
1.1.5.3 Reología	29
1.1.5.3.1 Viscosidad plástica (PV)	29
1.1.5.3.2 Punto cedente (YP)	29
1.1.5.3.3 Resistencia o fuerza de gel	30
1.1.5.4 Filtrado API	30
1.1.5.5 pH	30
1.1.5.6 Porcentaje sólido y líquido	31
1.1.5.7 Filtrado PPT	31
1.1.5.8 Calcio	32
1.1.5.9 Cloruros	32
1.1.5.10 Alcalinidad	33
1.1.5.10.1 Alcalinidad de lodo (PM)	33
1.1.5.10.2 Alcalinidad de filtrado	33
1.1.5.11 Prueba de azul de metileno MBT	34
1.2 GENERALIDADES DEL SISTEMA ROMPEDOR DE REVOQUE	35
1.2.1 Definición	35
1.2.2 Características de los sistemas rompedores	36
1.2.3 Aplicaciones de los sistemas rompedores de revoque	36
1.2.4 Procedimiento para la aplicación del rompedor de revoque	36
2. SELECCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LAS ENZIMAS UTILIZADAS EN LA FORMULACIÓN DEL SISTEMA ROMPEDOR DE REVOQUE	40
2.1 FORMULACIÓN DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN DRILL-IN	40
2.2 FORMULACIÓN DEL SISTEMA ROMPEDOR DE REVOQUE	43
2.3 PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCIÓN DE CONCENTRACIONES DE CADA ENZIMA	45

2.4 RESULTADOS Y ANÁLISIS CUALITATIVO	46
2.4.1 Prueba de yodo para identificar presencia de polímeros	48
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE LOS BREAKER CON RESPECTO A LA REMOCIÓN EFECTIVA DEL REVOQUE	52
3.1 DETERMINACIÓN DE RECUPERACIÓN DE FLUJO INICIAL Y DAÑO DE FORMACIÓN GENERADO POR EL REVOQUE	52
3.1.1 Determinación de la capacidad de flujo de disco limpio	52
3.1.2 Determinación del caudal inicial, % de recuperación y % de daño para disco con revoque	55
3.1.3 Determinación del caudal inicial, % de recuperación y % de daño para los discos en remojo con el breaker	58
3.2 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA PRUEBA DE RETORNO DE FLUJO	62
3.2.1 Análisis de los resultados obtenidos en el retorno de flujo.	62
3.2.2 Análisis visual de los discos sumergidos en el breaker	63
3.2.3 Análisis prueba de microscopía	64
3.2.4 Análisis de los tiempos de ruptura.	67
3.2.5 Breaker con la mejor eficiencia, selección de la mejor enzima	68
4. ANÁLISIS DE COSTOS ASOCIADO AL USO DE LAS ENZIMAS UTILIZADAS EN LA FORMULACIÓN DEL BREAKER.	69
4.1 ANÁLISIS DE COSTOS	69
4.1.1. Costos asociados a la elaboración del fluido de perforación	69
4.1.2. Costos por libra asociados al sistema rompedor de revoque	70
5. CONCLUSIONES	75
6. RECOMENDACIONES	76
BIBLIOGRAFÍA	77
ANEXOS	80

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Granulometría del Carbonato de Calcio	24
Cuadro 2. Materiales usados para la formulación de fluidos Drill-in	24
Cuadro 3. Selección de salmuera para el rango de densidades del sistema DRILL-IN	25
Cuadro 4. Pruebas de caracterización para un fluido de perforación	35
Cuadro 5. Aditivos para el sistema Drill-In	40
Cuadro 6. Caracterización del fluido de perforación Drill-in	42
Cuadro 7. Residuo del cake tratado	46
Cuadro 8. Comportamiento de la enzima a una concentración del 7%	48
Cuadro 9. Cake final con tintura de yodo	49
Cuadro 10. Análisis visual de los discos	63
Cuadro 11. Microscopía de discos	66

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Concentraciones de los aditivos del fluido DRILL-IN (350ml)	41
Tabla 2. Porcentaje de concentraciones para la formulación del breaker (150ml)	43
Tabla 3. Cantidad de gramos de componente para la formulación del breaker (150ml)	44
Tabla 4. Cantidad de gramos de enzima para la formulación del breaker (150ml)	44
Tabla 5. Concentración seleccionada para cada enzima	51
Tabla 6. Datos disco limpio	55
Tabla 7. Datos disco con cake	58
Tabla 8. Resultados del retorno de flujo para los discos tratados con breaker	61
Tabla 9. Resultados retorno de flujo	61
Tabla 10. Tiempos de ruptura de cada breaker	67
Tabla 11. Selección del disco con el mejor comportamiento	68
Tabla 12. Costos asociados al diseño del fluido de perforación.	69
Tabla 13. Costos del fluido de perforación.	70
Tabla 14. Costos asociados al diseño del rompedor de revoque.	70
Tabla 15. Costos implementados en el laboratorio para 150ml con la enzima 1, variando la concentración en tres porcentajes.	71
Tabla 16. Costos implementados en el laboratorio para 150ml con la enzima 2, variando la concentración en tres porcentajes.	71
Tabla 17. Costos implementados en el laboratorio para 150ml con la enzima 3, variando la concentración en tres porcentajes.	71
Tabla 18. Costos implementados en el laboratorio para 150ml con la enzima 4, variando la concentración en tres porcentajes.	71
Tabla 19. Variación de costos con respecto a la variación en la concentración de la enzima para preparar 150ml	72
Tabla 20. Costos asociados a un barril de breaker en campo	74

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Resultados obtenidos del retorno de flujo	62
Gráfica 2. Costos para 150ml de breaker variando la concentración de cada enzima.	72
Gráfica 3. Costos totales del breaker para las concentraciones seleccionadas de cada enzima.	73

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Balanza de lodo	28
Figura 2. Embudo Marsh	28
Figura 3. Viscosímetro Fann 35A	29
Figura 4. Filtro prensas API	30
Figura 5. Medidor de pH	31
Figura 6. Retorta	31
Figura 7. Filtro prensa PPT	32
Figura 8. Medición de calcio	32
Figura 9. Medición de cloruros	33
Figura 10. Medición alcalinidad PM	33
Figura 11. Medición alcalinidad Pf	34
Figura 12. Medición alcalinidad Mf	34
Figura 13. Prueba azul de metileno	34
Figura 14. Perforación hasta profundidad deseada	37
Figura 15. Empaques y filtros	37
Figura 16. Salmuera	38
Figura 17. Aplicación del sistema rompedor de revoque.	38
Figura 18. Aplicación del sistema rompedor de revoque.	39
Figura 19. Mezcla de aditivos	41
Figura 20. Cake o revoque	45
Figura 21. Baño maría para cada solución de breaker.	46
Figura 22. Coloración de yodo en contacto con almidón, polímero y carbonato de calcio.	49
Figura 23. Coloración del cake sin ser tratado con el breaker	49
Figura 24. Disco de Aloxita	53
Figura 25. Posicionamiento del disco	54
Figura 26. Prueba de retorno de flujo para disco con cake	54
Figura 27. Llenado del beaker hasta 200ml	55
Figura 28. Ubicación del disco y llenado de la celda	57
Figura 29. Equipo PPT con presión diferencial	57
Figura 30. Limpieza de la celda del PPT.	57
Figura 31. Celda PPT con cake en remojo	60
Figura 32. Limpieza de la celda retirando el breaker sobrante	60
Figura 33. Microscopio de barrido electrónico	65
Figura 34. Secado de los discos	65
Figura 35. Análisis de la muestra del disco	65

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Viscosidad plástica	29
Ecuación 2. Punto cedente	30
Ecuación 3. Conversión volumen a peso	44
Ecuación 4. Caudal inicial	55
Ecuación 5. Porcentaje de recuperación	58
Ecuación 6. Porcentaje de daño	58

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Costos y cantidades implementadas en el laboratorio para 150ml para la enzima nov1 variando la concentración en tres porcentajes.	81
Anexo B. Costos y cantidades implementadas en el laboratorio para 150ml para la enzima nov2 variando la concentración en tres porcentajes.	82
Anexo C. Costos y cantidades implementadas en el laboratorio para 150ml para la enzima nov3 variando la concentración en tres porcentajes.	83
Anexo D. Costos y cantidades implementadas en el laboratorio para 150ml para la enzima nov4 variando la concentración en tres porcentajes.	84

GLOSARIO

AGENTE PUENTEANTE: materiales usados para sellar gargantas de poro y disminuir la invasión de lodo y/o filtrado de lodo a la formación. Debe ser soluble en ácido para que pueda ser removido

COMPLETAMIENTO: conjunto de trabajos que se realizan en un pozo después de la perforación para dejarlos en buenas condiciones y poder producir eficientemente. Puede incluir revestimiento con tubería lisa o ranurada, realización de empaques con grava o cañoneo del revestimiento y finalmente la instalación de la tubería.

DISCO DE ALOXITA: núcleo sintético compuesto de óxido de aluminio cristalizado que sirven para evaluar la tasa de filtración.

ENZIMA: las enzimas son moléculas grandes de proteínas, y estas se componen de una cadena de bloques de construcción llamados aminoácidos. Son utilizadas en el breaker específicamente para degradar polímeros o almidones, trabajan a bajas y altas temperaturas, no son corrosivas y son de acción completa.

FORMACIÓN: unidad que define cuerpos de rocas caracterizados por unas propiedades comunes (composición y estructura) que las diferencian de las otras que están cerca.

FORMACIÓN DE INTERÉS: formación porosa y permeable, que se cree, contiene hidrocarburos.

FLUIDO DE PERFORACIÓN (Lodo de perforación): fluido base agua o aceite cuyas propiedades han sido modificadas por sólidos comerciales y/o nativos, disueltos y/o suspendidos. Se usa para hacer circular los recortes fuera del pozo y cumplir otras funciones durante la perforación de un pozo.

FLUIDO DE PERFORACIÓN DRILL-IN: es un fluido base agua en el que la fase continua puede ser agua o salmuera, se utilizan para perforar las zonas productoras (yacimientos) con el mínimo daño de formación posible no consolidada, o pozos horizontales.

GARGANTA DE PORO: espacio poral pequeño existente en el punto donde se unen dos o más granos de una roca intergranular

LSRV: viscosidad a baja velocidad de corte (Low Shear Rate Viscosity).

RDF: fluido de perforación Drill-in (Reservoir Drill-in Fluid).Un fluido diseñado exclusivamente para la perforación que atraviesa la sección del yacimiento de un pozo.

REVOQUE O CAKE: se genera cuando el fluido de perforación entra en contacto con un zona permeable y la fase continua (líquida) es filtrada hacia los poros de la roca depositando en la cara de la formación una capa compuesta por la fase discontinua (sólidos), que protege la integridad del pozo.

REOLOGÍA: ciencia que trata de la deformación y del flujo de la materia, que sufren los fluidos cuando son sometidos a una fuerza, influyendo en la elasticidad, plasticidad y viscosidad de los fluidos.

ROMPEDOR DE REVOQUE O BREAKER: tratamiento químico compuesto por oxidantes o enzimas, quelantes y ácidos y otros aditivos que remueve el revoque generado por el fluido de perforación en las paredes del pozo y varía su composición dependiendo de las características del mismo.

RESUMEN

Este proyecto se desarrolló en la empresa Naciona IOilwell Varco en donde se evaluó el uso de cuatro enzimas en la formulación de un sistema rompedor de revoque, generado por el fluido de perforación DRILL-IN. Para esto fue necesario formar revoques en laboratorio que se sometieron con los breakers formulados con enzimas para ver cuál fue la capacidad de remoción de cada una de ellas. Para la evaluación se realizó una breve descripción de las generalidades del fluido de perforación DRILL-IN y de los sistemas rompedores de revoque. Se preparó el fluido y se simuló la formación de revoques mediante filtrado API se elaboraron breakers, cada uno con una diferente enzima y variación en su concentración, los demás componentes en la formulación del breaker se dejaron constantes para que la variación en los resultados fuera producto de las enzimas usadas para degradar los polímeros. Dentro de un recipiente que contenía el breaker a la concentración seleccionada, se dejaron en remojo los revoques formados y así se evaluó para cada enzima la capacidad de remoción que proporcionó.

Posteriormente, se generaron revoques en un medio poroso donde se simuló la formación de interés del pozo con los que se evaluaron los breaker con las enzimas a la concentración que se seleccionó para cada una, mediante unas pruebas de retorno de flujo. Lo que se buscó con estas pruebas era determinar si las enzimas removían el daño generado en la formación y permitían restablecer la permeabilidad. Adicionalmente se determinó cuál fue la mejor enzima y se realizó un análisis visual y en microscopio de barrido electrónico a los discos para evaluar la capacidad de remoción y saber cuál disco tenía el espesor más delgado y si el polímero y los sólidos que invaden las gargantas de poro fueron removidos, en donde se pudo observar que la enzima que obtuvo los mejores resultados fue la Nov4.

Finalmente se realizó una evaluación económica sobre el uso de los breakers con las cuatro enzimas comparando los costos y beneficios de la remoción del cake, y se determinó si la opción de incrementar el uso de las enzimas es económicamente rentable teniendo en cuenta que la enzima seleccionada tuvo un costo de \$553 para 150ml a escala laboratorio y llevado a campo un costo de \$586.132 para un barril.

PALABRAS CLAVE: enzima, formación, fluido de perforación, rompedor de revoque, polímero

INTRODUCCIÓN

La industria petrolera se ha visto en la necesidad de adoptar nuevas tecnologías que favorezcan la extracción del petrolero, por esta razón el daño a la formación causado por la formulación incorrecta del fluido de perforación ha sido foco de estudios que tratan de evitar las bajas producciones. Uno de los desafíos para la industria petrolera es perforar pozos sin afectar la permeabilidad de la formación productora, ya que esto permitirá obtener la mayor productividad del pozo. Los fluidos de perforación son uno de los mecanismos que generan daño a la formación y disminuyen la producción futura del pozo.

Para reducir el daño generado a la formación se utilizan técnicas de limpieza como el uso de rompedores de revoque o breakers que se encargan de eliminar los daños causados por el revoque del fluido de perforación. Actualmente se hace uso de enzimas de buen rendimiento que cumplan con su función de remoción de polímeros presentes en el revoque, reemplazando el uso de hipocloritos y/o peróxidos que hacen parte de la formulación en rompedores convencionales que son causantes de problemas de corrosión, de contaminación en el sistema de perforación, genera residuos tóxicos en el medio ambiente y para el personal que lo manipula, los altos costos para el mantenimiento de los equipos todo esto desenlazando en problemas de sobrecostos.

Las condiciones a las que se pueden trabajar las enzimas para evitar su inactividad o su desnaturalización es dentro de un rango de pH de 3 a 7 y las temperaturas de 40° F hasta 230°F para que no haya un mal empleo de ella y la degradación del polímero no sea baja; la enzima no es consumida por lo tanto a pesar de las bajas cantidades de enzima utilizadas la descomposición del polímero está completa.

El proyecto evaluó el desempeño de las enzimas utilizadas en el breaker como degradante del polímero y se probaron únicamente para el fluido de perforación DRILL-IN empleado por la empresa; no contempló el análisis de las cinéticas de las reacciones enzimáticas y se realizó a escala laboratorio, por lo tanto no se probó el aditivo obtenido en una operación real de perforación y no se garantizó que la formulación del breaker fuera mejor que las ya existentes.

Se hace necesario realizar una adecuada remoción de este revoque durante la etapa de terminación o completamiento del pozo, para reducir el daño generado a la formación por eso la limpieza eficiente del pozo es la clave para un alto rendimiento en la producción del yacimiento, eliminando los daños causados por el revoque del fluido de perforación con ayuda del breaker.

Se llevó a cabo el desarrollo del proyecto con el siguiente Objetivo General: evaluar el uso de enzimas empleadas en el sistema rompedor de revoque para la

degradación de los polímeros presentes en el fluido de perforación Drill-in a escala laboratorio. Para cumplir dicho objetivo se establecieron los siguientes Objetivos específicos: establecer las generalidades del fluido de perforación Drill-in y de los sistemas rompedores de revoque; seleccionar la concentración de las enzimas utilizadas en la formulación del rompedor de revoque para la degradación del polímero, determinar el desempeño que tiene cada enzima en el breaker con respecto a la remoción efectiva del revoque mediante desarrollo experimental y realizar el análisis de costos sobre el uso de las enzimas utilizadas en la formulación del breaker.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el uso de enzimas empleadas en el sistema rompedor de revoque para la degradación de los polímeros presentes en el fluido de perforación Drill-in a escala laboratorio

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Establecer las generalidades del fluido de perforación Drill-in y de los sistemas rompedores de revoque.
2. Seleccionar la concentración de las enzimas utilizadas en la formulación del rompedor de revoque para la degradación del polímero.
3. Determinar el desempeño que tiene cada enzima en el breaker con respecto a la remoción efectiva del revoque mediante desarrollo experimental
4. Realizar el análisis de costos sobre el uso de las enzimas utilizadas en la formulación del breaker.

1. GENERALIDADES DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN DRILL-IN Y LOS SISTEMAS ROMPEDORES DE REVOQUE

Los fluidos de perforación tienen una gran importancia en la industria petrolera, puesto que cumplen una variedad de funciones que aseguran que la operación tenga éxito, pero debe ser tratado y removido con una solución que no cause daño a los equipos de perforación debido al uso de químicos fuertes originando problemas de corrosión, por lo tanto es necesario conocer todo lo relacionado al fluido de perforación de yacimiento DRILL-IN y al tratamiento empleado para la remoción de éste.

1.1 GENERALIDADES DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN DRILL-IN

Los fluidos o lodos de perforación de yacimiento son fluidos no dañinos diseñados especialmente para ser usados en la zona del yacimiento. Se formulan para disminuir los daños a la formación, mejorar la limpieza en el pozo y conservar así la productividad de este. Los fluidos de perforación convencionales pueden causar daños graves a los yacimientos productivos

1.1.1 Definición de sistema DRILL-IN. Los sistemas DRILL-IN son fluidos de perforación de yacimiento base agua o base salmuera diseñados y formulados por la compañía National Oilwell Varco, estos cumplen las mismas funciones de un fluido de perforación convencional y al mismo tiempo exhibe características no dañinas para la formación.

1.1.2 Características del sistema DRILL-IN¹. Muchos fluidos pueden ser usados como fluidos de perforación de yacimiento incluyendo los base agua, aceite y sintético. La selección depende de su composición, del tipo de formación, de mecanismo de daño a la formación, método de limpieza y el método de completación. Las características que debe tener un fluido de perforación de yacimiento y que por lo tanto debe tener el sistema DRILL IN son:

- No contener arcillas o materiales densificantes insolubles en ácidos que pueden migrar dentro de la formación y taponar los poros.
- Estar formulado con un viscosificante soluble en ácido, materiales de filtrado y agentes de taponamiento de tamaño apropiado que limiten el filtrado hacia la formación.
- El filtrado debe ser compatible con el fluido de perforación para evitar la formación de precipitaciones se las incrustaciones minerales.
- El filtrado no debe formar emulsiones con fluidos de la formación causando taponamiento.

¹PDVSA. Fluidos de Perforación. Centro Internacional de Educación y Desarrollo (CIED). Caracas. 2002.

- Debe ser formulado con materiales solubles en ácido, agua, solventes, oxidantes que no causen precipitados.

