

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA EFECTIVIDAD DE LA *CAESALPINIA CORIARIA* COMO AGENTE DEFLOCULANTE EN EL TRATAMIENTO DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE AGUA BENTONÍTICO AL 5 % CONTAMINADO CON YESO ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Ramos U. Paola D.,
Rodríguez B. Noyka E.
Para optar al Título
de Ingeniero de Petróleo

Caracas, Octubre de 2018

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA EFECTIVIDAD DE LA *CAESALPINIA CORIARIA* COMO AGENTE DEFLOCULANTE EN EL TRATAMIENTO DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE AGUA BENTONÍTICO AL 5 % CONTAMINADO CON YESO ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

Tutor Académico: Profa. Yujeisly Reina

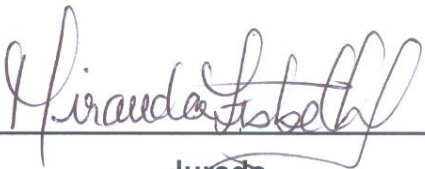
Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Ramos U. Paola D.,
Rodríguez B. Noyka E.
Para optar al Título
de Ingeniero de Petróleo

Caracas, Octubre de 2018

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería de Petróleo, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por las Bachilleres Ramos U. Paola D., y Rodríguez B. Noyka E.; titulado:

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA EFECTIVIDAD DE LA CAESALPINIA CORIARIA COMO AGENTE DEFLOCULANTE EN EL TRATAMIENTO DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE AGUA BENTONÍTICO AL 5 % CONTAMINADO CON YESO ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero de Petróleo y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran **APROBADO**.



Jurado

Profa. Lisbeth Miranda



Jurado

Prof. Richard Muñoz



Profa. Yujeisly Reina

Tutora

DEDICATORIA

A mi madre Isabel por todo su apoyo, esfuerzo y sacrificio durante todos estos años y de esta manera ayudarme a cumplir un sueño más. Gracias infinitas.

A mi hijo Daniel Alejandro por ser mi motor, mi inspiración y mi fuerza para seguir adelante. Gracias a ti he podido continuar para brindarte el mejor de mis legados, el ejemplo. Te amo hijo.

A mi tía Ginette por ser una segunda madre para mí y apoyarme en los momentos difíciles.

A mi hermana Valery, por escucharme y apoyarme aún sin entenderme.

A mis abuelos por ser mis segundos padres quien con su amor y dedicación me enseñaron que con constancia y sobre todo paciencia todo es posible. Los amo.

Paola Ramos

DEDICATORIA

A mi amado hijo, Andrés Arteaga, por ser mi principal motivación, por inspirar en mí el deseo de ser mejor persona y una profesional integral, por enseñarme que, sin importar el cansancio, las horas sin dormir, las frustraciones, tengo que perseverar hasta lograr el éxito en cada aspecto de mi vida, todo esto con el propósito de ser tu modelo a seguir. Te amo inmensamente.

A mis padres, Noika Bautista y Cecilio Rodríguez, por convertirme en la persona que soy, por inculcarme los mejores valores, humildad y honestidad, por ser los padres más amorosos e incondicionales y por apoyarme en cada paso que decido dar en la vida, siempre serán mi ejemplo y a ustedes dedicaré todos mis logros. Los amo.

A mi abuela, Gladys Ojeda, quien fue mi mejor amiga y mi mayor inspiración, por brindarme tú cariño y apoyo en todo momento, por enseñarme el valor del trabajo y a disfrutar las recompensas, porque te hubiese hecho muy feliz compartir conmigo este logro, mi dedicatoria es para ti. Te extrañaré y recordare siempre con mucho amor.

Noyka Rodríguez

AGRADECIMIENTOS

A la ilustre Universidad Central de Venezuela por abrirme sus puertas y formarme como profesional de la casa que vence las sombras.

A mi tutora Yujeisly Reina por permitirnos llevar a cabo este proyecto, su asesoría y orientación fueron esenciales para completar este trabajo.

A Dios por inspirarme y darme fuerza para seguir adelante en todo momento, brindándome paciencia y sabiduría para culminar con éxito cada una de mis metas.

A mi familia por haberme dado la fortaleza para seguir adelante y no desfallecer en los momentos que sentía que ya no podía.

A los profesores que con cada cátedra fueron creando bases que permitieron solidificar los conocimientos adquiridos y así finalmente poder llevar a cabo esta investigación.

A mis compañeros en especial a Julio Hernández quien nos ayudó a hacer la investigación más llevadera.

A mi compañera de tesis Noyka quien aceptó emprender este reto junto conmigo, quien con su paciencia y sabiduría hizo la investigación más agradable. Gracias por esa amistad que logramos labrar en el camino.

A todos los que día a día me dieron un granito de arena para que fuera más fácil mi andar por la universidad y apoyarme en todo momento sobre todo con mi hijo. De corazón gracias a todos.

Paola Ramos

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por haber labrado para mí una vida privilegiada rodeada de personas buenas e inspiradoras y por darme siempre la voluntad de seguir adelante.

A la ilustre Universidad Central de Venezuela, por abrirme sus puertas, por ser mi segundo hogar y por permitirme forjar una carrera como profesional integral.

A mis padres, por inculcarme la pasión por el estudio y por todos los sacrificios que hicieron para que lograra obtener un título profesional.

A mi esposo, Carlos Arteaga, por brindarme su apoyo en todo aspecto de mi vida y por siempre inspirar en mí aptitudes para el emprendimiento.

A nuestra tutora, Yujeisly Reina, por apoyarnos en el desarrollo de este trabajo, por la dedicación y paciencia.

A todos aquellos compañeros que se convirtieron en amigos incondicionales, gracias por hacer el camino más ameno.

A todos los profesores de la Escuela de Ingeniería de Petróleo de la UCV, por los conocimientos impartidos y por ser parte fundamental en la realización de este sueño.

A mi compañera, Paola Ramos, por considerarme para este proyecto, por la comprensión y apoyo, por demostrarme amistad incondicional y por hacer el trabajo mucho más grato.

Noyka Rodríguez

Ramos U., Paola D.;Rodríguez B., Noyka E.

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA EFECTIVIDAD DE LA
CAESALPINIA CORIARIA COMO AGENTE DEFLOCULANTE EN EL
TRATAMIENTO DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE AGUA
BENTONÍTICO AL 5 % CONTAMINADO CON YESO (CASO₄.2H₂O)**

Tutor Académico: Profa. Yujeisly Reina.

**Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de
Petróleo. Año 2018, n° pág.152**

Palabras Claves: *Caesalpinia Coriaria*, Fluidos de Perforación, Defloculante, Yeso, Propiedades Reológicas.

Resumen. El propósito principal de esta investigación es evaluar en base a resultados obtenidos en el laboratorio, los efectos que tiene la adición de la *Caesalpinia Coriaria* a un fluido de perforación contaminado con yeso, encausando el estudio a sus propiedades como agente defloculante. Se realizaron ensayos químicos y físicos que permitieron determinar las propiedades del fluido de perforación sin contaminar, contaminado con yeso (CaSO₄) y tratado con *Caesalpinia Coriaria*, para finalmente compararla con un defloculante comercial (carbonato de sodio). En principio, el desempeño de la *C. Coriaria* se evaluó variando la granulometría, razón por la cual se pulverizó y tamizó para separar en rangos de tamaño de grano. Seguidamente, se estudió los efectos de añadir diferentes concentraciones de la *Caesalpinia* pulverizada y, una vez optimizado estos parámetros, se sometió a un proceso de rolado para verificar su efectividad bajo efectos de presión y temperatura a condiciones de yacimiento. Adicionalmente, se elaboró una solución destilada de la *Caesalpinia* para evaluar su desempeño como agente defloculante en estado líquido. Entre los resultados obtenidos se pudo observar que la *C. Coriaria* añadida en forma sólida (polvo) logró controlar la dureza de 120 mg/L a 80 mg/L, independientemente de la granulometría utilizada, sin embargo, evaluando el efecto de la cantidad agregada, se estableció un rango donde esta cumplió con la defloculación, comprendido entre 0,05 y 0,13 g/bbl. La *C. Coriaria* en solución no garantiza su efectividad como defloculante en el tiempo dado que a los pocos días de preparada la misma evidencio presencia de hongos. En líneas generales, la *C. Coriaria* controla efectivamente el excedente de iones calcio causando mejorías en las propiedades reológicas del fluido, optimando su efecto con el incremento de la temperatura, sin embargo, en contraste con el defloculante comercial (Na₂CO₃), no logró controlar las pérdidas de filtrado y generó un revoque más grueso.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	vi
ÍNDICE GENERAL	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xvi
ÍNDICE DE TABLAS	xx
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	3
EL PROBLEMA.....	3
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.2 OBJETIVOS	4
1.2.1 Objetivo General	4
1.2.2 Objetivos Específicos	5
1.3 JUSTIFICACIÓN	5
CAPÍTULO II.....	7
MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 Antecedentes	7

2.2	FLUIDOS DE PERFORACIÓN	9
2.2.1	Definición	9
2.2.2	Funciones del fluido de Perforación.....	11
2.2.3	Composición del fluido de perforación	13
2.2.4	Clasificación de los fluidos de perforación	17
2.3	ARCILLAS.....	23
2.3.1	Hidratación de las arcillas	23
2.3.2	Estado de asociación de las partículas arcillosas	25
2.3.3	Intercambio Iónico.....	28
2.4	PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN.....	29
2.4.1	Propiedades Físicas	29
2.4.2	Propiedades Químicas	31
2.4.3	Propiedades Reológicas.....	32
2.5	CONTAMINACIÓN DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN	36
2.5.1	Contaminación de yeso o Anhidrita	36
2.5.2	Contaminación por Cemento	40
2.5.3	Contaminación por Sal	41
2.5.4	Contaminación por Carbonatos y Bicarbonatos	42

2.5.5	Contaminación por Gas	43
2.5.6	Contaminación por Arena	44
2.5.7	Contaminación por Sólidos	45
2.5.8	Contaminación por H ₂ S y CO ₂	46
2.5.9	Contaminación por Altas Temperaturas	46
2.6	DEFLOCULANTES	49
2.6.1	Taninos	50
2.7	<i>CAESALPINIA CORIARIA</i>	51
2.7.1	Descripción Taxonómica	51
2.7.2	Distribución Geográfica	55
2.7.3	Constituyentes y estudios fitoquímicos de <i>Caesalpinia Coriaria</i> (Jacq.) Willd.	56
2.8	PREPARACION DE MATERIALES	58
2.8.1	Muestreo	58
2.8.2	Conminución	58
2.8.3	Trituración	58
2.8.4	Molienda	59
2.8.5	Cribado	60

CAPÍTULO III.....	63
METODOLOGÍA	63
3.1 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	63
3.1.1 Tipo de investigación.....	64
3.1.2 Etapas de la investigación.....	64
3.2 MATERIALES A UTILIZAR.....	66
3.3 PROCEDIMIENTOS PARA REALIZAR LAS PRUEBAS FÍSICAS.....	69
3.3.1 Balanza electrónica.....	69
3.3.2 Embudo Marsh.....	69
3.3.3 Balanza de lodo	70
3.3.4 Retorta.....	71
3.3.5 Filtro prensa API multiceldas	72
3.3.6 Viscosímetro	73
3.3.7 pH-metro.....	74
3.4 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR LAS PRUEBAS QUÍMICAS	75
3.4.1 Alcalinidad	75
3.4.2 Cloruros	77

3.4.3	Dureza	78
3.5	LODO SIN CONTAMINAR.....	78
3.5.1	Lodo sin contaminar Rolado 150 °F	81
3.6	LODO CONTAMINADO CON 1g/bbl de YESO (CaSO ₄ .2H ₂ O)	83
3.7	LODO TRATADO CON DEFLOCULANTE COMERCIAL: CARBONATO DE SODIO (Na ₂ CO ₃)	84
3.8	LODO TRATADO CON <i>C. CORIARIA</i> VARIANDO GRANULOMETRIA	86
3.8.1	Acondicionamiento de la vaina de <i>Caesalpinia Coriaria</i>	86
3.9	LODO TRATADO CON <i>C. CORIARIA</i> VARIANDO CONCENTRACIÓN.....	91
3.9.1	Lodo tratado con <i>C. Coriaria</i> rolado 150 °F	91
3.10	LODO TRATADO CON <i>C. CORIARIA</i> EN SOLUCIÓN.....	92
3.10.1	Lodo tratado con <i>C. Coriaria</i> en solución Rolado 150°F	97
CAPÍTULO IV.....		98
ANÁLISIS DE RESULTADOS		98
4.1	LODO SIN CONTAMINAR.....	98
4.1.1	Lodo sin contaminar Rolado 150 °F	99
4.2	LODO CONTAMINADO CON 1g/bbl de YESO (CaSO ₄ .2H ₂ O) ..	103

4.3 LODO TRATADO CON DEFLOCULANTE COMERCIAL: CARBONATO DE SODIO (Na ₂ CO ₃)	108
4.4 LODO TRATADO CON <i>C. CORIARIA</i> VARIANDO GRANULOMETRIA	111
4.4.1 Acondicionamiento de la vaina de <i>Caesalpinia Coriaria</i>	111
4.5 LODO TRATADO CON <i>C. CORIARIA</i> VARIANDO CONCENTRACIÓN.....	123
4.5.1 Lodo tratado con <i>C. Coriaria</i> Rolado 150 °F	133
4.6 LODO TRATADO CON <i>C. CORIARIA</i> EN SOLUCIÓN.....	136
4.6.1 Lodo tratado con <i>C. Coriaria</i> en solución Rolado 150 °F...	143
CONCLUSIONES.....	146
RECOMENDACIONES.....	148
BIBLIOGRAFÍA	149
ANEXOS.....	151
ANEXO 1	151
ANEXO 2	152
ANEXO 3	152
ANEXO 4	152
ANEXO 5	153

ANEXO 6	153
ANEXO 7	153

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de circulación de un fluido de perforación	10
Figura 2. Clasificación de los fluidos de perforación	18
Figura 3. Hidratación de las arcillas	25
Figura 4. Estado de asociación de las arcillas	28
Figura 5. Árbol de <i>Caesalpinia Coriaria</i>	52
Figura 6. Flores de la <i>Caesalpinia Coriaria</i>	53
Figura 7. Vainas de la <i>Caesalpinia Coriaria</i>	54
Figura 8. Semilla de la <i>Caesalpinia Coriaria</i>	55
Figura 9. Distribución Geográfica de la <i>Caesalpinia Coriaria</i>	56
Figura 10. Tamiz	61
Figura 11. Etapas de la metodología	65
Figura 12. Bentonita Sódica	66
Figura 13. Yeso	67
Figura 14. Carbonato de Sodio Na_2CO_3	68
Figura 15. Balanza Mettler	69
Figura 16. Embudo Marsh	70
Figura 17. Balanza de Lodo Baroid	71

Figura 18. Retorta	72
Figura 19. Filtro Prensa API	73
Figura 20. Viscosímetro de Fann	74
Figura 21. pH-metro digital.....	75
Figura 22. Alcalinidad del filtrado (Pf).....	76
Figura 23. Alcalinidad del filtrado (Mf)	77
Figura 24. Celda de envejecimiento	81
Figura 25. Horno de Rolado	83
Figura 26. Mortero de Cerámica.....	87
Figura 27. Tamices	88
Figura 28. Sistema de extracción Soxhlet	93
Figura 29. Brazo para ascenso	94
Figura 30. Perlas de ebullición	94
Figura 31. Temperatura del sistema de extracción Soxhlet.....	95
Figura 32. Liquido extraído de la destilación	96
Figura 33. Grumos en el lodo sin contaminar Rolado	101
Figura 34. Viscosidad de embudo lodo sin contaminar vs Rolado sin contaminar.....	102

Figura 35. Reología lodo sin contaminar vs Rolado sin contaminar	102
Figura 36. Revoque lodo sin contaminar Rolado	103
Figura 37. Dureza lodo sin contaminar vs contaminado.....	105
Figura 38. Reología lodo sin contaminar vs contaminado	106
Figura 39. Viscosidad de embudo lodo sin contaminar vs lodo contaminado	106
Figura 40. Filtrado lodo sin contaminar vs lodo contaminado.....	107
Figura 41. Alcalinidad lodo sin contaminar vs lodo contaminado	107
Figura 42. Dureza lodo sin contaminar, contaminado y tratado con Na_2CO_3	110
Figura 43. Reología lodo sin contaminar, contaminado y tratado con Na_2CO_3	110
Figura 44. Filtrado lodo sin contaminar, contaminado y tratado con Na_2CO_3	111
Figura 45. Sólidos retenidos en el tamiz de 10 Mesh.....	113
Figura 46. Lodo con partículas de <i>C. Coriaria</i> retenidas en el tamiz de 40 Mesh.....	113
Figura 47. Rendimiento de la <i>C. Coriaria</i>	114
Figura 48. Reología variando granulometría <i>C. Coriaria</i>	123
Figura 49. Dureza variando la concentración.	130

Figura 50. Viscosidad de embudo variando la concentración	131
Figura 51. Reología variando concentración	132
Figura 52. Reología lodo tratado con 0,07 g/bbl de <i>C. Coriaria</i> vs Lodo tratado con Na ₂ CO ₃	133
Figura 53. Reología lodo tratado con <i>C. Coriaria</i> Rolado.....	135
Figura 54. Viscosidad de embudo lodo tratado con <i>C. Coriaria</i> Rolado	136
Figura 55. Dureza lodos tratados con <i>C. Coriaria</i> en solución	141
Figura 56. Reología Lodo tratado con <i>C. Coriaria</i> en solución	142
Figura 57. Reología de lodo tratado con <i>C. Coriaria</i> pulverizada vs <i>C.</i> <i>Coriaria</i> en solución	143
Figura 58. Reología lodo rolado con <i>C. Coriaria</i> pulverizada vs Rolado con <i>C. Coriaria</i> en solución	145

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de síntomas y tratamientos para la contaminación del lodo de perforación	47
Tabla 2. Clasificación botánica de <i>Caesalpinia coriaria</i> (Jacq.) Willd. Tomada de Base de datos de plantas USDA-NRCS, 2017	51
Tabla 3. Tratamiento químico. Fuente: API, (2001)	84
Tabla 4. Tabla de conversión de malla hasta micrones. Fuente: <i>Sun Power Thermoelectrics</i>	88
Tabla 5. Rangos de tamaño de partícula retenido por cada tamiz	91
Tabla 6. Lodo Bentonítico al 5 % sin contaminar	98
Tabla 7. Lodo Bentonítico al 5 % sin contaminar Rolado 150 °F	100
Tabla 8. Lodo Bentonítico al 5 % contaminado con 1g/bbl de yeso (CaSO ₄ .2H ₂ O).....	103
Tabla 9. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 0,11 g/bbl de laboratorio de Carbonato de Sodio (Na ₂ CO ₃)	108
Tabla 10. Rendimiento de la <i>C. Coriaria</i>	112
Tabla 11. Lodo Bentonítico al 5% tratado con 0,11g/bbl de <i>C. Coriaria</i> correspondiente a tamaños de grano entre 0,0165- 0,0070 pulgadas (80 Mesh)	115

Tabla 12. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 0,11 g/bbl de <i>C. Coriaria</i> correspondiente a tamaños de grano entre 0,0070 - 0,0059 pulgadas (100 Mesh)	116
Tabla 13. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 0,11g/bbl de <i>C. Coriaria</i> correspondiente a tamaños de grano entre 0,0059 - 0,0049 pulgadas (120 Mesh)	117
Tabla 14. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 0,11g/bbl de <i>C. Coriaria</i> correspondiente a tamaños de grano entre 0,0049 - 0,0041pulgadas (140 Mesh).....	118
Tabla 15. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 0,11g/bbl de <i>C. Coriaria</i> correspondiente a tamaños de grano entre 0,0041 - 0,0029 pulgadas (200 Mesh)	119
Tabla 16. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 0,11g/bbl de <i>C. Coriaria</i> correspondiente a tamaños de granos menores a 0,0029 pulgadas.....	121
Tabla 17. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 0,05 g/bbl de laboratorio de <i>C. Coriaria</i> entre 0,0049 – 0,0041 pulgadas (140 Mesh)	124
Tabla 18. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 0,06 g/bbl de <i>C. Coriaria</i> entre 0,0049 – 0,0041 pulgadas (140 Mesh)	125
Tabla 19. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 0,07 g/bbl de <i>C. Coriaria</i> entre 0,0049 – 0,0041 pulgadas (140 Mesh)	126
Tabla 20. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 0,08 g/bbl de <i>C. Coriaria</i> entre 0,0049 – 0,0041 pulgadas (140 Mesh)	127

Tabla 21. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 0,13 g/bbl de <i>C. Coriaria</i> entre 0,0049 – 0,0041 pulgadas (140 Mesh)	128
Tabla 22. Lodo Bentonítico al 5% tratado con 0,07 g/bbl de <i>C. Coriaria</i> entre 0,0049 – 0,0041 pulgadas (140 Mesh). Rolado 150 °F ...	133
Tabla 23. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 1,67 ml/bbl de Solución de <i>C. Coriaria</i>	137
Tabla 24. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 3,33 ml/bbl de Solución de <i>C. Coriaria</i>	138
Tabla 25. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 5 ml/bbl de Solución de <i>C. Coriaria</i>	139
Tabla 26. Lodo Bentonítico al 5% tratado con 3,33ml/bbl de <i>C. Coriaria</i> Rolado 150 °F.....	143

INTRODUCCIÓN

Desde el advenimiento de la revolución industrial, el consumo energético mundial se ha incrementado de forma continuada, siendo el petróleo una de las principales fuentes de energía en la actualidad. La industria petrolera debe ser garante del abastecimiento del vital recurso y así poder cumplir con la creciente demanda, por lo que se requiere el desarrollo de yacimientos mediante la perforación de nuevos pozos de petróleo y gas.

Durante la construcción de un pozo petrolero es indispensable el uso de fluidos de perforación, los cuales son diseñados con propiedades físicas y químicas específicas dependiendo de las funciones que van a desempeñar y de las características del medio que contacten. La contaminación de estos fluidos con materiales alóctonos es un problema frecuente y ocasiona alteraciones no deseadas en sus propiedades que a su vez, dificultan el cumplimiento óptimo de sus funciones.

Las sales como el sulfato de calcio (CaSO_4) son altamente solubles en agua y se incorporan al fluido durante la circulación. Los iones Ca^{+2} pueden causar floculación de las arcillas alterando las propiedades reológicas del fluido, aumentando la viscosidad plástica, punto cedente, esfuerzo de gel y además ocasionan pérdida de filtrado.

Los defloculantes son ampliamente utilizados en fluidos de perforación para estabilizar las propiedades reológicas, ya sea natural o materiales producidos comercialmente. Sin embargo, la mayoría de estos aditivos son importados y los costos de adquisición suelen ser elevados, por lo cual incrementan los costos de la perforación.

El presente trabajo de investigación tiene como objeto de estudio la evaluación en forma experimental de la efectividad de la *Caesalpinia Coriaria* al ser utilizada como agente defloculante en el tratamiento de fluidos de perforación base agua bentonítico al 5 % que se encuentren contaminados con anhidrita o yeso (CaSO_4). El implementar materiales naturales producidos en el país es una alternativa que ofrece ventajas económicas al sustituir las importaciones, además de impulsar el progreso de la industria nacional.

El estudio se realizó a condiciones de laboratorio y de envejecimiento, con la finalidad de describir el comportamiento reológico de fluidos bentoníticos tratados con *Caesalpinia Coriaria* como agente defloculante, variando la cantidad añadida del aditivo así como la granulometría. Una vez establecida su efectividad como agente defloculante se comparó con otro aditivo de uso comercial.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante las operaciones de perforación donde se emplean sistemas base agua, es un problema habitual que se incorporen al fluido de perforación materiales solubles provenientes de las formaciones que sean atravesadas en el subsuelo, ocasionando cambios no deseados en las propiedades físico-químicas del mismo, razón por la cual son considerados contaminantes.

Entre los contaminantes se puede encontrar anhidrita o yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y es altamente soluble en agua. Los iones Ca^{+2} pueden causar floculación de las arcillas presentes en el lodo de perforación debido a las fuerzas atractivas entre las partículas suspendidas, resultando inicialmente en un aumento de la viscosidad plástica, punto cedente, esfuerzo de gel y además ocasiona pérdida de filtrado. La fuerza de atracción entre las partículas suspendidas incrementa conforme aumenta el tamaño de partícula así como la cantidad de material suspendido. Ante esta problemática, es imperativo añadir aditivos que actúen como agentes defloculantes que contribuyan a restablecer las propiedades del fluido sin afectar el proceso de perforación en sí mismo y sin causar mayor impacto ambiental.

Los defloculantes son ampliamente utilizados en fluidos de perforación para evitar la floculación de sólidos y controlar las propiedades reológicas, ya sea natural o materiales producidos comercialmente. Sin embargo, la mayoría de estos aditivos son de fabricación extranjera, los

costos de adquisición suelen ser elevados y por ende incrementan los costos de la perforación.

En consecuencia, es indispensable avizorar la incorporación de agentes defloculantes que exhiban un comportamiento estable a altas temperaturas, manteniéndose amigables al medio ambiente. El implementar materiales naturales de producción nacional generará ahorros significativos al sustituir importaciones y además promoverá avances integrales en la industria petrolera.

Por lo expuesto anteriormente, se pretende extender los estudios realizados previamente con la semilla de la especie *Caesalpinia Coriaria* como agente defloculante en la formulación de fluidos de perforación base agua, evaluado en condiciones de laboratorio y bajo condiciones de envejecimiento, con la finalidad de impulsar el uso y comercialización de un nuevo aditivo natural que no requiera modificaciones químicas y que además optimice el cumplimiento de su función como sustitutivo de otros aditivos comerciales comúnmente empleados.

Por consiguiente cabe plantearse la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo evaluar experimentalmente la efectividad de la *Caesalpinia Coriaria* como agente defloculante en el tratamiento de fluidos de perforación base agua bentonítico al 5 % contaminado con yeso (CaSO_4)?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Evaluar experimentalmente la efectividad de la *Caesalpinia Coriaria* como agente defloculante en el tratamiento de fluidos de perforación base agua bentonítico al 5 % contaminado con yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

1.2.2 Objetivos Específicos

- (a) Recopilar información bibliográfica y estudios previos relacionados con el uso de *Caesalpinia Coriaria* como agente defloculante.
- (b) Evaluar las propiedades iniciales del fluido de perforación bentónico al 5 % sin contaminar para establecer parámetros de referencia.
- (c) Evaluar las propiedades físicas y químicas del fluido de perforación bentonítico al 5 % contaminado con yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), tratado con *Caesalpinia Coriaria* como agente defloculante, variando la cantidad y granulometría.
- (d) Verificar la efectividad del agente defloculante *Caesalpinia Coriaria* si se utiliza en fase sólida (polvo) o en solución.
- (e) Establecer comparaciones entre las propiedades físico-químicas del fluido tratado con *Caesalpinia Coriaria* y el fluido tratado con un agente defloculante comercial.

1.3 JUSTIFICACIÓN

En las actividades de perforación y producción de hidrocarburos es necesario el uso de gran cantidad de aditivos que garanticen un óptimo desempeño de todos los sistemas y procesos. La mayoría de estos aditivos deben ser importados, lo que incrementa considerablemente los costos de perforación en la construcción de pozos petroleros. El desafío es desarrollar proyectos que involucren aditivos eficientes que se puedan producir a nivel nacional, de fácil fabricación sin producir impacto negativo al ambiente, que permitan sustituir los aditivos importados generando ahorros significativos a la industria.

La *Caesalpinia Coriaria* es una especie leguminosa que reúne árboles, arbustos y hierbas perennes o anuales, fácilmente reconocibles y

abundantes al norte de Suramérica, Centroamérica y al sur de México, además, posee una cantidad considerable de compuestos tánicos, los cuales son ampliamente utilizados por contrarrestar la floculación de las arcillas. En este sentido, el uso de esta especie representa un atractivo como posible agente defloculante en el tratamiento de fluidos de perforación base agua.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Con la finalidad de facilitar la comprensión de la información presentada en este Trabajo Especial de Grado, se plantearon los aspectos teóricos y tópicos referentes a los fluidos de perforación y a la *Caesalpinia Coriaria*, los cuales permitirán sustentar e interpretar los resultados obtenidos.

2.1 ANTECEDENTES

El trabajo de Chadid y Osma (2011), titulado **“ESTUDIO DE LA FACTIBILIDAD DEL USO DE LOS TANINOS DEL PINO COMO DISPERSANTE EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN”**, tuvo como objetivo principal cuantificar y observar el comportamiento de los taninos extraídos del pino cuando interactúan con los aditivos más comunes que se encuentran en los fluidos de perforación y así evaluar su compatibilidad con el medio, además de su capacidad para dispersar.

Diferentes lodos base, formados por agua + aquagel se contaminaron con sustancias como cal, yeso, sal común, y cloruro de calcio. Estos fueron tratados con dos dispersantes comerciales y con tanino de pino a 3 diferentes concentraciones, de donde obtuvieron que las cantidades óptimas de taninos del pino no difieren mucho de las utilizadas con los dispersantes comerciales.

Así mismo, determinaron la factibilidad del uso de los taninos del pino como dispersante en los lodos de perforación base-agua contaminados con cal y yeso, sin embargo, esto se cumple a bajas concentraciones, debido a que los taninos del pino pierden sus propiedades dispersantes cuando se tiene concentraciones muy altas de los iones de Ca^{++}

Adicionalmente, demostraron que los taninos del pino no generaron ninguna reacción desfavorable en presencia de los aditivos esenciales de los lodos de perforación. Es decir, que el uso de esta sustancia no genera desestabilidad del sistema ni desmejora el rendimiento de alguno de los aditivos presentes.