1.1.3 Componentes del sistema DRILL-IN. Los sistemas DRILL-IN tienen un contenido mínimo de sólidos, exhiben propiedades reológicas adecuadas para garantizar la limpieza del pozo y estabilizar arenas poco consolidadas; están diseñados para perforar sin problemas las formaciones productivas que sufren daños causados por los fluidos de perforación convencionales. Usan polímeros para la reología y el control de filtración; solo contienen una cantidad mínima de sólidos no deseados (sólidos de perforación) que se incorporan involuntariamente al sistema como producto del trabajo de la broca y la dispersión de arcilla presentes en la formación y pueden ser densificados adicionando Carbonato de Calcio soluble en ácido de granulometría determinada específicamente (de mármol molido como se describe en el Cuadro 1) para cada yacimiento o mediante el uso de una salmuera de densidad adecuada como fluido base.

Cuadro 1. Granulometría del Carbonato de Calcio²

Carbonato de Calcio	90% por debajo del valor (µm)	50% por debajo del valor (µm)
Malla 200	34 - 36	18 -22
Malla 325	18 -22	10-12
Malla 600	12-14	5-8
Malla 1200	6-8	2-4

Los sistemas DRILL-IN a base de polímeros tienen una alta viscosidad a bajas velocidades de corte (LSRV) en comparación con otros sistemas o fluidos de perforación a base de arcilla, lo que proporciona una buena suspensión de recortes en pozos de alto ángulo (más de 35°) y horizontales y además reduce la erosión de las paredes del pozo en formaciones poco consolidadas. La alta LSRV es crítica no solo para optimizar la limpieza del pozo y la eficiencia de la perforación, sino también para disminuir la invasión del lodo entero hacia la formación. Estos fluidos se formulan generalmente con tipos de materiales que cumplen funciones específicas que se describen en el Cuadro 2:

Cuadro 2. Materiales usados para la formulación de fluidos Drill-in³

Tipo de material	Función
Densificante	Son materiales no tóxicos ni peligrosos, se utilizan para incrementar la densidad del fluido, controlar la presión de formación y evitar derrumbes en las áreas tectónicas.

² NOV Protocolo de pruebas de producto

³PDVSA. Fluidos de Perforación. Centro Internacional de Educación y Desarrollo (CIED). Caracas. 2002.

Cuadro 2. (Continuación)

Tipo de material	Función
Viscosificante	Mejoran la habilidad del fluido para remover los sólidos perforados y suspender el material densificante durante la perforación del pozo.
Controlador de filtrado	Evita el paso de la fase líquida del fluido hacia la formación permeable cuando el fluido es sometido a una presión diferencial.
Controlador de Ph	Encargado de estabilizar el valor de pH para asegurar el alto rendimiento de los otros aditivo, evitar problemas de corrosión y reproducción de bacterias
Controlador de Bacterias	Inhiben o eliminan la reproducción y crecimiento de organismos microscópicos como bacterias, algas y hongos.

Según la nomenclatura utilizada en la compañía para los aditivos utilizados en la formulación del fluido de perforación de yacimiento DRILL-IN, Nov Xan D es una goma xantana clarificada de primera calidad, es el viscosificador primario de los sistemas DRILL IN. Aqua Film es un derivado de almidón y es el agente principal de control de filtrado. NOVCarb es un carbonato de calcio de granulometría determinada, como se describió anteriormente en el Cuadro 1, que se usa como agente puenteante y es soluble en ácido. Las formulaciones de los sistemas DRILL-IN son flexibles y pueden ser adaptadas a los yacimientos específicos, usa agua como fluido base con carbonato de calcio como material densificante para alcanzar un rango de densidades de 8.4 a 11.5 lb/gal; si la aplicación lo requiere se pueden usar varias salmueras para proporcionar un rango de densidades de 8.4 a 14.7 lb/gal sin la adición de sólidos para aumentar la densidad (Cuadro 3). Todos los productos usados en los sistemas DRILL-IN son solubles en ácidos, oxidantes o agua, después de instalar el conjunto de completamiento el procedimiento recomendado consiste en desplazar el fluido sucio con una píldora o bache de fluido sin sólidos, luego romper y degradar el revoque con un oxidante o un rompedor compuesto de enzima y ácido, si es posible, antes de realizar la producción para minimizar los daños potenciales no solo a la formación sino también al ensamblaje.

Cuadro 3. Selección de salmuera para el rango de densidades del sistema DRILL-IN⁴

Densidad (lb/gal)	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Agua dulce									
Cloruro de potasio									
Cloruro de sodio									
Salmuera típica de campo									

⁴ NOV. Selección de salmueras.

Cuadro 3. (Continuación)

Densidad (lb/gal)	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Cloruro de calcio									
Formiato de sodio									
Bromuro de sodio									
Formiato de potasio									
Bromuro de calcio									

1.1.4 Funciones del fluido de perforación⁵

- Remoción de los recortes:** Los recortes de perforación debe ser retirados del pozo a medida que son generados por la broca. Para esto se hace circular un fluido de perforación a través de la sarta de perforación, la broca y el espacio anular formado entre las paredes del hueco y la sarta de perforación, que arrastra y transporta los recortes hasta la superficie. La remoción depende de la forma, tamaño y la densidad de los recortes, del caudal de bombeo del fluido; así como de la densidad y viscosidad del fluido de perforación.
- Control de las presiones de la formación:** Esta función garantiza una operación de perforación segura. A medida que va aumentando la presión de poro de la formación, se agregan materiales densificantes (entre los más comunes están el Carbonato de Calcio, barita y hematita), con el fin de incrementar la densidad del fluido y generar una mayor presión hidrostática en el pozo, lo que permite contrarrestar la presión de poro de la formación y de esta manera evitar que los fluidos de formación (gas, petróleo o agua) entren al agujero mientras se perfora.
- Suspensión y descarga de recortes:** Los fluidos deben mantener suspendidos los recortes de perforación, los aditivos y los materiales densificantes, bajo una gran variedad de condiciones, pero se debe permitir la remoción de los recortes por el equipo del control de sólidos. Los recortes que se sedimentan durante condiciones estáticas pueden causar puentes y rellenos que ocasionan pérdida de circulación o pegas de tubería. El material densificante que se sedimenta, al asentarse, causa grandes variaciones de la densidad del fluido.
- Obtención de las formaciones permeables:** Las formaciones de las cuales se pretende producir hidrocarburos deben ser permeables para que estos puedan ser producidos. Los fluidos deben ser diseñados para depositar sobre

⁵ GONZÁLEZ, Héctor. Análisis y evaluación de la aplicación de tecnología a los fluidos de perforación para el campo gasífero yucal placer, con la finalidad de optimizar el fluido utilizado. Trabajo de grado Ingeniero de petróleos. Caracas, Venezuela. Universidad central de Venezuela. 2003. p. 4-16

la formación un delgado revoque con una permeabilidad baja para mejorar la estabilidad del pozo, minimizar la interacción del fluido de perforación con la formación y evitar numerosos problemas de perforación y producción.

- **Mantener la estabilidad del pozo:** Se deben equilibrar las fuerzas mecánicas (presión y esfuerzo) que actúan sobre el pozo. La composición y propiedades del fluido se deben combinar para que se proporcione un pozo estable hasta el momento en que se introduce y se cementa la tubería de revestimiento.
- **Minimizar los daños de formación:** Se debe mantener protegida la zona productora contra los daños que pueden alterar la productividad del pozo. Esta es la función principal de un fluido de perforación RDF. Se considera daño a la formación cualquier forma de reducción de la permeabilidad natural de la formación productora, que puede ser causada por el fluido o los sólidos de perforación.
- **Enfriamiento y lubricación de la broca y del equipo de perforación:** Las fuerzas mecánicas e hidráulicas generan una considerable cantidad de calor por fricción en la broca y en las zonas donde hay roce (columna de perforación rotatoria y tubería de revestimiento). Al hacerse circular el fluido de perforación se enfría la broca y la tubería de perforación; el efecto lubricante y refrigerante del fluido, reduce los daños y fallos de la broca, los motores de fondo y componentes de la sarta de perforación
- **Control de la corrosión:** Los gases generados como el dióxido de carbono, el oxígeno y el sulfuro de hidrógeno pueden causar graves problemas de corrosión tanto en la superficie como en el fondo del pozo. El fluido de perforación controla la corrosión y lo mantiene a un nivel aceptable porque protege las superficies metálicas contra la corrosión y no daña los componentes de caucho o elastómeros
- **Facilitar la cementación y la completación:** El fluido de perforación debe permitir que la tubería de revestimiento pueda ser introducida y cementada de manera eficaz. Durante la introducción de la tubería de revestimiento, el lodo debe permanecer fluido para que se produzca ninguna pérdida de circulación y luego debe ser desplazado por los fluidos de limpieza.

1.1.5 Caracterización de las propiedades del fluido de perforación DRILL-IN⁶.

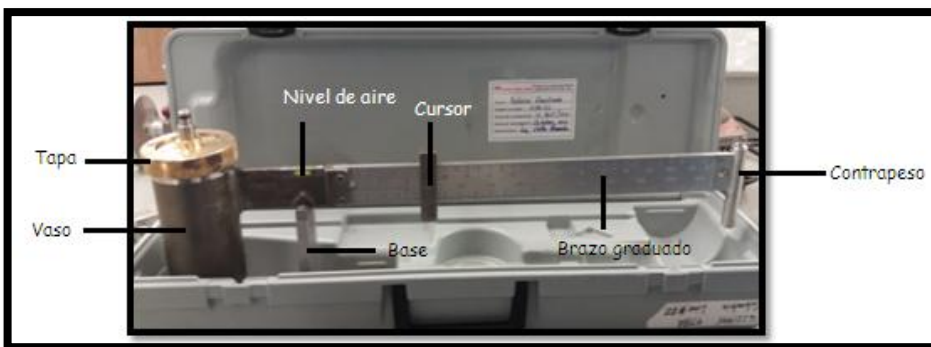
Las propiedades de los fluidos se deben mantener durante la perforación de un pozo, por esta razón se realiza una serie de pruebas de laboratorio para analizar las propiedades físicas y químicas de acuerdo al instituto americano del petróleo

⁶PDVSA. Fluidos de Perforación. Centro Internacional de Educación y Desarrollo (CIED). Caracas. 2002. Unidad 2, tema1.

(API)⁷ donde se describe las pruebas y los parámetros que se deben tener en cuenta para llevar a cabo cada una de ellas.

1.1.5.1 Densidad. Es llamada comúnmente peso del lodo, tiene como función principal mantener los fluidos de la formación en su sitio, se expresa por lo general en libras por galón (lb/ gal), significa el peso por volumen unitario y se mide pesando el fluido con una balanza de lodo para que las mediciones se obtengan con un margen de error de 0,1lb/gal. La balanza de lodo (Figura 1) se compone principalmente de una base sobre la que reposa un brazo graduado con un vaso, tapa, cursor, nivel de burbuja de aire, contrapeso.

Figura 1. Balanza de lodo



1.1.5.2 Viscosidad Embudo. Se determina con el embudo Marsh (Figura 2). Se expresa en segundos por cuarto de galón. Se mide manteniendo el embudo en posición vertical, se tapa el orificio de la parte inferior del embudo con un dedo y se vierte la muestra del lodo, se retira el dedo del orificio y se mide el tiempo que tarda el lodo en llenar el vaso hasta el nivel (cuarto de galón). Si el fluido exhibe un cambio brusco en la viscosidad puede estar contaminado.

Figura 2. Embudo Marsh



⁷ API. Manual de Fluidos de Perforación. Instituto Americano del Petróleo. Texas, USA. 2001

1.1.5.3 Reología. Estudia como la materia se deforma y fluye. El medidor de viscosidad-gravedad Fann 35A (Figura 3) se utiliza para completar la información obtenida por el viscosímetro Marsh en lo que se refiere a viscosidad plástica, punto cedente y los esfuerzos de gel (iniciales y cíclicos) y obtiene velocidades de 600, 300, 200, 100, 6 y 3 RPM.

Figura 3. Viscosímetro Fann 35A



Para la determinación de punto cedente y viscosidad plástica se coloca la muestra de lodo en un vaso térmico y se ajusta al nivel trazado, se gradúa a una temperatura de 120°F y se agita, se arranca el motor y se coloca el conmutador en velocidad de 600RPM esperando que se estabilice e indique un valor constante, se ajusta el conmutador nuevamente a velocidad de 300RPM hasta que haya una estabilidad para registrar el dato.

1.1.5.3.1 Viscosidad plástica (PV). Resulta de la fricción mecánica entre líquidos, sólidos y sólido-líquido. Esta viscosidad depende de la concentración, forma y tamaño de los sólidos presentes en el fluido. Si hay una baja viscosidad plástica y un alto punto cedente se permite una limpieza efectiva en el pozo y una alta tasa de penetración. Se calcula en centipoises (cP) con la lectura a 600RPM (θ_{600}) y 300RPM (θ_{300}) con la Ecuación 1:

Ecuación 1. Viscosidad plástica

$$PV(cP) = \theta_{600} - \theta_{300}$$

Fuente: API. Manual de Fluidos de Perforación.
Instituto Americano del Petróleo. Dallas, USA.
2001. Cap 5

1.1.5.3.2 Punto cedente (YP). Es la fuerza que ayuda a mantener el fluido estable una vez entra en movimiento. Está relacionado con la capacidad de limpieza del hoyo, si hay contaminantes solubles como carbonato, calcio y sólidos reactivos,

puede haber un incremento del punto cedente. Se calcula en $lb/100pies^2$ con el valor de indicación a 300RPM menos el valor de viscosidad plástica (centipoise), de acuerdo a la Ecuación 2:

Ecuación 2. Punto cedente

$$YP(lb/100ft^2) = \theta 300 - PV$$

Fuente: API. Manual de Fluidos de Perforación.
Instituto Americano del Petróleo. Dallas, USA.
2001. Cap. 5

1.1.5.3 Resistencia o fuerza de gel. Es una medida de atracción física bajo condiciones estáticas, se relaciona con la capacidad de suspensión y debe ser controlada. Esta fuerza debe ser baja para que haya una buena separación de los sólidos en superficie y se permita el rendimiento de las bombas con la velocidad de circulación y permitir el desprendimiento del gas que está incorporado al fluido. Se determina primero agitando la muestra a 600RPM durante 15 segundos aproximadamente cambiando lentamente la velocidad hasta una posición neutra, segundo apagar el motor y esperar 10 segundos y tercero poner el conmutador en la posición de baja velocidad (3RPM) y registrar el valor máximo. Se repiten los mismos pasos pero en este caso se esperan 10 minutos y se registra el dato superior.

1.1.5.4 Filtrado API. Se determina con un filtro prensa (Figura 4) y consiste en cuantificar el filtrado del fluido de perforación cuando se le ejerce fuerza a través de un papel filtro, se realiza a temperatura ambiente, a una presión de 100psi y un tiempo de 30 minutos. El resultado se registra como número de mililitros.

Figura 4. Filtro prensas API



1.1.5.5 pH. Indica si el lodo es ácido o básico. Se mide con un dispositivo electrónico de pH con electrodo de vidrio (Figura 5) La mayoría de fluidos base acuosa son alcalinos (varía de 7.5 a 11.5). Si el pH del fluido varía entre 7.5 a 9.5 se considera de bajo pH y si el fluido varía entre 9.5 a 11.5 se considera de alto pH.

Figura 5. Medidor de pH



1.1.5.6 Porcentaje sólido y líquido (%). Se mide con una retorta de lodo (Figura 6) con capacidad de calefacción para determinar la cantidad de líquidos y sólidos contenidos en el fluido de perforación. Se coloca una muestra de lodo hasta el nivel máximo del vaso y se tapa para expulsar parte del líquido para garantizar un correcto volumen. Se calienta la muestra hasta que se evaporen los líquidos contenidos, este vapor pasa por un condensador y se recoge en un cilindro. Se mide directamente en porcentaje el volumen de líquido, petróleo y agua. El porcentaje de sólidos suspendidos y disueltos se calcula restando el 100%.

Figura 6. Retorta



1.1.5.7 Filtrado PPT. Se realiza a condiciones mayores o iguales de 250°F y 100 psi. Se lleva a cabo en una filtro prensa PPT (Figura 7), que tiene una celda calefactora en la que se vierte el lodo y se coloca un trozo de papel filtro en la parte superior, luego tapar y asegurar con los tornillos y colocar la celda dentro de la chaqueta calefactora, colocar la unidad de presión sobre las válvulas superior e inferior y bloquearlas con una clavija de cierre, aplicar una presión de 100psi a las unidades inferior y superior, cuando se alcanza la temperatura de prueba aumentar la presión a 600psi y abrir el vástago de la válvula inferior para iniciar la filtración, el filtrado será captado en un cilindro durante un período de 30 minutos.

Figura 7. Filtro prensa PPT



1.1.5.8 Calcio. Se da por la cantidad de sales de calcio disueltas en el agua o en el filtrado del fluido, se toma 1ml de muestra del filtrado API, se añaden 20 gotas de buffer amoniacal y 4 gotas de versenato estándar, se agita continuamente y se titula con una solución de etilendiaminotetraacético (EDTA) hasta que pase de un color morado a uno azul (Figura 8). Se registra el número de ml de solución de versenato estándar utilizado.

Figura 8. Medición de calcio



1.1.5.9 Cloruros. Es la cantidad de iones de cloro presentes en el filtrado del fluido. Si hay alta concentración de cloruros puede causar efectos adversos en los fluidos base agua. Se toma 1ml de muestra del filtrado API, se añaden 3 gotas de cromato de potasio al 5%, se agita continuamente y se titula gota a gota con una solución de nitrato de plata hasta que el color pase de amarillo a un tono anaranjado (Figura 9) y permanezca durante 30 segundos. Se registra el valor en números de mililitros de nitrato de plata. Si se excede el valor de 10ml se recomienda repetir la prueba. El valor se expresa en mg/L de cloruro.

Figura 9 .Medición de cloruros



1.1.5.10Alcalinidad.Concentración de iones solubles en agua que pueden neutralizar ácidos. Con los resultados de la prueba se puede llegar a estimar la concentración de iones presentes en el fluido como $OH^-CO_3^-$ y HCO_3^-

1.1.5.10.1 Alcalinidad de lodo (PM).Se mide 1ml de lodo, se añaden 5 gotas de indicador fenolftaleína y durante la agitación añadir ácido sulfúrico al 0,2N hasta que el color rosa desaparezca (Figura 10).

Figura 10. Medición alcalinidad PM



1.1.5.10.2 Alcalinidad de filtrado. En esta prueba se hallan dos valores, la alcalinidad del filtrado de lodo (Pf) y la alcalinidad del filtrado (Mf). Para determinar el valor de Pf se mide 1ml de filtrado y se añaden 5 gotas de indicador fenolftaleína (Figura 11), durante la agitación titular con ácido sulfúrico al 0,2N hasta que el color rosa desaparezca. Indicar la alcalinidad de fenolftaleína del filtrado Pf como número de ml de ácido sulfúrico al 0,2N. Para obtener el valor de Mf, se agrega a la misma muestra que fue usada para medir Pf, 4 gotas de metil naranja donde aparecerá un color anaranjado, titular con ácido sulfúrico al 0,2N hasta que el color se torne amarillo (Figura 12). El Mf se indica como el volumen total en ml del ácido utilizado para Pf más esta última valoración.

Figura 11. Medición alcalinidad Pf

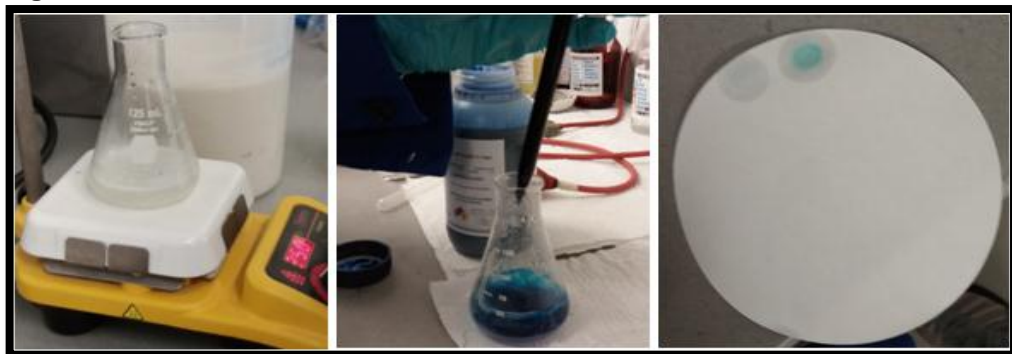


Figura 12. Medición alcalinidad Mf



1.1.5.11 Prueba de azul de metileno MBT.(Figura 13). Se mide la concentración total de sólidos arcillosos presentes en el fluido. Se añade en un Erlenmeyer 2 ml de lodo, 10 ml de agua destilada, 15ml de peróxido al 3% y 0,5 ml de ácido sulfúrico al 0,5N. Se agita y se deja hervir lentamente durante 10 minutos. Se deja enfriar y se diluye con agua hasta completar 50ml de solución. Se añade la solución de azul de metileno, cada vez una cantidad de 0.5ml. Agitar después de cada adición. Mientras los sólidos están suspendidos extraer una gota del Erlenmeyer con una varilla de vidrio y colocarlo en papel filtro, se alcanza el punto de valoración cuando aparece el colorante en forma de círculo azul verdoso alrededor de los sólidos teñidos.

Figura 13. Prueba azul de metileno



En el Cuadro 4 se resumen las pruebas descritas anteriormente con los instrumentos de medición apropiados para las pruebas de caracterización físicas y con los reactivos correspondientes para las pruebas de caracterización químicas.

Cuadro 4. Pruebas de caracterización para un fluido de perforación

Pruebas de caracterización físicas	
Propiedad	Instrumentos de medición
Densidad	Balanza de lodos
Viscosidad embudo	Embudo Marsh
Reología	Viscosímetro Fann 35 ^a
Filtrado API	Filtroprensa API
pH	pHmetro
%sólidos y % líquidos	Retorta
Filtrado PPT	Filtroprensa PPT
Pruebas de caracterización químicas	
Propiedad	Reactivos para medición
Calcios	Buffer amoniacal, Versenato, EDTA
Cloruro	Cromato de Potasio, Nitrato de Plata
Alcalinidad PM	Lodo, Fenolftaleína, Ácido Sulfúrico 0.2N
Alcalinidad Pf	Filtrado de lodo, Fenolftaleína, Ácido Sulfúrico 0.2N
Alcalinidad Mf	Muestra usada en Pf, Metil naranja, Ácido Sulfúrico 0.2N
Azul de metileno	Lodo, agua destilada, peróxido al 3%, Ácido Sulfúrico 0.5N, Azul de Metileno,

1.2 GENERALIDADES DEL SISTEMA ROMPEDOR DE REVOQUE⁸

Con el tiempo algunos avances se han producido en todo el mundo para mejorar perforación y procedimientos de terminación de pozos. El daño de la formación y la finalización del pozo se han convertido en el foco de muchos estudios que tratan de evitar una baja productividad, pero la limpieza eficiente del pozo es la clave para un alto rendimiento en la producción de este, eliminando los daños causados por el fluido de perforación con ayuda de un rompedor de revoque.

1.2.1 Definición. Un sistema rompedor de revoque está diseñado para remover el cake formado por los polímeros y el carbonato de calcio presentes en el lodo de perforación, este actúa generando una reacción entre los componentes del

⁸ ULLOA CASTAÑEDA, Ana María. Diseño y evaluación de la formulación óptima de un sistema de remoción de revoque N-Flow. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2016

rompedor y los componentes del revoque. La formulación de los rompedores depende del tipo de fluido que sea empleado en el pozo, desarrolladas con un procedimiento de pruebas en laboratorio, y son comprobados previamente de forma experimental. Son diseñados con la finalidad de que puedan ser adaptados a las condiciones específicas de cada pozo teniendo en cuenta la temperatura y la presión dinámica.

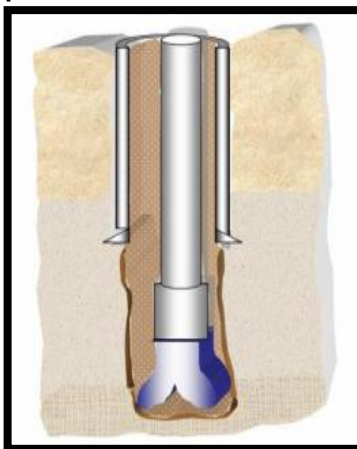
1.2.2 Características de los sistemas rompedores. Los sistemas rompedores actúan disolviendo el carbonato de calcio por medio de ácidos, el calcio solubilizado es secuestrado mediante un quelante que evita su reacción y precipitación en la formación productora, degradando los polímeros y almidones presentes en el revoque mediante uso de enzimas u oxidantes. Con este tipo de formulaciones se evita el uso de hipocloritos, ácidos fuertes o rompedores convencionales de tal manera que se reducen los problemas de corrosión y de contaminación en el sistema de perforación siendo una técnica segura para el medio ambiente y para el personal que lo manipula, no generan residuos tóxicos, aumenta la productividad, se tiene una cobertura total de la zona que se quiere remover, hay bajos costos en los equipos y disminuye el daño de formación.

1.2.3 Aplicaciones de los sistemas rompedores de revoque. Estos sistemas rompedores de revoque se pueden aplicar a los pozos cuando tienen en su composición materiales solubles en ácido, en los pozos con filtro de grava, terminaciones de pozo abierto, pozos verticales y en proceso de estimulación de pozos maduros. Otro tipo de aplicaciones son, las mallas expandibles para la eliminación de revoque, en reparación y terminación, en pozos de inyección, para eliminación de revoque en la mayoría de las salmueras. Estos sistemas proporcionan la eliminación eficaz y homogénea del revoque en arenisca, o en arenisca que contiene capas de lutita reactiva al ácido y en formaciones de carbonato.

1.2.4 Procedimiento para la aplicación del rompedor de revoque. Los procedimientos para la aplicación del sistema rompedor de revoque varían dependiendo el método utilizado para la terminación o completamiento del pozo. Básicamente el tratamiento con un sistema rompedor de revoque consiste en desplazar el fluido que se encuentra en el pozo por un bache o píldora de breaker y dejar en remojo para que este remueva adecuadamente el cake antes que el pozo sea puesto en producción. A continuación se describirá el procedimiento aplicado en un pozo completado con mallas para el control de la producción de arena:

Perforar hasta la zona de interés como se muestra en la Figura 14.

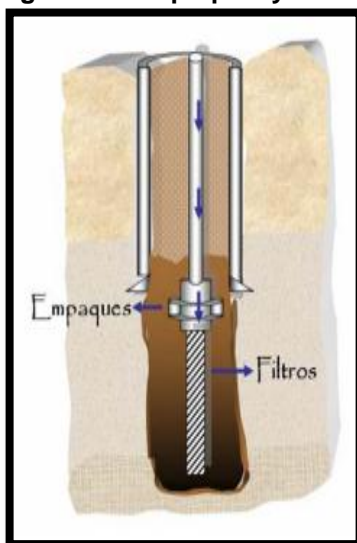
Figura 14. Perforación hasta profundidad deseada



**Fuente: Halliburton N-Flow
Delayed Action Filter Cake
Breaker. 2013**

Se deben bajar los filtros y empaques como se observa en la Figura 15 lo más profundo posible. Los filtros evitan que los sólidos que han sido desprendidos por acción del rompedor de revoque queden como material en suspensión.

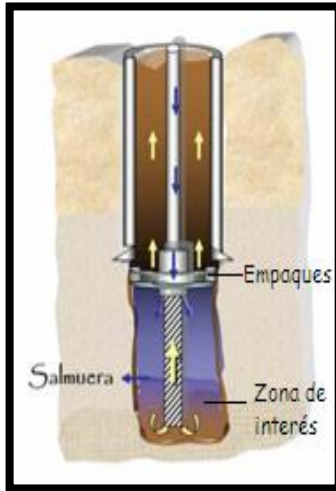
Figura 15. Empaques y filtros



**Fuente: Halliburton N-Flow
Delayed Action Filter Cake
Breaker. 2013**

El fluido de perforación de yacimiento se desplaza por medio de una salmuera para seguir con la limpieza del hueco. En la Figura 16 se observa como la salmuera fluye a través de la tubería, atraviesa el empaque y fluye a la zona de interés.

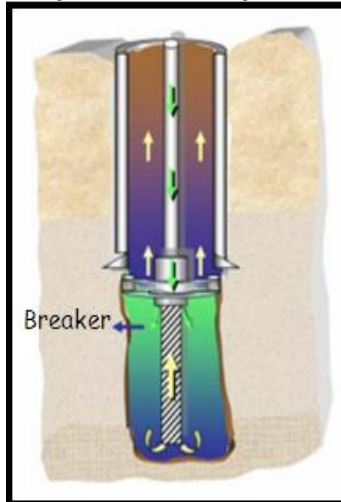
Figura 16. Salmuera



Fuente: Halliburton N-Flow Delayed Action Filter Cake Breaker. 2013

Se bombea el rompedor de revoque, desplazando el fluido contenido anteriormente (Figura 17).

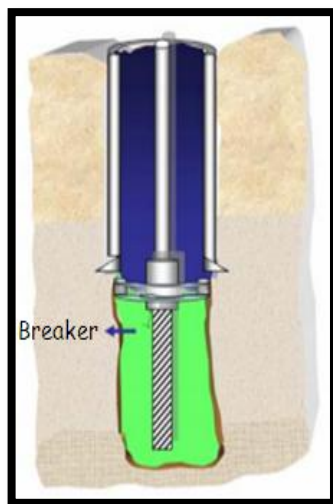
Figura 17. Aplicación del rompedor de revoque.



Fuente: Halliburton N-Flow Delayed Action Filter Cake Breaker. 2013

Figura 18. Se deja en remojo la formación el tiempo que sea necesario para remover el revoque formado

**Figura 18. Aplicación del
rompedor de revoque.**



**Fuente: Halliburton N-Flow
Delayed Action Filter Cake
Breaker. 2013**

Según lo expuesto en el capítulo, se puede decir que se llegó al cumplimiento de conocer las generalidades del fluido de perforación DRILL-IN y de los sistemas rompedores de revoque. De acuerdo a esto se puede proceder a la elaboración del fluido y del rompedor de revoque para poder seleccionar el tratamiento más adecuado en la remoción del cake.

2. SELECCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LAS ENZIMAS UTILIZADAS EN LA FORMULACIÓN DEL SISTEMA ROMPEDOR DE REVOQUE

En la compañía no se han formulado rompedores de revoque que contengan en su composición alguna enzima, por lo tanto se evaluaron cuatro enzimas que han sido propuestas por la empresa para estudiar su eficacia, cada una con una variación de tres concentraciones baja, media y alta (1,3 y 5 respectivamente) puesto que estudios previos sugieren que en este rango de concentraciones las enzimas desarrollan propiedades efectivas de degradación de polímeros y mediante un análisis visual se escogió para cada enzima la concentración que más cantidad de revoque removió. Teniendo en cuenta esto, se seleccionó la concentración adecuada para cada enzima mediante procedimientos experimentales que serán descritos detalladamente durante el desarrollo del capítulo. La selección se realizó visual y no por diferencia de pesos, debido a que al secar cada revoque para registrar el peso estaría perdiendo su funcionalidad por lo que se necesita que el revoque permanezca húmedo; igualmente no todos los revoques presentan el mismo peso, esto dependiendo de la limpieza que se le realiza a la celda que lo contiene por lo tanto no se puede realizar una diferencia entre peso inicial y peso final.

2.1 FORMULACIÓN DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN DRILL-IN⁹

Para seleccionar la concentración adecuada de cada enzima, primero se elaboró el fluido de perforación y se formó con éste el revoque, el diseño del breaker se hizo para la formulación de este lodo específicamente, es decir, no tiene la misma eficiencia en el revoque formado por cualquier tipo de lodo. El breaker se evaluó en el fluido de perforación DRILL-IN que la compañía National Oilwell Varco usa en un campo petrolero, por lo tanto no se generó ninguna variación en la formulación del fluido. El diseño del fluido de perforación se llevó a cabo teniendo en cuenta algunas variables propias de cada pozo como lo son propiedades de la roca, presión, temperatura, profundidad, entre otras. De acuerdo a esto y teniendo en cuenta lo descrito en el numeral 1.1.3. En el Cuadro 5 se muestran los aditivos que se usaron para el diseño del fluido con su respectiva función.

Cuadro 5. Aditivos para el sistema Drill-In

Aditivo	Función
Goma Xantica (Nov Xan D)	Viscosificante
Soda caústica	Controlador de pH
Almidón (Aqua Film)	Controlador de filtrado

⁹PDVSA. Fluidos de Perforación. Centro Internacional de Educación y Desarrollo (CIED). Caracas. Unidad 5, tema 1.

Cuadro 5. (Continuación)

Aditivo	Función
Carbonato de Calcio(Nov Carb)	Densificante
Bactericida (Myacide)	Controlador de bacterias
RevDust	Simula sólidos de perforación

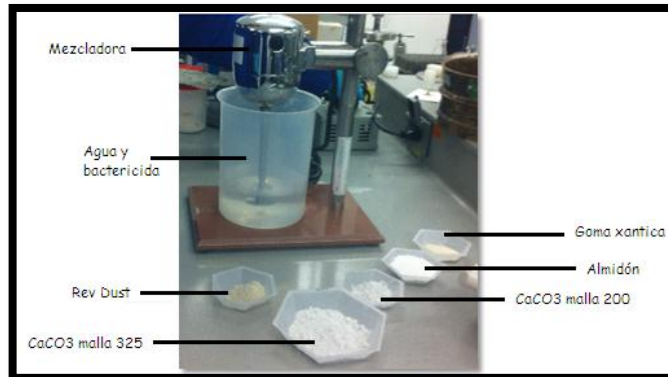
Teniendo claros los aditivos empleados en el diseño del fluido se procedió a prepararlo de acuerdo a las concentraciones de la Tabla 1 donde se especifican las cantidades en gramos para preparar un barril de fluido, haciendo referencia que 1 barril equivale a 350ml en laboratorio.

Tabla 1. Concentraciones de los aditivos del fluido DRILL-IN (350ml)

Aditivo	Cantidad(gr)
Goma Xantica (Nov Xan D)	1.5
Almidón (Aqua Film)	6
CaCO ₃ malla 200 (Nov Carb 200)	7
CaCO ₃ malla 325 (Nov Carb 325)	18
Bactericida (Myacide)	0.2
RevDust	5
Agua	312.274
Soda cáustica	0.026

Una vez conocida la concentración de cada compuesto, se pesaron y mezclaron los aditivos químicos(Figura 19) en el siguiente orden: se activó la mezcladora y se colocó el recipiente con el agua para que hubiera una agitación continua, el bactericida se agregó directamente al agua, se añadió lentamente el polímero y el almidón para evitar que se formaran grumos, seguido de los carbonatos y el RevDust, finalmente la soda cáustica fue la última en ser mezclada debido a que el pH es una operación crítica para el control del fluido de perforación y lo ideal es mantenerlo entre 9 y 10 para evitar problemas de corrosión, reproducción de bacterias y degradación del lodo.

Figura 19. Mezcla de aditivos



A continuación se presenta una descripción de los productos utilizados en el diseño del fluido de perforación DRILL-IN:

- **Goma Xantica:** polímero natural de alto peso molecular, aniónico con tolerancia a la salinidad, se utiliza como agente viscosificante. Mantiene las partículas en suspensión y reduce el filtrado por incremento de la viscosidad en la fase líquida.
- **Almidón modificado:** almidón pregelatinizado soluble en agua que ha sufrido cambios irreversibles por calentamiento en agua o vapor, no iónico que provee control a la filtración y proporciona viscosidad.
- **Carbonato de calcio:** es un producto sólido inerte procedente del mármol molido a diferente granulometría, de baja gravedad específica, se utiliza como material densificante, para controlar las pérdidas de circulación y para minimizar el filtrado.
- **RevDust:** material usado en el laboratorio para simular la presencia de recortes de sólidos de perforación.
- **Bactericida:** proveniente de la familia de los aldehídos usado para inhibir o eliminar la reproducción y crecimiento de bacterias y hongos. Se emplea para evitar la degradación de biopolímeros cuando estos permanecen estables por un largo período de tiempo,
- **Soda cáustica:** hidróxido de sodio de pH 13. Irritante que absorbe con facilidad la humedad proveniente del aire. Se usa para dar y mantener el pH a los fluidos base agua.

Luego de preparado el fluido DRILL-IN, se llevó a cabo la caracterización del fluido por medio de las pruebas de laboratorio descritas en el Numeral 1.1.5, en el Cuadro 6 se recopilan los datos obtenidos para cada una de estas pruebas:

Cuadro 6. Caracterización del fluido de perforación Drill-in

Propiedad	Condiciones	Valor
Densidad		8.916 lb/gal
Viscosidad embudo		56.25 s
Reología	600 RPM	46 lb/100ft ² .s
	300 RPM	38 lb/100ft ² .s
	200 RPM	34 lb/100ft ² .s
	100 RPM	29 lb/100ft ² .s
	6 RPM	17 lb/100ft ² .s
	3 RPM	15 lb/100ft ² .s
Viscosidad plástica		8 cP
Punto cedente		30 lb/100ft ² .s
Rompimiento de geles	10s	15 lb/100ft ² .s
	10min	16 lb/100ft ² .s

Cuadro 6. (Continuación)

Propiedad	Condiciones	Valor
Filtrado API		6.2 ml
pH		9.8
Retorta	% sólidos	5%
	% líquidos	95%
Filtrado PPT		15 ml
Calcios		100 mg/L de calcio
Cloruro		150 mg/L de cloruro
Alcalinidad	PM	0.25 ml H ₂ SO ₄ 0.2N
	Pf	0.05 ml H ₂ SO ₄ 0.2N
	Mf	0.1 ml H ₂ SO ₄ 0.2N

Estas son las características propias del fluido de perforación DRILL-IN con las que se pueden apreciar el comportamiento del lodo. Con este fluido, se llevó a cabo toda la prueba para formar los revoques que fueron necesarios y que se sometieron a tratamiento con el breaker.

2.2 FORMULACIÓN DEL SISTEMA ROMPEDOR DE REVOQUE

Con el fin de evaluar el desempeño de cada una de las enzimas y sus concentraciones en el breaker se formularon rompedores con cuatro enzimas diferentes y tres concentraciones para cada una de 1%, 3% y 5% debido a que éste es el rango de funcionamiento de este tipo de enzimas, los demás componentes del breaker mantuvieron constante su concentración en la formulación para que la variación en los resultados fuera producto de la capacidad de la enzima y concentración usada para degradar polímeros.