Un segundo trabajo de investigación corresponde a Pérez y Colina (2015), denominado "**RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF WATER-BASED DRILLING FLUIDS CONTAMINATED WITH GYPSUM ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) USING UNMODIFIED DIVIDIVI TANNINS (*CAELSAPINIA CORIARIA*) AS DEFLOCCULANT AGENT**". El estudio estuvo fundamentado en que los taninos de dividivi mantienen sus propiedades defloculantes sin requerir modificaciones, y por ello son más amigables con el ambiente. Inicialmente prepararon una suspensión base agua de 1500 g dispersando 420 g de arcilla bentonítica para lograr un contenido de sólidos de $28\% \pm 0,1\%$. Seguidamente, tomaron muestras de 350 ml de la formulación anterior, se contaminaron con 5 lbm de yeso y fueron tratados con 8 lbm del agente defloculante a estudiar. Posteriormente, establecieron los parámetros reológicos mediante las lecturas obtenidas con el viscosímetro Fann 35A, antes y después del envejecimiento a 150 °F y 350 °F, respectivamente.

Los resultados arrojaron que las muestras contaminadas con yeso y tratadas con distintos defloculantes, antes y después del envejecimiento a 150 °F, tuvieron un comportamiento reológico similar, sin embargo, con los taninos del dividivi el grado de floculación fue menor a las mismas condiciones de temperatura, por lo que consideraron que tuvo el mejor comportamiento defloculante. Luego de envejecer todas las muestras a 350 °F, con el tanino modificado se evidenció un alto grado de floculación, comparado con lo obtenido de la muestra con dividivi. En este

último caso lograron demostrar que la *C. Coriaria* tuvo una eficiencia 9 veces mejor que la obtenida con el tanino modificado.

2.2 FLUIDOS DE PERFORACIÓN

2.2.1 Definición

Un lodo de perforación puede ser cualquier fluido que es utilizado en una operación de perforación, en la que este es circulado o bombeado desde la superficie, baja por la sarta de perforación, pasa por la mecha, y de nuevo sube a la superficie a través del espacio anular, según lo define *American Society of Mechanical Engineers ASME (2005)*.

El Centro Internacional de Educación y Desarrollo CIED (2002) exhibe que el fluido de perforación puede ser cualquier sustancia o mezcla de sustancias con características físicas y químicas apropiadas, como por ejemplo: aire o gas, agua, petróleo o combinaciones de agua y aceite con determinado porcentaje de sólidos.

Según Prieto (2007), el fluido utilizado usualmente en las operaciones de perforación es una mezcla de agua y/o aceite con una cantidad de sólidos definida, que se caracteriza por no ser tóxico, corrosivo ni inflamable, pero si inerte a las contaminaciones de sales solubles o minerales y estable a las altas temperaturas. Además, dicho fluido debe estar exento a cualquier tipo de degradación.

En la Figura 1 se muestra un esquema del sistema de circulación del pozo. El lodo es bombeado desde superficie hasta el fondo del hoyo a través de una secuencia de dispositivos conectados a la sarta de perforación, a través de la broca y comienza el viaje de regreso a la superficie por el espacio anular llevando los trozos de roca, llamados recortes, que han sido raspados de la formación durante la perforación, y

posteriormente salen de la línea de retorno de lodo hacia la sección de control de sólidos. Una vez reacondicionado el lodo, vuelve a ser bombeado al pozo.

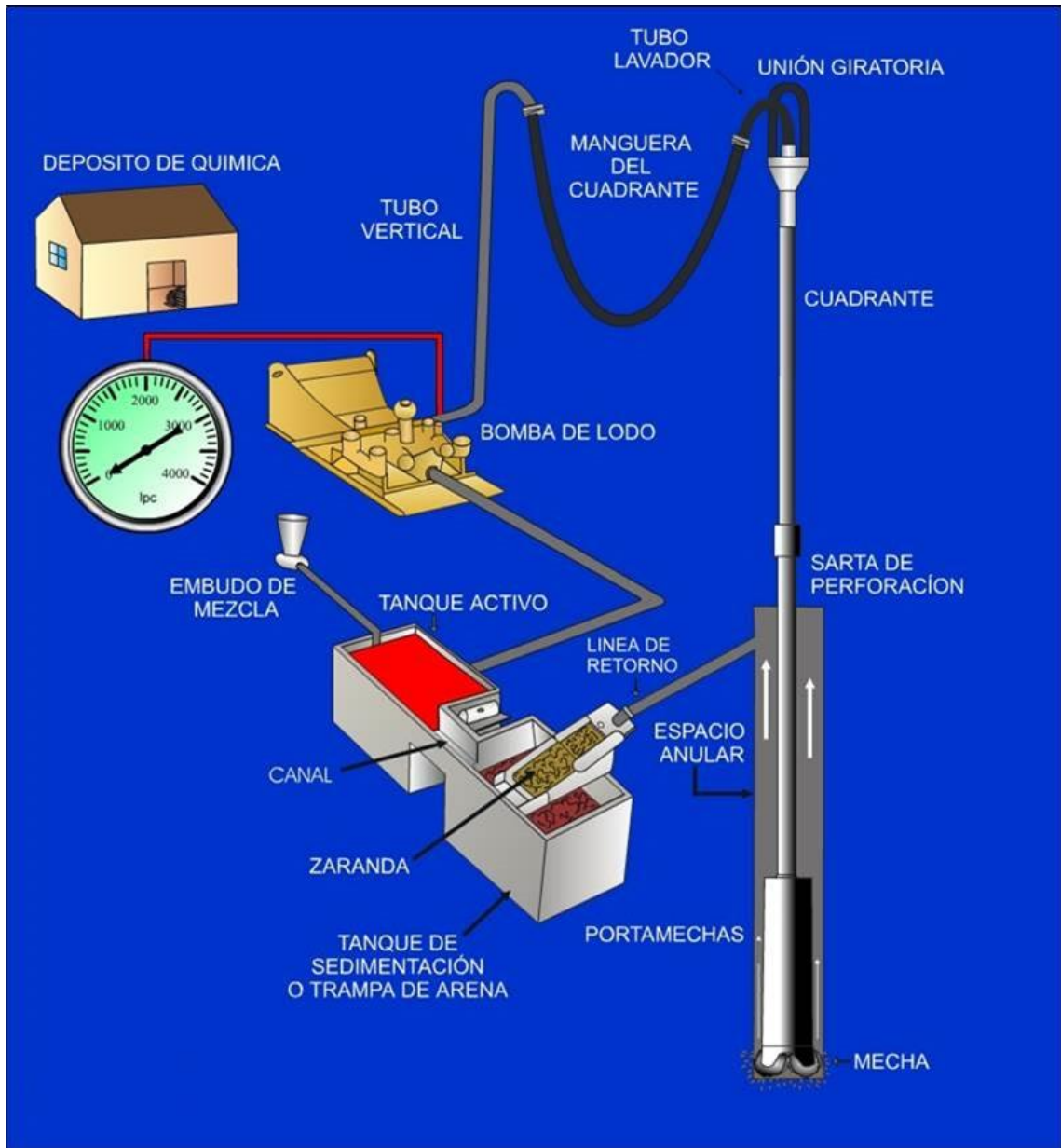


Figura 1. Sistema de circulación de un fluido de perforación

2.2.2 Funciones del fluido de Perforación

El propósito fundamental del fluido de perforación es ayudar a hacer rápida y segura la perforación del pozo, mediante el cumplimiento de las siguientes funciones, CIED (2002) clasifica las funciones de la siguiente manera:

- (a) **Capacidad de transporte:** La densidad, viscosidad y el punto cedente son las propiedades del fluido que, junto a la velocidad de circulación o velocidad anular, hacen posible la remoción y el transporte del ripio desde el fondo del hoyo hasta la superficie.
- (b) **Enfriar y lubricar:** El fluido de perforación facilita el enfriamiento de la mecha al expulsar durante la circulación el calor generado por la fricción mecánica entre la mecha y la formación. En cierto grado, por sí mismo, el fluido actúa como lubricante y esta característica puede incrementarse con aceite o cualquier producto químico elaborado para tal fin.
- (c) **Formar revoque:** Para minimizar los problemas de derrumbe y atascamiento de tubería en formaciones permeables, es necesario cubrir la pared del hoyo con un revoque liso, delgado, flexible, de baja permeabilidad y altamente compresible. El revoque se logra incrementando la concentración y dispersión de los sólidos arcillosos.
- (d) **Controlar la presión de la formación:** El fluido de perforación ejerce una presión hidrostática en función de la densidad y altura vertical del pozo, la cual debe controlar la presión de la formación, evitando un influjo hacia el pozo. Esta presión no depende de la geometría del hoyo.
- (e) **Capacidad de suspensión:** La resistencia o fuerza de gel es la propiedad reológica del fluido que permite mantener en suspensión

las partículas sólidas cuando se interrumpe la circulación. Esta propiedad retarda la caída de los sólidos, pero no la evita.

- (f) **Flotabilidad:** La sarta de perforación y la tubería de revestimiento pierden peso cuando se introducen en el hoyo, debido al factor de flotación, el cual depende de la densidad o peso del fluido. En consecuencia, para calcular el peso de la sarta en el fluido, se multiplica su peso en el aire por el factor de flotación.
- (g) **Estabilidad:** La estabilidad de las formaciones permeables se logra con peso y revoque de calidad, y las impermeables con peso, cuando se trata de lutitas presurizadas, y con inhibición o con fluido cien por ciento aceite, cuando se trata de lutitas reactivas.
- (h) **Evaluación:** El fluido debe tener una alta calidad para facilitar la toma de núcleos y la evaluación de las formaciones perforadas, sobre todo cuando se trata de la zona productora.
- (i) **Hidráulica:** El fluido es el medio por el cual se transmite la potencia desde la superficie hasta el fondo del pozo. El programa hidráulico, trata de obtener la máxima caída de presión en la mecha para seleccionar los valores óptimos de caudal y chorros, que faciliten una limpieza efectiva del fondo del hoyo y del espacio anular.

Algunos beneficios adicionales del fluido de perforación son:

- (j) Minimizar el daño de formación.
- (k) Reducir la corrosión.
- (l) Minimizar la pérdida de circulación.
- (m) Reducir el atascamiento de tubería.
- (n) Reducir las pérdidas de presión.
- (o) Mejorar la tasa de penetración (ROP).
- (p) Reducir el impacto ambiental.

2.2.3 Composición del fluido de perforación

El fluido de perforación está compuesto por una fase continua, generalmente líquida y una fase dispersa o sólida, además, es necesario agregar diversos aditivos químicos, tanto líquidos como sólidos, para cumplir con funciones específicas, alineando el rendimiento del fluido con las condiciones de perforación. La fase líquida de un fluido de perforación es normalmente agua, aceite o una mezcla estable de ambos.

Según expresa CIED (2002), La composición del fluido depende de las exigencias de cada operación de perforación en particular. La perforación debe hacerse atravesando diferentes tipos de formaciones, que a la vez, pueden requerir diferentes tipos de fluidos.

2.2.3.1 Fase Líquida

La fase líquida o fase continua es aquella que constituye el elemento de mayor proporción en la mezcla, el cual sirve de medio para mantener suspendidos los aditivos que representan las otras fases. Es por ello que en un fluido de perforación base agua, la fase continua es el agua y en uno base aceite la fase continua es el aceite.

Agua

El agua es un fluido newtoniano ideal para perforar zonas de bajas presiones. Es económica, abundante, no requiere tratamiento químico, provee el mejor líquido en el uso de los métodos de evaluación de formaciones y resulta el mejor dispersante químico para controlar sólidos por dilución (Prieto A., 2007).

En la industria, generalmente, se utiliza agua tomada de la fuente más cercana a la locación donde se esté realizando la perforación, como por

ejemplo, agua de lagos, ríos, agua de mar, etc. Dependiendo de su origen, el agua posee cierto contenido de iones y es por ello que se puede clasificar de la siguiente manera:

- (a) **Agua dulce:** El agua dulce, también llamada agua fresca, es el fluido que más se emplea como fase líquida en los lodos de perforación, comúnmente usados en zonas de baja presión. Se denomina agua dulce si el contenido de iones cloruro no sobrepasa los 1.000 ppm, de allí hasta 10.000 ppm se considera agua salobre.
- (b) **Agua salada:** El contenido de iones cloruro sobrepasan los 10.000 ppm y generalmente se usa cuando se perfora costa afuera debido a la abundancia y accesibilidad de la misma. Es aconsejable el uso de lodo saturado de sal cuando se estén penetrando secciones salinas o cuando se requiere mantener el ensanchamiento del hoyo al mínimo. A veces, exprofesamente, se agrega sal al lodo para tratar de controlar la resistividad y obtener mejor interpretación de los registros eléctricos (CIED, 2002).

Los iones de calcio y magnesio son los principales cationes bivalentes y conjuntamente constituyen el 95% de lo que se conoce como Dureza del Agua, la cual es una mezcla compleja y variable de cationes y aniones. Si bien, la dureza del agua se debe, principalmente, a la presencia de calcio y magnesio, también contribuyen a ella el estroncio, hierro, manganeso, bario y otros iones polivalentes.

Aceite

Representa la fase continua en los fluidos base aceite y forma parte de la fase dispersa en algunos tipos de fluidos base agua. Los lodos base aceite son mucho menos sensibles a la contaminación que los fluidos cuya fase líquida es el agua y resultan eficientes a altas temperaturas.

El aceite como componente de los fluidos no acuosos mejora la estabilidad del hoyo y ayuda a mantener las arcillas hidratables en sitio. En los fluidos acuosos incrementa la lubricidad y ayuda a minimizar los problemas de torques y arrastres. En términos generales el aceite disminuye el peso de los fluidos y aumenta la viscosidad plástica. En los lodos base agua disminuye el pH y produce espuma, especialmente cuando se está perforando con un sistema de lodo de bajo contenido de sólidos (Prieto A., 2007).

2.2.3.2 Fase Sólida

La fase sólida de un fluido de perforación está constituida por aquellos aditivos insolubles suspendidos en el lodo, que cumplen con funciones específicas en el acondicionamiento y mantenimientos del mismo. Además de los sólidos inherentes, esta fase puede estar representada por componentes líquidos y/o gases, dependiendo del tipo de fluido de perforación y, de acuerdo a su interacción con el medio en el cual se encuentran dispersos, pueden clasificarse como sólidos inertes (deseables o indeseables) o sólidos reactivos.

(a) **Sólidos Inertes Deseables:** Estos sólidos suelen ser de alta gravedad específica y son agregados al fluido para aumentar su densidad. Por ejemplo: El sulfato de bario (Barita), óxido de hierro (Hematita) y sulfuro de plomo (Galena).

Un sólido inerte o no reactivo es deseable solamente cuando tiene una contribución positiva a las propiedades del fluido de perforación en cuyo caso se justifica su presencia.

(b) **Sólidos Inertes Indeseables:** Estos sólidos se incorporan al fluido durante la perforación, deben ser removidos rápidamente y de la forma más eficiente posible debido a que afectan el rendimiento del lodo, alternado de forma negativa sus propiedades y causando

serios problemas a la operación. Ejemplos típicos de estos sólidos son los provenientes de formaciones de roca caliza, dolomita y arenas, siendo esta última extremadamente abrasiva y si es recirculada a través del sistema de lodo, causará daños a los pistones y cilindros de las bombas.

- (c) **Sólidos Reactivos:** son sólidos que tienen la capacidad de hidratarse, ya que contienen numerosas cargas eléctricas expuestas que le permiten atraer y retener líquido de la fase continua, son de baja gravedad y proporcionan cuerpo al fluido de perforación, aspecto coloidal y las propiedades de gel necesarias. Estos sólidos pueden ser incorporados de la formación y/o añadidos para controlar las propiedades del lodo. Los agregados son aditivos comerciales, como la bentonita, y los incorporados son sólidos arcillosos provenientes de las formaciones perforadas, que se integran al fluido durante la circulación.

2.2.3.3 Fase Química

Esta fase es importante porque controla ampliamente la fase coloidal y particularmente, la de los fluidos de tipo bentonítico. La fase química comprende las sales solubles que toma el fluido de perforación de los recortes y porciones desintegradas del hoyo y sustancias en solución tales como: dispersantes, emulsificantes, reductores de filtrado y otras sustancias químicas que permiten controlar el comportamiento de las arcillas, así como también permiten mantener la formulación del fluido requerida por el diseño de perforación. Algunas de las sustancias que componen esta fase son: lignitos, lignosulfonatos, bicarbonato de sodio, soda cáustica, humectantes, surfactantes, entre otros (Bolívar & Matos, 2008).

2.2.4 Clasificación de los fluidos de perforación

Actualmente existe una gran variedad de lodos empleados en la industria petrolera, cada uno con propiedades específicas adaptadas a las condiciones de la perforación. Los fluidos cuya fase continua es líquida son llamados convencionales y, debido a su peso, son usados para perforar formaciones donde las densidades varían entre 6 y 20 lb/gal. Ocasionalmente, es necesario perforar con una densidad menor a 6 lb/gal, en cuyo caso es imperativo utilizar lodos más ligeros o gaseosos. En este sentido, los fluidos de perforación pueden clasificarse de acuerdo a su fase continua, como se ilustra en la Figura 2.

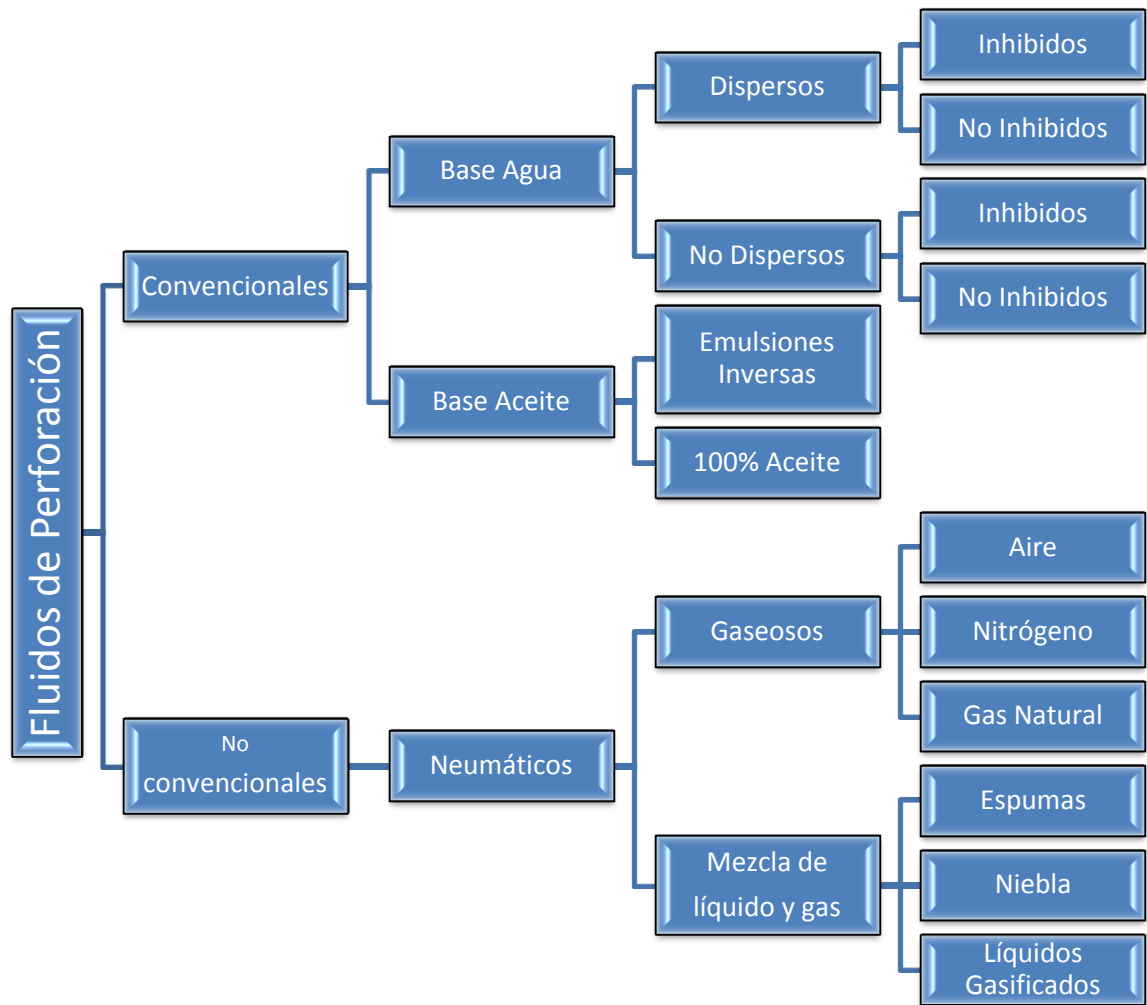


Figura 2. Clasificación de los fluidos de perforación

2.2.4.1 Fluidos base agua

Un fluido base agua es aquel cuya fase continua es agua. Son los sistemas más utilizados por su bajo costo, accesibilidad, y por lo general se pueden formular para satisfacer la mayoría de las condiciones de perforación. Cuando se añade aceite a un fluido base agua, éste forma parte de la fase dispersa, se comporta como partículas sólidas suspendidas debido a la adición de un agente emulsificante. Este sistema se conoce como emulsión directa (CIED, 2002).

La formulación más básica de los sistemas acuosos está constituida por agua y un compuesto con comportamiento coloidal (arcilla). Ciertas partículas de arcilla provenientes de la perforación al entrar en contacto con el agua se dispersan originando lo que se conoce como un fluido de perforación de arcilla natural.

Según el efecto que tiene el lodo sobre los ripios y arcillas procedentes de las formaciones perforadas, los fluidos de perforación base agua se pueden clasificar como fluidos Dispersos y No dispersos, y estos a su vez pueden estar inhibidos o no inhibidos.

(a) **Lodos No Dispersos:** Son aquellos a los que no se le añaden adelgazantes químicos, en cuyo caso, las arcillas agregadas o incorporadas de la formación encuentran naturalmente su propia condición de equilibrio. Sin embargo, si ocurre algún tipo de contaminación, existe el riesgo que el lodo, por sí solo, no pueda contrarrestar ese efecto.

Generalmente son utilizados para perforar pozos poco profundos, en la mayoría de los casos compuesto de agua dulce, bentonita y cal (hidróxido de calcio), donde primero se hidrata la bentonita y luego se agrega cal para aumentar el valor real de punto de cedencia, que le da la capacidad de transportar los ripios, a bajas tasas de corte. No son muy estables a altas temperaturas, aproximadamente 400°F y no toleran contaminaciones salinas ni contaminaciones de calcio (Bolívar & Matos, 2008).

(b) **Lodos Dispersos:** Son aquellos que contienen aditivos químicos que ayudan a acondicionar al fluido según los requerimientos de la perforación.

Muy útiles cuando se perfora a grandes profundidades o en formaciones altamente problemáticas, pues presentan como característica principal la dispersión de arcillas constitutivas, adelgazando el fluido de perforación. Están compuestos por bentonita, sólidos perforados y bajas concentraciones de agentes dispersantes, tales como los lignosulfonatos y lignitos; el pH de este fluido de perforación está entre 8,5 y 10,5 (Bolívar & Matos, 2008).

El término inhibido y no inhibido representa la capacidad del fluido de perforación de inhibir la hidratación de las arcillas de formación. Un lodo no inhibido se refiere a la ausencia de iones inhibitorios de lutitas, como potasio, calcio o sodio; mientras que, un lodo inhibido contiene cationes, agentes encapsulantes o ambos en suficiente cantidad para reducir la interacción entre el fluido de perforación y las arcillas de formación.

En el mismo orden de ideas, los diferentes sistemas existentes de fluidos de perforación se pueden agrupar combinando las clasificaciones anteriores, según lo definen Artigas y Fuenmayor (2011), de la siguiente manera:

(a) **Fluidos No Dispersos-No Inhibidos:** Estos lodos no poseen adelgazantes químicos ni iones inhibidores de lutitas. Presentan reología invertida, y por ende permiten obtener altas tasas de penetración y alta capacidad de limpieza y suspensión. Entre este tipo de sistemas se encuentran los lodos agua-bentonita.

(b) **Fluidos No Dispersos-Inhibidos:** Entre este tipo de sistema se encuentran las salmueras (agua salada) y los Polímeros, por ejemplo, estos últimos se clasifican de acuerdo a su origen, estructura y utilidad. Asimismo, los lodos poliméricos se

caracterizan por presentar reología invertida y la estabilidad térmica de estos sistemas puede alcanzar hasta 400°F.

(c) **Fluidos Dispersos-No Inhibidos:** Dentro de este grupo se encuentran los sistemas de lignito/lignosulfonato. Estos lodos sufren degradación termal cuando son expuestos por largo tiempo a temperaturas mayores a 300° F y tienden a ser afectados fácilmente por cualquier contaminante común. Por ende, cuando se perfora con este tipo de fluido, se debe verificar constantemente los valores de alcalinidad, el contenido de sólidos y se debe agregar soda cáustica continuamente para mantener el rango adecuado de pH.

(d) **Fluidos Dispersos-Inhibidos:** Este tipo de lodo contiene tanto adelgazantes químicos como iones inhibidores de lutitas. Dentro de esta clasificación se encuentran los fluidos de base calcio. Por sus características inhibitorias presentan viscosidades más bajas que un fluido disperso de la misma densidad, además de ofrecer mayor tolerancia a los sólidos que cualquier sistema disperso.

2.2.4.2 Fluidos base aceite

Son aquellos en los cuales el componente de mayor volumen es el aceite, denominado la fase continua, y es el encargado de servir de medio para mantener los sólidos en suspensión.

Estos sistemas son usados para perforar formaciones lutíticas sensibles al agua (arcillas hidratables) debido a su naturaleza inhibitoria, a su vez, proporcionan una mayor estabilidad en el pozo y, siendo más resistentes ante agentes contaminantes, mantienen sus propiedades durante la perforación. Son estables a altas presiones y temperaturas por lo que se

aplican en pozos altamente profundos, además de zonas productoras de gases ácidos (H_2S/CO_2), zonas de bajo gradiente y domos de sal. Por su alto grado de lubricidad se utilizan en la perforación de pozos direccionales y en pozos que presentes problemas de pega de tubería.

Sí son formulados con un porcentaje de agua que actúa como fase dispersa, o no, los sistemas base aceite pueden clasificarse como emulsiones inversas o fluidos 100% aceite.

(a) **Emulsiones Inversas:** Es una mezcla de agua en aceite a la cual se le agrega cierta concentración de sal para lograr un equilibrio de actividad entre el fluido y la formación. El agua no se disuelve o mezcla con el aceite, sino que permanece suspendida, actuando cada gota como una partícula sólida. En una buena emulsión no debe haber tendencia de separación de fases y su estabilidad se logra por medio de emulsificantes y agentes adecuados (CIED, 2002).

(b) **100% Aceite:** Estos fluidos se preparan con puro aceite y con un surfactante débil que tiene la habilidad de absorber el agua de la formación y emulsionarla de manera efectiva. Son utilizados usualmente para recobrar núcleos en su estado original, pueden tolerar hasta un 15% v/v de agua de formación y es recomendable convertirlos a un sistema de emulsión inversa cuando el porcentaje de agua alcance valores entre 5 y 10% en volumen (Prieto A., 2007).

2.2.4.3 Fluidos neumáticos

Este tipo de fluidos poseen como fase continua un gas al cual se le agrega poca cantidad de agua para formar fluidos denominados neblinas,

o una mayor cantidad de agua para formar las llamadas espumas. El gas puede ser natural, aire o nitrógeno. La perforación con aire o niebla es usada en zonas agotadas o donde las formaciones contienen una cantidad relativamente pequeña de fluidos de formación, y son muy útiles en áreas donde la pérdida de circulación representa un grave problema (Cruces C., 2002).

2.3 ARCILLAS

La arcilla es un material natural, terroso, de grano fino el cual desarrolla plasticidad cuando se moja. Por plasticidad se entiende la propiedad que presentan muchos materiales a ser deformados bajo la aplicación de presión. Están constituidas por un cierto número de minerales en proporciones variables. Químicamente, son láminas coloidales cargadas, que están formadas por silicatos de aluminio hidratados, con contenido de iones como sodio, calcio, hierro y magnesio (Rausseo C., 2002).

2.3.1 Hidratación de las arcillas

CIED (2002) puntualiza que es el proceso mediante el cual una arcilla absorbe agua, permitiendo el desarrollo del punto cedente, de la resistencia o fuerza de gel y el desarrollo de la viscosidad del fluido.

Las arcillas se pueden clasificar según su capacidad de adsorción de agua. Las arcillas hidrofílicas son aquellas en las que los cationes entre las capas son intercambiables, estos cationes pueden ser sustituidos por moléculas de agua. Las arcillas hidrofóbicas, son aquellas en las cuales la unión entre las capas son lo suficientemente fuertes, de modo tal que el intercambio de cationes por moléculas de agua es menor (Rausseo C., 2002).

Entre las arcillas hidrofílicas, la más conocida es la montmorillonita, la cual es el constituyente principal de la bentonita. Es el componente activo de las formaciones arcillosas más recientes, que causan problemas de hinchamiento cuando se perforan.

Cuando las arcillas se mojan, la mayoría adsorben algo de agua entre las láminas, aumentando el espaciamiento interlaminar y provocando el hinchamiento. Las arcillas, como la bentonita, adsorben tanta agua que las láminas son capaces de separarse completamente unas de otras causando la dispersión de las partículas arcillosas.

Existen arcillas que tienen mayor capacidad de hidratación y dispersión por tener un ligamento más débil, como es el caso de las arcillas sódicas. Las arcillas cálcicas se hidratan, pero se dispersan ligeramente porque el calcio es bivalente, resultando un ligamento más fuerte que el sodio, tal como se muestra en la Figura 3.