Las sustancias químicas empleadas en la formulación del sistema rompedor de revoque; teniendo en cuenta lo descrito en el numeral 1.2.2, fueron un ácido orgánico (GLC), una enzima, un quelante (Quelex100), un solvente (butilglicol), un surfactante (Np10), y agua. Los porcentajes de concentración necesaria de los compuestos empleados en la formulación del breaker para elaborar 150 ml de rompedor se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Porcentaje de concentraciones para la formulación del breaker (150ml)

Sustancia	Gravedad específica	Concentración		
		Con enzima al 1%	Con enzima al 3%	Con enzima al 5%
Ácido	1.27	15%	15%	15%
Quelante	1.3	5%	5%	5%

Tabla 2. (Continuación)

Sustancia	Gravedad específica	Concentración		
		Con enzima al 1%	Con enzima al 3%	Con enzima al 5%
Solvente	0.9	5%	5%	5%
Surfactante	1	0.5%	0.5%	0.5%
Agua	1	73.5%	71.5%	69.5%

Con los valores, y los porcentajes dados en la **Tabla 3** se determinó la cantidad en gramos para preparar cada breaker. Para determinar la cantidad de cada componente se tuvo en cuenta la gravedad específica de cada uno de estos, para poder hacer la conversión de cada aditivo se realizó con la **Ecuación 3**:

Ecuación 3. Conversión volumen a peso

$$gr\ componente = (\% \text{ de concentración} * \text{gravedad específica} * \text{ml de solución})$$

En la Tabla 3 se aprecian las cantidades utilizadas de cada compuesto para 150ml de solución, a excepción de las enzimas, que varían su porcentaje de concentración y serán descritas más adelante.

Tabla 3. Cantidad de gramos de componente para la formulación del breaker (150ml)

Componente	Cantidad (gr) Con enzima al 1%	Cantidad (gr) Con enzima al 3%	Cantidad (gr) Con enzima al 5%
Ácido	28.57	28.57	28.57
Quelante	9.75	9.75	9.75
Solvente	6,75	6,75	6,75
Surfactante	0.75	0.75	0.75
Agua	110.25	107.25	104.25

Para determinar la cantidad en gramos que tiene que haber de cada enzima con su respectiva concentración se realizó la misma conversión de volumen a peso. En la Tabla 4 se aprecian estos valores para elaborar 150ml de breaker:

Tabla 4. Cantidad de gramos de enzima para la formulación del breaker (150ml)

Enzima	Gravedad específica	Gramos para cada concentración		
		1%	3%	5%
Nov1	1.15	1.72	5.17	8.62
Nov2	1.15	1.72	5.17	8.62
Nov3	1.02	1.53	4.59	7.65
Nov4	1.31	1.96	5.89	9.82

Con estos valores, y los porcentajes dados en la Tabla 5 se hizo la preparación de cada breaker.

2.3 PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCIÓN DE CONCENTRACIONES DE CADA ENZIMA

Para iniciar con la selección de las mejores concentraciones, primero se realizaron filtrados API, sobre papel filtro, para generar los revoques que fueron puestos en remojo con los breaker y de esta manera se determinó de forma visual en cuál de ellos había más remoción del cake.

Se realizó el filtrado API, que según el manual de fluidos API¹⁰ con este se cuantifica el filtrado de fluido de perforación que se genera en 30 minutos a una temperatura ambiente y una presión de 100psi. Se colocó un papel filtro como medio filtrante dentro de una filtroprensa, sobre este se generó una membrana semipermeable que recibe el nombre de Cake o revoque (Figura 20).

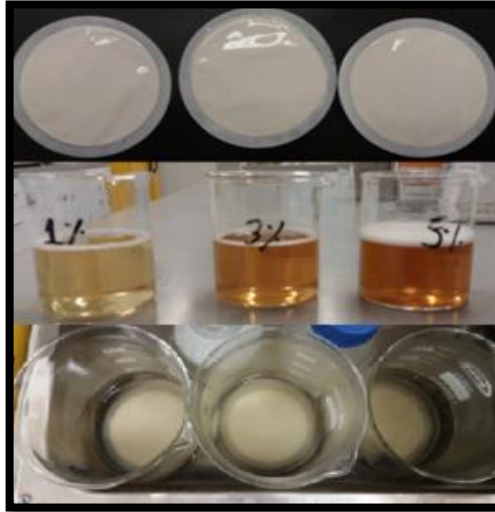
Figura 20. Cake o revoque



Para cada enzima se hicieron tres filtrados API, se prepararon los breaker teniendo en cuenta que el pH para la formulación del breaker con las enzimas Nov1, Nov2 y Nov3 se manejó en 5, y el pH para la enzima Nov 4 se mantuvo en 3, esto de acuerdo a lo indicado por los fabricantes de cada una para obtener una mejor eficiencia en su funcionamiento; se tomaron tres beaker y a cada uno se le añadió 150ml de breaker a sus respectivas concentraciones (1%, 3% y 5%) y se introdujo el cake en cada uno de estos. Se llevó a baño maría durante 4 horas a una temperatura de 93°C (Figura 21).

¹⁰API. Manual de Fluidos de Perforación. Instituto Americano del Petróleo. Texas, USA. 2001.

Figura 21. Cakes y baño maría

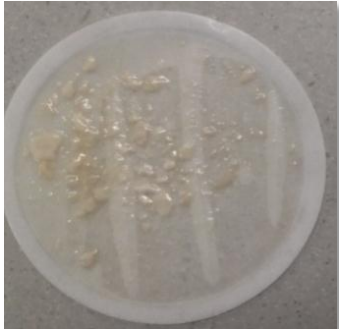
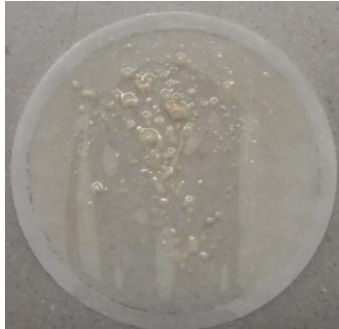
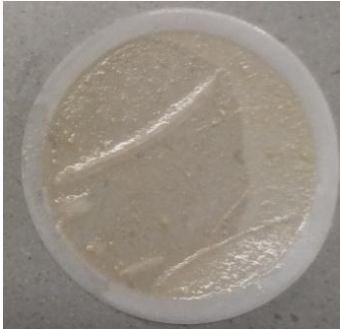


Este procedimiento se realizó para las cuatro enzimas con su variación en el porcentaje de concentración con su respectiva réplica, para poder seleccionar de forma visual cual tiene una mejor remoción del cake. Luego de realizarse el baño maría se retiró de cada beaker el papel filtro con el residuo de cake y se hizo un análisis cualitativo para cada uno.








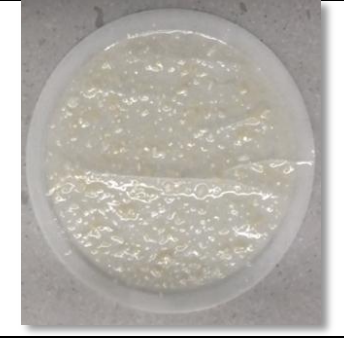

2.4 RESULTADOS Y ANÁLISIS CUALITATIVO

Al ser retirado el papel filtro de cada beaker, se inició con un análisis visual para cada enzima, determinando que concentración es la que mejor removió el cake. En el Cuadro 7 se observa el residuo dejado por cada solución rompedora de revoque.

Cuadro 7. Residuo del cake tratado

EnzimaNov1		
1%	3%	5%
		

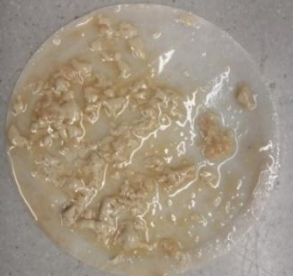


Cuadro 7. (Continuación)

Enzima Nov2		
1%	3%	5%
		
Enzima Nov3		
1%	3%	5%
		
Enzima Nov4		
1%	3%	5%
		

Con esta prueba experimental visual se buscó de manera cualitativa analizar a que concentración la enzima removió de forma más eficiente el cake. Con los resultados obtenidos se pudo analizar que para la enzima Nov1 la concentración en la que se notó una menor cantidad de revoque es al 5%, con las concentraciones al 1% y 3% se notaron residuos de grumos; con la enzima Nov2 los mejores resultados se observaron con una concentración del 1% que comparado con los de las otras dos concentraciones se tuvo un residuo mucho

más fino; la enzima Nov3 obtuvo una mejor remoción al 5%; con la enzima Nov4 se vio que el mejor resultado se consiguió con la concentración al 5% donde el revoque fue degradado de una forma más homogénea y hubo poca cantidad de aglutinación sobre el papel filtro. Se quiso comprobar que el rango en el que las enzimas desempeñaron un mejor rendimiento era entre 1% y 5% debido a dos razones, la primera que a una mayor cantidad el sistema se satura y la enzima no actúa de forma eficiente y la segunda que se logra un comportamiento lineal, es decir, la enzima a una concentración más alta que la deseada que en este caso es al 5% tiene la misma cantidad de remoción del cake; por lo tanto adicionalmente, a las enzimas que obtuvieron un buen resultado a una concentración del 5% (Nov1, Nov3, Nov4) se le aumentó la cantidad al 7% y se observó que tipo de comportamiento tenían, en el Cuadro 8 se muestra el desempeño de la enzima a una concentración más alta.

Cuadro 8. Comportamiento de la enzima a una concentración del 7%

Concentración al 7%		
Enzima Nov1	Enzima Nov3	Enzima Nov4
		

Con estos resultados se observó que la remoción para cada enzima disminuyó con una concentración más alta, en este caso del 7%, por lo que se pudo concluir que el sistema rompedor se satura de enzima y esta disminuye su funcionalidad.

2.4.1 Prueba de yodo para identificar presencia de polímeros. Se identificó, de otra manera visual, que concentración de enzima tenía un mejor comportamiento por lo tanto se llevó a cabo una prueba cualitativa con tintura de yodo como indicador para evidenciar la remoción de polímeros, agregando 2 o 3 gotas sobre el cake final, arrojando un tono característico de acuerdo al tipo de compuesto del fluido DRILL-IN que haya quedado presente en el revoque y no haya podido ser degradado o solubilizado. En la Figura 22 se observan muestras de almidón, polímero y carbonato de calcio respectivamente, que cuando entraron en contacto con la tintura de yodo arrojaron un color característico. El almidón dio una tonalidad negra, el polímero un tono café oscuro y el carbonato de calcio un color amarillo.

Figura 22. Coloración de yodo al contacto con almidón, polímero y carbonato de calcio.






Se hizo una comparación tomando un cake sin ser sometido a remojo con el breaker y se le agregaron 3 gotas de yodo, la coloración que arrojó es oscura (Figura 23) por lo tanto se pudo deducir que en el cake había una alta presencia de polímero y almidón

Figura 23. Coloración del cake sin ser tratado con el breaker

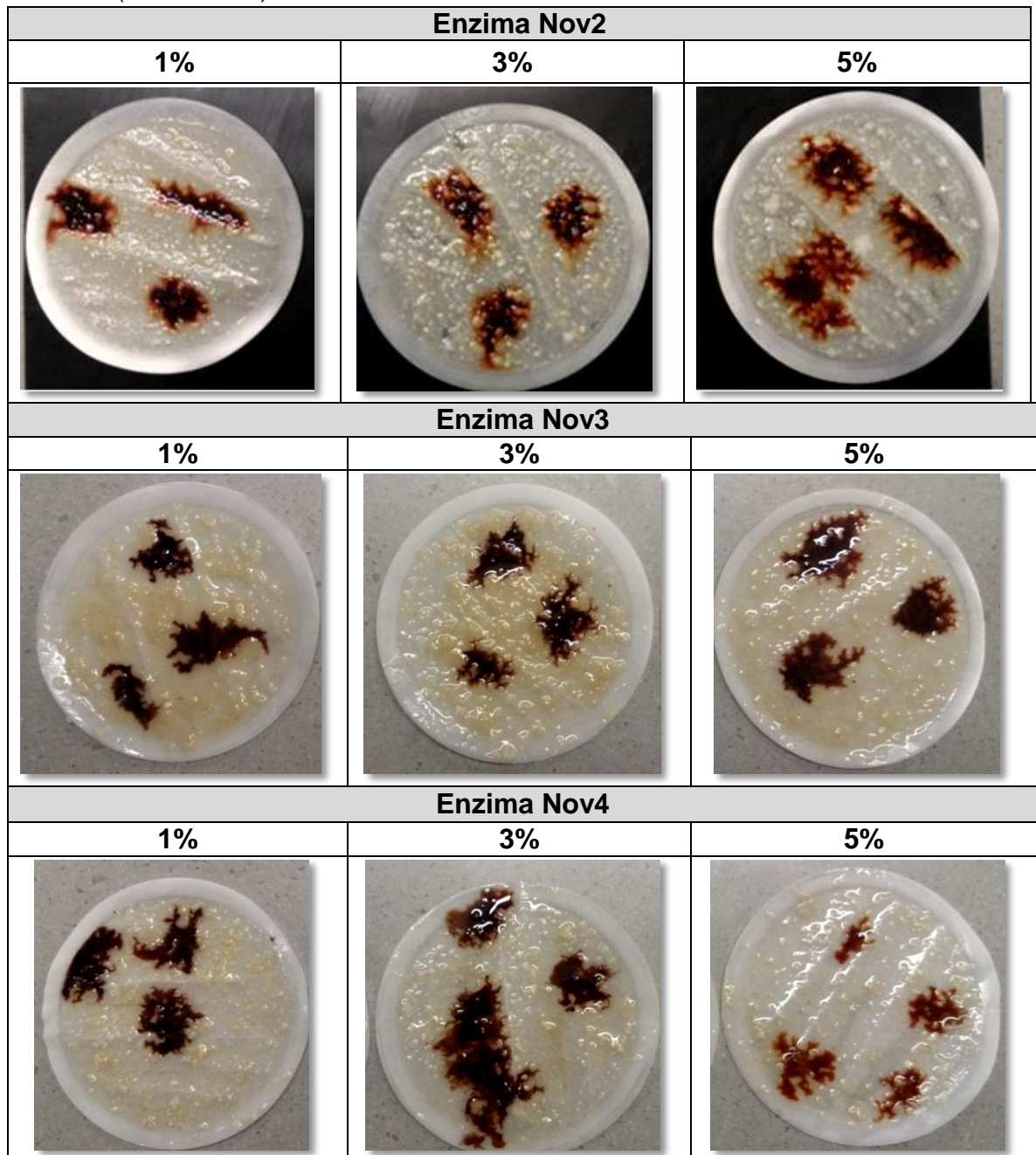


Para cada cake final se realizó esta prueba para escoger de manera más precisa la concentración de enzima que tuvo un mejor comportamiento. En el Cuadro 9 se muestran los resultados arrojados por la prueba de tincura de yodo para cada cake.

Cuadro 9. Cake final con tintura de yodo

Enzima Nov1		
1%	3%	5%
		

Cuadro 9. (Continuación)



Realizando una comparación entre el cake que no fue sometido a tratamiento con el breaker y los que si se sometieron, se pudo observar que la coloración oscura tuvo una alta disminución y se presenció una tonalidad más clara, por lo tanto la degradación de polímero y almidón se desarrolló de forma apropiada. En la enzima Nov1 se observó que en las tres concentraciones hay una disminución de polimeros y almidones porque arrojó una coloración café con bordes amarillos, muy similar en las tres, pero teniendo en cuenta que en la concentración a un 5%

no hubo tanta acumulación de la tonalidad oscura sino que fue más homogénea, esta concentración fue la que mejor resultado obtuvo. Con la enzima Nov2 se concluyó que la coloración con el yodo para las tres fue muy parecida, en este caso se tuvo en cuenta el análisis realizado en el Cuadro 7 para escoger la concentración adecuada. Con respecto a la enzima Nov 3, aunque no fue muy notorio se observó una leve disminución de coloración a medida que aumentó la concentración siendo así la concentración al 5% la que mejores resultados obtuvo. La Enzima Nov4 se comportó totalmente diferente a las otras tres enzimas donde se observó que la concentración a un 5% es la que más polímero removió con respecto a las otras dos concentraciones, se evidenció que en relación a las otras 4 enzimas también fue la que mejor resultados obtuvo. De acuerdo a la prueba visual y la prueba con yodo, en la Tabla 5 se resumen las concentraciones que se escogieron para cada enzima.

Tabla 5. Concentración seleccionada para cada enzima

Enzima	Concentración
Nov1	5%
Nov2	1%
Nov3	5%
Nov4	5%

Estas concentraciones fueron las que mostraron la mejor remoción en el papel filtro, ya con esto se pudo evaluar el breaker y la eficiencia de las enzimas en un medio poroso en condiciones similares a las que se tienen en las aplicaciones en campo y así seleccionar la mejor.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE LOS BREAKER CON RESPECTO A LA REMOCIÓN EFECTIVA DEL REVOQUE

La permeabilidad es la capacidad que presenta un material para permitir el flujo a través de la estructura porosa que la conforma, el revoque formado por el fluido de perforación genera una disminución de la permeabilidad en la cara de la formación, por lo tanto reduce el flujo y esto genera una disminución en la producción diaria de crudo. Para asemejar estas condiciones se necesita simular el revoque en un medio poroso, por esta razón el filtrado API en papel filtro no sirve porque no es un medio poroso, en este caso se escogen discos de aloxita con condiciones específicas que simulen permeabilidad para poder evaluar el flujo y el daño generado por el fluido de perforación,

Con el fin de evaluar la eficiencia de remoción de revoque con la enzima empleada en la formulación del breaker y su funcionamiento en un medio poroso, se realizó el análisis que permitió una comparación de resultados mediante filtrados PPT(Permeability Plugging Test)y pruebas de retorno de flujo.

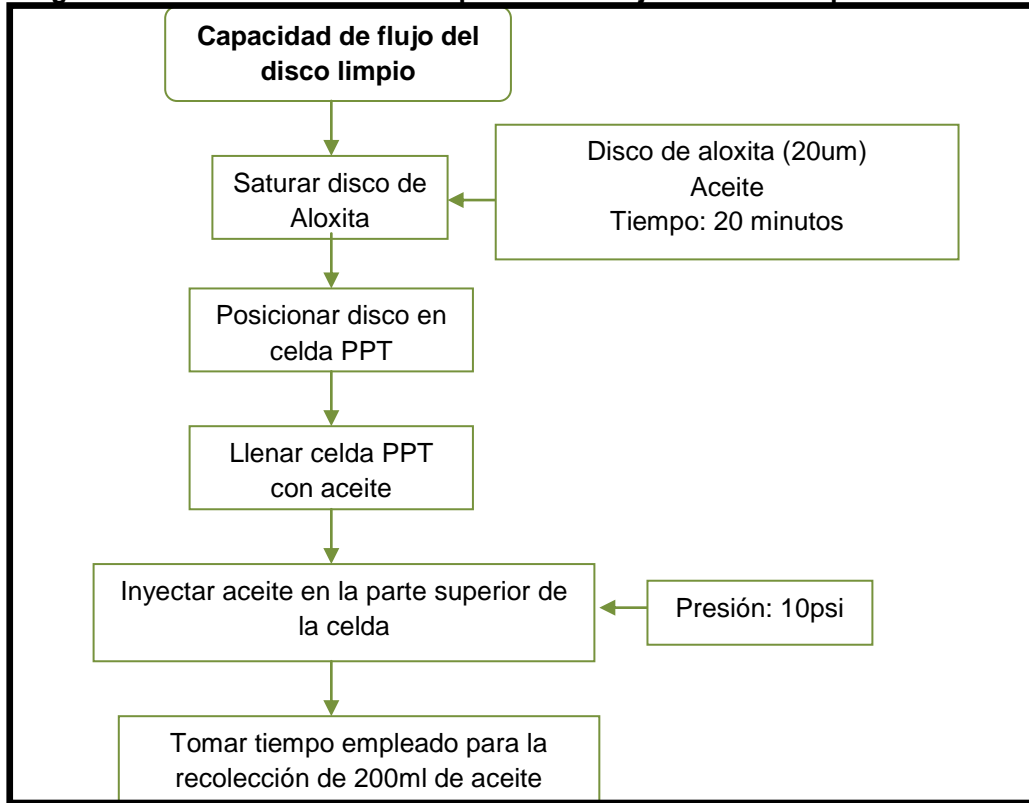
3.1 DETERMINACIÓN DE RECUPERACIÓN DE FLUJO INICIAL Y DAÑO DE FORMACIÓN GENERADO POR EL REVOQUE

Para poder evaluar el breaker con las enzimas a la concentración seleccionada en el capítulo anterior primero se conoció la capacidad de flujo del disco de aloxita limpio, posterior a esto se generó el revoque sobre el disco de aloxita y se le midió la nueva capacidad de flujo, lo que permitió calcular el daño causado por el fluido de perforación y así obtener los parámetros entre los cuales se evaluó si los breakers formulados con las enzimas removieron el daño.

Luego se realizaron cuatro revoques más que se dejaron en remojo con el breaker, cuando terminó este remojo se midió la capacidad de flujo que arrojó cada disco y así se evaluaron los comportamientos de las enzimas en la remoción del cake

3.1.1 Determinación de la capacidad de flujo de disco limpio. Para la determinación de la capacidad de flujo se llevó a cabo la prueba de retorno de flujo, como se muestra en el Diagrama 1. Esta prueba va a ser descrita con las condiciones e instrumentos necesarios para llevarla a cabo.

Diagrama 1. Determinación de la capacidad de flujo del disco limpio



En una roca intergranular, el espacio que existe en el punto donde se unen dos o más granos es conocido como garganta de poro, el tamaño y distribución de las gargantas de poros controlan muchas características, entre ellas el flujo; teniendo esto en cuenta se seleccionó un disco de aloxita (Figura 24), en este caso se escogió uno de 20 micrones que es cercano al tamaño de gargantas de poro de un campo donde la compañía ha utilizado el fluido de perforación DRILL-IN. Este disco se saturó dejándolo sumergido en un beaker con aceite mineral durante 20 minutos para simular el fluido contenido en la formación.

Figura 24. Disco de Aloxita



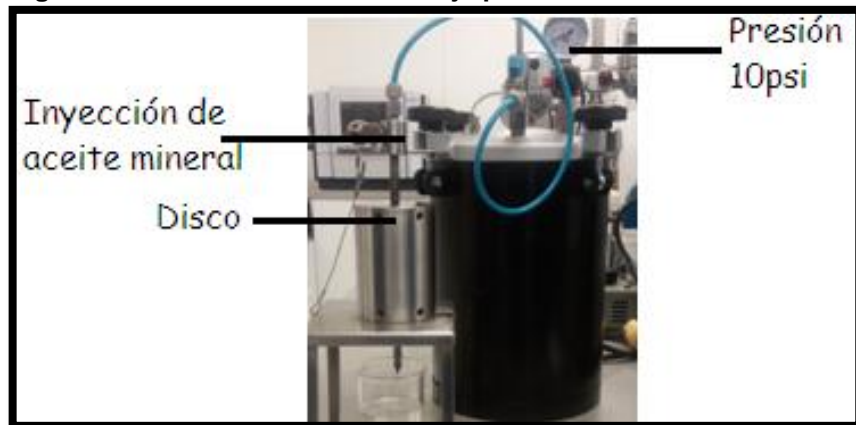
Se inició directamente con la prueba de retorno de flujo que se desarrolló de la siguiente manera:

- Se ubicó el disco en el extremo inferior de una celda de filtrado PPT (Figura 25) y por el otro extremo se llenó la celda con aceite mineral. Ésta celda se llevó al equipo de retorno de flujo (Figura 26) y se posicionó dándole un giro de 180°, es decir, el disco quedó ubicado en la parte superior por donde se inyectó aceite a una presión de 10psi de tal forma que se permitió el paso fluyente de aceite por los poros del disco, pasó por los el cake, logrando simular el comportamiento del crudo al fluir del yacimiento al pozo.

Figura 25. Posicionamiento del disco



Figura 26. Prueba de retorno de flujo para disco con cake



- Por la parte inferior de la celda salió el aceite que iba atravesando el disco y para tomar una medida del caudal se debió tomar un parámetro de medición, en este caso se tomó el tiempo que tardó el aceite en llenar 200ml de un beaker(Figura 27). Para dar más precisión a la medida de 200ml, el aceite recolectado se pasa a una probeta.

Figura 27. Llenado del beaker hasta 200ml



De esta manera se midió el caudal del disco limpio y se tomó como patrón inicial de comparación. El tiempo del disco para el llenado de 200ml de un beaker fue de 136 s. Con este resultado se halló el valor de caudal inicial mediante la Ecuación 4:

Ecuación 4. Caudal inicial

$$Caudal\ inicial\ (ml/s) = \frac{mldellenado}{tiempo\ de\ llenado(s)}$$

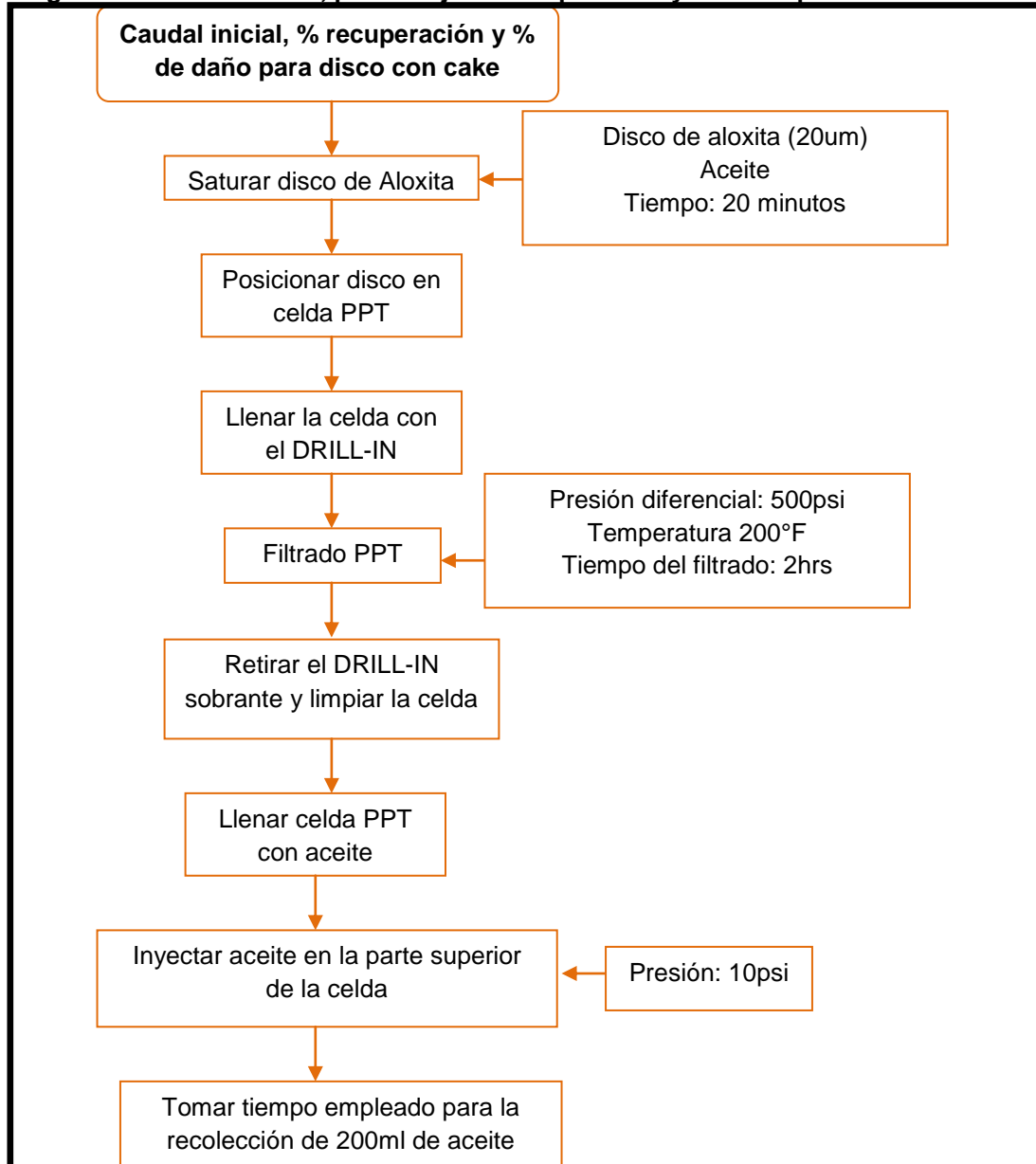
Se puede decir entonces que el valor de caudal inicial para el disco limpio fue de 1.47 ml/s. Este valor se tomó como patrón de comparación con los otros discos que fueron evaluados para así poder determinar cuánto fue el porcentaje de recuperación del flujo inicial que tuvo cada disco. Los resultados de esta prueba se recopilan en la Tabla 6.

Tabla 6. Datos disco limpio

Tiempo de llenado de 200ml	Caudal inicial (ml/s)
136 s	1.47

3.1.2 Determinación del caudal inicial, % de recuperación y % de daño para disco con revoque. Para determinar el caudal inicial, el porcentaje de recuperación y de daño se llevó a cabo una serie de pasos en el laboratorio, que se encuentran resumidos en el Diagrama 2:

Diagrama 2. Caudal inicial, porcentaje de recuperación y de daño para disco con cake



Se saturó el disco de aloxita que fue utilizado para esta prueba y para generar el revoque mediante un filtrado PPT se llevó a cabo el proceso:

- Se formó el cake o revoque simulando las condiciones de yacimiento lo más real posible, por tal razón se posicionó el disco dentro de la celda de PPT en el extremo inferior y por el extremo superior se vertió el fluido de perforación (Figura 28), se presurizaron en un equipo de referencia OFITE para PPT

(Figura 29), por la parte superior a 600psi y por la parte inferior a 100psi, a una Temperatura de 200°F, ésta prueba tardó aproximadamente dos horas.

Figura 28. Ubicación del disco y llenado de la celda

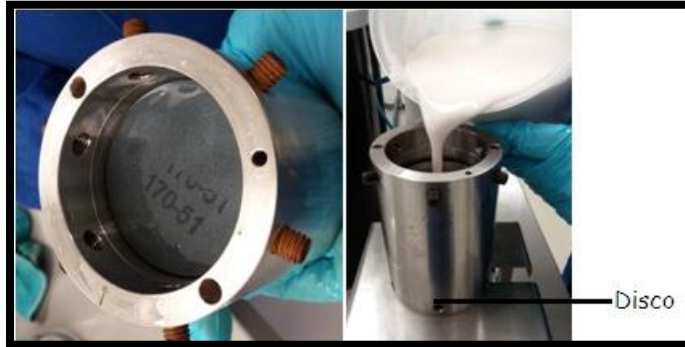
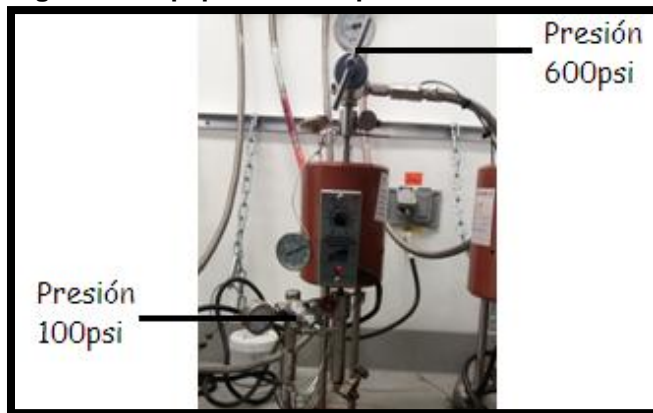
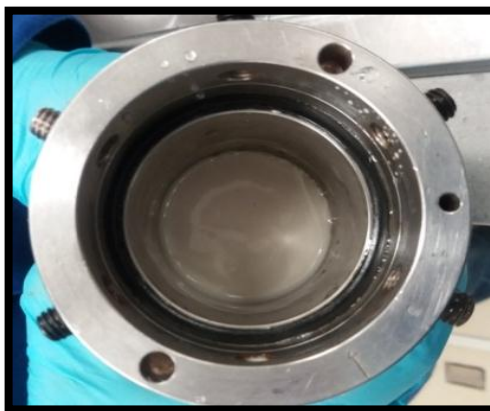


Figura 29. Equipo PPT con presión diferencial



- Se prosiguió retirando de la celda el residuo del fluido, y se limpiaron las paredes de ésta dejándola completamente limpia y que se pudiera observar la formación del revoque en la parte inferior de la celda (Figura 30).

Figura 30. Limpieza de la celda del PPT.



Una vez, ya obtenido el revoque, se realizó la prueba de retorno de flujo a las mismas condiciones que se nombran en el numeral 3.1.1. El tiempo del disco para el llenado de 200ml de un beaker fue de 203s. Con este dato se aplicó la Ecuación 4 para determinar el caudal inicial del disco con el revoque y dio un caudal de 0,98ml/s. Para poder evaluar las enzimas primero se evaluó el daño que genera el revoque por lo tanto se calculó el porcentaje de recuperación del flujo inicial usando la Ecuación 5 y para obtener el valor del porcentaje de daño se utilizó la Ecuación 6, teniendo como patrón de comparación el disco limpio:

Ecuación 5. Porcentaje de recuperación

$$\% \text{ de recuperación} = \left(\frac{\text{caudal disco sucio}}{\text{caudal disco limpio}} \right) * 100$$

Ecuación 6. Porcentaje de daño

$$\% \text{ daño generado por el fluido} = 100\% - \% \text{ de recuperación}$$

Los cálculos obtenidos para el disco con el cake se recopilan en la Tabla 7:

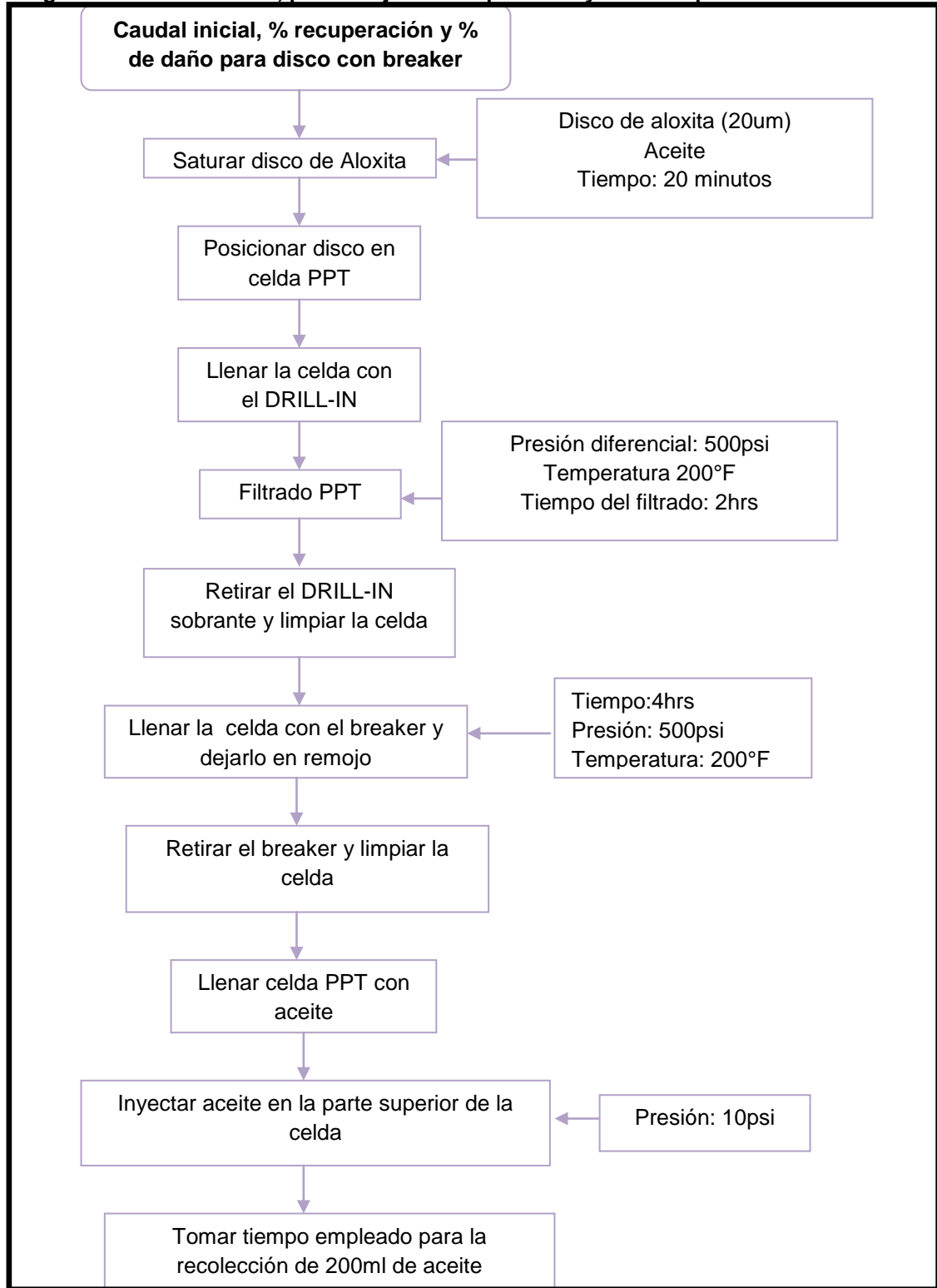
Tabla 7. Datos disco con cake

Tiempo de llenado de 200ml	Caudal inicial (ml/s)	% De recuperación	% De daño
136 s	1.47	66.6%	33.4%

Se determinó que el porcentaje de recuperación para el disco con el cake fue de 66.6% y el porcentaje del daño generado por el fluido de perforación de 33.4% por lo tanto se pudo decir que el cake redujo la capacidad de paso del aceite y que fue necesario aplicar un tratamiento que degradara el cake para que el caudal fuera lo más cercano posible al del disco limpio es decir, que porcentaje de recuperación se encontrara lo más aproximado al 100%, de igual manera que el daño generado por el fluido estuviera muy cercano a cero.