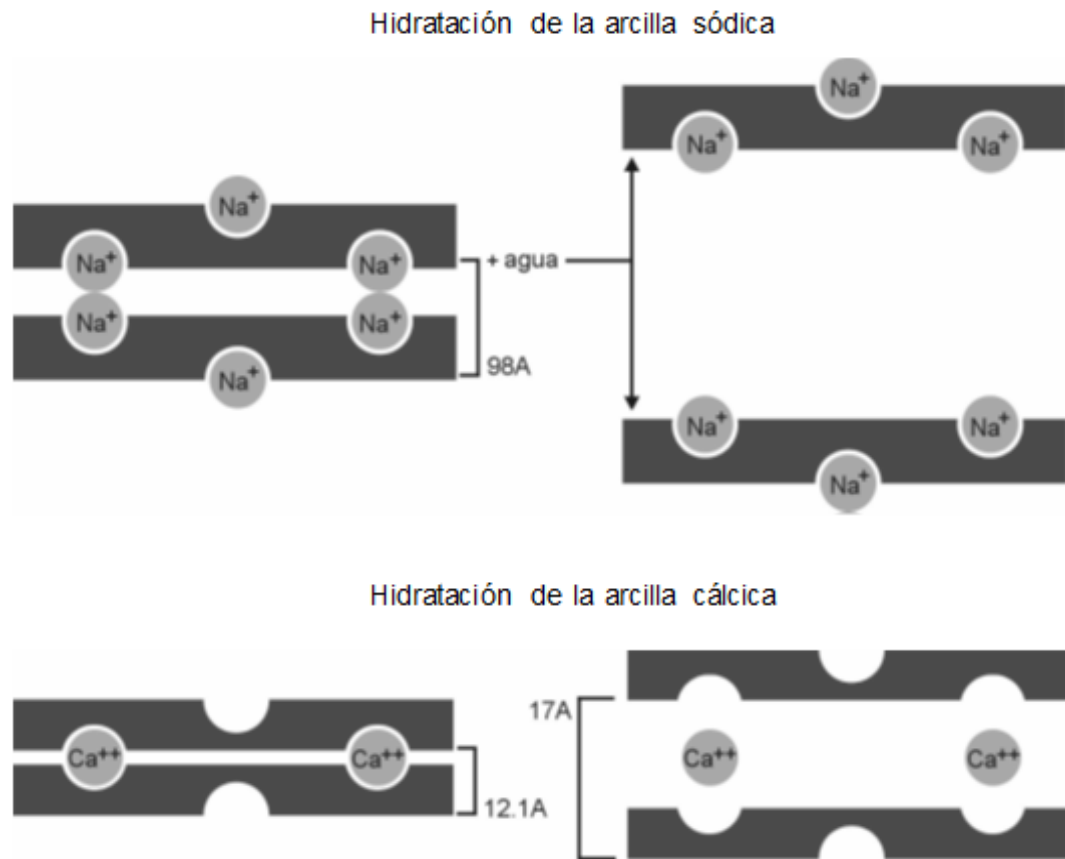


Figura 3. Hidratación de las arcillas

2.3.2 Estado de asociación de las partículas arcillosas

En una solución, las partículas coloidales se mantienen indefinidamente en suspensión debido a su tamaño extremadamente pequeño, sin embargo, dependiendo de las fuerzas atractivas y repulsivas generadas por el intercambio iónico entre estas y el medio, se pueden distribuir en arreglos definidos llamados estados de asociación de las arcillas y representan un factor altamente influyente en la reología del fluido. Rausseo C. (2002) describe los estados de la siguiente manera:

- (a) **Agregación:** Las partículas están agrupadas cara a cara para formar una pila o columna y es considerado la condición normal de

las arcillas antes de ser hidratadas. Se pueden dispersar estos agregados sometiéndolos a esfuerzos de corte por agitación mecánica y/o tratamiento químico. Usualmente la agregación disminuye la viscosidad y la resistencia de gel, a la vez que la filtración aumenta.

(b) **Dispersión:** Cuando ocurre la hidratación de la arcilla, la fuerza de atracción existente entre las capas se debilita y tienden a separarse de forma individual. Este efecto se conoce con el nombre de dispersión. Al ocurrir la dispersión existe un aumento en el número de partículas y por lo tanto un aumento en el área superficial, lo cual lleva a un incremento en la viscosidad. La dispersión puede lograrse, permitiendo la hidratación de las partículas de arcilla en agua, cortando mecánicamente las partículas en suspensión o usando químicos para acelerar la subdivisión de las partículas.

(c) **Floculación:** Las partículas de arcilla suspendidas en agua llevan cargas positivas y negativas de superficie. En soluciones alcalinas, las cargas positivas predominan en los bordes de las partículas de arcilla, mientras las cargas negativas predominan en las caras. Esta distribución de las cargas permite que se desarrolle una estructura reversible de gel cara – borde, este fenómeno se conoce con el nombre de floculación. Los agentes adelgazantes minimizan el desarrollo de este tipo de estructura. Con una concentración baja de partículas de arcilla, la floculación puede resultar en una pérdida de propiedades coloidales. Entonces, la arcilla puede asentarse dejando el agua sin sólidos en suspensión. Por otra parte, en una alta concentración de arcilla dispersa, la floculación podría resultar en una excesiva gelatinización, cuando se atrapa el agua libre en

su estructura. En cualquiera de los casos mencionados la floculación resultaría en tasas de filtración mayores por la red abierta que existe en la estructura de gel.

- (d) **Defloculación:** Se produce cuando se neutralizan las cargas y como resultado se debilitan las asociaciones borde – borde y cara –borde de las partículas de arcilla. La defloculación mejora o restaura las propiedades coloidales de la suspensión de arcilla, y en el proceso, reduce el asentamiento, la gelatinización excesiva y la filtración. Es decir, las partículas de arcilla han sido redispersadas en la fase acuosa.

Chadid y Osma (2011) describen los medios para alcanzar la defloculación como se detallan a continuación:

- (a) **Adición de dispersantes:** Existen varios productos químicos que son usados comúnmente para el tratamiento reológico de los lodos, estos productos son llamados dispersantes, adelgazantes o defloculantes. En este grupo se encuentran incluidos los taninos, fosfatos, lignitos, lignosulfonatos y polímeros sintéticos de bajo peso molecular.
- (b) **Reducción de la concentración de sales:** Este factor conlleva a que las cargas de repulsión producto de las capas iónicas difusas no se vean afectadas o en su defecto sean restauradas para mantener el equilibrio de la dispersión.
- (c) **Aumentar el pH:** Con el fin de mantener mínimas las cargas positivas de los bordes de las arcillas se debe mantener un pH alto, para evitar que predominen las fuerzas de atracción borde-cara.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se ilustran los distintos estados de las partículas arcillosas descritos anteriormente.

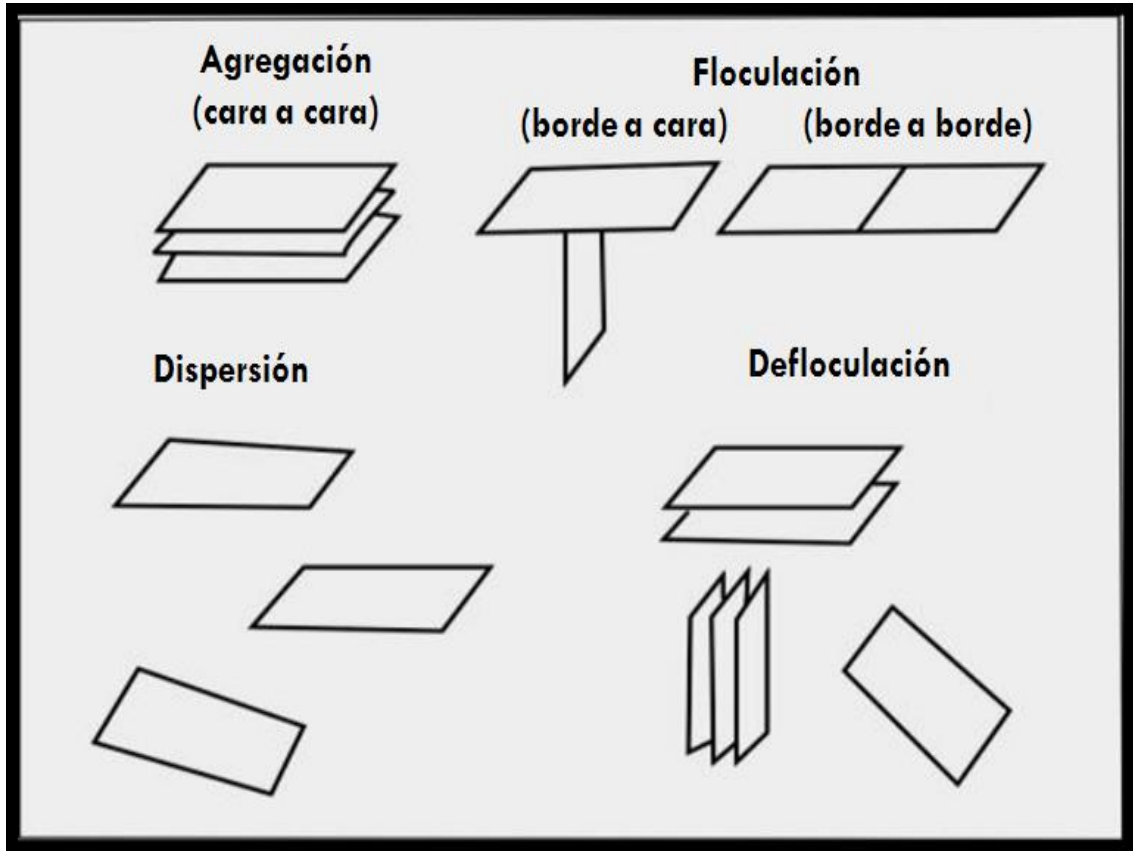


Figura 4. Estado de asociación de las arcillas

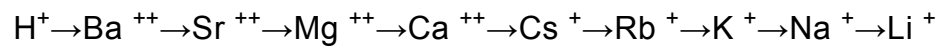
2.3.3 Intercambio Iónico

El grado de sustitución, los átomos envueltos y las especies de cationes intercambiables, son de enorme importancia en la tecnología de fluidos de perforación, debido a la influencia que ellos ejercen sobre las propiedades tales como: hinchamiento, dispersión y características reológicas y de filtrado.

Los iones interlaminares, están débilmente unidos, tanto así que ellos pueden ser intercambiados en una solución acuosa que contenga una

proporción alta de otro ion. En general, los iones divalentes son preferidos en los sitios interlaminares de las arcillas expandibles, es decir, el efecto de los cationes divalentes (Ca^{++} y Mg^{++}) sobre la bentonita es mucho más pronunciado que los cationes monovalentes de sodio.

Cuando dos iones de valencias diferentes están presentes, el que tiene mayor valencia generalmente es adsorbido. El orden de preferencia de intercambio es usualmente:



2.4 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Las propiedades de un fluido de perforación son valores que se ajustan en el campo de acuerdo al comportamiento de la perforación. Es responsabilidad del especialista tomar muestra del lodo de entrada y salida del pozo para comparar valores y proceder a efectuar los ajustes necesarios si la situación lo amerita. Las propiedades están en función del tipo de fluido y pueden ser físicas o químicas.

2.4.1 Propiedades Físicas

- (a) **Densidad:** La densidad, comúnmente llamada peso, significa masa por volumen unitario y es una de las propiedades más importantes a mantener durante la perforación de un pozo. A través de ella se controla la presión de poro y se evitan las arremetidas, es decir la incorporación de un flujo incontrolable de fluido de la formación hacia dentro del pozo.

- (b) **Viscosidad:** Es la resistencia que ofrece un fluido al flujo y se describe como la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte.

La viscosidad de embudo o viscosidad API sirve para comparar la fluidez de un líquido con la del agua. A la viscosidad embudo se le concede cierta importancia práctica aunque carece de base científica, es usada en el campo como parámetro referencial para detectar los cambios relativos en las propiedades del fluido. Es recomendable evitar las altas viscosidades y perforar con la viscosidad embudo más baja posible, siempre y cuando, se tengan valores aceptables de fuerzas de gelatinización y un control sobre el filtrado. Un fluido contaminado exhibe alta viscosidad embudo.

(c) **Filtrado:** Es el volumen líquido forzado a través de un medio poroso durante el proceso de filtración. El filtrado indica la cantidad relativa de líquido que se filtra a través del revoque hacia las formaciones permeables cuando el fluido es sometido a una presión diferencial. Esta propiedad, afectada por la presión, la dispersión, la temperatura y el tiempo, se controla en formaciones permeables no productoras con sólidos arcillosos comerciales que forman revoques finos y de baja permeabilidad y con aditivos reductores de filtrado. El revoque está constituido por el material no soluble que se encuentra disperso en el fluido y por el líquido que ocupa los espacios porosos del revoque cuando se comporta como sólido suspendido, como es el caso del agua en las emulsiones inversas o el aceite en los lodos base agua.

(d) **pH:** El pH indica si el lodo es ácido o básico y va a depender de la concentración del Ion hidrógeno presente en la muestra del fluido de perforación. La escala de pH va de cero (0) a catorce (14), siendo siete (7) el valor correspondiente a un pH neutro. Valores menores de siete (7) son índices de acidez y mayores de 7 de alcalinidad. La mayoría de los fluidos base acuosa son alcalinos y

trabajan con un rango de pH entre 7.5 a 11.5. Cuando el pH varía de 7.5 a 9.5, el fluido es de bajo pH y cuando varía de 9.5 a 11.5, es de alto pH.

(e) **% de sólidos y líquidos:** En los fluidos de perforación se puede conocer el contenido de sólidos totales, así como el volumen de agua y/o aceite correspondientes a la fase líquida del lodo. Estos valores deben ser monitoreados constantemente, tanto por la incorporación de sólidos provenientes de las formaciones como por las pérdidas de filtrado que puedan ocurrir durante la perforación. Cambios en los porcentajes de bentonita, arcilla de formación y sólidos no reactivos de formación influyen en las propiedades reológicas del lodo y también afectan la tasa de perforación e hidráulica del sistema.

2.4.2 Propiedades Químicas

(a) **Dureza:** Es causada principalmente por la cantidad de iones de calcio y magnesio presentes en el agua o el filtrado del lodo. El calcio soluble es extremadamente contaminante, particularmente para los fluidos que contienen arcillas. Este puede proceder del agua dura, del cemento o de la formación (sales y/o yeso) afectando el comportamiento de las arcillas, causando su floculación.

(b) **Cloruros:** Es la cantidad de iones de cloro presentes en el filtrado del lodo. La concentración de sal soluble en agua de un fluido de perforación está relacionada con la efectividad de controlar las lutitas reactivas. Determinar la cantidad de iones cloruros toma

gran importancia en aquellas áreas donde hay posibilidad de un influjo de agua salada o exista una potencial contaminación por sal.

(c) **Alcalinidad:** La alcalinidad de una solución se puede definir como la concentración de iones solubles en agua que pueden neutralizar ácidos. Con los datos obtenidos de la prueba de alcalinidad se pueden estimar la concentración de iones OH^- , $\text{CO}_3^{=}$ y HCO_3^- , presentes en el fluido.

(d) **MBT (*Methylene Blue Test*):** Es una medida de la concentración total de sólidos arcillosos reactivos que contiene el fluido.

2.4.3 Propiedades Reológicas

La Reología es la ciencia que estudia la deformación de un cuerpo sometido a esfuerzos externos; es decir, se encarga de estudiar el comportamiento de flujo de un fluido cuando circula a través de una tubería o conducto; el cual se realiza estableciendo la relación existente entre el esfuerzo de corte y la tasa o velocidad de corte, que son las propiedades directamente relacionadas con el proceso de deformación de un fluido que se encuentra en movimiento (Bolívar & Matos, 2008).

Al determinar las propiedades reológicas del fluido es posible determinar la manera en que dicho fluido fluirá bajo diversas condiciones, incluyendo la temperatura, la presión y la velocidad de corte.

(a) **Viscosidad Aparente:** Se define como la medición en centipoises que un fluido Newtoniano debe tener en un viscosímetro rotacional, a una velocidad de corte previamente establecida, y que denota efectos simultáneos de todas las propiedades de flujo. Está en función de la viscosidad plástica y el punto cedente y se relaciona

con la máxima concentración de sólidos arcillosos que acepta una mezcla de agua y bentonita sin alcanzar el estado de floculación. Es utilizada en el campo para determinar el rendimiento de una arcilla (Prieto A., 2007).

En un fluido newtoniano la viscosidad aparente es numéricamente igual a la plástica.

La viscosidad aparente puede ser calculada por medio de la siguiente ecuación:

$$VA(cp) = \frac{L600}{2}$$

Ecuación n° 1. Viscosidad Aparente

Dónde:

VA: Viscosidad aparente (cp).

L600: Lectura del viscosímetro a 600 rpm.

- (b) **Viscosidad Plástica:** Es una medida de la resistencia interna al flujo de fluido, debido a la fricción mecánica generada por los sólidos presentes en el fluido de perforación. El valor de la viscosidad plástica está sujeto a la cantidad, tipo y tamaño de los sólidos suspendidos en el lodo de perforación y se calcula con dos lecturas del viscosímetro rotatorio, mediante la siguiente ecuación:

$$VP(cp) = L600 - L300$$

Ecuación n° 2. Viscosidad Plástica.

Dónde:

VP: Viscosidad plástica (cp).

L600: Lectura del viscosímetro a 600 rpm.

L300: Lectura del viscosímetro a 300 rpm.

Un incremento en la viscosidad plástica, se ve reflejado en un aumento en la cantidad de sólidos, una reducción en el tamaño de las partículas sólidas, un cambio en la forma de las mismas o debido a una combinación de estos factores, lo cual se controla con equipos mecánicos de Control de Sólidos. Este control es indispensable para mejorar el comportamiento reológico y sobre todo para obtener altas tasas de penetración (ROP). Una baja viscosidad plástica aunada a un alto punto cedente permite una limpieza efectiva del hoyo con alta tasa de penetración.

- (c) **Punto cedente:** Es una medida de la fuerza de atracción entre las partículas, bajo condiciones dinámicas o de flujo. Es la parte de la resistencia a fluir causada por las fuerzas de atracción electroquímicas debido a las cargas presentes sobre la superficie de las partículas sólidas dispersas en la fase líquida. El punto cedente está relacionado con la capacidad de limpieza del fluido en condiciones dinámicas, y generalmente sufre incremento por la acción de los contaminantes solubles como el carbonato, calcio, y por los sólidos reactivos de formación. Un fluido floculado exhibe altos valores de punto cedente. La floculación se controla de acuerdo al causante que lo origina. Se usan adelgazantes químicos cuando es causada por excesos de sólidos arcillosos y agua cuando el fluido se deshidrata por altas temperaturas. El punto cedente de los lodos dispersos es aproximadamente igual al peso del lodo y el de los no dispersos ligeramente mayor.

Esta propiedad reológica se calcula a partir de los datos del viscosímetro de lectura directa de la siguiente manera:

$$PC = 2 * L300 - L600 \Rightarrow PC = L300 - VP$$

Ecuación n° 3. Punto Cedente.

Dónde:

PC: Punto cedente $\left(\frac{lb}{100pies^2}\right)$.

L600: Lectura del viscosímetro a 600 rpm.

L300: Lectura del viscosímetro a 300 rpm.

VP: Viscosidad plástica (cp).

(d) **Resistencia de Gel:** Es una propiedad que mide las fuerzas de atracción entre partículas bajo condiciones estáticas. Se relaciona con la capacidad de suspensión que adquiere el fluido cuando se detiene la circulación, lo cual es una medida del grado de tixotropía presente en el fluido; es decir, la capacidad de formar una estructura rígida cuando está estático, regresando luego al estado fluido cuando se aplica un esfuerzo de corte. La resistencia del gel depende de la cantidad y del tipo de sólidos en suspensión, del tiempo, de la temperatura y del tratamiento químico.

Las mediciones de resistencia de gel se reportan comúnmente a los diez segundos y a los diez minutos, pero pueden ser medidas para cualquier espacio de tiempo deseado y corresponde a la máxima lectura del dial obtenida a 3 RPM registrada en $lb/pies^2$.

Si existe una amplia diferencia entre los valores de esfuerzo de gel inicial y después de 10 minutos o más, quiere decir que hay formación de geles progresivos e indica la acumulación de sólidos. Por otro lado, si los valores de gel inicial y a 10 minutos son altos y muy similares, significa que hay formación de geles instantáneos y puede indicar que ha ocurrido floculación.

2.5 CONTAMINACIÓN DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Según Prieto (2007), un contaminante es cualquier elemento, sea sólido, líquido o gas que cause cambios indeseados en las propiedades del fluido.

En términos generales, un contaminante es cualquier sustancia que altere de forma negativa las propiedades del fluido de perforación, en algunos casos será posible aplicar un tratamiento, sin embargo en otros será imposible; lo importante es que el tratamiento a aplicar sea compatible con el sistema.

En ocasiones, el contaminante puede esperarse desde el principio, y se podrá hacer un tratamiento previo, siempre y cuando no genere efectos adversos en las propiedades del fluido. Por otro lado, cuando la contaminación ocurre de forma inesperada, eventualmente el contaminante mostrará su efecto modificando las propiedades del fluido de perforación.

Existen tres formas de eliminar los contaminantes:

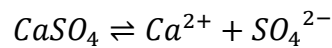
- (a) Por remoción y precipitación, al circular el fluido de perforación por los equipos de control de sólidos.
- (b) Por tratamiento químico, al agregar aditivos químicos que permitan controlar tales contaminantes.
- (c) Por dilución, para reducir su concentración de los contaminantes en el fluido de perforación.

2.5.1 Contaminación de yeso o Anhidrita

Según API (2001) explica que la anhidrita y el yeso son sulfatos de calcio que tienen composiciones químicas prácticamente idénticas, sin embargo,

el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) es más soluble que la anhidrita (CaSO_4). La contaminación ocurre al perforar secciones donde hay presencia de estos compuestos que, al entrar en contacto con el lodo, son solubilizados e incorporados al sistema. La severidad de este contaminante depende principalmente de la cantidad perforada.

Al solubilizarse en agua, el sulfato de calcio se disocia en iones calcio y sulfato como se muestra a continuación:



Ecuación n° 4. Reacción química del Sulfato de Calcio

No obstante, la solubilidad del sulfato de calcio es controlada por el pH, la salinidad y la temperatura del sistema. Un aumento del pH y/o de la temperatura del lodo, reduce la capacidad de diluir al sulfato de calcio, mientras que el aumento en la concentración de iones cloruro aumenta la solubilidad.

El efecto inicial de la contaminación con iones calcio sobre un sistema de lodo a base de bentonita es la alta viscosidad, altos esfuerzos de gel y un mayor filtrado. La medida en que estas propiedades son afectadas depende de la concentración del contaminante, la concentración de sólidos reactivos y la concentración de defloculantes químicos en el lodo de perforación.

Factores de detección

La primera indicación de contaminación con anhidrita o yeso es el aumento de las propiedades físicas, incluyendo la viscosidad Marsh, el punto cedente y los esfuerzos de gel, sin embargo, será necesario realizar pruebas químicas para identificar el contaminante químico que

está presente. Los principales síntomas que indican que ha ocurrido contaminación con yeso o anhidrita incluyen:

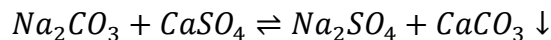
- (a) Aumento de la cantidad de calcio en el filtrado. Es posible que este aumento inicialmente no resulte evidente si hay algún excedente de iones carbonato, bicarbonato o fosfato en el lodo, o si se está aumentando el pH del sistema de lodo. Sin embargo, una vez que el yeso solubilizado haya agotado estos elementos químicos, el pH disminuirá porque el pH del yeso (6 a 6,5) es muy bajo. Esta reducción del pH resultará en un aumento importante de la cantidad de calcio en el filtrado.
- (b) Reducción de la alcalinidad del filtrado (Pf) y alcalinidad del filtrado al naranja de metilo (Mf).
- (c) Debido a la solubilidad relativamente limitada de la anhidrita y del yeso, los recortes pueden contener trazas del mineral. Esto es demostrado frecuentemente en los recortes por la presencia de bolitas blandas de material soluble en ácido.
- (d) El sulfato de calcio causa agregación y floculación en los fluidos de perforación base agua.

Tratamiento

El propósito principal es reducir la concentración de iones calcio disueltos en el lodo de perforación, inhibirlos y así evitar que estos interactúen con el medio alterando negativamente sus propiedades. Esta reducción se evidencia a través de ensayos químicos, más específicamente mediante pruebas de dureza del filtrado del lodo.

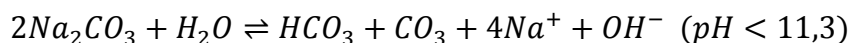
El primer paso en el tratamiento de un fluido de perforación contaminado con yeso es aumentar la concentración de defloculante en el sistema, por ejemplo lignito o lignosulfonato. Si la concentración de calcio es muy alta,

uno de los aditivos más efectivos para tratar la floculación de las arcillas es el carbonato de sodio. La Ecuación 5 ilustra de qué manera se puede reducir la cantidad de iones de calcio usando tratamientos de carbonato de sodio para formar carbonato de calcio (caliza). La flecha descendente supone la precipitación de un sólido insoluble y la reacción química que se genera es la siguiente:



Ecuación n° 5. Reacción química del Carbonato de Sodio con el Sulfato de Calcio

Las contaminaciones con calcio de formación disminuyen el pH, porque el yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) y la anhidrita ($CaSO_4$), formaciones suplidoras de calcio, suplen radicales sulfatos (SO_4^{2-}) en lugar de oxidrilos (OH^-). Para optimizar el funcionamiento del defloculante se debe mantener el pH básico, en un rango de 9,5 a 10,5 con la incorporación de soda cáustica (NaOH) o potasa cáustica (KOH), debido a que en este rango se limita la solubilidad del yeso. Sin embargo, cuando se mezcla carbonato de sodio en agua, el pH aumenta debido a la formación de un ion hidroxilo, como se muestra a continuación:



Ecuación n° 6. Reacción química del Carbonato de Sodio acuoso

Una vez precipitado el exceso de calcio, se deben restaurar todas las propiedades del fluido añadiendo los aditivos necesarios para tal fin.

Así mismo, se puede emplear Pirofosfato Ácido de Sodio (SAPP) para tratar la contaminación de anhidrita. Debe ser usado con precaución, ya que el SAPP reduce el pH y no es estable a grandes temperaturas como diluyente de lodo.

2.5.2 Contaminación por Cemento

Otra fuente de contaminación con calcio es el proveniente del cemento empleado en las operaciones de perforación de un pozo.

Los escenarios en los cuales ocurre este tipo de contaminación son:

- (a) Al perforar los tapones de cemento.
- (b) Cuando se cementa la tubería de revestimiento.
- (c) Cuando la cal que contiene el cemento reacciona con agua formándose grandes cantidades de hidróxido de calcio, lo cual genera mayor dificultad en la contaminación.

Factores de detención

- (a) Aumento de las propiedades reológicas.
- (b) Reducción del control del filtrado.
- (c) Aumento del pH.
- (d) Adsorción del ion calcio en las partículas de arcillas causando floculación.
- (e) Aumento de la alcalinidad.
- (f) Revoque grueso y esponjoso.
- (g) Aumento de la viscosidad de embudo.

Tratamiento

Según Bolívar & Matos (2008) se debe seguir el procedimiento descrito a continuación:

- (a) Reducir el pH y la alcalinidad del fluido de perforación (Pm), aprovechando el bajo pH de los defloculantes, pues esto compensa

algunos de los iones hidroxilo generados por el cemento; lo cual aumenta la solubilidad del cemento permitiendo su precipitación.

- (b) El calcio del filtrado puede ser precipitado con bicarbonato de sodio.
- (c) Utilizar equipos de eliminación de sólidos, para eliminar las partículas finas de cemento.

2.5.3 Contaminación por Sal

Se puede generar por las siguientes causas:

- (a) Al perforar sales de rocas naturales tales como: la halita (NaCl), la silvita (KCl) y la carnalita ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).
- (b) La sal puede provenir del agua que se usa para mezclar el fluido. Perforación de domos salinos.
- (c) Flujos de agua salada, los cuales pueden ser mucho más perjudiciales para las propiedades de flujo que la perforación dentro de sales de rocas. Por reacciones de intercambio catiónico de las sales con las arcillas, la acción de masa por el catión dominante y en ocasiones por el pH.

Factores de Detención

- (a) Alta viscosidad y esfuerzos de gel.
- (b) Alto filtrado y un aumento importante en el contenido de cloruros, acompañado por pequeños aumentos de dureza en el filtrado del fluido de perforación.
- (c) Debido a que se produce un intercambio catiónico entre la sal y las arcillas para expulsar el ion calcio de las partículas de arcilla, lo que resulta en un aumento de la dureza.

- (d) Disminución rápida del pH y de la alcalinidad del fluido de perforación. Aumento del volumen del fluido en el sistema
Incremento de las propiedades reológicas.

Tratamiento

No existe ningún producto químico que permita eliminar la sal del fluido de perforación, pero si se pueden aplicar algunos mecanismos como:

- (a) Reducir la concentración de sal por dilución con agua dulce.
- (b) Utilizar dispersantes para reducir las propiedades reológicas.
- (c) Agregar soda cáustica al sistema para aumentar el pH.
- (d) Aplicar un reductor de filtrado.
- (e) Incrementar la densidad del fluido de perforación.

2.5.4 Contaminación por Carbonatos y Bicarbonatos

Es ocasionada por:

- (a) Por el dióxido de carbono (CO_2) del aire, de la formación y del agua de formación que se incorpora en el fluido de perforación, pues al disolverse, el CO_2 se transforma en ácido carbónico (H_2CO_3) y es convertido en bicarbonatos (HCO_3^-) y/o carbonatos (CO_3^{2-}) según el pH del fluido.
- (b) Excedentes de carbonato y/o bicarbonato utilizados en el tratamiento para la contaminación del cemento.
- (c) Por la degradación térmica del lignosulfonato y el lignito.

Factores de detención

- (a) Alta viscosidad de la línea de flujo.
- (b) Alto punto cedente y esfuerzos de gel progresivos.

- (c) Bajo Pf.
- (d) Solidificación del fluido de perforación.
- (e) Moderada pérdida de filtrado.
- (f) Disminuye el calcio presente en el filtrado. Con la diferencia de que el carbonato además, causa una disminución en el pH y Mf y el bicarbonato, por el contrario produce alto Mf.

Tratamiento

- (a) Carbonatos: es conveniente tratar el fluido de perforación con compuestos de calcio para precipitar y eliminar el carbonato y si el pH es menor de 9,4 se debe usar cal, de lo contrario se debe agregar yeso; y para mantenerlo se debe agregar soda cáustica.
- (b) Bicarbonatos: agregar suficiente soda cáustica para mantener un pH mínimo de 11 y así lograr la conversión de bicarbonatos a carbonatos, para luego aplicar el tratamiento para eliminar carbonatos.

2.5.5 Contaminación por Gas

Se produce cuando se perforan zonas de gas muy porosas a altas tasas de penetración.

Factores de detención

- (a) Disminución de la densidad del fluido de perforación.
- (b) Aumento del volumen de tanques activos.
- (c) Disminución de la eficiencia volumétrica de las bombas. Olor a gas en las líneas de flujo.

Tratamiento

- (a) Circular el fluido de perforación a través del desgasificador.
- (b) Mantener baja la gelatinización para ayudar a la desgasificación del fluido de perforación.
- (c) Mantener el peso del fluido de perforación en el tanque de succión. Aplicar un tratamiento químico para mantener las propiedades reológicas. Reanudar lentamente la circulación del fluido de perforación y continuar perforando.

2.5.6 Contaminación por Arena

Se genera al perforar formaciones que contienen cuarzo y sílice, generalmente en localizaciones costa afuera.

Factores de detención

Desgaste continuo de:

- (a) Pistones y camisas.
- (b) Asientos de las válvulas de las bombas de fluido de perforación.
- (c) Bombas de transferencia.
- (d) Piezas metálicas como: tuberías, mechas, entre otros.

Tratamiento

- (a) Realizar mantenimiento periódico a los tanques de sedimentación y al canal de fluido de perforación, con el fin de mantener un porcentaje de arena no mayor al 0,5% en el tanque activo.
- (b) Programar un mantenimiento continuo y preventivo de los tanques de fluido de perforación.

2.5.7 Contaminación por Sólidos

Se puede producir por:

- (a) Agregar aditivos y/o sólidos inertes no deseables al fluido de perforación durante su preparación.
- (b) Ineficiente remoción de sólidos por parte de los equipos mecánicos de control de sólidos.
- (c) Generación de sólidos (ripios o material densificante) durante la perforación que no son removidos en forma rápida y eficiente.

Factores de detención

Ligero aumento de la densidad, viscosidad plástica y esfuerzo de gel.
Aumento en el volumen de sólidos.

(a) Sólidos Antiguos:

- Permanecen invariables las propiedades del filtrado y el punto cedente.
- El pH permanece constante.

(b) Sólidos Nuevos:

- Ligero aumento del punto cedente y pérdida del filtrado.
- Reducción del pH y de la alcalinidad del filtrado y del fluido de perforación. Ligero aumento de la concentración de cloruros y calcio en el filtrado del fluido de perforación.

Tratamiento

- (a) Agua de dilución.
- (b) Equipo de remoción de sólidos.

2.5.8 Contaminación por H₂S y CO₂

Es producida por:

- (a) Descomposición de materiales que contienen azufre.
- (b) Gas de la formación.
- (c) Degradación biológica.

Factores de detención

- (a) Reducción del pH del fluido de perforación.
- (b) Decoloración del fluido de perforación (hacia un color oscuro), debido a la formación de FeS a partir de la barita.
- (c) Fuerte olor a gas.
- (d) Aumento de la viscosidad y del filtrado debido a la reducción del pH.
- (e) Aumento del volumen en los tanques.
- (f) Disminución de la densidad del fluido de perforación.
- (g) Disminución de la eficiencia volumétrica de las bombas de lodo.

Tratamiento

- (a) Declarar al taladro en emergencia y aplicar plan de contingencia.
- (b) Utilizar depuradores y desgasificar.

2.5.9 Contaminación por Altas Temperaturas

Al incrementar la temperatura, aumenta la velocidad de las reacciones químicas entre los componentes de los fluidos.

Factores de detención

- (a) Solidificación del fluido de perforación.

- (b) Baja tasa de penetración y aumento del costo.
- (c) Incremento del torque de la mesa rotatoria.
- (d) Tendencia al embolamiento.
- (e) Degradación de muchos de los aditivos utilizados en su formulación.
- (f) Inestabilidad del hoyo.
- (g) Aumento del filtrado.
- (h) Aceleración de las reacciones químicas.

Tratamiento

- (a) Evaluar los aditivos a la máxima temperatura de fondo registrada.
Eliminar el uso de aditivos poco resistentes a altas temperaturas.
- (b) Diluir el fluido de perforación con agua para evitar la deshidratación.
- (c) Utilizar productos resistentes a temperaturas elevadas.
- (d) Efectuar pruebas pilotos en el campo para optimizar el uso de aditivos químicos.

En la Tabla 1 se resumen los síntomas generados al fluido de perforación por parte de cada contaminante descrito anteriormente:

Tabla 1. Resumen de síntomas y tratamientos para la contaminación del lodo de perforación

Contaminante	WT	FV	PV	YP	Gel	FL	pH	P _m	P _f	M _f	Cl ⁻	Ca ²⁺	Sólidos	Tratamiento
Cemento	-	↑	-	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	-	↑ pH 11,5 ↓	-	Bicarbonato o SAPP, diluyente y ácido cítrico.

Contaminante	WT	FV	PV	YP	Gel	FL	pH	P _m	P _f	M _f	Cl ⁻	Ca ²⁺	Sólidos	Tratamiento
Yeso o Anhidrita	-	↑	-	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓	-	↑	-	Soda caustica, agua de dilución y diluyente o carbonato de sodio (más polímero para filtrado).
Sal	-	↑	-	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↑↗	-	Soda caustica, agua de dilución, diluyente y polímero para filtrado.
Carbonato o Bicarbonato	-	↑	-	↑	↑	↗	↓	↓	↗ →	↑	-	↓	-	pH≤10,3 : cal, pH 10,3 a 11,3: cal y yeso, pH≥11,3: Yeso
H ₂ S	-	↑	-	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓	-	↗	-	Soda caustica y fuente de cinc.
Sólidos Antiguos	↗	↗	↗	-	↗	-	-	-	-	-	-	-	↑	Agua de dilución y equipo de remoción de sólidos
Sólidos Nuevos	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↘	↘	↘	↘	↗	↗	↑	Agua de dilución y equipo de remoción de sólidos y diluyente.
↑ Aumento ↓ Reducción - Sin cambio ↗ Ligero aumento ↘ Ligera reducción														

WT = densidad

FV = viscosidad embudo

PV = viscosidad plástica

YP = punto cedente

Gel = Esfuerzos de gel

FL = Pérdida de filtrado

P_m = Alcalinidad del lodo

P_f = Alcalinidad del filtrado

M_f = Alcalinidad del filtrado

de anaranjado de metilo

2.6 DEFLOCULANTES

Los defloculantes, dispersantes o adelgazantes son sustancias utilizadas en los fluidos de perforación principalmente para reducir la resistencia al flujo y las estructuras de gel que se desarrollan en los lodos cuando éstos son contaminados (Chadid Y Osma, 2011).

Estos diluyentes suelen tener un componente aniónico relativamente grande el cual genera enlaces con los bordes positivos de las partículas de arcilla, reduciendo de esta manera las fuerzas de atracción borde-cara, y por ende revirtiendo el proceso de floculación, sin afectar la hidratación de las arcillas.

Los dispersantes tienden a reducir la floculación de los lodos de perforación mediante alguno de los siguientes mecanismos:

- (a) Eliminando el contaminante mediante precipitación.
- (b) Reduciendo los efectos del contaminante mediante la complejidad del lodo contaminado (secuestro).
- (c) Neutralizando la floculación mediante la satisfacción de las cargas catiónicas en las partículas de arcilla.
- (d) Encapsulando o formando una película protectora alrededor de la partícula de arcilla.

Además de los defloculantes comerciales que se han mencionado anteriormente en el tratamiento de lodos de perforación (Lignitos, Lignosulfonatos, Carbonatos o Bicarbonatos, Fosfatos o Polifosfatos, existen otros compuestos de origen natural, que se han utilizado por muchos años en la industria petrolera, llamados taninos.

2.6.1 Taninos

La palabra taninos hace referencia a un grupo de complejas sustancias astringentes, compuestas de carbón, hidrógeno y oxígeno y que en algunos casos contienen pequeñas cantidades de fósforo y nitrógeno. Son ácidos particularmente débiles cuyo peso molecular varía entre 300 y 1000. Estas sustancias suelen encontrarse en una amplia variedad de plantas, en su corteza, madera o frutos (Chadid Y Osma, 2011).

Se puede clasificar los taninos según dos parámetros:

- (a) El grupo de taninos que consisten en ésteres de uno o más ácidos polifenólicos, se conocen como taninos hidrolizables.
- (b) Grupo de taninos que consisten en núcleos fenólicos, se conocen como taninos condensados.

El extracto de quebracho, un tipo de tanino, fue uno de los primeros dispersantes usados en los lodos de perforación en Estados Unidos y era extraído principalmente de la madera de algunos árboles del género *Schinopsis*, que crecían en el norte de Argentina y el este de Paraguay. Es un adelgazante muy efectivo en lodos de agua dulce pues requiere concentraciones de 1-2 lb/bbl para generar defloculación. El quebracho tiene una concentración de taninos de 60-65% y un pH igual a 3.8. Esta sustancia tiene dos grandes limitaciones, la primera es que pierde estabilidad en lodos contaminados con sal y calcio a altas concentraciones y a temperaturas que superen los 225°F. Debe ser usado en sistemas con pH de 11; y la segunda es que tiene dificultades para disolverse en agua fría. Su uso actual se limita pozos someros y lodos de agua fresca.

Como solución a la limitación de solubilidad en agua fría del quebracho se crearon los Taninos modificados. Son compuestos de metales complejos de taninos sulfoalcalinos que tienen una alta solubilidad en el agua. Sus modificaciones brindan mejores efectos adelgazantes, mayores efectos en el manejo de pérdidas de filtrado, un rango más amplio de pH y más estabilidad térmica.

2.7 CAESALPINIA CORIARIA

2.7.1 Descripción Taxonómica

En la Tabla 2 se puede observar la clasificación botánica de la planta *C. Coriaria*

Tabla 2. Clasificación botánica de *Caesalpinia coriaria* (Jacq.) Willd. Tomada de Base de datos de plantas USDA-NRCS, 2017

Taxonomía	
Reino	<i>Plantae</i>
Subreino	<i>Tracheobionta</i>
División	<i>Magnoliopsida</i>
Orden	<i>Fabales</i>
Familia	<i>Fabaceae</i>
Subfamilia	<i>Caesalpinioideae</i>
Tribu	<i>Caesalpinieae</i>
Genero	<i>Caesalpinia</i>
Especie	<i>Caesalpinia Coriaria (Jacq.) Willd.</i>

Nombres Vulgares:

“Barabó”, “Dividivi”, “Dividivi Calentano”, “Dividivi de tierra caliente”, “Ichí”, “Ichí-ajuañay”, “Libidivi” (Colombia).

Es un árbol sin espinas, ramificado, pequeño y torcido que alcanza una altura de aproximadamente seis a diez metros (Jansen, 2005), como puede observarse en la Figura 5, las hojas pinnadas van de cinco a siete pares y poseen una pinna impar terminal. Sus flores son pequeñas y amarillas (Figura 6).



Figura 5. Árbol de *Caesalpinia Coriaria*



Figura 6. Flores de la *Caesalpinia Coriaria*

Por lo general, el árbol produce frutos perennemente a partir de su séptimo año y puede vivir hasta 100 años en promedio. Las frutas son vainas indehiscentes, de color café pálido a marrón negruzco. Las vainas (Figura 7), tienen una apariencia rizada o retorcida y tienen de 1 a 10 semillas por vaina.



Figura 7. Vainas de la *Caesalpinia Coriaria*

Las semillas (Figura 8), son de seis a siete milímetros de largo, marrones y elipsoides o reniformes. Un árbol maduro puede producir hasta aproximadamente 130 kg o 300 libras de vainas por temporada. La *C. Coriaria* prospera en varios tipos de suelos y acepta climas diferentes. Tolera suelos ricos en arcilla, así como suelos pobres en arena en un rango de pH de 4,5-8,7. Puede crecer en zonas templadas cálidas y secas, y también en zonas tropicales húmedas (Jansen, 2005).



Figura 8. Semilla de la *Caesalpinia Coriaria*

2.7.2 Distribución Geográfica

Originalmente, La *Caesalpinia Coriaria* era autóctona de las Indias Occidentales y América tropical (Jansen, 2005). Posteriormente se introdujo en otras regiones y hoy se encuentra en muchos países tropicales y subtropicales en todo el mundo.

Esta planta se halla ampliamente distribuida desde el sur de México, Las Antillas, El Salvador, Puerto Rico, hasta la parte Norte de Suramérica (Correa & Bernal, 1990), encontrándose en Colombia, Panamá y Venezuela, países pertenecientes a la región andina.

En la Figura 9 se muestra la distribución de la planta a nivel mundial.



Figura 9. Distribución Geográfica de la *Caesalpinia Coriaria*

Estos árboles se hallan mayormente en zonas de bosque muy seco, xerofítico, abierto, sobre suelo desnudo; también en manglares en la costa.

2.7.3 Constituyentes y estudios fitoquímicos de *Caesalpinia Coriaria* (Jacq.) Willd.

Anandhi & Revathi (2013), realizaron un estudio fitoquímico de las vainas de la *Caesalpinia Coriaria*, revelando la existencia de las siguientes clases de sustancias:

- (a) Taninos
- (b) Quinones
- (c) Hidratos de Carbono
- (d) Saponinas
- (e) Flavonoides
- (f) Glicósidos
- (g) Glucósidos cardiacos

- (h) Terpenoides
- (i) Fenoles
- (j) Cumarinas
- (k) Esteroides de proteínas
- (l) Antraquinona

Los taninos se encuentran en todas las partes de la planta, la mayor cantidad se encuentra en el tejido esponjoso debajo de la epidermis de las vainas. El contenido de taninos de las vainas es 40-50% (Anandhi & Revathi, 2013). En las semillas, los taninos ocurren solo en pequeñas cantidades o no aparecen en absoluto.

Un análisis de las vainas muestra la siguiente composición: 41,5% de taninos, 25,4% de sustancias insolubles, 18% no-taninos, 13,5% de agua y 1,6% de cenizas. Además, las vainas son altas en contenido de carbohidratos. Los taninos contienen una gran porción de elagitaninos y galotaninos hidrolizables y son notablemente astringentes (Jansen & Cardón, 2005). Los galotaninos están caracterizados por la presencia del ácido galatónico o ácido gálico. Y en los elagitaninos su componente principal es el ácido elágico (Tezen Roldan, 2008)

La *C. Coriaria* es alta en componentes fenólicos. Debido a una correlación positiva entre la cantidad total de flavonoides fenólicos y las propiedades antioxidantes, se puede concluir que la planta presenta una buena actividad antioxidante. Los estudios sugieren que los flavonoides y glucósidos de las hojas, así como los taninos de las vainas, tienen una actividad antibacteriana.

Las semillas consisten en 5-9% de aceite fijo. La mitad está compuesta de ácidos grasos ciclopropenoides que son conocidos por sus efectos carcinogénicos (Jansen, 2005).

2.8 PREPARACION DE MATERIALES

El muestreo, la trituración, la molienda y el tamizado son algunos de los métodos empleados para el acondicionamiento del material, en este caso la *Caesalpinia Coriaria*, hasta alcanzar las condiciones de tamaño y separación requeridas para su aplicabilidad.

2.8.1 Muestreo

Se conoce como muestreo la técnica para la selección de una muestra a partir de una población. Este proceso permite obtener resultados parecidos a los que se alcanzarían si se realizase un estudio a toda la población.

El cuarteo es una técnica que describe el procedimiento de reducción de grandes cantidades de material hasta obtener una muestra representativa, empleando técnicas que intentan minimizar la variación de las características entre la muestra de ensayo y la muestra grande.

2.8.2 Conminución

Es un término general que significa una reducción paulatina del tamaño de un material, sin importar el mecanismo de fractura involucrado, para luego poder ser separado por los métodos disponibles.

2.8.3 Trituración

Es la primera etapa mecánica de conminución e implica sólo una transformación de la materia sin alterar su naturaleza. Se refiere a la reducción del material en fragmentos o partículas de menor tamaño y por lo general se realiza en seco y en etapas sucesivas. El triturado es

también el nombre del proceso para reducir el tamaño de las partículas de una sustancia mediante la molienda.

2.8.4 Molienda

La molienda es el proceso que consiste en desmenuzar una materia sólida, especialmente granos o frutos, golpeándola o frotándola entre dos piezas hasta reducirla a trozos muy pequeños, a polvo o a líquido.

2.8.4.1 Tipos de molino

Por la naturaleza de la carga moledora, los molinos se pueden clasificar en: molinos rotativos de barras y molinos rotativos de bolas.

(a) **Molino de Barras:** El molino de Barras está formado por un cuerpo cilíndrico de eje horizontal, que en su interior cuenta con barras cilíndricas sueltas dispuestas a lo largo del eje, de longitud aproximadamente igual a la del cuerpo del molino. Las barras se elevan, rodando por las paredes del cilindro hasta una cierta altura, y luego caen efectuando un movimiento que se denomina “de cascada”. La rotura del material que se encuentra en el interior del cuerpo del cilindro y en contacto con las barras, se produce por frotamiento (entre barras y superficie del cilindro, o entre barras), y por percusión (consecuencia de la caída de las barras desde cierta altura).

(b) **Molino de Bolas:** El molino de Bolas, análogamente al de Barras, está formado por un cuerpo cilíndrico de eje horizontal, que en su interior tiene bolas libres. Las bolas se mueven haciendo el efecto “de cascada”, rompiendo el material que se encuentra en la cámara de molienda mediante fricción y percusión.

2.8.4.2 Circuitos de molienda

- (a) **Circuito Cerrado:** Son utilizados cuando se requiere de molido fino. Este circuito consiste en complementar los aparatos de molienda con otros de clasificación, los cuales se colocan en el sistema a continuación del molino. El papel del aparato de clasificación es separar las partículas de tamaños inferiores al requerido mientras que el resto (más grueso) es devuelto a la máquina de molienda (Rondón W., 2010).

- (b) **Circuito Abierto:** En este tipo de circuitos no hay devolución de material al equipo de molienda. En este caso todo el material circula una única vez a través de la máquina.

2.8.5 Cribado

El cribado o tamizado es un proceso mecánico que separa los materiales de acuerdo a su tamaño de partículas individual. Esto se cumple proporcionando un movimiento en particular al medio de cribado, el cual es generalmente una malla o tamiz (Figura 10) esto provoca que las partículas más pequeñas que el tamaño de las aberturas (del medio de cribado) pasen a través de ellas como finos y que las partículas más grandes sean acarreadas como residuos (Peláez, 1981).



Figura 10. Tamiz

El termino Mesh se utiliza como una unidad de medida del medio cribado y representa el número de luces de la malla o aberturas útiles por cada pulgada inglesa (equivalente a 25,4 mm). Por esta razón, a medida que aumenta el número en Mesh, habrá mayor cantidad de aberturas por pulgada, y en consecuencia el tamaño de partícula que atraviesa la malla será más pequeño.

2.8.5.1 Análisis Granulométrico

El análisis granulométrico consiste en estudiar los porcentajes de material retenido en cada tamiz al someter la muestra a un proceso de cribado mediante tamices normalizados de distintos tamaños colocados de forma descendente, es decir, de mayor a menor tamaño de orificio o abertura útil de pasaje, esto con la finalidad de determinar la distribución de las partículas y posteriormente realizar correspondencias entre tamaño y porcentaje en masa.

Es común elaborar todo tipo de gráficos que sean de utilidad para optimizar el manejo de la información obtenida mediante el procedimiento descrito anteriormente.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

La metodología para llevar a cabo el trabajo de investigación se delimitó mediante un diagrama de flujo definido por etapas, además, en el presente capítulo, se describieron los equipos y materiales empleados, así como los procedimientos desarrollados.

El objetivo principal de esta investigación es evaluar en base a resultados obtenidos en el laboratorio, los efectos que tiene la adición de la *Caesalpinia Coriaria* a un fluido de perforación contaminado con yeso, encausando el estudio a sus propiedades como agente defloculante.

La vaina de la especie *Caesalpinia Coriaria* fue previamente triturada y clasificada por tamaño de grano mediante el uso de tamices y posteriormente añadida al fluido de perforación contaminado, variando granulometría y concentración, para así determinar el efecto sobre las principales propiedades del lodo. Adicionalmente, se compararon los resultados obtenidos con otro sistema preparado con Carbonato de Sodio como defloculante de uso comercial.

3.1 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño de la investigación especifica la naturaleza de la intervención del investigador y estipula la estructura de la misma, es decir, el plan general que se ha de llevar a cabo para obtener respuestas a las interrogantes o para comprobar la hipótesis de investigación. En este sentido, se definió a continuación el tipo de investigación y la forma en que se realizó. El estudio fue dividido en etapas las cuales permitieron cumplir paso a paso con los objetivos del trabajo.

3.1.1 Tipo de investigación

En la primera etapa, la investigación estuvo orientada al tipo documental, debido a que el problema fue abordado por medio de la búsqueda y recopilación de información obtenida a partir de materiales impresos y digitales tales como libros, artículos técnicos, normas estandarizadas y trabajos especiales de grado. Sin embargo, en el resto de las etapas, se define que el tipo de investigación es experimental ya que, de manera general, el estudio se enfocó en realizar ensayos en el laboratorio que permitieron observar y determinar el efecto en las propiedades del lodo para así evaluar el comportamiento de la *Caesalpinia Coriaria* como agente defloculante.

3.1.2 Etapas de la investigación

El procedimiento a seguir para el desarrollo del trabajo de investigación se muestra en la Figura 11 mediante un diagrama de flujo.

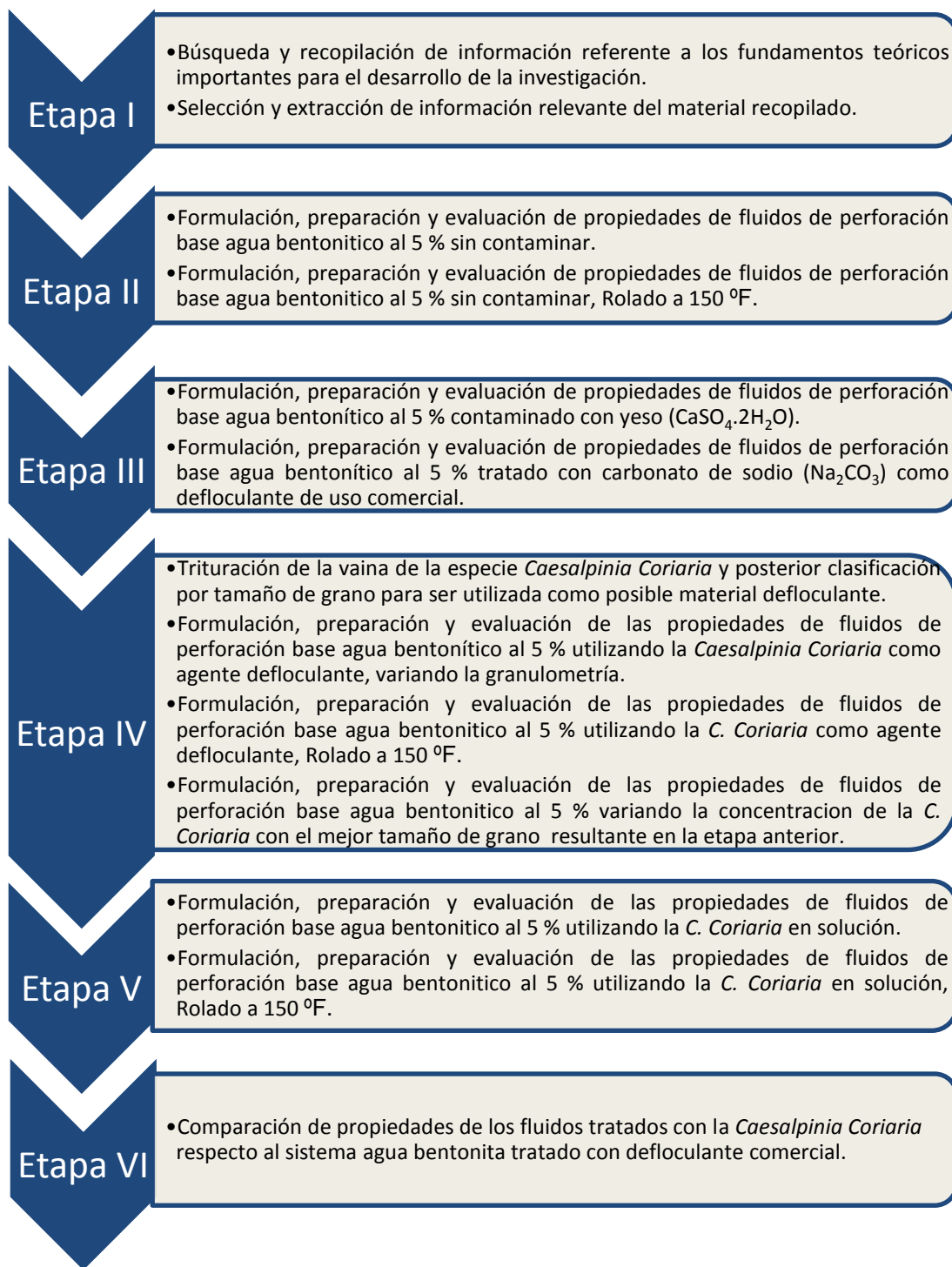


Figura 11. Etapas de la metodología

3.2 MATERIALES A UTILIZAR

Para cumplir con los objetivos planteados en este trabajo, se emplearon los materiales descritos a continuación:

- (a) **Bentonita Sódica** (Figura 12): Arcilla coloidal que se compone por 85% del mineral montmorillonita, un silicato de aluminio hidratado. Es usada en fluidos de perforación principalmente como agente viscosificante. En agua dulce, la bentonita sódica se hincha considerablemente hasta tal punto que su volumen final es diez veces su volumen original proporcionando un alto rendimiento al lodo, alcanzando valores mayores a 85 bbl/toneladas. La bentonita sódica permite un mayor control de filtrado (Rondón, 2010). Tiene una densidad de $2,4 \text{ g/cm}^3$.



Figura 12. Bentonita Sódica

(b) **Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)** (Figura 13): Es un químico común industrial y de laboratorio. En estado natural, el sulfato de calcio es una roca blanca cristalina. Tiene una densidad de $2,32 \text{ g/cm}^3$ y un peso molecular de $136,14 \text{ g/mol}$.



Figura 13. Yeso

(c) **Agua dulce:** Es la fase continua en la preparación de los fluidos de perforación base agua. Su densidad es $8,33 \text{ lpg}$.

(d) **Carbonato de Sodio (Na_2CO_3)** (Figura 14): Es una sal inorgánica de sodio, alcalina, blanca y translúcida también conocida como Soda Ash.



Figura 14. Carbonato de Sodio Na_2CO_3

(e) **Vaina de *Caesalpinia Coriaria***: Es el fruto de la *C. Coriaria* y su apariencia es de una vaina enroscada y carnosa que en un principio es verde y lustrosa, para luego tornarse marrón y finalmente negra, tiene pequeñas semillas de 3 a 7 mm de largo y de 1,5 a 2,3 cm de ancho (Tezen Roldan, 2008); color café, lustrosas, comprimidas, elíptico-oblongas. Se reproduce por las semillas. Prospera en zonas cálidas (más de 30°C), secas y con abundantes exposición solar, cercana al mar, a una altitud menor de 250 msnm.

3.3 PROCEDIMIENTOS PARA REALIZAR LAS PRUEBAS FÍSICAS

3.3.1 Balanza electrónica

Es utilizada para pesar los aditivos de las formulaciones de los fluidos de perforación. La capacidad de la balanza es de 400 g y la precisión es de $\pm 0,01$ g (Figura 15).



Figura 15. Balanza Mettler

3.3.2 Embudo Marsh

Equipo utilizado para determinar la viscosidad de embudo o viscosidad API. Para ello se debe tapar el extremo del embudo con un dedo y verter

el fluido a través del tamiz hasta que el nivel de fluido coincida con la base del tamiz, el embudo se debe sostener firme y recto sobre una jarra graduada con una marca a $\frac{1}{4}$ de galón. Se debe retirar el dedo del extremo y medir con un cronómetro, el tiempo que toma en escurrir $\frac{1}{4}$ de galón de lodo a través del embudo (Figura 16).



Figura 16. Embudo Marsh

3.3.3 Balanza de lodo

Usada para determinar la densidad del lodo. Está diseñada de tal manera que la copa para fluido, situada en un extremo del brazo de la balanza, es equilibrada por un contrapeso en el extremo opuesto y un carril libre de movimiento a lo largo de la escala graduada. Posee una burbuja de nivel en el brazo que sirve de referencia para determinar el valor de la densidad, esta se mide cuando la burbuja coincide con la marca centrada. Permite mediciones en lpg, con una precisión de $\pm 0,1$ lpg (Figura 17).



Figura 17. Balanza de Lodo Baroid

3.3.4 Retorta

Usada para medir la cantidad de sólidos y líquidos en el lodo. Una muestra de lodo cuidadosamente medida, 10 ml en el modelo utilizado, es colocada en un contenedor no corrosivo y calentada hasta que los componentes líquidos se evaporicen. Los vapores pasan a través de un condensador y son colectadas en un cilindro calibrado de 10 ml. El volumen de líquido es medido directamente y convertido en porcentaje. Este porcentaje restado a 100% determina el contenido de sólidos (Figura 18).



Figura 18. Retorta

3.3.5 Filtro prensa API multiceldas

Equipo utilizado para medir la filtración y formación de revoque del lodo. Una muestra de lodo colocada en una celda, es forzada a pasar a través de un papel de filtro a temperatura ambiente, presión de 100 psi y durante un tiempo de 30 minutos. Las medidas serán registradas a los 7,5 y 30

minutos. Pasado ese tiempo se desmonta la celda para determinar el espesor y características del revoque (Figura 19).



Figura 19. Filtro Prensa API

3.3.6 Viscosímetro

Equipo utilizado para medir los esfuerzos de corte del lodo a diferentes tasas de corte. Permite determinar las propiedades reológicas del lodo. Una muestra de lodo es contenida en el espacio anular entre dos cilindros. El cilindro exterior (rotor) gira a velocidades conocidas. La resistencia a fluir que ejerce el lodo crea un torque sobre el cilindro

interior (bob). Este torque es transmitido a un resorte de precisión donde la deflexión es medida directamente en el dial (Figura 20).