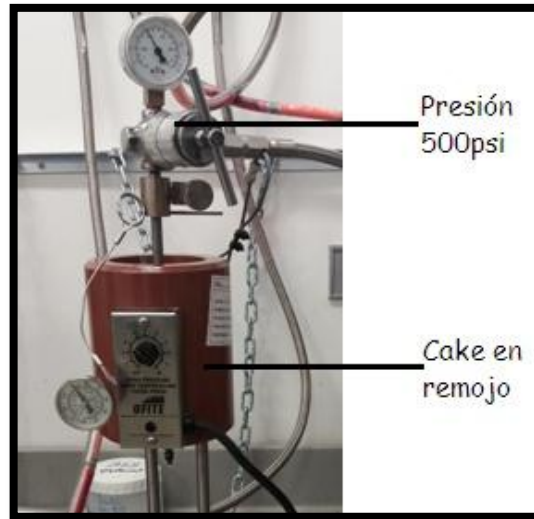
3.1.3 Determinación del caudal inicial, % de recuperación y % de daño para los discos en remojo con el breaker. Para realizar esta prueba era necesario realizar el procedimiento, que se describe en el Diagrama 3, se llevó a cabo cuatro veces debido a que se seleccionó para cada enzima la concentración que mejores resultados arrojó

Diagrama 3. Caudal inicial, porcentaje de recuperación y de daño para disco con breaker.



Para evaluar cada breaker, se saturó un disco de aloxita, el disco se ubicó en la parte inferior de una celda de filtrado PPT y se generó el revoque como se detalla en el numeral 3.1.2. Luego de limpiar la celda y dejar el cake formado se agregó el breaker con el que se realizó la remoción de éste dejándolo en remojo durante cuatro horas. Se presurizó únicamente por la parte superior a una presión de 500psi y a una Temperatura de 200°F(Figura 31). Por la parte inferior de la celda se dejó la válvula abierta para tomar los tiempos de ruptura, es decir, desde el momento en que fue colocado el disco en remojo con el cake, a las condiciones de temperatura y presión ya establecidas, se tomó el tiempo que tardó el breaker en comenzar a degradar el cake y atravesar el disco, apenas se observó que salió un flujo continuo, se cerró la válvula para impedir que se desocupara la celda y permitir que el disco permaneciera en remojo.

Figura 31. Celda PPT con cake en remojo



Fue necesario volver a hacer limpieza de la celda (Figura 32) esta vez limpiando el breaker y dejando el cake para continuar con la evaluación de la prueba.

Figura 32. Limpieza de la celda retirando el breaker sobrante



Luego se llenó la celda de aceite y se realizó la prueba de retorno de flujo para cada uno de los cuatro discos. Una vez terminada esta prueba se calcularon los datos de caudal, porcentaje de recuperación y porcentaje de daño para cada disco como lo indica la Ecuación 4, 5 y 6, obteniendo los resultados indicados en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados del retorno de flujo para los discos tratados con breaker

Disco	Tiempo llenado de 200ml	Caudal (ml/s)	% de recuperación	% de daño
Disco 1. Enzima Nov1 (5%)	147 s	1.36	92.5%	7.5%
Disco2. Enzima Nov2 (1%)	181 s	1.10	74.8%	25.2%
Disco 3. Enzima Nov3 (5%)	139 s	1.43	97.2%	2.8%
Disco 4. Enzima Nov4 (5%)	140 s	1.42	96.5%	3.5%

Lo que se espera de un breaker es que después de actuar con el revoque lo remueva y que la capacidad de flujo sea lo más cercano posible al del disco limpio. Según lo indica esta tabla, el disco con la mejor eficiencia fue el disco 3, puesto que tuvo un porcentaje de recuperación de 97,2% siendo superior a los obtenidos por las otras enzimas, por lo tanto el porcentaje de daño que ha ocasionado al disco es de 2.8%. Se recopilaron todos los resultados obtenidos en las pruebas descritas en los numerales 3.1.1, 3.1.2 y 3.1.3 y se resumen en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados retorno de flujo

Disco	Tiempo llenado de 200ml	Caudal (ml/s)	% de recuperación	% de daño
Disco limpio	136 s	1.47	100%	0%
Disco con el cake	203 s	0.98	66.6%	33.4%
Disco 1. Enzima Nov1 (5%)	147 s	1.36	92.5%	7.5%
Disco2. Enzima Nov2 (1%)	181 s	1.10	74.8%	25.2%
Disco 3. Enzima Nov3 (5%)	139 s	1.43	97.2%	2.8%
Disco 4. Enzima Nov4 (5%)	140 s	1.42	96.5%	3.5%

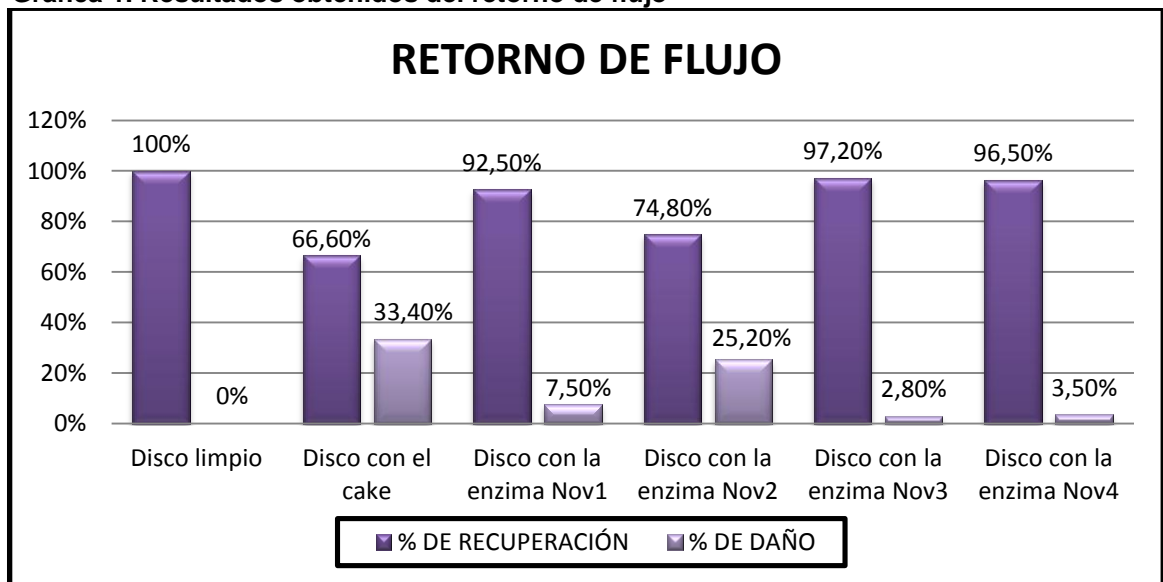
Con estos valores obtenidos, se hizo un análisis más detallado acerca de que breaker ha tenido el mejor comportamiento y se asemejó más a las condiciones que se obtuvieron con el disco limpio.

3.2 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA PRUEBA DE RETORNO DE FLUJO

Para poder determinar que enzima obtuvo una mejor acción de remoción, se tomaron en cuenta varios factores, primero se observaron los porcentajes de recuperación y de daño para cada disco; segundo, se realizó un análisis cualitativo al disco después de haber pasado por remojo con el breaker y tercero se tomaron en cuenta los tiempos de ruptura que se lograron en cada disco.

3.2.1 Análisis de los resultados obtenidos en el retorno de flujo. Iniciando con los resultados seleccionados en la prueba de retorno, se pudo determinar que los más favorables fueron para los discos que dieron un porcentaje de recuperación más cercano al 100%. En la Gráfica 1 se hace un balance entre los 6 discos utilizados, donde se tomó como patrón de comparación el disco limpio.

Gráfica 1. Resultados obtenidos del retorno de flujo

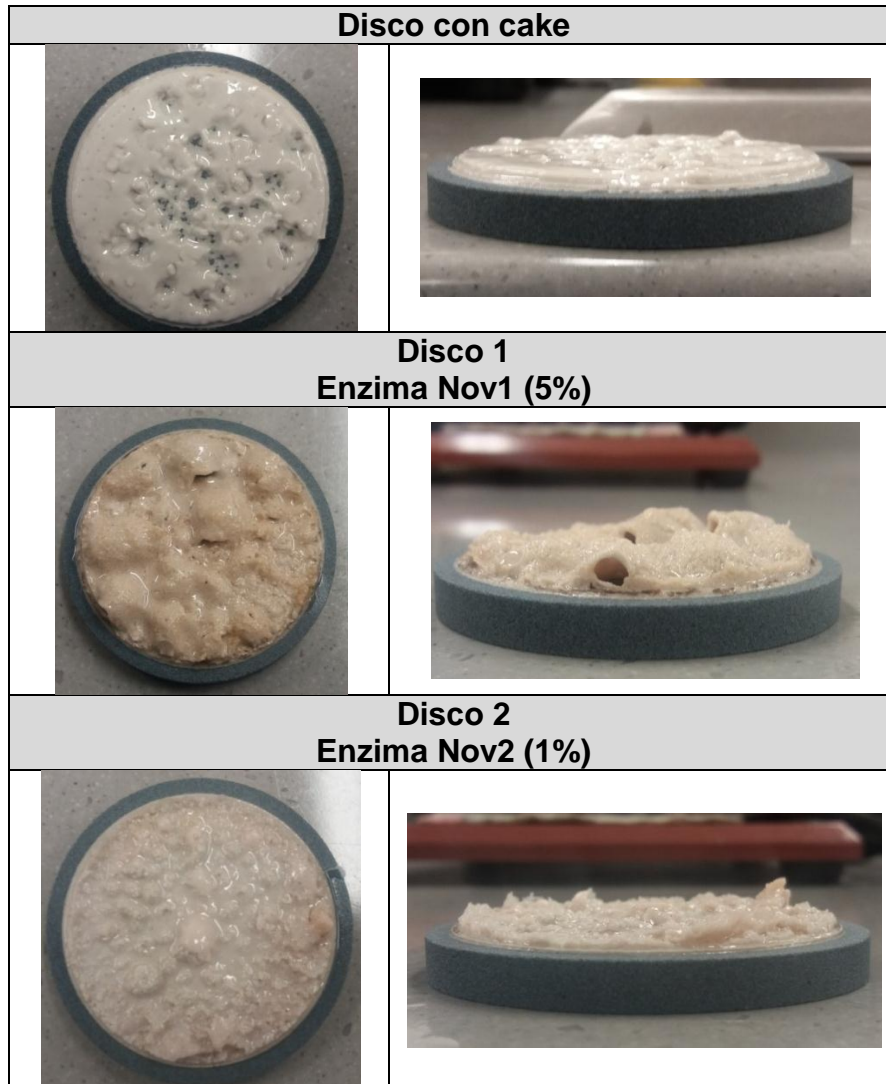


Como se observa en la gráfica, los discos tratados con los breaker que contenían las enzimas Nov1, Nov3 y Nov4 obtuvieron porcentaje de recuperación por encima del 90%, mientras que el disco tratado con el breaker de la enzima Nov2 tuvo un bajo porcentaje de recuperación que se encuentra en el 74.8% siendo más cercano al 66.6% que se obtuvo del disco que fue evaluado solo con el cake, por lo tanto se descartó el uso de la enzima Nov2 en un breaker. Con respecto a los otros tres breaker empleados se escogió, el que mayor porcentaje de recuperación del flujo inicial tuviera, en este caso se seleccionó el breaker que tenía en su composición la enzima Nov3 con un porcentaje del 97.2% sin descartar que el breaker con la enzima Nov4 tuvo un comportamiento del 96.5% y por ende se consideró que es una buena opción de tratamiento, sin embargo hay que tener en

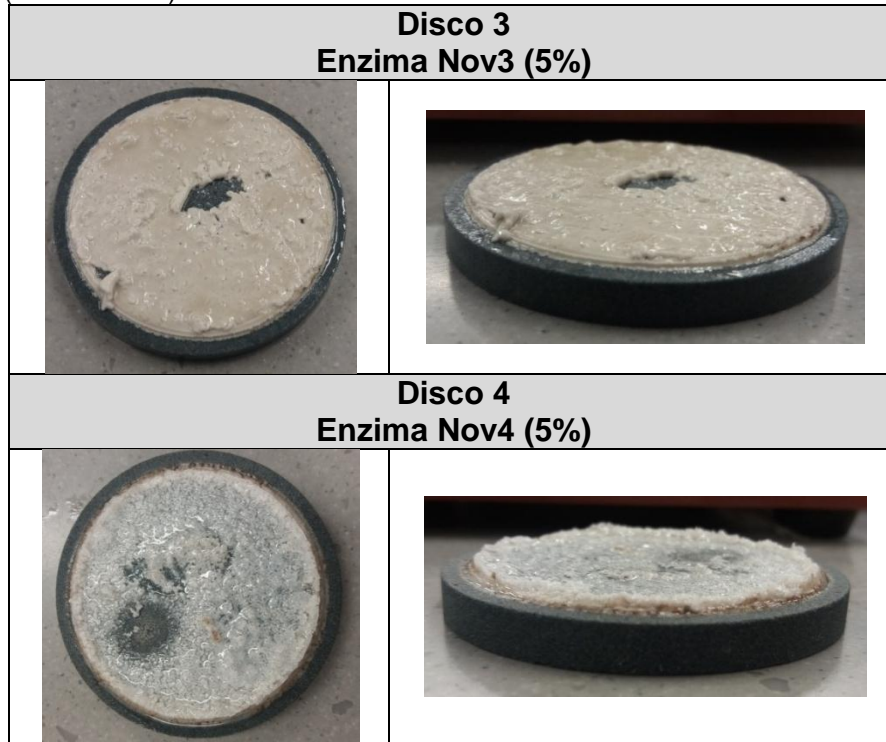
cuenta los análisis que se realizarán más adelante a los discos y a los tiempos de ruptura para poder obtener un resultado más apropiado.

3.2.2 Análisis visual de los discos sumergidos en el breaker. La finalidad del breaker empleando la enzima es que remueva el revoque, por lo tanto se evaluaron los discos que se trataron con las enzimas seleccionadas para ser utilizadas en cada breaker y compararlos con el disco que tiene el cake sin haber sometido a tratamiento con el rompedor, como se observa en el Cuadro 10 haciendo un análisis cualitativo para observar cual tuvo una mayor remoción

Cuadro 10. Análisis visual de los discos



Cuadro 10. (Continuación)



En el disco con el cake se pudo evidenciar que el revoque no está tratado por ningún breaker, solamente se observaron pequeños agujeros que se formaron al momento de hacer el retorno de flujo. En el disco 1 se ven espacios de aire entre el disco y el cake, aunque la enzima removió parte del cake, también logró desprenderlo en algunas zonas del disco. El disco 2 tuvo una media remoción del cake, en la imagen se ven picos y se puede diferenciar las zonas donde el cake fue degradado. Aunque en el disco 3 no se puede apreciar una gran remoción del cake al momento que se retiró estaba desprendido del disco en algunas zonas formando bolsas de aire y es por esta razón que dio un buen porcentaje de recuperación del fluido inicial al momento de hacer la prueba de retorno de flujo. El comportamiento del breaker sobre el disco 4 fue el más completo, debido a que removió gran parte del cake disminuyendo su espesor y se logró ver la superficie del disco sin que estuviera el revoque desprendido de éste; por lo tanto para éste análisis visual, el breaker que tuvo una mejor remoción del cake fue el diseñado con la enzima Nov4.

3.2.3 Análisis prueba de microscopía. Adicionalmente para hacer un estudio más detallado y corroborar los análisis realizados cualitativamente a cada disco, se realizó una prueba de microscopía mediante un microscopio de barrido electrónico (Figura 33) que puede producir imágenes a una alta resolución de la superficie de alguna muestra, y en vez de usar un haz de luz para producir las imágenes, utiliza un haz de electrones habiendo una interacción electrón-materia.

Figura 33. Microscopio de barrido electrónico



Para llevar a cabo esta prueba microscópica se puso primero a secar los discos (Figura 34), para evitar que el aceite con el que se saturó el disco altere las imágenes tomadas y no permitiera hacer una observación clara de las condiciones a las que se encuentra el disco.

Figura 34. Secado de los discos




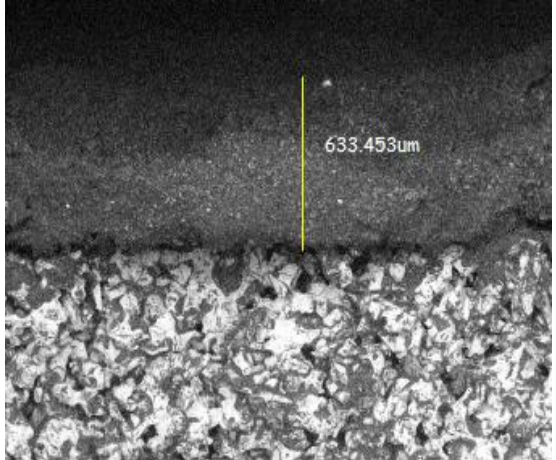
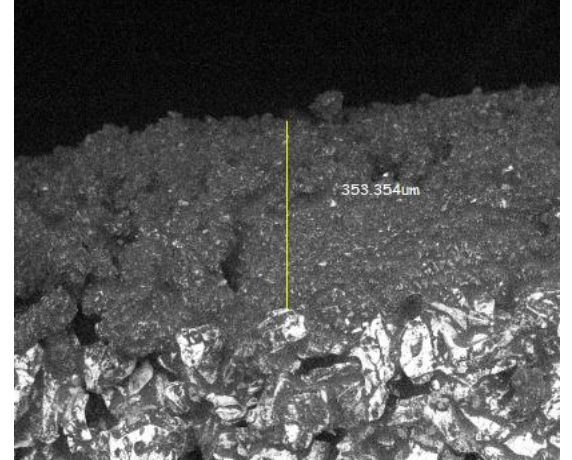
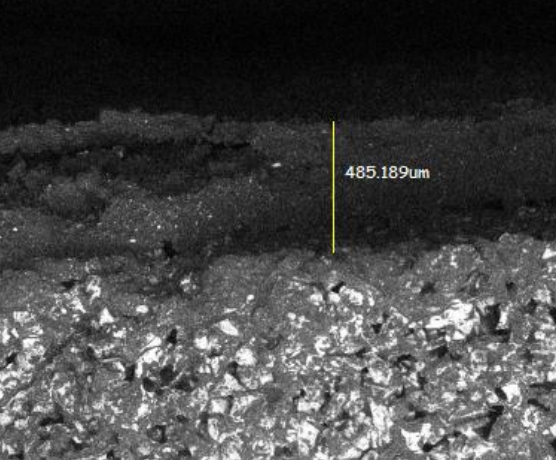
El disco se fragmentó en varias partes y se tomó una pequeña muestra que se colocó dentro de la caja de muestra del microscopio (Figura 35), el análisis se hizo por la cara lateral del disco para poder observar en imágenes la medida del espesor de residuo de revoque que quedó presente.