Figura 20. Viscosímetro de Fann

3.3.7 pH-metro

El pH-metro es un instrumento utilizado para determinar el pH de soluciones acuosas, midiendo el electro potencial generado entre el electrodo especial de vidrio y el electrodo de referencia (Figura 21).



Figura 21. pH-metro digital

3.4 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR LAS PRUEBAS QUIMICAS

3.4.1 Alcalinidad

(a) Alcalinidad del filtrado Pf y Mf

Agregar 1 ml de filtrado dentro del recipiente donde se realizara la prueba. Añadir de 2 a 3 gotas de indicador de fenolftaleína. Sí la solución se torna rosada, titular con ácido H_2SO_4 al 0,02 N gota a gota de la bureta, agitando hasta que el color rosado desaparezca. Si la muestra es oscura y no se puede observar el cambio de color del indicador, el punto final

será tomado cuando el pH cae a 8,3, según indique el medidor de pH. Reportar la alcalinidad del filtrado, Pf, como el número de ml de ácido 0,02 N requeridos por ml de filtrado para lograr el punto final (Figura 22).

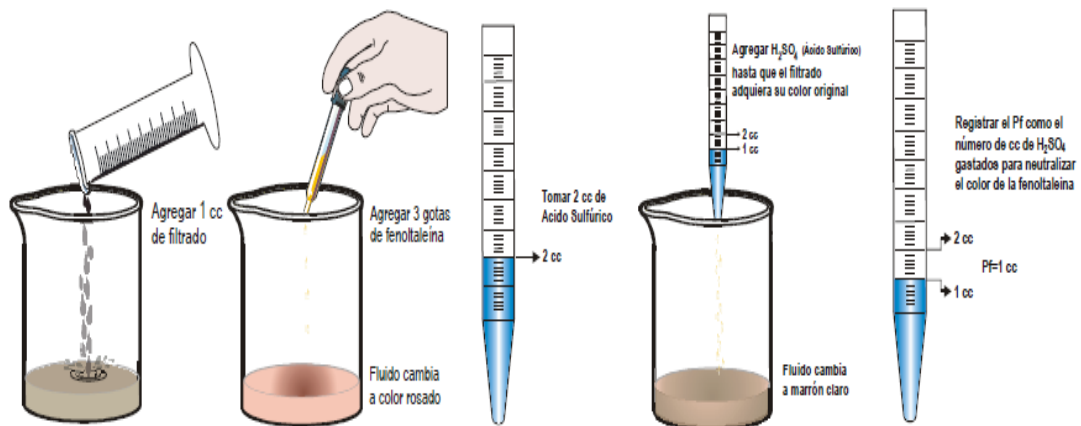


Figura 22. Alcalinidad del filtrado (Pf)

Posteriormente, añadir de 3 a 4 gotas de indicador de naranja de metilo a la misma muestra que fue utilizada para medir Pf; un color naranja aparecerá. Titular con ácido H_2SO_4 al 0,02 N, hasta que el color se torne rosado. Esto ocurrirá a un valor de pH 4,3. Mf se indica como el volumen total (ml) de ácido gastado tanto, para determinar Pf como el requerido en esta última titulación (Figura 23).

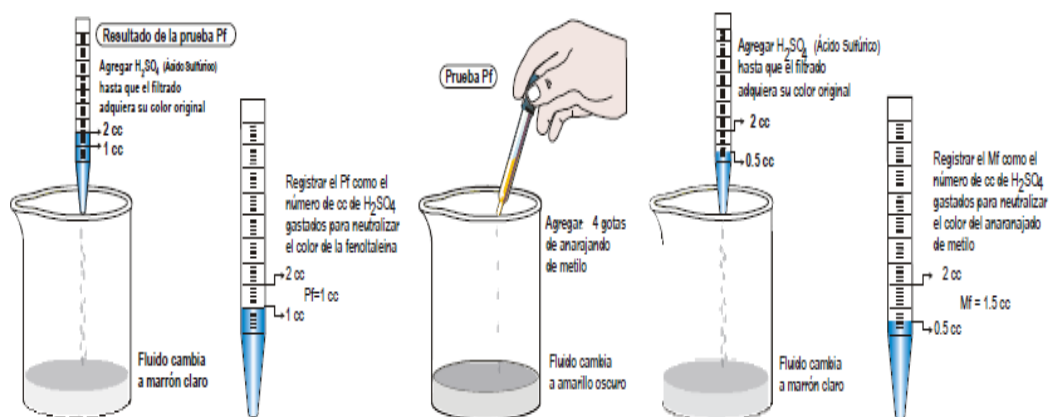


Figura 23. Alcalinidad del filtrado (Mf)

(b) Alcalinidad del lodo (Pm)

Agregar 1 ml de lodo en un Erlenmeyer. Añadir 25 ml de agua destilada. Colocar de 3 a 4 gotas de solución indicadora de fenolftaleína. Si la muestra se torna de un color rosado, titular rápidamente con ácido H_2SO_4 al 0,02 N gota a gota de la bureta, agitando hasta que el color rosado desaparezca. Reportar la alcalinidad del lodo, Pm, como el número de ml de ácido al 0,02 N requeridos por ml de lodo para lograr el punto final.

3.4.2 Cloruros

Medir 1 ml de filtrado dentro de un Erlenmeyer. Añadir 3 gotas de fenolftaleína y agregar H_2SO_4 al 0,02 N hasta que el color rosado desaparezca. Añadir 25 ml de agua destilada y de 4 a 10 gotas de la solución de cromato de potasio. Agitar continuamente y titular con la solución de nitrato de plata de 1.000 ppm (0,0282N), gota a gota de la bureta, hasta que el color pase de amarillo a rojo ladrillo y permanezca en este color durante 30 segundos. Registrar el número de ml de nitrato de plata requeridos para lograr el punto final.

$$Cl^{-} \left(\frac{mg}{L} \right) = cm^3 AgNO_3 * 1000$$

Ecuación n° 7. Cloruros

3.4.3 Dureza

Añadir 1 ml del filtrado en un Erlenmeyer. Agregar 2 ml de solución amortiguadora buffer y completar con agua destilada hasta alcanzar los 50 ml en el recipiente a graduado. Añadir unas 6 gotas de calmagita y mezclar con una varilla de agitación. Un color vino tinto aparecerá si la muestra contiene calcio. Usando una bureta, se titula con la solución de EDTA, agitando continuamente hasta que la muestra cambie a azul. Se reporta la dureza total, utilizando la siguiente ecuación:

$$Dureza\ total\ como\ calcio \left(\frac{mg}{L} \right) = 400 * cm^3 EDTA\ gastados$$

Ecuación n° 8. Dureza

3.5 LODO SIN CONTAMINAR

Al momento de determinar el efecto final en el lodo por la incorporación de aditivos, se realizaron los ensayos con tres muestras de lodo de 3 bbl cada una, para ser promediadas y así obtener mayor precisión en los resultados.

Para realizar las pruebas en el laboratorio se prepararon 3 bbl de lodo bentonítico base agua al 5% por cada muestra a evaluar. Para ello fue necesario determinar la masa bentonítica necesaria para preparar el lodo base agua al 5 %, mediante la siguiente ecuación:

$$Mb = \frac{Xb * \rho a * Vl}{\left(\frac{Xb * \rho a}{\rho b}\right) - Xb + 1}$$

Ecuación n° 9. Masa de Bentonita requerida para preparar fluido de perforación

Dónde:

Ma: Masa de agua

Mb: masa de arcilla

Xb: Fracción másica de arcilla

ρa : Densidad del agua (1g/cc)

ρb : Densidad de la bentonita (2,4 g/cc)

VI: Volumen del lodo

Va: Volumen de agua

El desarrollo de la ecuación se encuentra en el anexo 1.

Por lo tanto si se desea preparar 1 bbl de lodo bentonítico a condiciones de laboratorio, se debe considerar la siguiente equivalencia:

$$1 \frac{lb}{bbl} = \frac{454 \frac{g}{lb}}{42 \frac{gal}{bbl} * 3785 \frac{cc}{gal}} \Rightarrow 1 \frac{lb}{bbl} = \frac{1g}{350cc}$$

Por consiguiente el volumen correspondiente a 3 bbl de lodo bentonítico es de $3 * 350cc = 1050cc$. Conocido el volumen del fluido, la densidad del agua, la densidad de la bentonita y el porcentaje en masa del lodo a preparar, se pudo determinar que la masa de bentonita es de 54,08 g, utilizando la Ecuación 9, el cálculo se puede observar en el anexo 2.

Conocida la masa de bentonita a utilizar para preparar los 3 bbl de lodo, se debió determinar el volumen de agua necesario para realizar la formulación del mismo. La cantidad de agua a utilizar por cantidad de bentonita es de 1027,5 g de agua. El cálculo de la misma se encuentra en el anexo 3.

Como la densidad del agua es 1g/cc, se utilizó la ecuación de densidad para determinar que el volumen de agua a agregar es de 1027,5 cc. Ver anexo 4.

$$\rho a = \frac{Ma}{Va}$$

Ecuación n° 10. Densidad

En una jarra plástica, se añadió la masa de bentonita y el volumen de agua calculado anteriormente y se agitó por 30 minutos para alcanzar la hidratación de las arcillas. Luego de preparado el lodo, se determinaron las propiedades físicas y químicas del fluido descritas en la sección anterior, para establecer parámetros de referencia.

Propiedades físicas:

- (a) pH
- (b) Densidad
- (c) Perdida de filtrado
- (d) Espesor del Revoque
- (e) %(V/V) de agua y sólidos
- (f) Reología
- (g) Viscosidad de Embudo

Análisis Químico:

- (a) Alcalinidad del Filtrado
- (b) Alcalinidad del Lodo
- (c) Cloruros
- (d) Dureza

3.5.1 Lodo sin contaminar Rolado 150 °F

Luego de preparar una muestra de lodo sin contaminar para realizar esta prueba, se procedió a colocar un bbl de fluido en cada celda (Figura 24), para completar 3 en total.



Figura 24. Celda de envejecimiento

Posteriormente se colocó la tapa interna sobre la parte superior del cuerpo de la celda, de tal forma que esta se asiente en su lugar. Se enrosco manualmente la tapa externa y usando una llave Allen, se ajustó el set de 3 tornillos en la parte superior de la tapa exterior. Se insertó la válvula vástago en el agujero central de la tapa exterior y se da vuelta totalmente hasta que alcance el tope de cierre; para presurizar la celda, se afloja la válvula vástago hasta aproximadamente $\frac{1}{2}$ vuelta, se le inyectó presión de 100 psi y luego se gira nuevamente hasta el cierre. Se repite el procedimiento anterior con cada celda y se colocan dentro del horno de calentamiento a una temperatura de 150 °F (Figura 25). Finalmente se remueven las celdas de la cámara de calentamiento, se libera la presión y se deja enfriar hasta temperatura ambiente para poder determinar las propiedades del lodo luego del envejecimiento.



Figura 25. Horno de Rolado

Al fluido envejecido se le realizaron todas las pruebas físicas y químicas descritas en las secciones 3.3 y 3.4.

3.6 LODO CONTAMINADO CON 1g/bbl DE YESO ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

Una vez preparada una muestra de 3 bbl de lodo sin contaminar, se procedió a agregar 3 g de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), y se dejó agitar por 20 minutos. Pasado este tiempo se retiró del agitador y se dispuso a realizar las pruebas físicas y químicas descritas anteriormente.

3.7 LODO TRATADO CON DEFLOCULANTE COMERCIAL: CARBONATO DE SODIO (Na₂CO₃)

Luego de preparar una muestra de fluido con el contaminante, se trató con carbonato de sodio como defloculante comercial. A partir de los resultados obtenidos en las pruebas al fluido contaminado con yeso (CaSO₄.2H₂O), específicamente la dureza total como calcio en mg/l se utilizó la Tabla 3, para determinar la cantidad de tratamiento químico a utilizar.

Tabla 3. Tratamiento químico. Fuente: API, (2001)

Contaminante	Ion Contaminante	Tratamiento	Concentración de Tratamiento (lb/bbl)
Dióxido de Carbono	Carbonato Bicarbonato	Yeso para reducir el pH	mg/l x Fw x 0,00100
		Cal para aumentar el pH	mg/l x Fw x 0,000432
		Cal para aumentar el pH	mg/l x Fw x 0,00424
Yeso o anhidrita	Calcio	Carbonato de sodio	mg/l x Fw x 0,000928
		SAPP	mg/l x Fw x 0,000971
		Bicarbonato de sodio	mg/l x Fw x 0,00735
Cal o cemento	Calcio e hidroxilo	Bicarbonato de sodio	lb/bbl excedente de cal x 1,135
		SAPP	lb/bbl excedente de cal x 1,135
		ácido Cítrico	lb/bbl excedente de cal x 1,135

Contaminante	Ion Contaminante	Tratamiento	Concentración de Tratamiento (lb/bbl)
Agua dura o salada	Calcio y magnesio	Soda caustica	mg/l x Fw x 0,00116
Sulfuro de Hidrogeno	Sulfuro (H ₂ S, HS, S ²⁺)	Óxido de cinc más suficiente soda caustica para mantener el pH por encima de 10,5	mg/l x Fw x 0,00091

$$\text{Na}_2\text{CO}_3 = \frac{\text{mg}}{\text{l}} * Fw * 0,000928$$

Ecuación n° 11. Cantidad de descontaminante a utilizar

Dónde:

Na₂CO₃: Cantidad de carbonato de sodio a utilizar en lb/bbl.

mg/l: Dureza total como calcio en el lodo contaminado con yeso.

Fw: Porcentaje fraccionado de agua en la prueba de retorta.

Suministrando los valores requeridos en la Ecuación 11 se obtuvo que la cantidad necesaria de Na₂CO₃ es de 0,1080192 lb/bbl, sin embargo, debido al alcance del instrumento de medida utilizado para pesar, se aproximó a 0,11 lb/bbl. El cálculo correspondiente se encuentra en el anexo 5.

Tomando en cuenta que en laboratorio $1 \frac{\text{lb}}{\text{bbl}} = 1 \frac{\text{g}}{350 \text{ cc}}$ es equivalente añadir 0,11g Na₂CO₃ por cada barril a preparar. Debido a que las muestras son de 3 bbl cada una, se añadieron 0,33 g de Na₂CO₃ por muestra.

Una vez añadida la cantidad de descontaminante calculado, se agitó el lodo por 10 minutos. Posteriormente se realizaron las pruebas físicas y químicas para determinar las propiedades del fluido tratado con el carbonato de sodio (Na_2CO_3).

3.8 LODO TRATADO CON C. CORIARIA VARIANDO GRANULOMETRIA

3.8.1 Acondicionamiento de la vaina de *Caesalpinia Coriaria*

Inicialmente, se pesaron 3 muestras de 10 g de vaina de *C. Coriaria* cada una, con el fin de promediar y determinar el rendimiento en peso de la misma por cada tamaño de grano que se obtuvo. Cada muestra fue triturada por separado con un mortero (Figura 26) durante 5 minutos. Finalizado el tiempo, cada muestra triturada se hizo pasar por distintos tamices colocados en orden, desde mayor a menor tamaño de abertura.



Figura 26. Mortero de Cerámica

Los tamaños seleccionados para separar por granulometría a la *C. Coriaria* fueron: 10, 40, 80, 100, 120, 140 y 200 Mesh como se muestra en la Figura 27. Una vez apilados los tamices, se colocó un envase colector en el fondo, se agregó una muestra en el tamiz superior de 10 Mesh, y se agitó fuertemente hasta separar las partículas por tamaños retenidos en cada malla. Se repitió el procedimiento con el resto de las muestras. Evidentemente, los residuos retenidos representan un rango en tamaños de grano comprendidos entre el tamaño que dejó pasar el tamiz superior y el que retuvo el tamiz directamente inferior.



Figura 27. Tamices

En la

Tabla 4, se puede observar los tamaños de las aberturas de cada tamiz en pulgadas, milímetros y micrones.

Tabla 4. Tabla de conversión de malla hasta micrones. Fuente: *Sun Power Thermoelectrics*

US MALLA	PULGADAS	MICRONES	MILIMETROS
3	0,2650	6730	6,730

US MALLA	PULGADAS	MICRONES	MILIMETROS
4	0,1870	4760	4,760
5	0,1570	4000	4,000
6	0,1320	3360	3,360
7	0,1110	2830	2,830
8	0,0937	2380	2,380
10	0,0787	2000	2,000
12	0,0661	1680	1,680
14	0,0555	1410	1,410
16	0,0469	1190	1,190
18	0,0394	1000	1,000
20	0,0331	841	0,841
25	0,0280	707	0,707
30	0,0232	595	0,595
35	0,0197	500	0,500
40	0,0165	400	0,400
45	0,0138	354	0,354
50	0,0117	297	0,297
60	0,0098	250	0,250
70	0,0083	210	0,210
80	0,0070	177	0,177
100	0,0059	149	0,149
120	0,0049	125	0,125
140	0,0041	105	0,105
170	0,0035	88	0,088
200	0,0029	74	0,074
230	0,0024	63	0,063
270	0,0021	53	0,053
325	0,0017	44	0,044
400	0,0015	37	0,037

Una vez separada la *C. Coriaria* por tamaño de grano de acuerdo a los tamices utilizados, se pesó cada una de las cantidades retenidas en cada malla, se obtuvo un peso promedio entre las 3 muestra correspondiente a cada rango de tamaños y finalmente se calculó el rendimiento de la vaina de la siguiente manera:

$$\text{Rendimiento} = \frac{g\#Mesh}{gTotal} * 100\%$$

Ecuación n° 12. Rendimiento de la muestra

Dónde:

g/#Mesh: Peso en gramos del residuo en cada malla.

gtotal: Peso total de *C. Coriaria* utilizado para realizar la prueba.

Adicionalmente, se repitió el proceso antes descrito para una muestra más grande de vaina sin cuantificar, y así obtener mayor cantidad de producto por tamaño para ser utilizado en todos los ensayos predichos.

Como punto de partida, se acordó fijar la cantidad de *C. Coriaria* a añadir como la misma cantidad de defloculante comercial (Na_2CO_3), que requiere un lodo contaminado con 1g/bbl de yeso, es decir, aproximadamente 0,33 g de *Caesalpinia Coriaria* por los 3 bbl de lodo de cada muestra.

Después de ser establecida la cantidad de *C. Coriaria* a utilizar para tratar el lodo contaminado, se procedió a determinar las propiedades físicas y químicas del fluido de perforación tratado con cada uno de los tamaños de granos seleccionados. Con la finalidad de simplificar términos, se nombrarán las muestras según el tamaño de tamiz que las retuvo, esto se ejemplifica en la Tabla 5.

Tabla 5. Rangos de tamaño de partícula retenido por cada tamiz

Tamaño de Tamiz que retuvo (Mesh)	Rango de tamaños de partículas del residuo retenido (pulg)
10	partículas > 0,0787
40	0,0787 ≥ partículas > 0,0165
80	0,0165 ≥ partículas > 0,0070
100	0,0070 ≥ partículas > 0,0059
120	0,0059 ≥ partículas > 0,0049
140	0,0049 ≥ partículas > 0,0041
200	0,0041 ≥ partículas > 0,0029
Colector	partículas < 0,0029

3.9 LODO TRATADO CON *C. CORIARIA* VARIANDO CONCENTRACIÓN

Para hacer el siguiente análisis de sensibilidad, se fijó la granulometría seleccionada en la sección anterior para así variar la cantidad añadida de producto, con el fin de establecer la cantidad mínima necesaria de *C. Coriaria*, garantizando un óptimo desempeño del aditivo como defloculante en el tratamiento de un lodo con las características del estudiado en este trabajo.

3.9.1 Lodo tratado con *C. Coriaria* rolado 150 °F

Una vez evaluadas las propiedades del fluido de perforación tratado con *C. Coriaria* añadida en distintos tamaños de grano y concentración, se seleccionó el rango con el cual se determinó que esta funciona de forma óptima en la defloculación del lodo contaminado, restaurando sus propiedades. Sin embargo, es imperativo analizar si este nuevo aditivo se

degrada por efectos de la temperatura. El procedimiento a utilizar es similar al del lodo sin contaminar rolado descrito en la sección 3.5.1, con la diferencia que en este caso el fluido debe ser contaminado con 1g/bbl de yeso y luego tratado con la *C. Coriaria*. Luego de ser envejecido a una temperatura de 150 °F por 16 horas, se extraen las celdas, se deja enfriar el lodo hasta alcanzar la temperatura ambiente para poder realizar las pruebas físicas y químicas correspondientes.

3.10 LODO TRATADO CON *C. CORIARIA* EN SOLUCIÓN

Se ensambló un sistema extractor Soxhlet (Figura 28), que consiste en una manta térmica con un balón aforado de 2lts, el mismo se llenó con 1L de agua destilada, se insertó el brazo para ascenso de vapor donde se introdujo un dedal con 20 g de *C. Coriaria* (Figura 29), sujetándose con una pinza a un soporte universal. Sobre el brazo se encastró un refrigerante de rosario y se le conectaron dos mangueras de agua fría, una para entrada y otra para salida. Al balón aforado se agregaron perlas de ebullición (Figura 30), se encendió la manta térmica alcanzando una temperatura de 270 °F (Figura 31). Una vez alcanzada la temperatura de ebullición del agua, el vapor sube hasta la cámara donde es condensado; en este proceso cíclico se van separando los compuestos hasta una concentración deseada. El tiempo de destilación fue de aproximadamente 12 horas.



Figura 28. Sistema de extracción Soxhlet



Figura 29. Brazo para ascenso

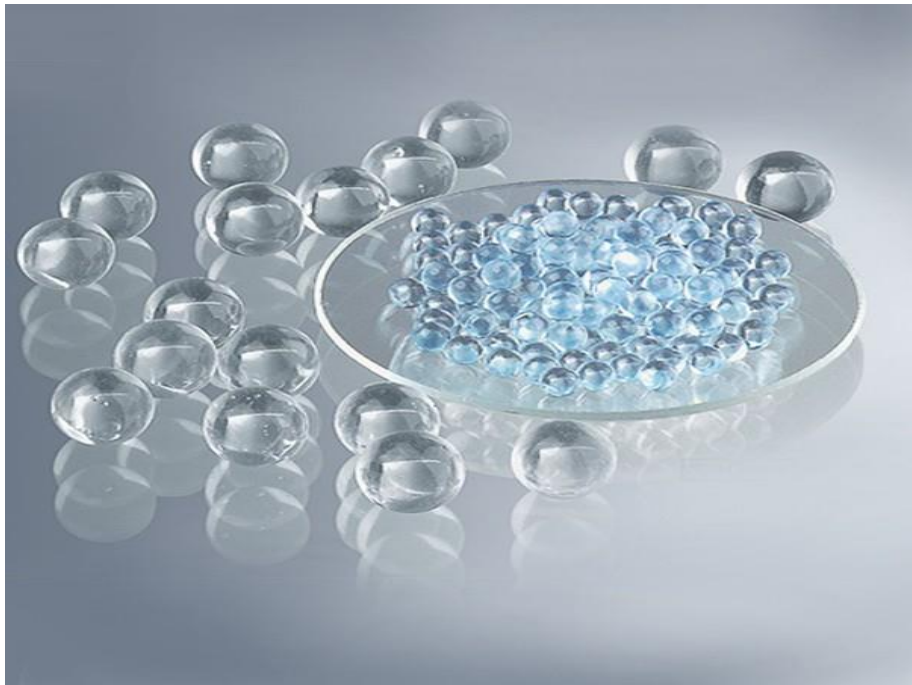


Figura 30. Perlas de ebullición



Figura 31. Temperatura del sistema de extracción Soxhlet

Pasado el tiempo de destilación, el líquido obtenido presentaba un color ámbar oscuro (Figura 32). El mismo se filtró para retirar las perlas de ebullición, y se envaso en un matraz aforado.

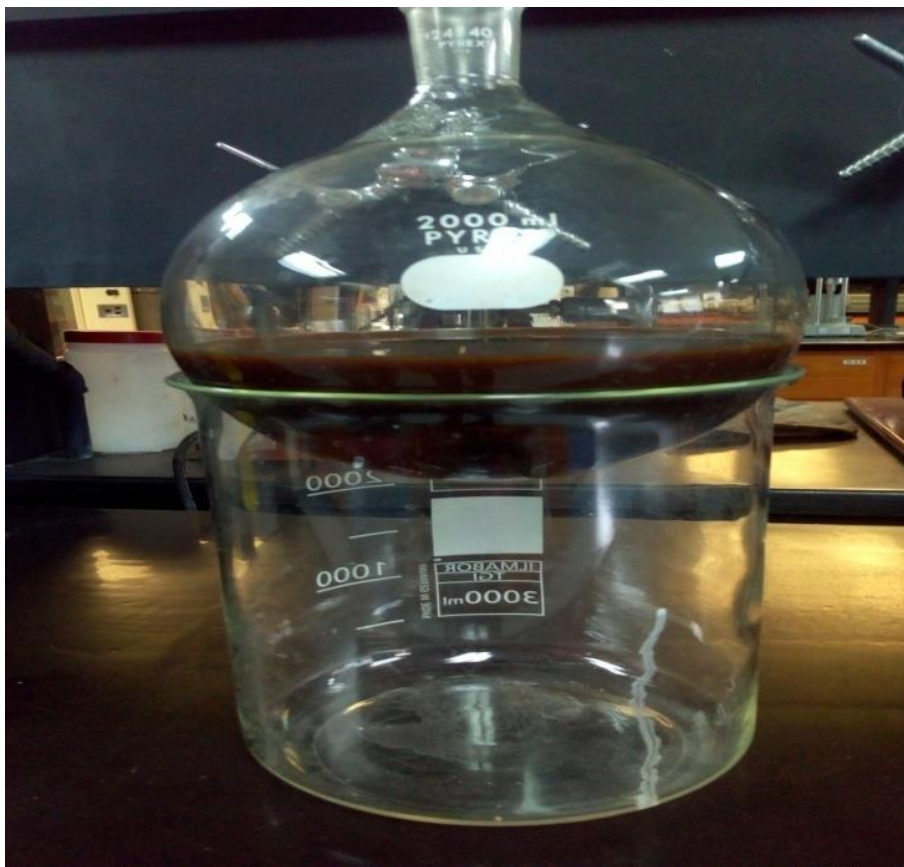


Figura 32. Líquido extraído de la destilación

Una vez filtrado, se determinó el peso de 100 ml de solución para realizar el cálculo de la densidad de la siguiente manera:

$$\rho_{sol} = \frac{M_{sol}}{V_{sol}} * \frac{8,33 \text{ lpg}}{1 \text{ g/cm}^3} = \frac{M_{sol}(100\text{ml})}{100\text{ml}} * \frac{8,33 \text{ lpg}}{1 \text{ g/cm}^3}$$

Ecuación n° 13. Densidad de la solución preparada

Dónde:

$\rho_{sol}(\text{lpg})$: Densidad de la solución preparada.

M_{sol} : Masa de 100 ml de solución preparada.

Vsol: Volumen utilizado para realizar la prueba (100 ml).

Así mismo, se calculó la densidad de la solución usando la balanza de lodo, de la misma manera que se realizó para los fluidos de perforación y se comparó con la obtenida de manera experimental, con el fin de corroborar el valor conseguido por el método anterior.

Obtenida la densidad de la mezcla, se prepararon tres muestras de 3 bbl cada una y se les agregó una cantidad de 5 ml, 10 ml y 15 ml de la solución de *C. Coriaria* respectivamente, para determinar la efectividad de la misma en solución como agente defloculante. Posteriormente, se realizaron las pruebas físicas y químicas descritas en la sección 3.3 y 3.4.

3.10.1 Lodo tratado con *C. Coriaria* en solución Rolado 150°F

Luego de realizar las pruebas con diferentes cantidades de solución de *C. Coriaria*, se seleccionó la cantidad que arrojó mejores resultados, en el tratamiento del lodo contaminado, como agente defloculante. A partir de ello se preparó una muestra del lodo tratado con la solución y se sometió a un proceso de rolado como el descrito en la sección 3.5.1.

Al fluido rolado, se le realizaron las pruebas físicas y químicas descritas anteriormente en las secciones 3.3 y 3.4, con el objetivo de determinar si el desempeño de la *C. Coriaria* en solución es afectada por la temperatura.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de los resultados está orientado a determinar si las propiedades de los lodos, contaminados y tratados con *Caesalpinia Coriaria*, fueron restablecidas a los valores operacionales con los cuales fueron diseñados originalmente, enfocándose particularmente en aquellas propiedades que, teóricamente, se alteran debido al estado de floculación de las arcillas.

Como características adicionales en el uso de *C. Coriaria* como agente defloculante, se estudió el porcentaje de rendimiento del material, así como su efectividad comparada con otro aditivo de uso comercial, con la finalidad de establecer su rentabilidad.

4.1 LODO SIN CONTAMINAR

De acuerdo a planteamiento metodológico, descrito en el Capítulo III, se procedió a determinar las propiedades del fluido de perforación base agua bentonítico al 5%, para así determinar las características intrínsecas del mismo. Conforme a lo anterior se muestran los resultados obtenidos en la Tabla 6, con el cual se establecieron parámetros de referencia.

Tabla 6.Lodo Bentonítico al 5 % sin contaminar

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Embudo Marsh (s/qt)		33,28±0,01	32,05±0,01	32,27±0,01	32,53±0,01
Densidad del lodo (lpg)		8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1
Temperatura de Reología	L600	9	9	9	9
	L300	6	6	6	6
78,08 °F	L200	4	5	5	5

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
	L100	3	4	4	4
	L6	2	3	3	3
	L3	2	2	2	2
Resistencia gel (lb/100ft ²)	10"	3	4	3	3
	10'	4	5	4	4
Vp (cp)		3	3	3	3
Pc (lb/100 ft ²)		3	3	3	3
Va (cp)		4,5	4,5	4,5	4,5
Filtrado	7,5"	10	9,5	10,5	10
API (cc)	30"	22	21	20,5	21,2
Espesor del revoque (pulg)		5/64	5/64	5/64	5/64
pH		7,84	7,80	7,76	7,80
Cloruros (mg/L)		250	250	250	250
Dureza como calcio (mg/L)		40	40	40	40
Pf (cc de H ₂ SO ₄)		0,05	0,05	0,1	0,07
Mf (cc de H ₂ SO ₄)		0,1	0,1	0,15	0,12
Pm (cc de H ₂ SO ₄)		0,05	0,05	0,05	0,05
Retorta	% v/v sólidos	2	2	2	2
	% v/v Agua	98	98	98	98
Características del revoque		Homogéneo, liso, flexible y verde opaco	Homogéneo, liso, flexible y verde opaco	Homogéneo, liso, flexible y verde opaco	

4.1.1 Lodo sin contaminar Rolado 150 °F

En la Tabla 7, se muestran los resultados del lodo sin contaminar, sometido a efecto de la presión y temperatura.

Tabla 7. Lodo Bentonítico al 5 % sin contaminar Rolado 150 °F

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Embudo Marsh (s/qt)		40,04±0,01	40,44±0,01	40,35±0,01	40,28±0,01
Densidad del lodo (lpg)		8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1
Temperatura de Reología	L600	18	24	21	21
	L300	12	15	14	14
78,08 °F	L200	9	11	11	10
	L100	6	7	8	7
	L6	5	5	4	5
	L3	3	4	3	3
Resistenciagel (lb/100ft ²)	10"	4	5	4	4
	10'	5	5	5	5
Vp (cp)		6	9	7	7
Pc (lb/100 ft ²)		6	6	7	6
Va (cp)		9	12	10,5	10,5
Filtrado API (cc)	7,5"	9	9	10	9,3
	30"	19	19	21	19,7
Espesor del revoque (pulg)		3/32	5/64	5/64	5/64
pH		7,69	7,77	7,79	7,75
Cloruros (mg/L)		250	250	250	250
Dureza como calcio (mg/L)		40	40	40	40
Pf (cc de H ₂ SO ₄)		0,05	0,05	0,05	0,05
Mf (cc de H ₂ SO ₄)		0,1	0,1	0,1	0,10
Pm (cc de H ₂ SO ₄)		0,05	0,05	0,05	0,05
Retorta	% v/v sólidos	2	4	3	3
	% v/v Agua	98	96	97	97

Propiedades a determinar	L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Características del revoque	Homogéneo, liso, flexible y verde opaco, gelatinoso con grumos	Homogéneo, liso, flexible y verde opaco, gelatinoso con grumos	Homogéneo, liso, flexible y verde opaco, gelatinoso con grumos	

Al abrir las celdas de envejecimiento, se pudo observar que el lodo tenía un aspecto gelatinoso con grumos, que no tenía al inicio del proceso (Figura 33).



Figura 33. Grumos en el lodo sin contaminar Rolado

En primer lugar, se observó un incremento de la viscosidad de embudo (Figura 34) y en las propiedades reológicas (Figura 35), esto debido a la degradación del lodo, por efecto de la presión y la temperatura a las cuales fue sometido durante el proceso de rolado.

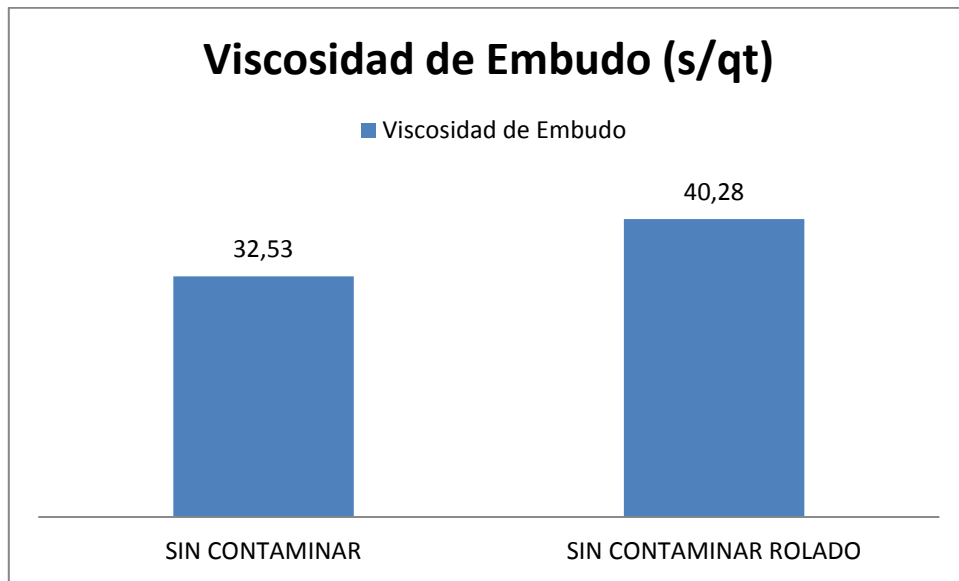


Figura 34. Viscosidad de embudo lodo sin contaminar vs Rolado sin contaminar

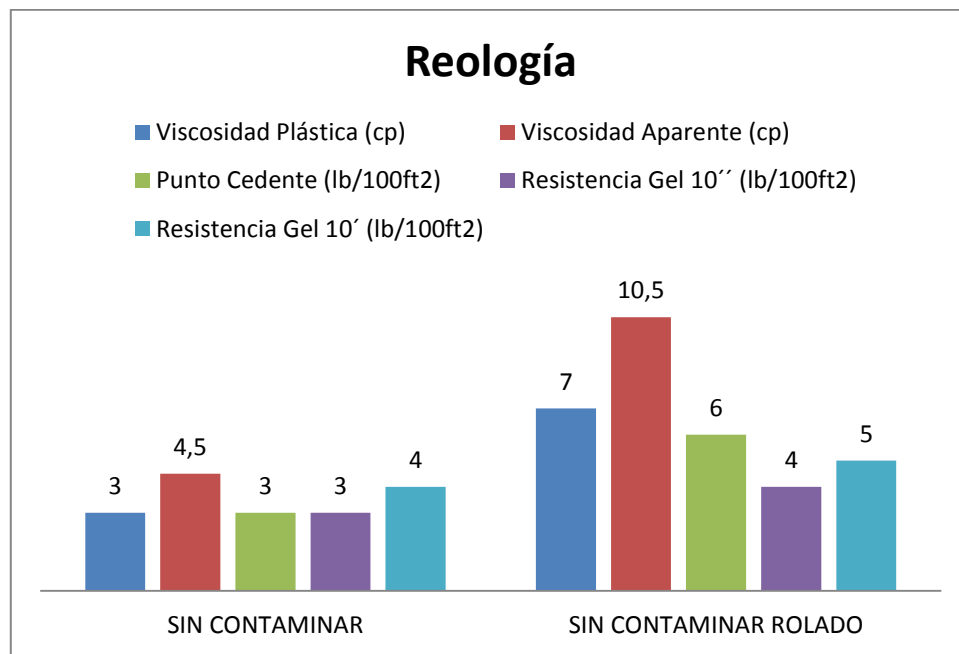


Figura 35. Reología lodo sin contaminar vs Rolado sin contaminar

Luego de realizar la prueba de filtro API, el volumen del filtrado no varió en gran medida, por lo que no se vio afectada la efectividad del revoque,

sin embargo, su aspecto físico cambió apareciendo los grumos (Figura 36) que se visualizaron en el lodo al aperturar las celdas.



Figura 36. Revoque lodo sin contaminar Rolado

4.2 LODO CONTAMINADO CON 1g/bbl DE YESO ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

En la Tabla 8, se observan los resultados de las pruebas realizadas al fluido contaminado con yeso.

Tabla 8. Lodo Bentonítico al 5 % contaminado con 1g/bbl de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Embudo Marsh (s/qt)		34,03±0,01	35,10±0,01	33,23±0,01	34,12±0,01
Densidad del lodo (lpg)		8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1
Temperatura de Reología	L600	13	14	12	13
	L300	10	10	9	10

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
78,08 °F	L200	9	9	8	9
	L100	7	7	6	7
	L6	6	5	5	5
	L3	5	4	4	4
Resistencia gel (lb/100ft ²)	10"	5	4	4	4
	10'	6	5	5	6
Vp (cp)		3	4	3	3
Pc (lb/100 ft ²)		7	6	6	6
Va (cp)		6,5	7	6	6,5
Filtrado	7,5"	21,5	26	24,5	24
API (cc)	30"	40	51,5	43,5	45
Espesor del revoque (pulg)		5/32	5/32	5/32	5/32
pH		7,99	7,70	7,96	7,88
Cloruros (mg/L)		250	250	250	250
Dureza como calcio (mg/L)		120	120	120	120
Pf (cc de H ₂ SO ₄)		0,05	0,05	0,05	0,05
Mf (cc de H ₂ SO ₄)		0,1	0,1	0,1	0,10
Pm (cc de H ₂ SO ₄)		0	0	0	0,00
Retorta	% v/v sólidos	4	3	3	3
	% v/v Agua	96	97	97	97
Características del revoque		Homogéneo, liso, flexible y verde pálido	Homogéneo, liso, flexible y verde pálido	Homogéneo, liso, flexible y verde pálido	

En comparación con los resultados de las pruebas realizadas al lodo sin contaminar, mostrados en la Tabla 6, se puede observar los cambios en las propiedades debido a la contaminación con yeso. Es evidente la

alteración de las características que teóricamente, son sensibles al efecto del sulfato de calcio dihidratado, como se ilustra en la Tabla 1.

Debido a que el yeso, al solubilizarse, se disocia en iones calcio y sulfato, la dureza total como calcio aumentó de 40 mg/l a 120 mg/l como se puede observar en la Figura 37. Otro efecto notorio fue que se acrecentaron los valores de las propiedades reológicas (Figura 38) viscosidad de embudo (Figura 39) y filtrado (Figura 40); además, se redujeron los valores de la alcalinidad (Figura 41).

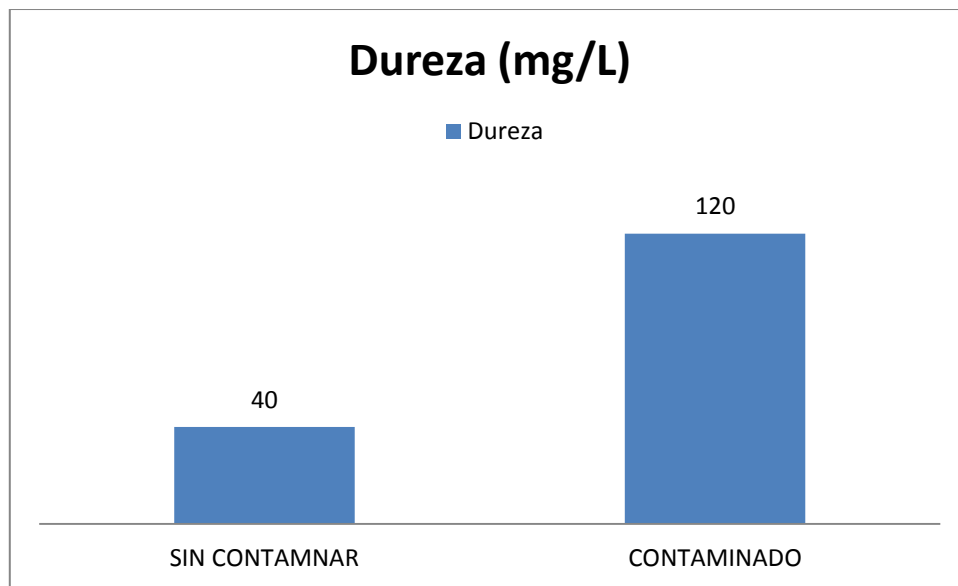


Figura 37. Dureza lodo sin contaminar vs contaminado

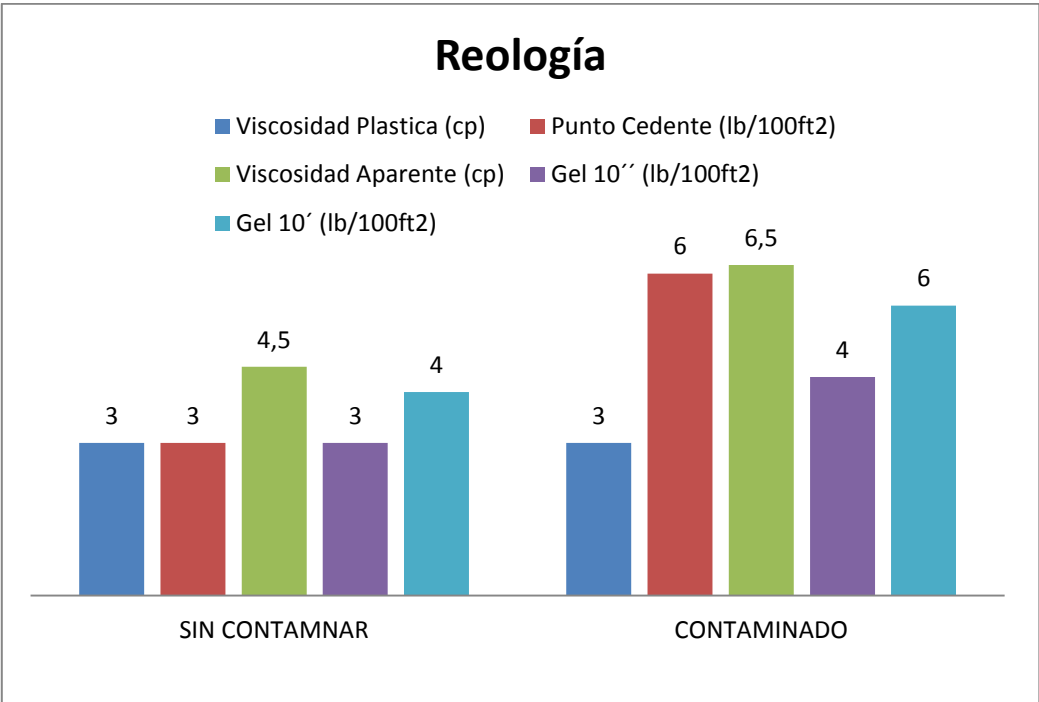


Figura 38. Reología lodo sin contaminar vs contaminado

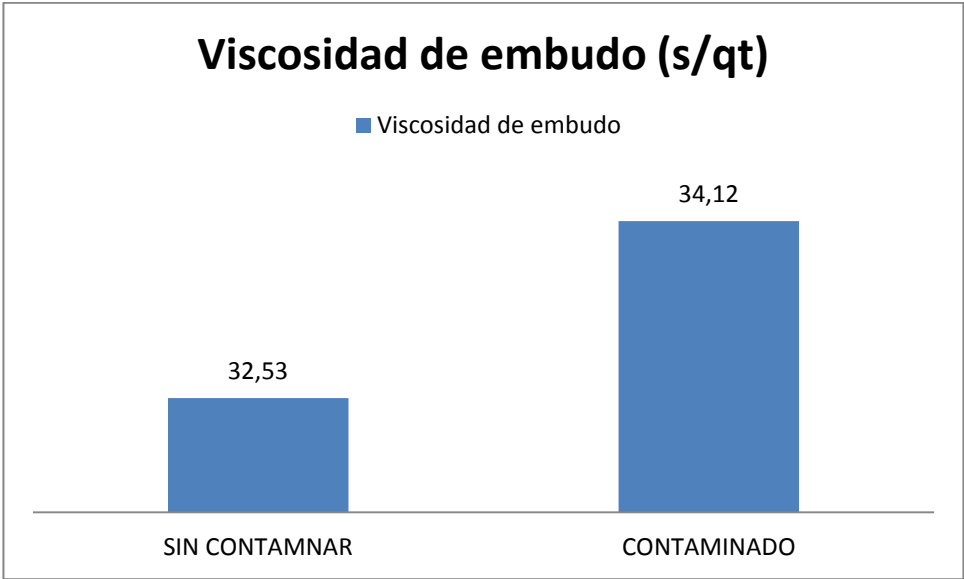


Figura 39. Viscosidad de embudo lodo sin contaminar vs lodo contaminado

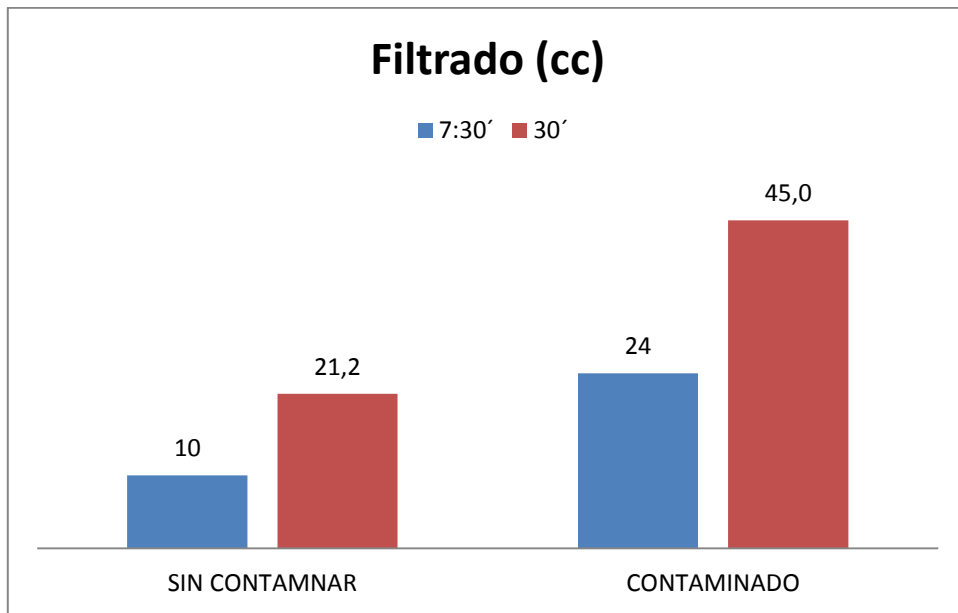


Figura 40. Filtrado lodo sin contaminar vs lodo contaminado

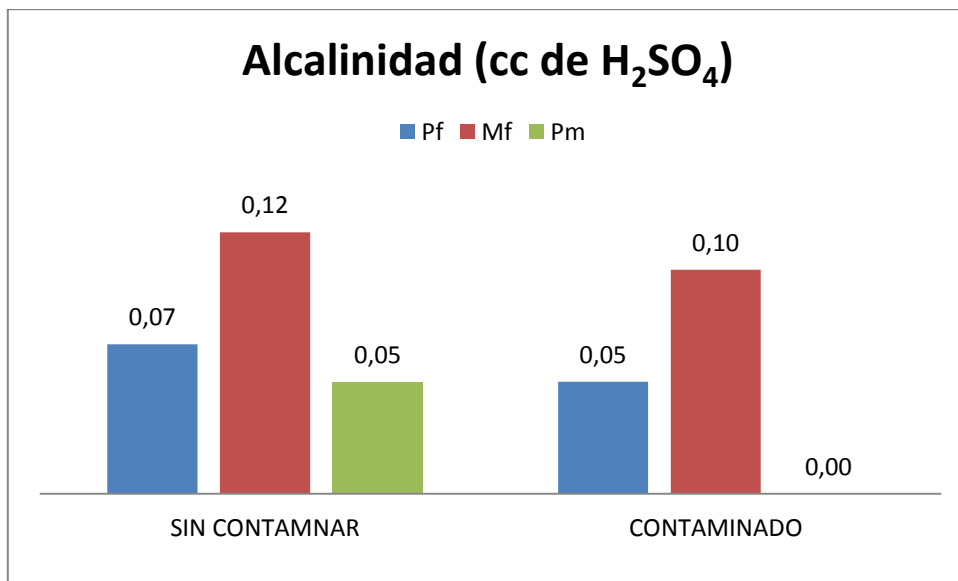


Figura 41. Alcalinidad lodo sin contaminar vs lodo contaminado

4.3 LODO TRATADO CON DEFLOCULANTE COMERCIAL: CARBONATO DE SODIO (Na₂CO₃)

En la Tabla 9 se registraron los resultados de las pruebas realizadas al fluido de perforación contaminado y tratado con carbonato de sodio como agente defloculante comercial.

Tabla 9. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 0,11 g/bbl de laboratorio de Carbonato de Sodio (Na₂CO₃)

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Embudo Marsh (s/qt)		33,08±0,01	32,77±0,01	32,98±0,01	32,94±0,01
Densidad del lodo (lpg)		8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1
Temperatura de Reología	L600	10	9	10	10
	L300	7	7	7	7
78,08 °F	L200	6	6	7	6
	L100	5	4	5	5
	L6	4	3	4	4
	L3	3	2	2	2
Resistencia gel (lb/100ft ²)	10"	4	4	3	4
	10'	6	6	5	6
Vp (cp)		3	2	3	3
Pc (lb/100 ft ²)		4	5	4	4
Va (cp)		5	4,5	5	5
Filtrado	7,5"	14	14	13,5	13,8
	30"	32,5	28,3	25	28,6
API (cc)					
Espesor del revoque (pulg)		5/64	5/64	5/64	5/64
pH		7,79	7,75	7,82	7,79
Cloruros (mg/L)		300	300	300	300
Dureza como calcio (mg/L)		80	80	80	80
Pf (cc de H ₂ SO ₄)		0,05	0,05	0,05	0,05

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Mf (cc de H ₂ SO ₄)		0,15	0,15	0,15	0,15
Pm (cc de H ₂ SO ₄)		0,05	0,05	0,05	0,05
Retorta	% v/v sólidos	3	3	2	3
	% v/v Agua	97	97	98	97
Características del revoque		Homogéneo, liso, flexible y verde opaco	Homogéneo, liso, flexible y verde opaco	Homogéneo, liso, flexible y verde opaco	

Efectivamente el carbonato de sodio restablece la mayoría de las propiedades que son afectadas por la contaminación con yeso y consecuente floculación de las arcillas, en primer lugar, la dureza (Figura 42) disminuye en comparación con el lodo contaminado, debido a que este aditivo reacciona con el calcio precipitándolo en forma de carbonato de calcio (CaCO₃) y así evitando que cause la floculación.

Así mismo se observó una disminución de las viscosidades, punto cedente (Figura 43) y el filtrado (Figura 44).

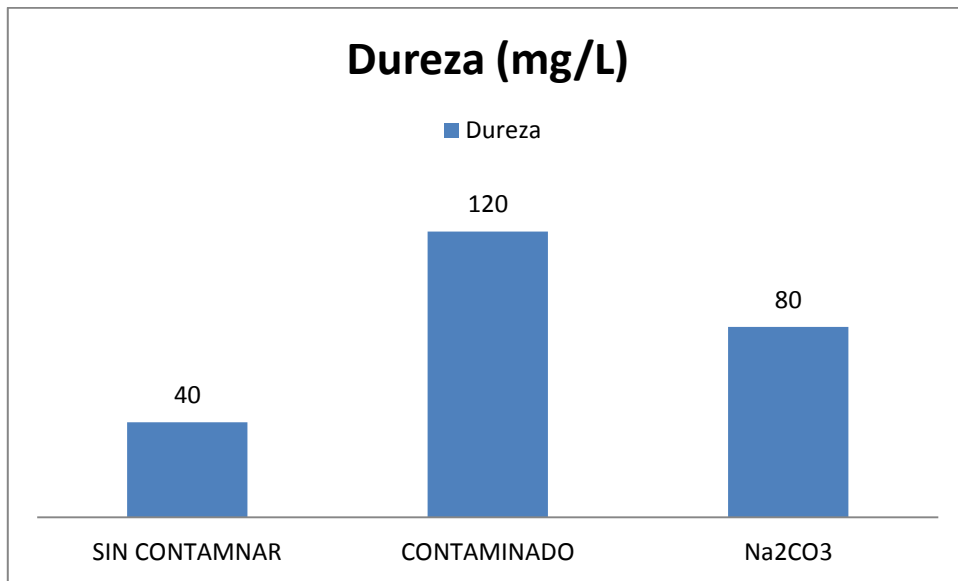


Figura 42. Dureza lodo sin contaminar, contaminado y tratado con Na_2CO_3

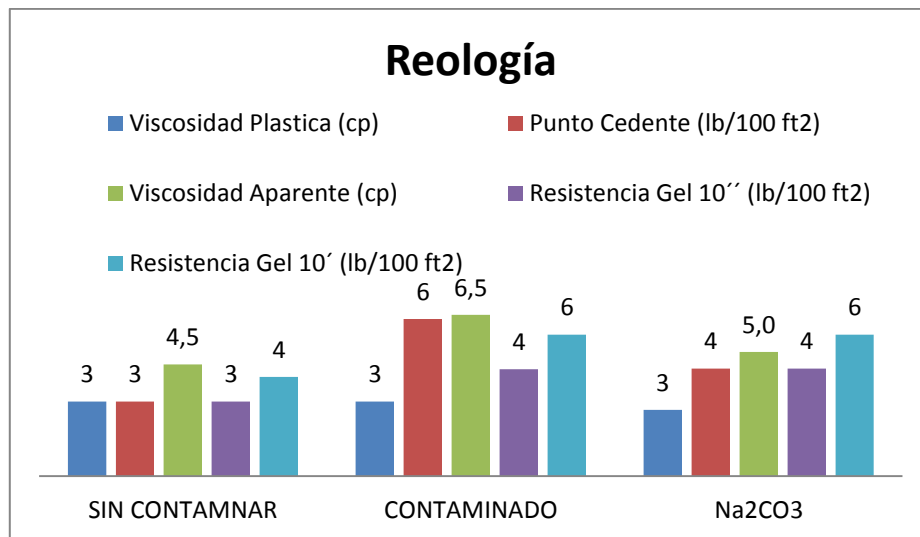


Figura 43. Reología lodo sin contaminar, contaminado y tratado con Na_2CO_3

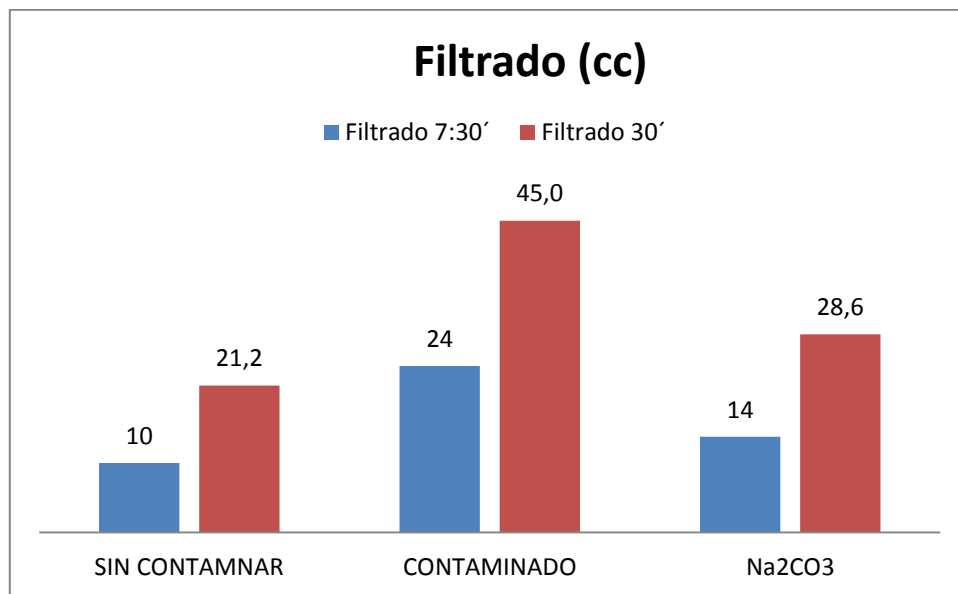


Figura 44. Filtrado lodo sin contaminar, contaminado y tratado con Na₂CO₃

4.4 LODO TRATADO CON C. CORIARIA VARIANDO GRANULOMETRIA

4.4.1 Acondicionamiento de la vaina de *Caesalpinia Coriaria*

En la Tabla 10 se observan los resultados del rendimiento de la *C. Coriaria*. La tabla fue construida registrando el peso retenido por cada tamiz utilizando la Ecuación 12.

Por ejemplo, para la muestra #1 el peso correspondiente a la cantidad de *C. Coriaria* retenida en el tamiz de 10 Mesh fue de 4,2 g y la muestra total de 10 g, se pudo determinar que el rendimiento correspondiente a partículas mayores a 0,0787 pulgadas es de 42%. El cálculo tipo se encuentra en el anexo 6.

Se repitieron los cálculos para todas las cantidades pesadas.

Tabla 10. Rendimiento de la *C. Coriaria*

Peso de la muestra: 10 g							
Mesh	Muestra #1		Muestra #2		Muestra #3		Promedio
	Peso	%Peso	Peso	%Peso	Peso	%Peso	% Peso
10	4,20	42,00	3,80	38,00	3,45	34,50	38,17
40	2,70	27,00	3,09	30,90	3,23	32,30	30,07
80	1,10	11,00	1,18	11,80	1,12	11,20	11,33
100	0,27	2,70	0,17	1,70	0,20	2,00	2,13
120	0,18	1,80	0,21	2,10	0,21	2,10	2,00
140	0,19	1,90	0,14	1,40	0,16	1,60	1,63
200	0,43	4,30	0,38	3,80	0,36	3,60	3,90
< 200	0,56	5,60	0,84	8,40	1,00	10,00	8,00

Utilizando los tamices seleccionados para realizar el análisis granulométrico, se separaron las partículas de un tamaño mayor a 0,0787 pulgadas, las cuales quedaron retenidas por encima de la malla de 10 Mesh, permaneciendo la mayoría de la corteza de la vaina así como las semillas de la *C. Coriaria* (Figura 45). En el tamiz de 40 Mesh, quedaron las partículas de tamaños comprendidos entre 0,0787 y 0,0165 pulgadas, las cuales no se utilizaron debido a que no se solubilizaron en el fluido de perforación ni se homogeneizaron con el sistema (Figura 46).



Figura 45. Sólidos retenidos en el tamiz de 10 Mesh



Figura 46. Lodo con partículas de *C. Coriaria* retenidas en el tamiz de 40 Mesh

En la Figura 47 se ilustra la distribución de tamaños de granos obtenidos a través de la trituración con un mortero, en el cual refleja que la mayor cantidad de material se obtuvo en los tamices superiores (10 y 40 Mesh), este material no fue de provecho para las pruebas a realizar. De los tamaños de granos aplicables a la investigación, se obtuvo mayor cantidad de partículas entre 0,0165 y 0,0070 pulgadas, correspondiente al residuo en el tamiz de 80 Mesh, seguido por el rango comprendido por partículas menores a 0,0029 pulgadas (<200 Mesh), con un 12% y 8% respectivamente. El resto de los tamaños seleccionados, arrojaron un porcentaje en peso menor a 5 %. Sin embargo esto es atribuido al método de molienda utilizado.