Figura 35. Análisis de la muestra del disco

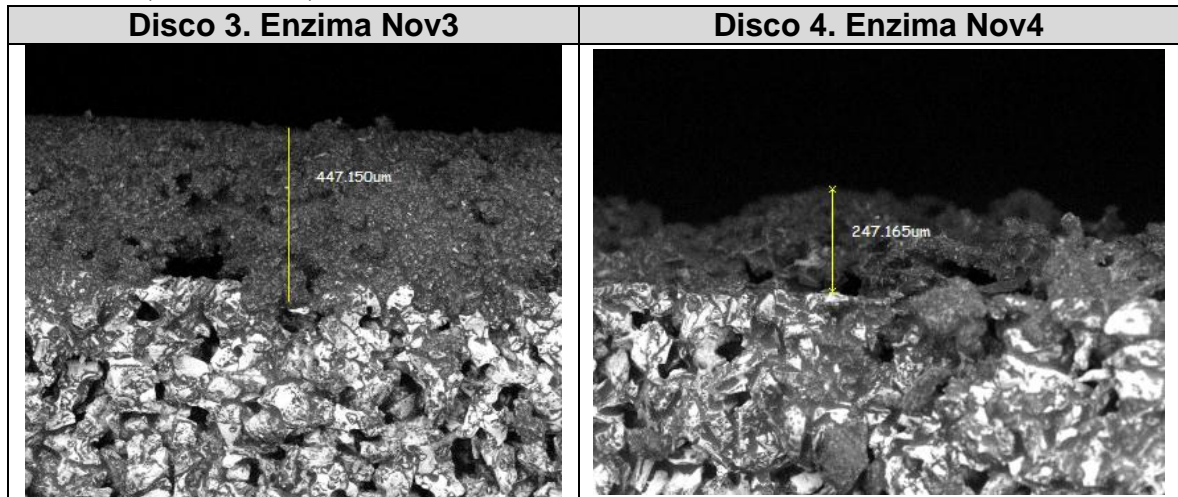


Luego del estudio de cada disco en el microscopio se obtuvieron las imágenes para cada uno de ellos, donde se pudo determinar la medida del espesor de cada cake presente en el disco mediante el uso de un software con el que se calibró la escala a la que se obtuvo la imagen y al momento de hacer la medición se hizo en una sección del cake que se viera compacta, sin presencia de bolsas de aire. El microscopio maneja una escala de grises, que para el caso del fluido de perforación, el color más oscuro es el elemento más liviano (polímero) y el color más claro es el elemento más pesado (carbonatos), así se puede determinar qué tipo de compuestos están en el residuo del cake. En el Cuadro 11 se pueden apreciar las imágenes captadas por el microscopio de barrido electrónico donde a cada disco que ha sido remojado en el breaker, se le hizo una medición del espesor del residuo del cake para saber que tanto disminuyó, en comparación con el disco que tenía el cake.

Cuadro 11. Microscopía de discos

Disco limpio	Disco con cake
	
Disco 1. EnzimaNov1	Disco 2. Enzima Nov2
	

Cuadro 11. (Continuación)



En estas imágenes tomadas por el microscopio se observó una disminución en los revoques que fueron tratados con los breaker, siendo comparados con el espesor del cake inicial que fue de 633.453 micrones. El espesor del disco 1 fue de 353.354 micrones, el del disco 2 de 485.189 micrones, el del disco 3 de 447.150 micrones y el del disco 4 de 247.165, comparando estos valores con el grosor del revoque del disco con el del cake sin tratar se pudo concluir que los breaker diseñados si degradan el cake y que son una buena alternativa como tratamiento de limpieza del fluido de perforación en el yacimiento. Con respecto a la limpieza del disco que pudo observar que la garganta de poro para los discos 1 y 2 estaban sucias y taponadas con el fluido de perforación, en cambio los discos 3 y 4 presentaron una buena limpieza del disco. De acuerdo a esto el disco con los mejores resultados en relación a grosor del revoque y limpieza del disco fue el número 4, por lo tanto el breaker con la enzima Nov4 fue el escogido en la prueba de microscopía.

3.2.4 Análisis de los tiempos de ruptura. El tercer parámetro que se evaluó fue el del tiempo de ruptura, este tiempo se tomó mientras se deja en remojo el cake con el breaker, y se obtuvieron los resultados descritos en la Tabla 10.

Tabla 10. Tiempos de ruptura de cada breaker

DISCO	TIEMPO DE RUPTURA (s)
Disco 1. Enzima Nov1 (5%)	25
Disco 2. Enzima Nov2 (1%)	85
Disco 3. Enzima Nov3 (5%)	17
Disco 4. Enzima Nov4 (5%)	13

Este tiempo de ruptura se usa como un criterio de selección, si el retorno de flujo da un resultado no esperado este tiempo de ruptura no se tiene en cuenta, como en este caso, pero en caso que el retorno de flujo y el análisis visual del disco sea

bueno y muy similar entre dos o más de estos se escoge el breaker que haya tenido un menor tiempo de ruptura. Como lo muestra la Tabla 10 el menor tiempo de ruptura fue para el breaker diseñado con la enzima Nov4 que obtuvo un tiempo de 13s seguido de la enzima Nov3 teniendo un tiempo de 17s, por lo tanto la enzima Nov4 empleada en el breaker a una concentración del 5% tuvo una acción más rápida en la degradación del revoque.

3.2.5 Breaker con la mejor eficiencia, selección de la mejor enzima. Hecho el análisis y estudio de cada disco se recopilaron los resultados obtenidos de cada uno y se seleccionó el breaker con el que se vio el mejor comportamiento. A continuación, en la Tabla 11 se resumen los resultados y la selección del disco que tuvo el mejor desempeño en cada prueba analizada.

Tabla 11. Selección del disco con el mejor comportamiento

Disco	Retorno de flujo	Análisis visual	Microscopía	Tiempo de ruptura
	% de recuperación	De 1 a 4, siendo 1 el mejor	Espesor del cake (micrones)	(segundos)
Disco 1. Enzima Nov1 (5%)	92.5	2	353.354	25
Disco 2. Enzima Nov2 (1%)	74.8	4	485.189	85
Disco 3. Enzima Nov3 (5%)	97.2	3	447.150	17
Disco 4. Enzima Nov4 (5%)	96.5	1	247.165	13
Disco seleccionado	Disco 3	Disco 4	Disco 4	Disco 4

A pesar que la prueba clave dentro de esta selección es la del retorno de flujo, se deben tener en cuenta los otros resultados para hacer una elección más minuciosa y detallada del breaker. Es por eso que aunque el porcentaje de recuperación fue mayor en el disco 3, al tener en cuenta el tiempo de ruptura, análisis visual y microscopía, se escogió el disco 4 tratado con el breaker diseñado con la enzima Nov4, debido a que tuvo un porcentaje de recuperación muy similar al del disco 3 y tuvo un mejor rendimiento en las otras pruebas. La importancia que tiene el análisis visual y la prueba de microscopía es determinar cual tiene el menor espesor de cake como residuo, porque al momento de ser llevado a un yacimiento, al hacer el completamiento puede taponar algunas mallas y esto reduciría la cantidad de producción esperada.

4. ANÁLISIS DE COSTOS ASOCIADO AL USO DE LAS ENZIMAS UTILIZADAS EN LA FORMULACIÓN DEL BREAKER.

El análisis de los costos del uso de las enzimas se llevó a cabo únicamente a escala laboratorio, se analizó el gasto empleado para la elaboración del fluido de perforación y de cada breaker con su respectiva variación en la concentración de la enzima. Luego se hizo una comparación entre los costos equivalentes a las enzimas seleccionadas argumentando si el breaker es rentable desde el punto de vista de costos, teniendo en cuenta el beneficio que se obtiene, en este caso el que más revoque remueva. El proyecto no se estudió ni llevó a escala industrial, debido que no se cuenta con los conocimientos suficientes a cerca de perforación y producción de un pozo petrolero, por eso no hizo parte de este estudio, sin embargo se cumplió con el objetivo planteado.

4.1 ANÁLISIS DE COSTOS

Para este análisis se tuvieron en cuenta los costos de los aditivos utilizados en el diseño del fluido de perforación y las sustancias químicas empleadas para la elaboración del breaker. En estos análisis se observan precios bajos, debido a que el proyecto fue realizado a escala laboratorio, en el que se utilizaron pequeñas cantidades de cada aditivo; para poder hallar el costo se tomó como referencia el precio de una libra de cada compuesto, y así se calculó el valor económico en pesos colombianos (COP) del porcentaje utilizado para la formulación.

Adicionalmente los costos para las enzimas Nov1, Nov3 y Nov4 a una concentración del 7%, no fueron calculados, debido que a esta concentración se quiso únicamente constatar que a una concentración mayor del 5% el comportamiento de la enzima era de forma lineal o que se saturaba el breaker y no había la remoción esperada.

4.1.1 Costos asociados a la elaboración del fluido de perforación. Con respecto a los costos operativos que se encuentran asociados al fluido de perforación, estos son los precios comerciales de los diferentes aditivos utilizados en esta formulación, los cuales se pueden evidenciar en la Tabla 12. El precio del agua no se tuvo en cuenta, debido que puede usarse el agua de la llave.

Tabla 12. Costos asociados al diseño del fluido de perforación.

Producto	Cantidad	Precio (COP)
Nov Xan D	1 lb	\$8.000
Soda caustica	1 lb	\$3.000
Aqua Film	1 lb	\$4.500
Nov Carb 200	1 lb	\$1.500

Tabla 12. (Continuación)

Producto	Cantidad	Precio (COP)
Nov Carb 325	1 lb	\$2.500
Myacide	500 ml	\$3.500
Revdust	1 lb	\$8.500

Para el análisis de costos por producto utilizado se muestra el costo asociado en 1 barril de laboratorio, la formulación se calculó a partir del respectivo cálculo de cantidades y los resultados se pueden apreciar en la Tabla 1; para conocer las cantidades de los aditivos utilizados a escala laboratorio es necesario hacer la aclaración que un barril en campo equivale a 350ml en laboratorio y a este equivale a una libra en campo, de igual manera es equivalente un gramo a un mililitro. Los costos del fluido se plantean en la Tabla 13.

Tabla 13. Costos del fluido de perforación.

Producto	Cantidad por unidad de medida	Cantidad en laboratorio	Precio (COP)
Nov Xan D	1 lb	1,5 g	\$26
Soda caustica	1 lb	0,5 g	\$3
Aqua film	1 lb	6 g	\$59
Nov Carb200	1 lb	7 g	\$23
Nov Carb 325	1 lb	18 g	\$99
Myacide	500 ml	0,2 ml	\$2
Revdust	1 lb	5 g	\$94
TOTAL			\$307

4.1.2 Costos por libra asociados al sistema rompedor de revoque. Este análisis es de manera general, en la que no se tiene en cuenta el costo de la enzima, en la Tabla 14. Se puede ver el precio para cada aditivo por libra, utilizado en una formulación del breaker a un volumen de 150 mla nivel laboratorio.

Tabla 14. Costos asociados al diseño del rompedor de revoque.

Producto	Cantidad (lb)	Precio (COP)	Proveedor
Ácido	1 lb	\$3.500	Disan
Quelante	1 lb	\$5.000	Disan
Solvente	1 lb	\$3.000	Disan
Surfactante	1 lb	\$4.500	NOV

Para poder probar el breaker formulado, se utilizaron cuatro enzimas diferentes las que se denominan como Nov1, Nov2, Nov3 y Nov4 de igual manera para poder observar el comportamiento y ver cuál de ellas remueve mejor el revoque, para evaluarlas se probaron teniendo en cuenta lo que se sugiere en el capítulo 2. En la Tabla 15, 16, 17y 18se muestran los costos totales asociados a la formulación de

cada breaker, variando las cuatro enzimas y a las tres concentraciones seleccionadas. Para la elaboración del breaker fue necesario calcular las cantidades por cada aditivo, estos valores se pueden evidenciar en la Tabla 3y 4,

Tabla 15. Costos implementados en el laboratorio para 150ml con la enzima 1, variando la concentración en tres porcentajes.

Concentración	Precio total (COP)
1%	\$ 412
3%	\$ 476
5%	\$ 541

Tabla 16. Costos implementados en el laboratorio para 150ml con la enzima 2, variando la concentración en tres porcentajes.

Concentración	Precio total (COP)
1%	\$ 402
3%	\$ 448
5%	\$ 494

Tabla 17. Costos implementados en el laboratorio para 150ml con la enzima 3, variando la concentración en tres porcentajes.

Concentración	Precio total (COP)
1%	\$ 403
3%	\$ 450
5%	\$ 498

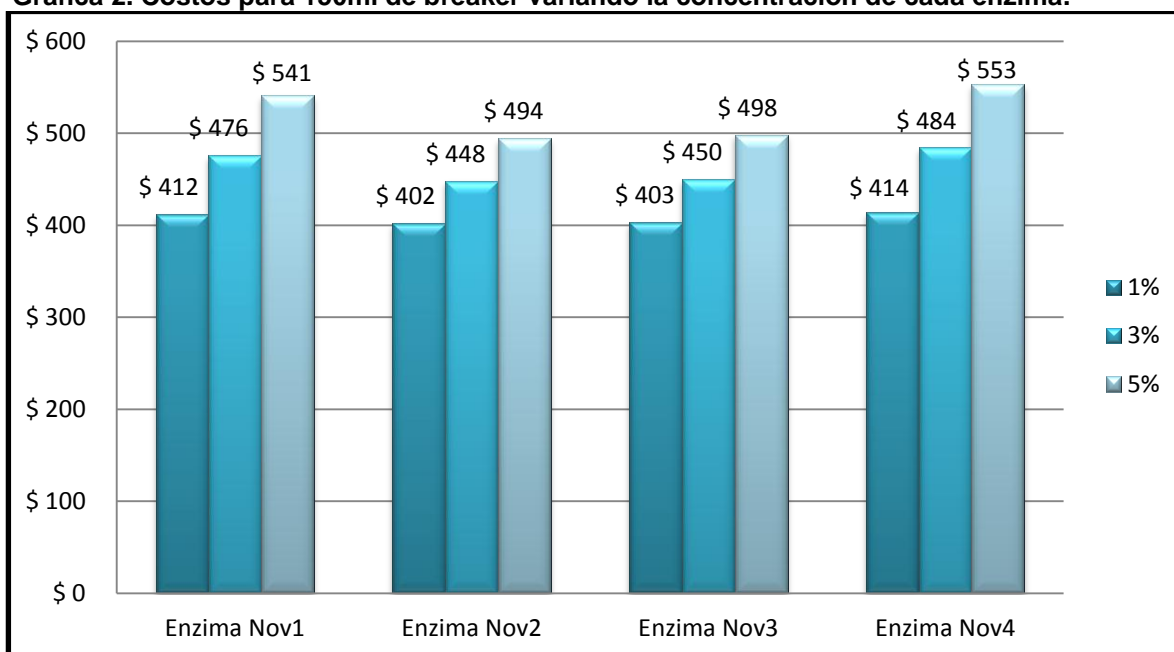
Tabla 18. Costos implementados en el laboratorio para 150ml con la enzima 4, variando la concentración en tres porcentajes.

Concentración	Precio total (COP)
1%	\$ 414
3%	\$ 484
5%	\$ 553

Con respecto a los resultados obtenidos en la Tabla 15, 16, 17y 18se observa que los costos más altos para la elaboración del breaker se presentan con la enzima Nov4, siendo esta más costosa con respecto a las otras tres, y la más económica es la enzima Nov2.

Debido a que la tendencia al aumento de precios es igual para las cuatro enzimas, en la Gráfica 2 se puede observar el aumento de costos con respecto al aumento en la variación de la concentración para cada enzima, para preparar 150ml de breaker.

Gráfica 2. Costos para 150ml de breaker variando la concentración de cada enzima.



En la Gráfica 2 se observa que el costo de la formulación del breaker crece a medida que aumenta la concentración de la enzima. La concentración de enzima más costosa es la de 5% con respecto a las otras concentraciones pero de igual manera se puede evidenciar este comportamiento de aumento de costos con respecto a la concentración en la Tabla 19.

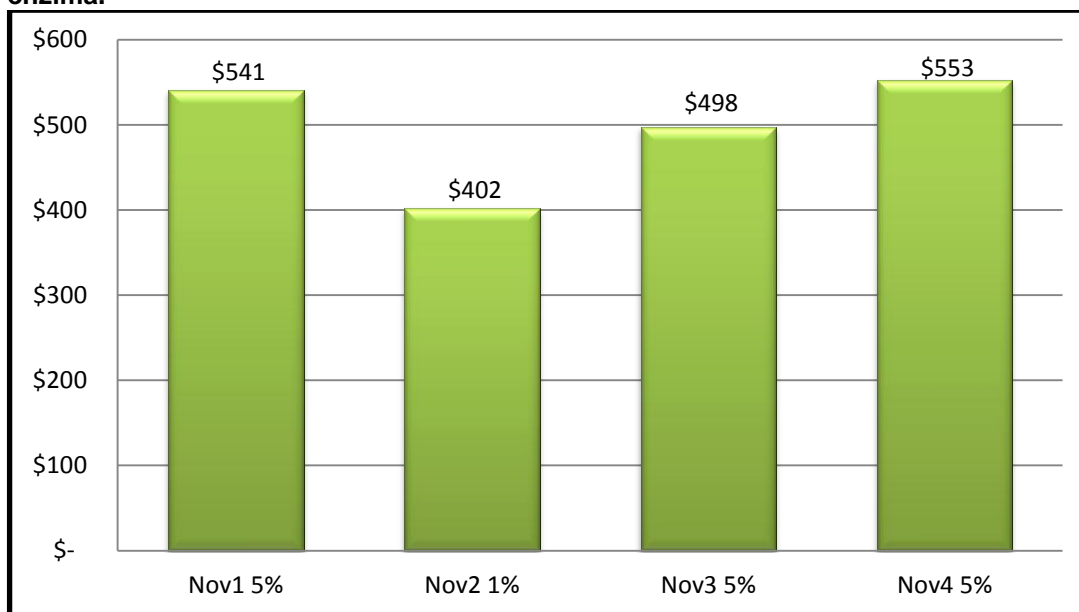
Tabla 19. Variación de costos con respecto a la variación en la concentración de la enzima para preparar 150ml

Cambio en la concentración	Nov1		Nov2		Nov3		Nov4	
	Dinero (COP)	variación	Dinero (COP)	variación	Dinero (COP)	variación	Dinero (COP)	Variación
Entre 5% y 1%	\$ 129	31.34%	\$ 91	22.64%	\$ 94	23.40%	\$ 139	33.43%
Entre 5% y 3%	\$ 65	13.56%	\$ 46	10.18%	\$ 47	10.47%	\$ 69	14.32%
Entre 3% y 1%	\$ 64	15.56%	\$ 46	11.31%	\$ 47	11.70%	\$ 69	16.72%

En la Tabla 19, se muestra un paralelo entre los costos asociados para las enzimas dependiendo del aumento de su concentración, observando que la variación más alta se presenta entre 5% y 1% siendo superior al 20% en los 4 casos.

Se realiza una comparación de costos entre las concentraciones seleccionadas en el capítulo dos para cada enzima, que en este caso es: para la enzima Nov1, Nov3 y Nov4 el 5% y para la enzima Nov2 el 3%.

Gráfica 3. Costos totales del breaker para las concentraciones seleccionadas de cada enzima.



Teniendo en cuenta el resultado de la Gráfica 3, se puede evidenciar el comportamiento de la concentración de enzimas en relación a sus costos, a continuación se puede observar las diferencias entre concentraciones y el porcentaje de comparación de los precios entre la enzima Nov4 y las demás enzimas:

- La diferencia de la concentración de 5% y 1% entre la enzima Nov4 y la enzima Nov2 respectivamente, es de 37.40%, lo que en dinero se ve reflejado en una diferencia de \$150 COP con respecto a 150ml de la solución.
- La diferencia de la concentración de 5% entre la enzima Nov4 y la enzima Nov3 es de 11.09%, lo que en dinero se ve reflejado en una diferencia de \$55 COP con respecto a 150ml de la solución.
- La diferencia de la concentración de 5% entre la enzima Nov4 y la enzima Nov1 es de 2.17%, lo que en dinero se ve reflejado en una diferencia de \$12 COP con respecto a 150ml de la solución.