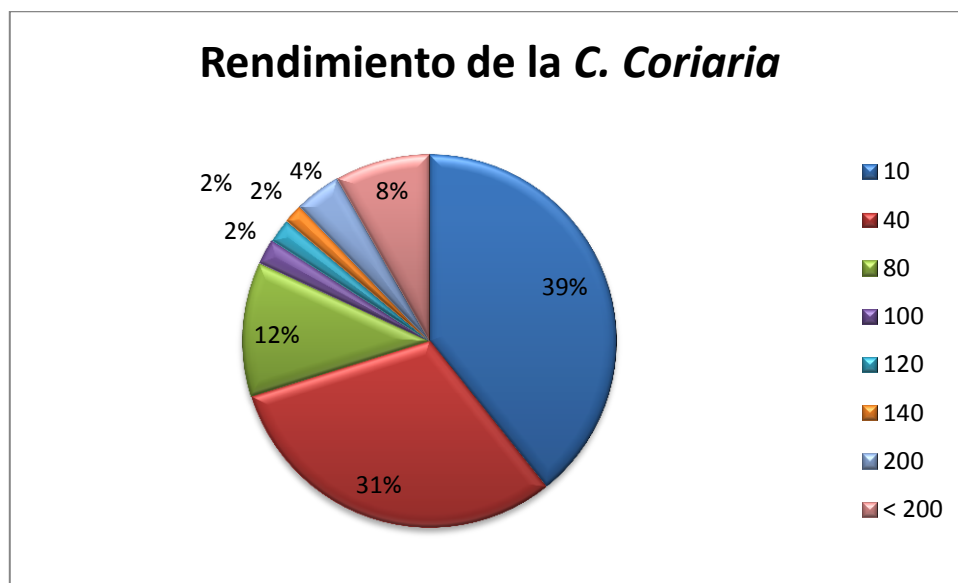


Figura 47. Rendimiento de la *C. Coriaria*

En las Tablas 11, 12, 13, 14, 15 y 16 se observan los resultados de las propiedades del fluido contaminado tratado con *C. Coriaria* como agente defloculante, variando la granulometría y manteniendo la cantidad agregada constante.

Tabla 11. Lodo Bentonítico al 5% tratado con 0,11g/bbl de *C. Coriaria* correspondiente a tamaños de grano entre 0,0165- 0,0070 pulgadas (80 Mesh)

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Embudo Marsh (s/qt)		33,00±0,01	32,42±0,01	32,70±0,01	32,71±0,01
Densidad del lodo (lpg)		8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1
Temperatura de Reología	L600	11	11	11	11
	L300	8	9	9	9
78,08 °F	L200	6	7	7	7
	L100	5	6	6	6
	L6	4	4	5	4
	L3	4	3	4	4
Resistencia gel (lb/100ft ²)	10"	4	4	4	4
	10'	5	6	5	5
Vp (cp)		3	2	2	2
Pc (lb/100 ft ²)		5	7	7	6
Va (cp)		5,5	5,5	5,5	5,5
Filtrado API (cc)	7,5"	31,5	31	30	30,8
	30"	64	63,5	61,5	63
Espesor del revoque (pulg)		1/8	5/32	1/8	1/8
pH		7,28	7,35	7,09	7,24
Cloruros (mg/L)		250	250	250	250
Dureza como calcio (mg/L)		80	80	80	80
Pf (cc de H ₂ SO ₄)		0	0,05	0,05	0,03
Mf (cc de H ₂ SO ₄)		0,1	0,15	0,1	0,12
Pm (cc de H ₂ SO ₄)		0	0	0	0,00
Retorta	% v/v sólidos	4	3	3	3

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
	% v/v Agua	96	97	97	97
Características del revoque		Homogéneo, liso, flexible y verde opaco con puntos marrones	Homogéneo, liso, flexible y verde opaco con puntos marrones	Homogéneo, liso, flexible y verde opaco con puntos marrones	

Tabla 12. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 0,11 g/bbl de *C. Coriaria* correspondiente a tamaños de grano entre 0,0070 - 0,0059 pulgadas (100 Mesh)

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Embudo Marsh (s/qt)		32,79±0,01	31,36±0,01	31,92±0,01	32,02±0,01
Densidad del lodo (lpg)		8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1
Temperatura de Reología	L600	11	11	12	11
	L300	8	8	9	8
78,08 °F	L200	7	6	7	7
	L100	6	5	6	6
	L6	4	4	5	4
	L3	3	3	4	3
Resistencia gel (lb/100ft ²)	10"	4	4	5	4
	10'	5	6	6	6
Vp (cp)		3	3	3	3
Pc (lb/100 ft ²)		5	5	6	5
Va (cp)		5,5	5,5	6	5,5
Filtrado API (cc)	7,5"	28	31	28	29
	30"	59	63	61	61
Espesor del revoque (pulg)		5/32	5/32	5/32	5/32
pH		7,34	7,2	7,23	7,26
Cloruros (mg/L)		250	250	250	250

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Dureza como calcio (mg/L)		80	80	80	80
Pf (cc de H ₂ SO ₄)		0	0	0	0,00
Mf (cc de H ₂ SO ₄)		0,05	0,05	0,05	0,05
Pm (cc de H ₂ SO ₄)		0,05	0,05	0,05	0,05
Retorta	% v/v sólidos	3	4	3	3
	% v/v Agua	97	96	97	97
Características del revoque		Homogéneo, liso, flexible y verde opaco	Homogéneo, liso, flexible y verde opaco	Homogéneo, liso, flexible y verde opaco	

Tabla 13. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 0,11g/bbl de *C. Coriaria* correspondiente a tamaños de grano entre 0,0059 - 0,0049 pulgadas (120 Mesh)

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Embudo Marsh (s/qt)		31,6±0,01	31,28±0,01	31,38±0,01	31,42±0,01
Densidad del lodo (lpg)		8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1
Temperatura de Reología	L600	11	12	12	12
	L300	9	8	9	9
78,08 °F	L200	7	7	8	7
	L100	6	6	6	6
	L6	5	4	5	5
	L3	4	3	4	4
Resistencia gel (lb/100ft ²)	10"	5	4	5	5
	10'	6	6	6	6
Vp (cp)		2	4	3	3
Pc (lb/100 ft ²)		7	4	6	6

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Va (cp)		5,5	6	6	6
Filtrado	7,5"	30	30	28,5	29,5
	30"	61	60,5	58	59,8
API (cc)					
Espesor del revoque (pulg)		1/8	1/8	1/8	1/8
pH		7,13	7,12	7,23	7,16
Cloruros (mg/L)		250	250	250	250
Dureza como calcio (mg/L)		80	80	80	80
Pf (cc de H ₂ SO ₄)		0	0	0	0,00
Mf (cc de H ₂ SO ₄)		0,05	0,05	0,05	0,05
Pm (cc de H ₂ SO ₄)		0	0	0	0,00
Retorta	% v/v sólidos	4	3	4	4
	% v/v Agua	96	97	96	96
Características del revoque		Homogéneo, liso, flexible y verde opaco	Homogéneo, liso, flexible y verde opaco	Homogéneo, liso, flexible y verde opaco	

Tabla 14. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 0,11g/bbl de *C. Coriaria* correspondiente a tamaños de grano entre 0,0049 - 0,0041 pulgadas (140 Mesh)

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Embudo Marsh (s/qt)		32,70±0,01	31,92±0,01	31,38±0,01	32,00±00,1
Densidad del lodo (lpg)		8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1
Temperatura de Reología	L600	11	12	11	11
	L300	9	8	9	9
78,08 °F	L200	7	7	7	7
	L100	6	6	6	6
	L6	4	4	5	4

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
	L3	3	3	4	3
Resistencia gel (lb/100ft ²)	10"	3	4	4	4
	10'	6	5	5	5
Vp (cp)		2	4	2	3
Pc (lb/100 ft ²)		7	4	7	6
Va (cp)		5,5	6	5,5	5,5
Filtrado	7,5"	29	30	31	30,8
API (cc)	30"	59,5	60,5	59,5	59,8
Espesor del revoque (pulg)		5/32	5/32	5/32	5/32
pH		7,52	7,08	7,46	7,35
Cloruros (mg/L)		250	250	250	250
Dureza como calcio (mg/L)		80	80	80	80
Pf (cc de H ₂ SO ₄)		0,05	0,05	0,05	0,05
Mf (cc de H ₂ SO ₄)		0,1	0,1	0,1	0,10
Pm (cc de H ₂ SO ₄)		0	0,05	0,05	0,03
Retorta	% v/v sólidos	4	3	3	3
	% v/v Agua	96	97	97	97
Características del revoque		Homogéneo, liso, flexible y verde opaco	Homogéneo, liso, flexible y verde opaco	Homogéneo, liso, flexible y verde opaco	

Tabla 15. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 0,11g/bbl de *C. Coriaria* correspondiente a tamaños de grano entre 0,0041 - 0,0029 pulgadas (200 Mesh)

Propiedades a determinar	L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Embudo Marsh (s/qt)	32,99±0,01	31,24±0,01	32,49±0,01	32,24±0,01
Densidad del lodo (lpg)	8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Temperatura de Reología	L600	13	11	12	12
	L300	11	9	10	10
78,08 °F	L200	8	7	8	8
	L100	7	6	7	7
	L6	4	4	6	5
	L3	3	4	5	4
Resistencia gel (lb/100ft ²)	10"	6	6	6	6
	10'	7	7	7	7
Vp (cp)		2	2	2	2
Pc (lb/100 ft ²)		9	7	8	8
Va (cp)		6,5	5,5	6	6
Filtrado	7,5"	28	29,5	30	29,2
API (cc)	30"	57	59	60	58,7
Espesor del revoque (pulg)		5/32	5/32	5/32	5/32
pH		7,1	7,21	7,18	7,16
Cloruros (mg/L)		250	250	250	250
Dureza como calcio (mg/L)		80	80	80	80
Pf (cc de H ₂ SO ₄)		0	0	0	0,00
Mf (cc de H ₂ SO ₄)		0,05	0,05	0,05	0,05
Pm (cc de H ₂ SO ₄)		0	0	0	0,00
Retorta	% v/v sólidos	4	3	3	3
	% v/v Agua	96	97	97	97
Características del revoque		Homogéneo, liso, flexible y verde opaco	Homogéneo, liso, flexible y verde opaco	Homogéneo, liso, flexible y verde opaco	

Tabla 16. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 0,11g/bbl de *C. Coriaria* correspondiente a tamaños de granos menores a 0,0029 pulgadas

233Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Embudo Marsh (s/qt)		32,44±0,01	31,80±0,01	33,01±0,01	32,42±0,01
Densidad del lodo (lpg)		8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1
Temperatura de Reología	L600	11	11	11	11
	L300	9	9	9	9
78,08 °F	L200	8	7	8	8
	L100	7	7	8	7
	L6	5	6	6	6
	L3	4	4	5	4
	Resistencia gel (lb/100ft ²)	10"	4	5	5
	10´	5	6	6	6
Vp (cp)		2	2	2	2
Pc (lb/100 ft ²)		7	7	7	7
Va (cp)		5,5	5,5	5,5	5,5
Filtrado	7,5"	30	30	31	30,3
	30"	69,5	61	62	64,2
API (cc)					
Espesor del revoque (pulg)		5/32	5/32	5/32	5/32
pH		7,58	7,5	7,51	7,53
Cloruros (mg/L)		300	300	300	300
Dureza como calcio (mg/L)		80	80	80	80
Pf (cc de H ₂ SO ₄)		0,05	0,05	0,05	0,05
Mf (cc de H ₂ SO ₄)		0,1	0,1	0,1	0,10
Pm (cc de H ₂ SO ₄)		0	0	0	0,00
Retorta	% v/v sólidos	4	3	4	4

233 Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
	% v/v Agua	96	97	96	96
Características del revoque		Homogéneo, liso, flexible y verde opaco	Homogéneo, liso, flexible y verde opaco	Homogéneo, liso, flexible y verde opaco	

Luego de evaluar las propiedades físicas y químicas del lodo contaminado tratado con la *C. Coriaria* variando la granulometría, se determinó que, en líneas generales, los resultados fueron similares entre sí.

Efectivamente la dureza disminuyó en comparación con los valores obtenidos para un lodo contaminado con yeso (Tabla 8), sin embargo, el valor resultante no varió entre un rango de tamaño de grano y otro, manteniéndose en 80mg/l luego de realizar el tratamiento con todas las muestras de *C. Coriaria*.

Así mismo, observando la reología (Figura 48), se pudo evidenciar que las muestras correspondientes a tamaños menores a 0,0041 pulgadas generaron valores más altos de punto cedente y fuerza de gel comparados con lo obtenido para un fluido contaminado con yeso. Por otro lado, las muestras referidas a 80, 100, 120 y 140 Mesh redujeron los parámetros reológicos de forma similar entre sí, comparado con los obtenidos para un fluido bentonítico base agua al 5% contaminado con yeso, presentando valores bajos de viscosidad plástica aunado a un alto punto cedente, lo que garantiza una limpieza efectiva del hoyo con alta tasa de penetración; además, generaron bajos esfuerzos de gel, lo cual es ideal para permitir el asentamiento de los sólidos en los tanques

superficiales, así como un buen rendimiento de las bombas y una adecuada velocidad de circulación.

Considerando que, a medida que las partículas son más pequeñas, mayor es su área de contacto con el medio, comparando con la misma cantidad de materia que contenga partículas más grandes, y en consecuencia la velocidad de reacción es mayor; por este motivo se seleccionó el rango correspondiente a 140 Mesh, que contiene partículas entre 0,0049 y 0,0041 pulgadas.

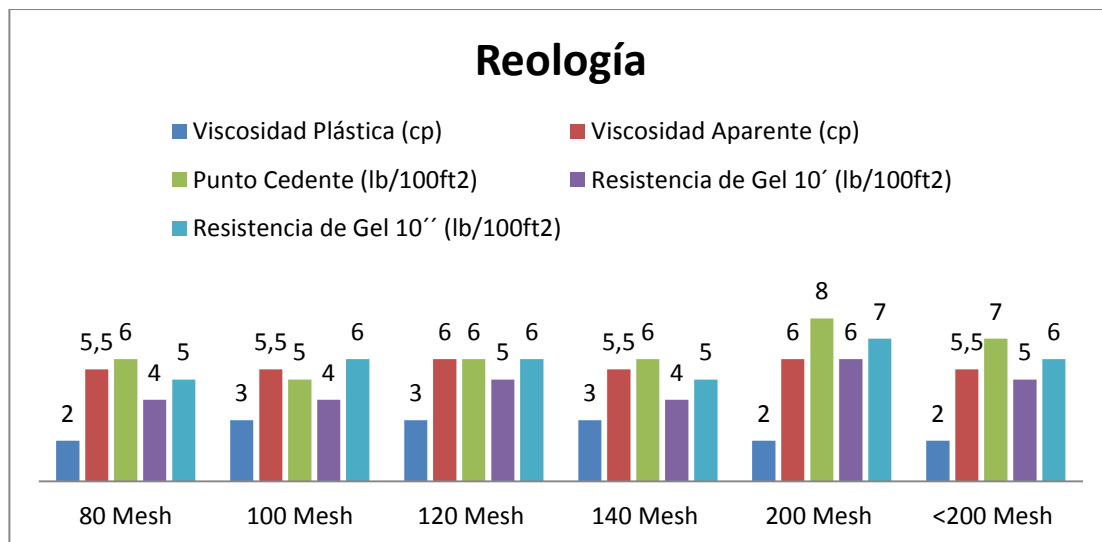


Figura 48. Reología variando granulometría *C. Coriaria*

4.5 LODO TRATADO CON *C. CORIARIA* VARIANDO CONCENTRACIÓN

En las tablas 17, 18, 19, 20 y 21 se evidencian los resultados del estudio de sensibilidad variando la cantidad de *C. Coriaria* añadida.

Tabla 17. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 0,05 g/bbl de laboratorio de *C. Coriaria* entre 0,0049 – 0,0041 pulgadas (140 Mesh)

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Embudo Marsh (s/qt)		31,69±0,01	31,19 ±0,01	31,20±0,01	31,36±0,01
Densidad del lodo (lpg)		8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1
Temperatura de Reología	L600	12	11	12	12
	L300	9	8	8	8
78,08 °F	L200	8	7	7	7
	L100	7	6	6	6
	L6	5	5	5	5
	L3	4	3	4	4
Resistencia gel (lb/100ft ²)	10"	5	5	4	5
	10'	6	6	5	6
Vp (cp)		3	3	4	3
Pc (lb/100 ft ²)		6	5	4	5
Va (cp)		6	5,5	6	6
Filtrado	7,5"	27	26,5	27,5	27
API (cc)	30"	56	55	56	58,5
Espesor del revoque (pulg)		1/8	1/8	1/8	1/8
pH		7,4	7,48	7,5	7,46
Cloruros (mg/L)		250	250	250	250
Dureza como calcio (mg/L)		100	100	100	100
Pf (cc de H ₂ SO ₄)		0	0	0	0
Mf (cc de H ₂ SO ₄)		0,05	0,05	0,05	0,05
Pm (cc de H ₂ SO ₄)		0	0	0	0
Retorta	% v/v sólidos	3	2	3	3
	% v/v Agua	97	98	97	97

Propiedades a determinar	L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Características del revoque	Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	

Tabla 18. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 0,06 g/bbl de *C. Coriaria* entre 0,0049 – 0,0041 pulgadas (140 Mesh)

Propiedades a determinar	L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Embudo Marsh (s/qt)	32,8±0,01	30,65±0,01	31,23±0,01	31,56±0,01
Densidad del lodo (lpg)	8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1
Temperatura de Reología	L600	12	11	11
	L300	10	8	9
78,08 °F	L200	8	6	7
	L100	7	5	6
	L6	5	4	5
	L3	4	3	4
Resistencia gel (lb/100ft ²)	10"	5	4	5
	10'	6	5	6
Vp (cp)	2	3	2	2
Pc (lb/100 ft ²)	8	5	7	7
Va (cp)	6	5,5	5,5	5,5
Filtrado API (cc)	7,5"	29	32	30
	30"	58,5	60	59,5
Espesor del revoque (pulg)	13/64	13/64	13/64	13/64
pH	7,36	7,23	7,48	7,36
Cloruros (mg/L)	250	250	250	250
Dureza como calcio (mg/L)	80	80	80	80
Pf (cc de H ₂ SO ₄)	0	0	0	0,00
Mf (cc de H ₂ SO ₄)	0,05	0,05	0,05	0,05
Pm (cc de H ₂ SO ₄)	0	0	0	0,00

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Retorta	% v/v sólidos	3	4	3	3
	% v/v Agua	97	96	97	97
Características del revoque		Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	

Tabla 19. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 0,07 g/bbl de *C. Coriaria* entre 0,0049 – 0,0041 pulgadas (140 Mesh)

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Embudo Marsh (s/qt)		31,86±0,01	31,47±0,01	31,46±0,01	31,60±0,01
Densidad del lodo (lpg)		8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1
Temperatura de Reología	L600	10	10	10	10
	L300	8	8	8	8
78,08 °F	L200	7	7	7	7
	L100	5	6	5	5
	L6	4	5	4	4
	L3	3	4	3	3
Resistencia gel (lb/100ft ²)	10"	4	5	5	5
	10'	5	6	6	6
Vp (cp)		2	2	2	2
Pc (lb/100 ft ²)		6	6	6	6
Va (cp)		5	5	5	5,0
Filtrado	7,5"	31	29	31	30,3
	30"	63	60	62	61,7
API (cc)					
Espesor del revoque (pulg)		13/64	13/64	13/64	13/64
pH		7,3	7,37	7,12	7,26
Cloruros (mg/L)		250	250	250	250
Dureza como calcio		80	80	80	80

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
(mg/L)					
Pf (cc de H ₂ SO ₄)		0	0	0	0,00
Mf (cc de H ₂ SO ₄)		0,5	0,5	0,5	0,50
Pm (cc de H ₂ SO ₄)		0	0	0	0,00
Retorta	% v/v sólidos	4	3	4	4
	% v/v Agua	96	97	96	96
Características del revoque		Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	

Tabla 20. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 0,08 g/bbl de *C. Coriaria* entre 0,0049 – 0,0041 pulgadas (140 Mesh)

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Embudo Marsh (s/qt)		32,19±0,01	31,07±0,01	31,69±0,01	31,65±0,01
Densidad del lodo (lpg)		8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1
Temperatura de Reología	L600	11	11	10	11
	L300	9	9	8	9
78,08 °F	L200	7	7	6	7
	L100	6	6	5	6
	L6	5	5	4	5
	L3	4	4	3	4
Resistencia gel (lb/100ft ²)	10"	5	4	5	5
	10'	6	5	6	6
Vp (cp)		2	2	2	2
Pc (lb/100 ft ²)		7	7	6	7
Va (cp)		5,5	5,5	5	5,5
Filtrado	7,5"	28,5	30	28,5	29

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
API (cc)	30"	58,5	61	59	59,5
Espesor del revoque (pulg)		1/8	1/8	1/8	1/8
pH		7,24	7,17	7,25	7,22
Cloruros (mg/L)		250	250	250	250
Dureza como calcio (mg/L)		80	80	80	80
Pf (cc de H ₂ SO ₄)		0	0	0	0,00
Mf (cc de H ₂ SO ₄)		0,05	0,05	0,05	0,05
Pm (cc de H ₂ SO ₄)		0	0	0	0,00
Retorta	% v/v sólidos	3	3	3	3
	% v/v Agua	97	97	97	97
Características del revoque		Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	

Tabla 21. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 0,13 g/bbl de *C. Coriaria* entre 0,0049 – 0,0041 pulgadas (140 Mesh)

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Embudo Marsh (s/qt)		33,27±0,01	33,06±0,01	33,96±0,01	33,43±0,01
Densidad del lodo (lpg)		8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1
Temperatura de Reología	L600	12	13	12	12
	L300	10	11	10	10
78,08 °F	L200	8	8	8	8
	L100	6	7	7	7
	L6	4	5	5	5

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
	L3	3	4	4	4
Resistencia gel (lb/100ft ²)	10"	4	5	5	5
	10´	5	6	5	5
Vp (cp)		2	2	2	2
Pc (lb/100 ft ²)		8	9	8	8
Va (cp)		6	6,5	6	6
Filtrado	7,5"	29,5	28,5	28,5	28,67
API (cc)	30"	60	58	58	58,5
Espesor del revoque (pulg)		13/64	13/64	13/64	13/64
pH		6,91	7,16	7,21	7,09
Cloruros (mg/L)		250	250	250	250
Dureza como calcio (mg/L)		80	80	80	80
Pf (cc de H ₂ SO ₄)		0	0	0	0,00
Mf (cc de H ₂ SO ₄)		0,5	0,5	0,5	0,50
Pm (cc de H ₂ SO ₄)		0	0	0	0,00
Retorta	% v/v sólidos	4	3	4	4
	% v/v Agua	96	97	96	96
Características del revoque/-99		Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	

Se realizaron pruebas añadiendo cinco cantidades diferentes de *C. Coriaria* con partículas comprendidas entre 0,0049 - 0,0041 pulgadas, dichas cantidades fueron de 0,05, 0,06, 0,07, 0,08 y 0,13 g/bbl de lodo preparado en el laboratorio.

Inicialmente, evaluando la capacidad de la *C. Coriaria* de inhibir la acción del calcio se determinó que, al añadir 0,05 g por bbl de lodo contaminado, la cantidad de iones de calcio disueltos no disminuyó hasta el valor de 80 mg/l como sucedió con el resto de las cantidades (Figura 49). Por tal razón, este valor se definió como un límite inferior, es decir, añadir 0,05 g/bbl o menos será insuficiente para alcanzar los valores de dureza deseados.

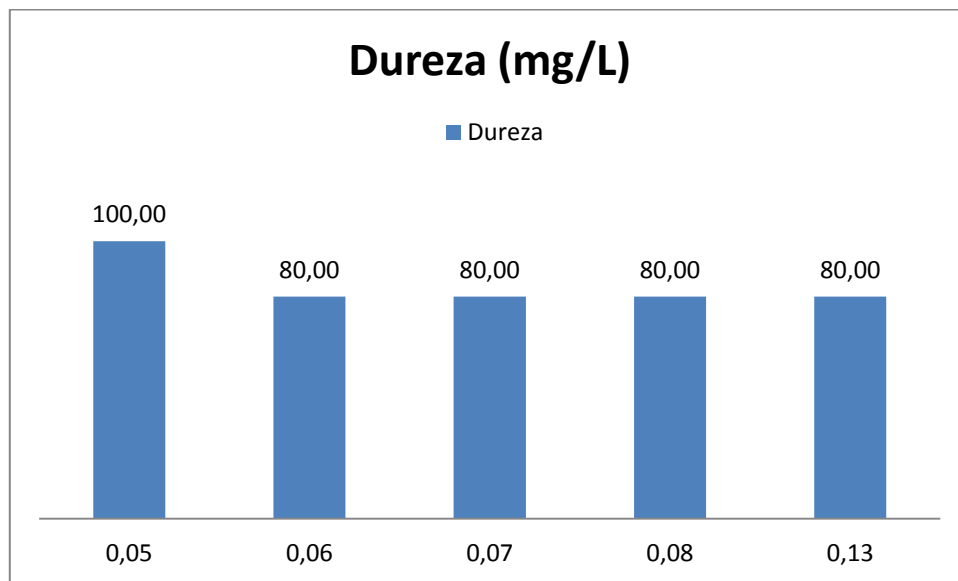


Figura 49. Dureza variando la concentración.

Por otro lado, la viscosidad de embudo fue en incremento a medida que aumentó la cantidad de *C. Coriaria* añadida, como se muestra en la Figura 50. Sin embargo, añadiendo una cantidad de 0,13 g/bbl, la viscosidad de embudo resultó ser elevada, similar al valor que generó el lodo contaminado, por lo cual se definió como límite superior.

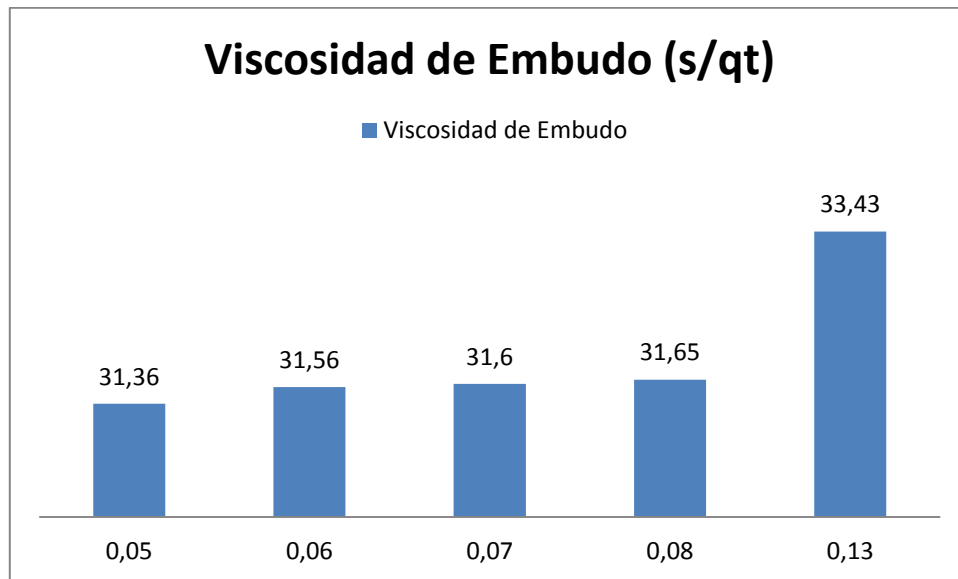


Figura 50. Viscosidad de embudo variando la concentración

Observando la reología (Figura 51) se pudo discrepar en el comportamiento asociado a cada concentración, resultando más favorable y similar a los valores de referencia (Tabla 6) añadir 0,07 gr/bbl de *C. Coriaria* en el tratamiento de un fluido bentonítico al 5 % contaminado con yeso.

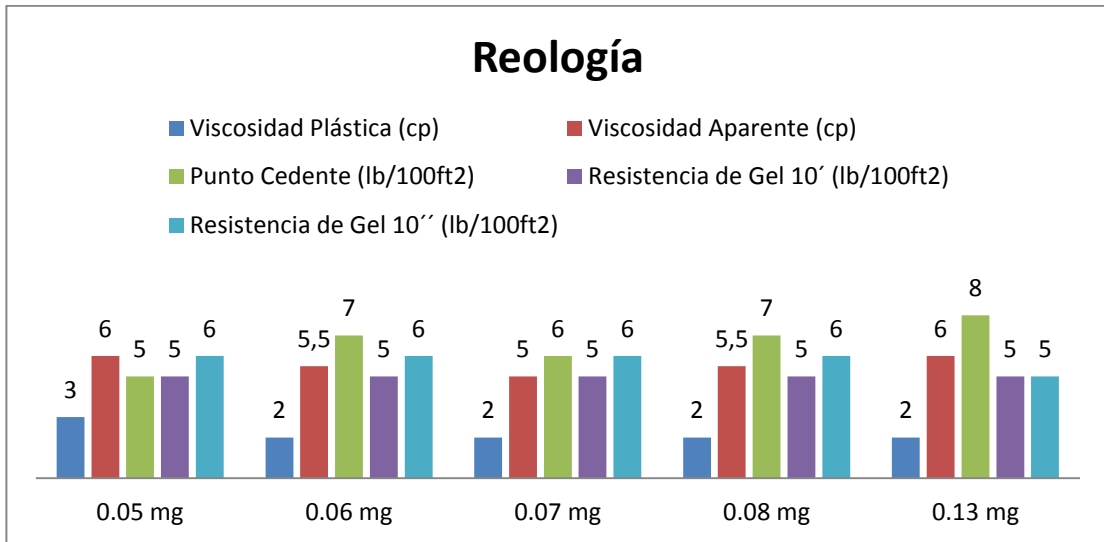


Figura 51. Reología variando concentración

Cumpliendo con los objetivos de la investigación, se realizó la comparación de la efectividad de la *C. Coriaria* como agente defloculante con el desempeño del defloculante de uso comercial (Na_2CO_3), observándose que ambos productos redujeron el exceso de calcio hasta alcanzar un valor de dureza de 80 mg/l. Así mismo, en la Figura 52 se observa el comportamiento reológico en ambos casos y es evidente que los resultados son similares y que, independientemente, Ambos aditivos alcanzan el objetivo planteado. Por otro lado, una desventaja en la utilización de la *C. Coriaria* es que no controló la pérdida de filtrado y generó un revoque más grueso, en contraste con el Na_2CO_3 .