La enzima Nov2 aparentemente puede ser una buena opción de selección como la mejor enzima, porque es la más económica debido a que utiliza el menor porcentaje de concentración y logra la remoción del cake, pero a pesar de que fuese económica y eficiente no resulta ser la que muestra un mejor rendimiento de remoción, por lo tanto, retomando lo analizado en el capítulo 3 la que mejor comportamiento presenta es la enzima Nov4 evidenciando que es la enzima con los mejores resultados, pero con respecto a los costos se observa un incremento comparado con los obtenidos por las otras tres enzimas (Nov1, Nov2 y Nov3),

Aunque la preparación en campo no hace parte del estudio de costos, en la Tabla 20 se observa el costo de un barril de breaker preparado con cada enzima a la concentración seleccionada, para dar idea de lo que puede llegar a costar un tratamiento del rompedor de revoque en campo, teniendo en cuenta que un barril equivale a 158.987ml.

Tabla 20. Costos asociados a un barril de breaker en campo

Enzima	Costo de 150ml (COP)	Costo de un barril (COP)
Nov1 (5%)	\$541	\$573.413
Nov2 (1%)	\$402	\$426.085
Nov3 (5%)	\$498	\$527.836
Nov4 (5%)	\$553	\$586.132

Los volúmenes de la cantidad de barriles utilizados en un pozo varían dependiendo las condiciones de pozo (volumen, longitud, profundidad) pero los tratamientos para el campo donde se utiliza la formulación del fluido DRILL-IN pueden llegar a oscilar entre 15 y 60 barriles de rompedor de revoque.

Finalmente al realizar la comparación del comportamiento del uso de un breaker con enzimas, se logra observar que al implementar el rompedor de cake este representara un incremento en costos de la operación global, aparentemente siendo esto un factor negativo, pero a pesar de que el uso del breaker genera un costo adicional, es necesario aclarar que con este gasto se conseguiría un aumento con respecto a la producción, debido que al disminuir el espesor del revoque, se logra aumentar la producción del yacimiento y este aumento se traducirá a una mayor cantidad de hidrocarburo extraído en decir mayores ganancias económicas.

5. CONCLUSIONES

- Las cuatro enzimas presentaron un buen comportamiento en la formulación del rompedor, debido que al ser sometidas a condiciones de temperatura (200°F) y presión (500psi), mantuvieron sus propiedades químicas siendo capaces de actuar removiendo los polímeros presentes en el revoque, unas removiendo en más cantidad que otras, pero se logró aumentar el paso de fluido por el disco en donde estaba formado el revoque.
- Al implementar las enzimas Nov1, Nov3 y Nov4 al 5% de concentración en el rompedor de revoque, se obtuvieron buenos resultados en las pruebas de evaluación del breaker, que al ser comparadas con los datos obtenidos con el uso de la enzima Nov2, que actuó con una cantidad del 1%, arrojó resultado bajos comparados con los obtenidos por las otras tres enzimas, por lo tanto se puede descartar el uso de esta enzima en la formulación del breaker.
- Para la elección de la mejor enzima en cuanto a remoción, tiempo de ruptura porcentaje de recuperación, y microscopía, se puede decir que la enzima Nov4 es la que mejor comportamiento presenta a un porcentaje del 5%, obteniendo el un porcentaje de recuperación de un 96.5%, el menor espesor de cake con un valor de 247.165 micrómetros y un tiempo de ruptura de 13 segundos
- Se logró comprobar que al emplear las enzima en el breaker a una concentración superior, para este caso de un 7%, el rompedor del revoque se saturó y esto impidió que la enzima actuara de forma adecuada, reduciendo la remoción que se logró con la concentración al 5% en las tres enzimas que tuvieron los mejores resultados con esta concentración.
- Con la prueba de microscopía se pudo observar que las enzimas Nov3 y Nov4, además de remover el revoque, limpiaron el disco es decir limpiaron las gargantas de poro y así se logra remover el daño en la formación.

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda evaluar el funcionamiento del breaker modificando uno de los otros compuestos que hacen parte de la formulación.
- Modificar el valor de pH para cada enzima para estudiar su comportamiento y ver hasta que rango afecta este parámetro e impide la correcta acción de la enzima.
- Evaluar incrementos en la temperatura para determinar hasta que rango la enzima tiene un buen comportamiento y no se presentan problemas de desnaturalización.
- Realizar la evaluación de las enzimas probando un fluido de perforación formulado con otro tipo de almidón y/U otras concentraciones de polímeros
- Para la enzima Nov2, se recomienda evaluarla variando el valor de pH y disminuyendo la temperatura para ver si tiene un mejor funcionamiento modificando estas condiciones.

BIBLIOGRAFÍA

ABBOTT, Susan et al. Baroid: The complete fluids Company. Halliburton energyservices, Inc. Manual de fluidos de perforación. 1999.

API. Manual de Fluidos de Perforación. Instituto Americano del Petróleo. Texas, USA. 2001.

BAKER, Hughes et al. Fluidos manual de ingeniería. Houston. Baker Hughes incorporated. 1998.

BLAND, Ron. et al. HP/HT Drilling Fluids Challenges. EN. Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition (13-15, Noviembre: Bangkok). Artículo IADC/SPE 10373, 2006..

E. BATTISTEL et al. Enzyme Breakers For Chemically Modified Starches. SPE International Symposium on Oilfield Chemistry held in The Woodlands (25-27 May, Sheveningen, The Netherlands). Artículo SPE-94702-MS, 2005.

Encyclopedia of Chemical Technology, volume 17, John Wiley & Sons, New York City (1982) 282.

GALL, B. L. AND RAIBLE, C. J.: "Molecular Size Studies of Degraded Fracturing Fluid Polymers," paper SPE 13566 presented at the 1985 International Symposium on Oilfield and Geothermal Chemistry, Phoenix, April 9-11.

GONZÁLEZ, Héctor. Análisis y evaluación de la aplicación de tecnología a los fluidos de perforación para el campo gasífero yucal placer, con la finalidad de optimizar el fluido utilizado. Trabajo de grado Ingeniero de petróleos. Caracas, Venezuela. Universidad central de Venezuela. 2003.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización. Bogotá D.C: El Instituto, 2008.

_____. Referencias bibliográficas. Contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá: El instituto. 2008. 33p.

LARAMAY, S. B., Norman, L. R., and Carathers, B. K.: "The Effect of Delayed Enzyme Breakers on Filter Cake Cleaning in Southeastern New Mexico Stimulation Jobs," paper SPE 23983 presented at the 1992 SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference, Midland, March 18-20.

MARK R. LUYSTER Y SYED ALI A. factors affecting the performance of Enzyme Breakers for Removal of Xanthan-based filter Cakes. SPE International Symposium on Oilfield Chemistry held in The Woodlands (23-24, Febrero: Texas). ArtículoSPE-58749-MS, 2000.

M-I Norway Technical Report TR-97/0, "Enzymes for Down Hole Clean-up."

MOHAMMED H. AL-KHALDI et al. Factors Affecting the Performance of Enzyme Breakers for Removal of Xanthan-Based Filter Cakes. SPE International Symposium on Oilfield Chemistry held in The Woodlands (20-22, Septiembre: Texas). ArtículoSPE -147863-EM, 2011.

MOORHOUSE, R. "What is Xanthan Gum?", Rhone-Polenc Technical Presentation.

NORMAN, L. R., VITTHAL, S., AND TERRACINA, J. M.: "New Breaker Technology for Fracturing High Permeability Formations," paper SPE 30097 presented at the 1995 SPE European Damage Symposium, The Hague, May 15-16

Novo's Handbook of Practical Biotechnology, C. O.L. Boyce (ed.), Novo Industry A/S, Bagsvaerd, Denmark (1986).

PARKER, M. A. AND LARAMAY, S. B.: "Properties and Application of Delayed Release Breakers," paper SPE 24300 presented at the 1992 SPE Mid-Continent Gas Symposium, Amarillo, April 13-14.

PDVSA. Fluidos de Perforación. Centro Internacional de Educación y Desarrollo (CIED). Caracas. 2002

PEREZ, M. Diseño de fluidos viscoelásticos para la perforación de hoyos productores de los campos Borburata y la vc Victoria. Trabajo de grado Ingeniero de Petróleos. Caracas. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Petróleo. 2011.

PRASHANT CHOPADE et al. Novel Stabilized Enzyme Breaker for Fracturing Applications. . SPE International Symposium on Oilfield Chemistry held in The Woodlands (1-5 March,, Oklahoma, USA). ArtículoSPE-173583-MS, 2015.

R.E. Himes et al. Enzyme Breaker Adsorption in Sandstones and Coal. SPE International Symposium on Oilfield Chemistry held in The Woodlands (14-15 February, Lafayette, Louisiana). ArtículoSPE-31095-MS, 2006.

SUBHASH, N. et al. Future Challenges of Drilling Fluids and Their Rheological Measurements. EN.AADE Fluids Conference and Exhibition (6-7, Abril Houston, Texas). Artículo AADE-10-DF-HO-4, 2010.

TEHRANI, M. et al. Water-Based Drilling Fluid for HP/HT Applications. EN. SPE International Symposium on Oilfield Chemistry held (1-3, Marzo: Houston, Texas). Artículo SPE 105485, 2007.p. 1.

WELLINGTON, S.L., "Biopolymer Solution Viscosity Stabilization-Polymer Degradation and Anti-Oxidant Use", SPE Journal, Dec, 1983

ANEXOS

ANEXO A.
COSTOS Y CANTIDADES IMPLEMENTADAS EN EL LABORATORIO PARA
150ML PARA LA ENZIMA NOV1 VARIANDO LA CONCENTRACIÓN EN TRES
PORCENTAJES.

Concentración 1%

Materia prima	Unidad de medida	Cantidad necesaria por unidad	Costo respecto a la unidad (COP)	Total
Ácido	1lb	28.57g	\$220	
Quelante	1lb	9.75g	\$107	
Solvente	1lb	6.75g	\$45	
Surfactante	1lb	0.75g	\$7	
Enzima 1	500ml	1,725g	\$32	
				\$412

Concentración 3%

Materia prima	Unidad de medida (lb)	Cantidad necesaria por unidad	Costo respecto a la unidad (COP)	Total
Ácido	1lb	28.57g	\$220	
Quelante	1lb	9.75g	\$107	
Solvente	1lb	6.75g	\$45	
Surfactante	1lb	0.75g	\$7	
Enzima 1	500ml	5,17 g	\$97	
				\$476

Concentración 5%

Materia prima	Unidad de medida (lb)	Cantidad necesaria por unidad	Costo respecto a la unidad (COP)	Total
Ácido	1lb	28.57g	\$220	
Quelante	1lb	9.75g	\$107	
Solvente	1lb	6.75g	\$45	
Surfactante	1lb	0.75g	\$7	
Enzima 1	500ml	8,62g	\$161	
				\$541

ANEXO B.
COSTOS Y CANTIDADES IMPLEMENTADAS EN EL LABORATORIO PARA
150ML PARA LA ENZIMA NOV2 VARIANDO LA CONCENTRACIÓN EN TRES
PORCENTAJES.

Concentración 1%

Materia prima	Unidad de medida (lb)	Cantidad necesaria por unidad	Costo respecto a la unidad (COP)	Total
Ácido	1lb	28.57g	\$220	
Quelante	1lb	9.75g	\$107	
Solvente	1lb	6.75g	\$45	
Surfactante	1lb	0.75g	\$7	
Enzima 2	500ml	1.725g	\$23	
				\$402

Concentración 3%

Materia prima	Unidad de medida (lb)	Cantidad necesaria por unidad	Costo respecto a la unidad (COP)	Total
Ácido	1lb	28.57g	\$220	
Quelante	1lb	9.75g	\$107	
Solvente	1lb	6.75g	\$45	
Surfactante	1lb	0.75g	\$7	
Enzima 2	500ml	5,17g	\$68	
				\$448

Concentración 5%

Materia prima	Unidad de medida (lb)	Cantidad necesaria por unidad	Costo respecto a la unidad (COP)	Total
Ácido	1lb	28.57g	\$220	
Quelante	1lb	9.75g	\$107	
Solvente	1lb	6.75g	\$45	
Surfactante	1lb	0.75g	\$7	
Enzima 2	500ml	8,62g	\$114	
				\$494

ANEXO C.
COSTOS Y CANTIDADES IMPLEMENTADAS EN EL LABORATORIO PARA
150ML PARA LA ENZIMA NOV3 VARIANDO LA CONCENTRACIÓN EN TRES
PORCENTAJES.

Concentración 1%

Materia prima	Unidad de medida (lb)	Cantidad necesaria por unidad	Costo respecto a la unidad (COP)	Total
Ácido	1lb	28.57g	\$220	
Quelante	1lb	9.75g	\$107	
Solvente	1lb	6.75g	\$45	
Surfactante	1lb	0.75g	\$7	
Enzima 3	500ml	1,53g	\$24	
				\$403

Concentración 3%

Materia prima	Unidad de medida (lb)	Cantidad necesaria por unidad	Costo respecto a la unidad (COP)	Total
Ácido	1lb	28.57g	\$220	
Quelante	1lb	9.75g	\$107	
Solvente	1lb	6.75g	\$45	
Surfactante	1lb	0.75g	\$7	
Enzima 3	500ml	4,59g	\$71	
				\$450

Concentración 5%

Materia prima	Unidad de medida (lb)	Cantidad necesaria por unidad	Costo respecto a la unidad (COP)	Total
Ácido	1lb	28.57g	\$220	
Quelante	1lb	9.75g	\$107	
Solvente	1lb	6.75g	\$45	
Surfactante	1lb	0.75g	\$7	
Enzima 3	500ml	7,65g	\$118	
				\$498

**ANEXO D.
COSTOS Y CANTIDADES IMPLEMENTADAS EN EL LABORATORIO PARA
150ML PARA LA ENZIMA NOV4 VARIANDO LA CONCENTRACIÓN EN TRES
PORCENTAJES.**

Concentración 1%


Materia prima	Unidad de medida (lb)	Cantidad necesaria por unidad	Costo respecto a la unidad (COP)	Total
Ácido	1lb	28.57g	\$220	
Quelante	1lb	9.75g	\$107	
Solvente	1lb	6.75g	\$45	
Surfactante	1lb	0.75g	\$7	
Enzima 4	500ml	1,965g	\$35	
				\$414

Concentración 3%

Materia prima	Unidad de medida (lb)	Cantidad necesaria por unidad	Costo respecto a la unidad (COP)	Total
Ácido	1lb	28.57g	\$220	
Quelante	1lb	9.75g	\$107	
Solvente	1lb	6.75g	\$45	
Surfactante	1lb	0.75g	\$7	
Enzima 4	500ml	5,895g	\$104	
				\$484

Concentración 5%

Materia prima	Unidad de medida (lb)	Cantidad necesaria por unidad	Costo respecto a la unidad (COP)	Total
Ácido	1lb	28.57g	\$220	
Quelante	1lb	9.75g	\$107	
Solvente	1lb	6.75g	\$45	
Surfactante	1lb	0.75g	\$7	
Enzima 4	500ml	9,825g	\$173	
				\$553

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016


AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL LUMIERES

Nosotros **Mayra Alejandra Ballesteros Guio y Julieth Marcela Jara Romero** en calidad de titulares de la obra **Evaluación del uso de enzimas empleadas en el sistema rompedor de revoque para la degradación de polímeros presentes en el fluido de perforación Drill-In a escala laboratorio**, elaborada en el año **2016**, autorizamos al **Sistema de Bibliotecas de la Fundación Universidad América** para que incluya una copia, indexe y divulgue en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres, la obra mencionada con el fin de facilitar los procesos de visibilidad e impacto de la misma, conforme a los derechos patrimoniales que nos corresponden y que incluyen: la reproducción, comunicación pública, distribución al público, transformación, en conformidad con la normatividad vigente sobre derechos de autor y derechos conexos (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, entre otras).

Al respecto como Autores manifestamos conocer que:

- La autorización es de carácter no exclusiva y limitada, esto implica que la licencia tiene una vigencia, que no es perpetua y que el autor puede publicar o difundir su obra en cualquier otro medio, así como llevar a cabo cualquier tipo de acción sobre el documento.
- La autorización tendrá una vigencia de cinco años a partir del momento de la inclusión de la obra en el repositorio, prorrogable indefinidamente por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales del autor y podrá darse por terminada una vez el autor lo manifieste por escrito a la institución, con la salvedad de que la obra es difundida globalmente y cosechada por diferentes buscadores y/o repositorios en Internet, lo que no garantiza que la obra pueda ser retirada de manera inmediata de otros sistemas de información en los que se haya indexado, diferentes al Repositorio Digital Institucional – Lumieres de la Fundación Universidad América.
- La autorización de publicación comprende el formato original de la obra y todos los demás que se requiera, para su publicación en el repositorio. Igualmente, la autorización permite a la institución el cambio de soporte de la obra con fines de preservación (impreso, electrónico, digital, Internet, intranet, o cualquier otro formato conocido o por conocer).
- La autorización es gratuita y se renuncia a recibir cualquier remuneración por los usos de la obra, de acuerdo con la licencia establecida en esta autorización.
- Al firmar esta autorización, se manifiesta que la obra es original y no existe en ella ninguna violación a los derechos de autor de terceros. En caso de que el trabajo haya sido financiado por terceros, el o los autores asumen la responsabilidad del cumplimiento de los acuerdos establecidos sobre los derechos patrimoniales de la obra.
- Frente a cualquier reclamación por terceros, el o los autores serán los responsables. En ningún caso la responsabilidad será asumida por la Fundación Universidad de América.
- Con la autorización, la Universidad puede difundir la obra en índices, buscadores y otros sistemas de información que favorezcan su visibilidad.

Conforme a las condiciones anteriormente expuestas, como autores establecemos las siguientes condiciones de uso de nuestra obra de acuerdo con la **licencia Creative Commons** que se señala a continuación:

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

Atribución- no comercial- sin derivar: permite distribuir, sin fines comerciales, sin obras derivadas, con reconocimiento del autor.



Atribución – no comercial: permite distribuir, crear obras derivadas, sin fines comerciales con reconocimiento del autor.



Atribución – no comercial – compartir igual: permite distribuir, modificar, crear obras derivadas, sin fines económicos, siempre y cuando las obras derivadas estén licenciadas de la misma forma.




Licencias completas: http://co.creativecommons.org/?page_id=13

Siempre y cuando se haga alusión de alguna parte o nota del trabajo, se debe tener en cuenta la correspondiente citación bibliográfica para darle crédito al trabajo y a sus autores.

Para constancia se firma el presente documento en Bogotá D.C., a los 27 días del mes de Octubre del año 2016.

LOS AUTORES:

Autor 1

Nombres	Apellidos
Mayra Alejandra	Ballesteros Guio
Documento de identificación No	Firma
1057588240	

Autor 2

Nombres	Apellidos
Julieth Marcela	Jara Romero
Documento de identificación No	Firma
1075665289	