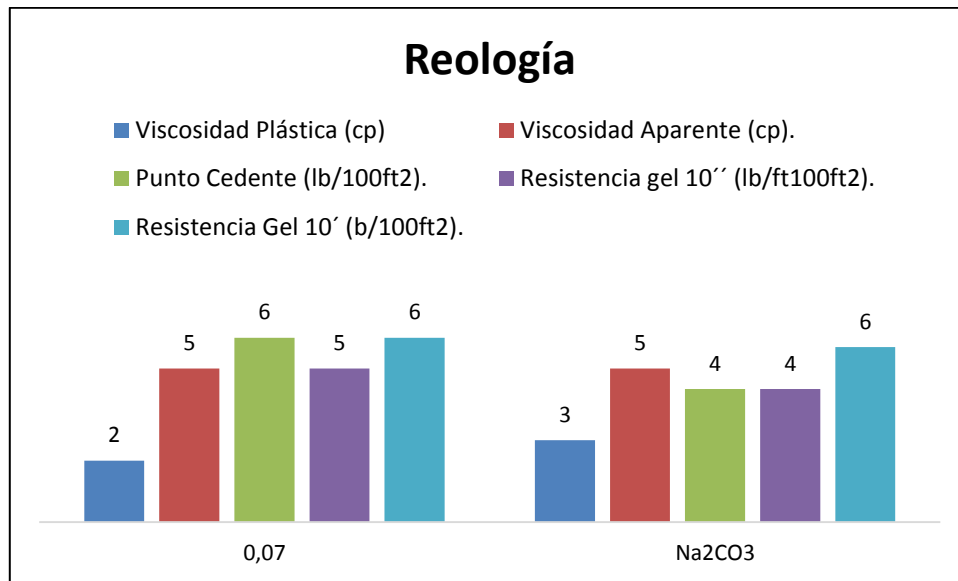


Figura 52. Reología lodo tratado con 0,07 g/bbl de *C. Coriaria* vs Lodo tratado con Na₂CO₃

4.5.1 Lodo tratado con *C. Coriaria* Rolado 150 °F

En la Tabla 22 se muestran los resultados del lodo tratado con *C. Coriaria*, sometido a efecto de la presión y temperatura.

Tabla 22. Lodo Bentonítico al 5% tratado con 0,07 g/bbl de *C. Coriaria* entre 0,0049 – 0,0041 pulgadas (140 Mesh). Rolado 150 °F

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Embudo Marsh (s/qt)		33,78±0,01	33,06±0,01	33,08±0,01	33,43±0,01
Densidad del lodo (lpg)		8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1
Temperatura de Reología	L600	11	10	10	10
	L300	8	7	7	7
78,08 °F	L200	7	6	6	6
	L100	6	5	5	5
	L6	5	4	4	4
	L3	4	3	3	3
Resistencia	10"	4	4	4	4

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
gel (lb/100ft ²)	10'	5	5	5	5
Vp (cp)		3	3	3	3
Pc (lb/100 ft ²)		3	4	4	4
Va (cp)		5,5	5	5	5
Filtrado	7,5"	33,5	33,5	35	30,8
API (cc)	30"	67,5	68,5	70	68,7
Espesor del revoque (pulg)		1/8	1/8	1/8	1/8
pH		7,3	7,34	7,18	7,27
Cloruros (mg/L)		200	200	200	200
Dureza como calcio (mg/L)		80	80	80	80
Pf (cc de H ₂ SO ₄)		0	0	0	0,00
Mf (cc de H ₂ SO ₄)		0,05	0,05	0,05	0,05
Pm (cc de H ₂ SO ₄)		0	0	0	0,00
Retorta	% v/v sólidos	4	3	4	4
	% v/v Agua	96	97	96	96
Características del revoque		Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	

Luego del proceso de rolado, el fluido tratado con *C. Coriaria* mantuvo los valores de viscosidad bajos, como se ilustra en la Figura 53 con el comportamiento reológico y en la Figura 54 con la viscosidad de embudo, en ambos casos comparando con el mismo lodo, ya tratado, antes de someterlo a presión y temperatura, y en contraste con los parámetros de referencia. Es evidente que, a pesar de las condiciones, la *C. Coriaria*

controló de forma eficiente las viscosidades y demás propiedades reológicas, es decir, la acción de esta como agente defloculante no se vio afectada o degradada por efectos de la temperatura a la cual fue sometido.

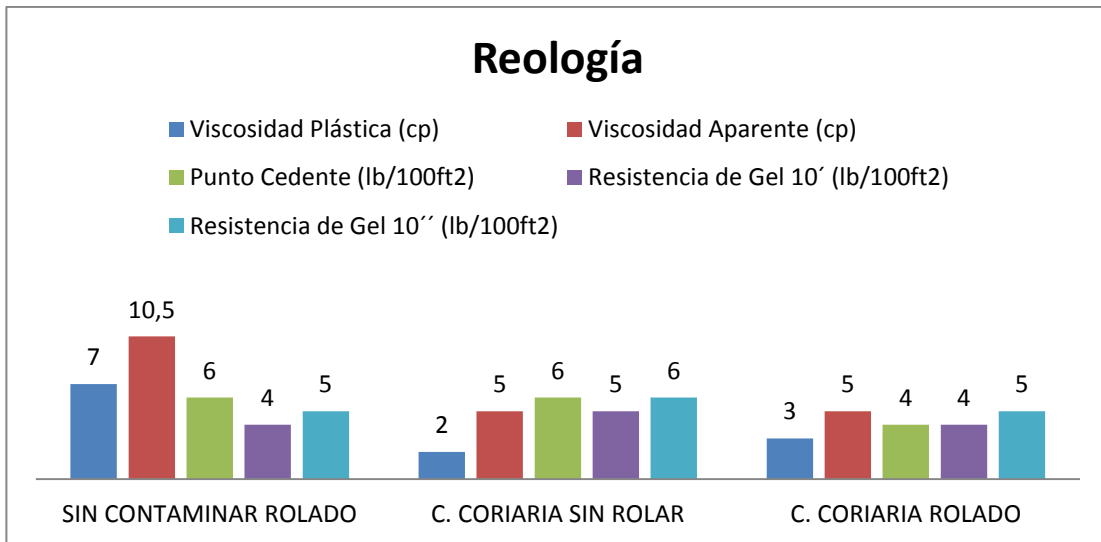


Figura 53. Reología lodo tratado con *C. Coriaria* Rolado

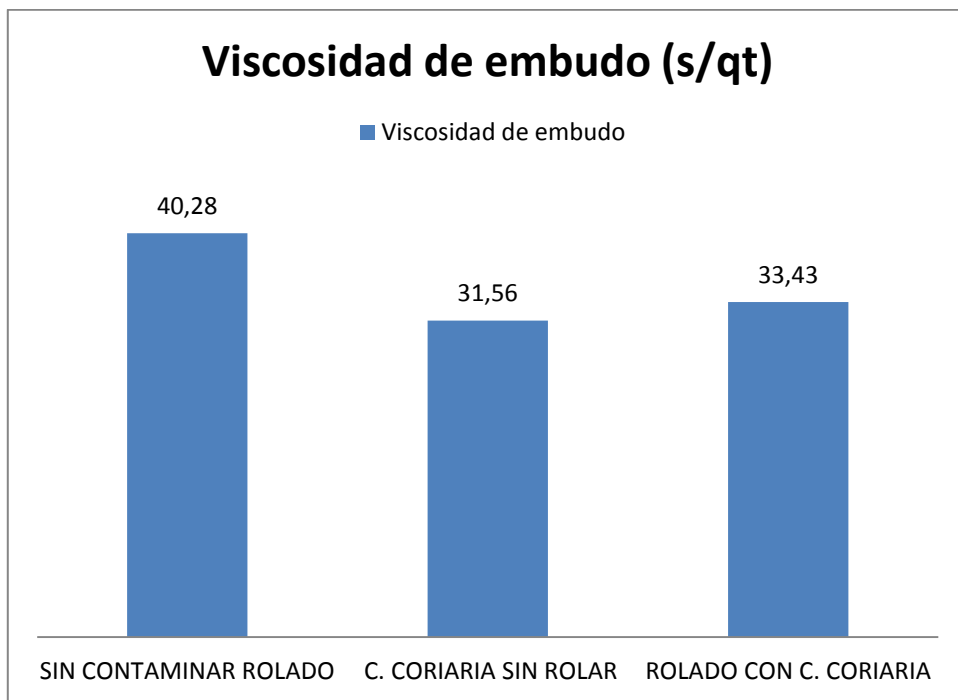


Figura 54. Viscosidad de embudo lodo tratado con *C. Coriaria* Rolado

4.6 LODO TRATADO CON *C. CORIARIA* EN SOLUCIÓN

De acuerdo a la metodología planteada en el Capítulo III, del presente trabajo de investigación, se pesó 100 ml de solución de *C. Coriaria* obteniéndose una masa de 100,4 g. Conocida la masa y el volumen de la solución se pudo determinar la densidad de la misma, dando como resultado 8,34 lpg. Ver anexo 7.

Como la solución de *C. Coriaria* es un fluido, se determinó la densidad de la misma mediante el uso de la balanza de lodo, obteniéndose como resultado 8,30 lpg aproximadamente, dicho valor corrobora el resultado anterior y además demuestra que la densidad de la solución es aproximadamente igual a la densidad del agua, razón por la cual no influyó en la densidad final del fluido de perforación una vez tratado.

En las tablas 23, 24 y 25 se evidencian los resultados del estudio de sensibilidad variando la cantidad de solución de *C. Coriaria* añadida.

Tabla 23. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 1,67 ml/bbl de Solución de *C. Coriaria*

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Embudo Marsh (s/qt)		33,31±0,01	32,97±0,01	32,48±0,01	33,43±0,01
Densidad del lodo (lpg)		8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1
Temperatura de Reología	L600	12	13	13	13
	L300	8	9	9	9
78,08 °F	L200	7	8	8	8
	L100	6	6	7	6
	L6	4	5	5	5
	L3	3	4	4	4
Resistencia gel (lb/100ft ²)	10"	4	4	4	4
	10'	5	5	5	5
Vp (cp)		4	4	4	4
Pc (lb/100 ft ²)		4	5	5	5
Va (cp)		6	6,5	6,5	6,5
Filtrado	7,5"	29	29	28,5	28,8
	30"	60	58,5	57	58,5
API (cc)					
Espesor del revoque (pulg)		1/8	1/8	1/8	1/8
pH		7,47	7,36	7,42	7,42
Cloruros (mg/L)		250	250	250	250
Dureza como calcio (mg/L)		120	120	120	120
Pf (cc de H ₂ SO ₄)		0	0	0	0,00
Mf (cc de H ₂ SO ₄)		0,05	0,05	0,05	0,05
Pm (cc de H ₂ SO ₄)		0	0	0	0,00
Retorta	% v/v sólidos	2	3	2	2
	% v/v Agua	98	97	98	98

Propiedades a determinar	L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Características del revoque	Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	

Tabla 24. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 3,33 ml/bbl de Solución de *C. Coriaria*

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Embudo Marsh (s/qt)		31,93±0,01	32,30±0,01	31,76±0,01	32,00±0,01
Densidad del lodo (lpg)		8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1
Temperatura de Reología	L600	13	13	12	13
	L300	10	10	9	10
78,08 °F	L200	8	8	9	8
	L100	7	7	7	7
	L6	5	6	6	6
	L3	4	5	5	5
Resistencia gel (lb/100ft ²)	10"	5	5	5	5
	10'	6	6	6	6
Vp (cp)		3	3	3	3
Pc (lb/100 ft ²)		7	7	6	7
Va (cp)		6,5	6,5	6	6,5
Filtrado API (cc)	7,5"	29	28,5	29,5	29
	30"	59	58,5	59,5	59
Espesor del revoque (pulg)		13/64	13/64	13/64	13/64
pH		6,94	7,02	6,97	6,98
Cloruros (mg/L)		300	300	300	300
Dureza como calcio (mg/L)		80	80	80	80
Pf (cc de H ₂ SO ₄)		0	0	0	0,00
Mf (cc de H ₂ SO ₄)		0,05	0,05	0,05	0,05

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Pm (cc de H ₂ SO ₄)		0	0	0	0,00
Retorta	% v/v sólidos	3	3	3	3
	% v/v Agua	97	97	97	97
Características del revoque		Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	

Tabla 25. Lodo Bentonítico al 5 % tratado con 5 ml/bbl de Solución de *C. Coriaria*

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Embudo Marsh (s/qt)		31,63±0,01	32,51±0,01	31,33±0,01	31,82±0,01
Densidad del lodo (lpg)		8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1
Temperatura de Reología	L600	13	12	13	13
	L300	10	10	10	10
78,08 °F	L200	9	8	9	9
	L100	7	6	7	7
	L6	5	5	5	5
	L3	4	4	4	4
Resistencia gel (lb/100ft ²)	10"	5	4	4	4
	10´	6	5	5	5
Vp (cp)		3	2	3	3
Pc (lb/100 ft ²)		7	8	7	7
Va (cp)		6,5	6	6,5	6,5
Filtrado	7,5"	30	28,5	28,5	29
API (cc)	30"	62,5	58	57,5	59,3

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Espesor del revoque (pulg)		13/64	13/64	13/64	13/64
pH		6,92	7,11	7,1	7,04
Cloruros (mg/L)		300	300	300	300
Dureza como calcio (mg/L)		80	80	80	80
Pf (cc de H ₂ SO ₄)		0	0	0	0,00
Mf (cc de H ₂ SO ₄)		0,05	0,05	0,05	0,05
Pm (cc de H ₂ SO ₄)		0	0	0	0,00
Retorta	% v/v sólidos	3	4	3	3
	% v/v Agua	97	96	97	97
Características del revoque		Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	

En la Figura 55 se evidencia que el lodo tratado con 1,67 ml/bbl de solución de *C. Coriaria* no actúa con la misma eficacia que las otras dos cantidades añadidas, debido a que la dureza no se alcanza los niveles deseados.

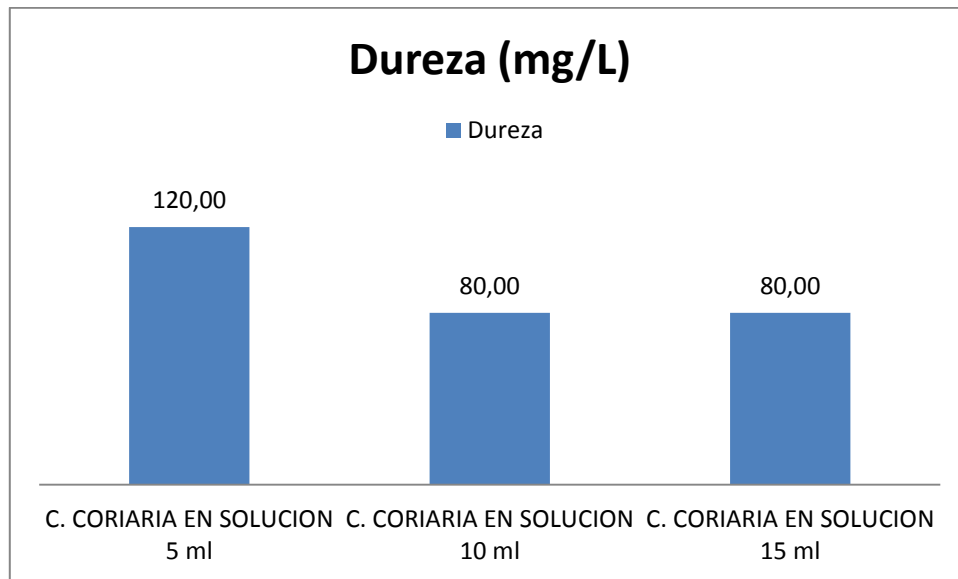


Figura 55. Dureza lodos tratados con *C. Coriaria* en solución

En la Figura 56 se compararon las propiedades reológicas asociadas a las variaciones de volumen añadido para evaluar la efectividad de la solución como agente defloculante. En ningún caso se logró disminuir los valores de viscosidad por debajo a los obtenidos del fluido contaminado con yeso (Tabla 8), no obstante, se seleccionó la muestra con 3,33 ml/bbl, como aquella que proporcionó mejores resultados para ser comparados con los valores correspondientes a la muestra con la *C. Coriaria* pulverizada.

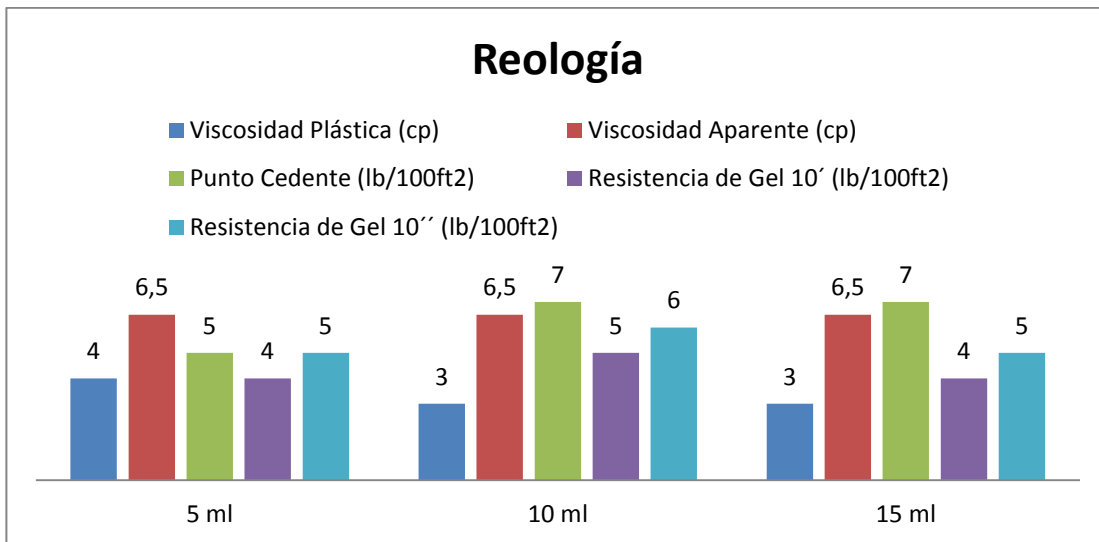


Figura 56. Reología Lodo tratado con *C. Coriaria* en solución

Comparando la efectividad como agente defloculante de la *C. Coriaria* en solución y pulverizada, se evaluaron los parámetros relevantes relacionados con la defloculación de las arcillas. Se demostró que no existe diferencia en cuanto la dureza obtenida en cada caso, debido a que con ambas se obtuvo un resultado de 80 mg/l, por lo tanto no es un factor determinante en la selección de la presentación de la *C. Coriaria* para ser utilizada en el tratamiento de la contaminación con calcio. Sin embargo, en la Figura 57 se muestra el comportamiento reológico en ambos casos, evidenciándose que se obtienen mejores resultados añadiendo la *C. Coriaria* pulverizada que preparando la solución. Aunado a esto, el proceso de obtención de la solución es más laborioso que la obtención de la semilla pulverizada. Como ventaja adicional se tiene que la semilla pulverizada envasada se preserva en el tiempo, mientras que la solución, mantenida a una temperatura aproximada de 24 °C, se descompuso a los pocos días, formándose hongos en la superficie, lo que no da garantía de la eficiencia de la solución con el paso del tiempo.

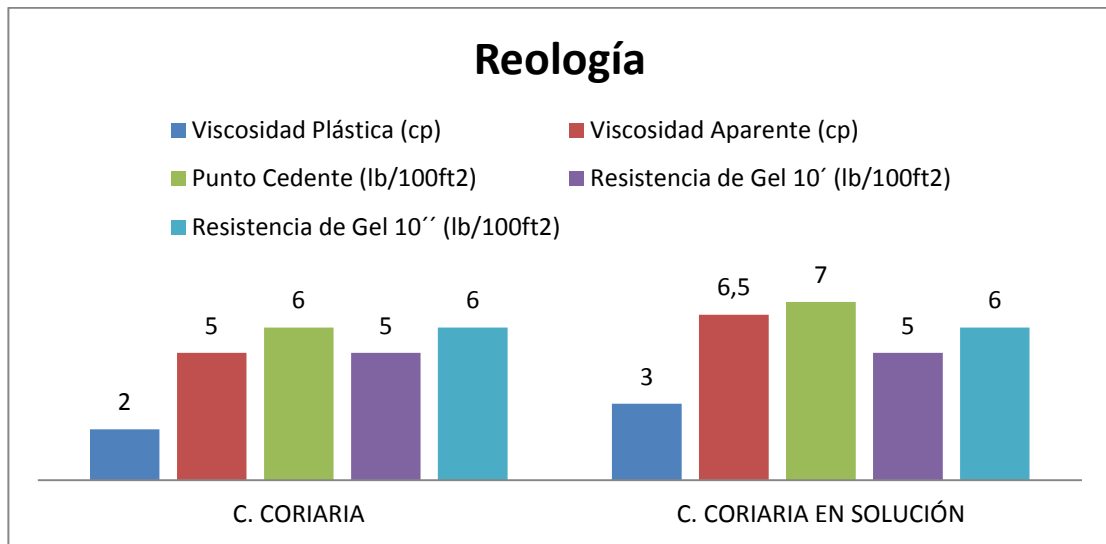


Figura 57. Reología de lodo tratado con *C. Coriaria* pulverizada vs *C. Coriaria* en solución

4.6.1 Lodo tratado con *C. Coriaria* en solución Rolado 150 °F

En la Tabla 26 se muestran los resultados del lodo tratado con 10 ml de solución de *C. Coriaria*, sometido a efecto de la presión y temperatura. A pesar de que se determinó que el tratamiento con *C. Coriaria* en solución no resultó ser más efectivo que añadir la semilla pulverizada, se realizaron las pruebas de rolado para verificar la efectividad de la solución.

Tabla 26. Lodo Bentonítico al 5% tratado con 3,33ml/bbl de *C. Coriaria* Rolado 150 °F

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
Embudo Marsh (s/qt)		32,13±0,01	32,55±0,01	33,96±0,01	33,43±0,01
Densidad del lodo (lpg)		8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1	8,6±0,1
Temperatura de Reología	L600	11	11	10	11
	L300	8	7	7	7
	L200	6	6	6	6
	L100	5	5	4	5

Propiedades a determinar		L-1(5%)	L-2(5%)	L-3(5%)	Promedio
78,08 °F	L6	4	4	3	4
	L3	3	3	2	3
Resistencia gel (lb/100ft ²)	10"	3	5	4	4
	10´	4	6	5	5
Vp (cp)		3	4	3	3
Pc (lb/100 ft ²)		5	3	4	4
Va (cp)		5,5	5,5	5	5,5
Filtrado	7,5"	34	34	33	33,7
API (cc)	30"	67	69	67	67,7
Espesor del revoque (pulg)		1/8	1/8	1/8	1/8
pH		7,01	7,08	7,21	7,10
Cloruros (mg/L)		250	250	250	250
Dureza como calcio (mg/L)		80	80	80	80
Pf (cc de H ₂ SO ₄)		0	0	0	0,00
Mf (cc de H ₂ SO ₄)		0,05	0,05	0,05	0,05
Pm (cc de H ₂ SO ₄)		0	0	0	0,00
Retorta	% v/v sólidos	3	4	3	3
	% v/v Agua	97	96	97	97
Características del revoque		Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	Homogéneo, liso, flexible y verde oscuro	

En la Figura 58 se ilustra los resultados de los valores obtenidos para las propiedades reológicas luego del proceso de rolado y, comparándolos con el lodo tratado con *C. Coriaria* en polvo, estos se mantuvieron similares aunque no lograron ser mejores, por tal razón se ratifica que la

C. Coriaria pulverizada obtiene mejores resultados en el tratamiento de lodos contaminados con yeso.

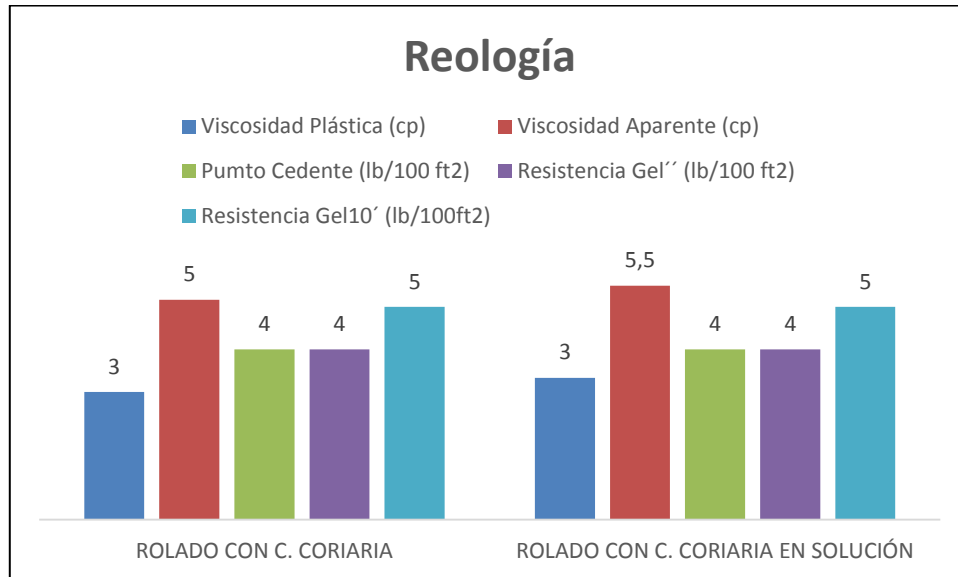


Figura 58. Reología lodo rolado con *C. Coriaria* pulverizada vs Rolado con *C. Coriaria* en solución

CONCLUSIONES

- a) La adición de la *C. Coriaria* controla efectivamente el excedente de iones calcio ocasionada por la contaminación con yeso del lodo contaminado disminuyendo la dureza de 120 mg/l a 80 mg/l en todos los casos estudiados y causando mejorías en las propiedades reológicas del mismo.
- b) En contraste con los valores referenciales, obtenidos a partir de los ensayos físico-químicos al fluido sin contaminar, la dureza no disminuyó a 40 mg/l, sin embargo, el tratamiento fue efectivo reduciendo las viscosidades y punto cedente hasta valores cercanos a estos y además funcionales para el desempeño del fluido de perforación.
- c) Los resultados obtenidos variando la granulometría fueron similares, los tamaños menores a 140 Mesh (0,0041 pulgadas) generaron valores muy altos de punto cedente y fuerza de gel por lo que fueron descartados y, debido a que el resto de las propiedades presentaron valores muy cercanos entre sí, se seleccionó la muestra correspondiente a 140 Mesh bajo el criterio de que a menor tamaño de partícula, mayor es su área de contacto con el medio y en consecuencia la velocidad de reacción es mayor.
- d) Variando la concentración, se estableció un rango entre 0,05 y 0,13 g/bbl en el cual la *C. Coriaria* fue efectiva como defloculante. Dentro de este rango, tanto la dureza como las propiedades reológicas disminuyeron, comparando con el fluido contaminado; A pesar de que no se logró igualar los parámetros referenciales, el

comportamiento más cercano y el que generó mejores resultados se obtuvo agregando 0,07 g/bbl.

- e) La acción de la *C. Coriaria* como agente defloculante no se ve afectada o degradada por efectos de la presión o temperatura una vez sometido al proceso de rolado.
- f) Al aplicar la solución de *C. Coriaria* como tratamiento, hubo una disminución de la dureza como en los casos anteriores, sin embargo, no logró disminuir los valores de viscosidad comparados con los obtenidos del fluido contaminado. Adicionalmente, la solución se descompuso a los pocos días, lo que no da garantía de su efectividad con el paso del tiempo.
- g) La *C. Coriaria* logró disminuir la dureza del lodo contaminado, así como las viscosidades y demás propiedades reológicas, alcanzando valores muy similares a los obtenidos con el defloculante comercial, sin embargo, no controla la pérdida de filtrado y generó un revoque más grueso, en contraste con el Na_2CO_3 .

RECOMENDACIONES

- a) Optimizar el proceso de obtención de la *C. Coriaria* pulverizada empleando otros métodos de molienda a mayor escala y aplicando circuitos cerrados para extraer la mayor cantidad de material aprovechable y determinar su rentabilidad.

- b) Aplicar la metodología descrita en este trabajo para probar la efectividad de la *C. Coriaria* como agente defloculante en fluidos bentoníticos con una fracción másica de arcilla mayor y/o con otros sistemas base agua más complejos.

- c) Realizar las pruebas correspondientes al fluido de perforación, variando la cantidad de contaminante y así establecer un rango de aplicabilidad de la *C. Coriaria* como agente defloculante.

- d) Realizar un trabajo de investigación para estudiar las reacciones químicas que se llevan a cabo entre la *C. Coriaria* y los diferentes aditivos que comúnmente se encuentran presentes en el fluido de perforación.

BIBLIOGRAFÍA

Anandhi, D., & Revathi, K. (2013). Análisis fitoquímico de la *Caesalpinia Coriaria*. *Revista internacional de investigación en Biociencias* , 1-7.

ANONIMO. Fluidos de perforación.

API. (2001). Instituto Americano del Petróleo. Obtenido de manual de fluidos de perforación.

Artigas, J., & Fuenmayor, D. (2011). Caracterización de sistemas de fluidos de perforación base agua no dispersos inhibidos y dispersos inhibidos utilizando un nuevo aditivo densificante. Caracas: Universidad Central de Venezuela.

ASME, S. S. (2005). *Drilling fluids processing handbook*. Estados Unidos: Gulf professional publishing of elsevier.

Bolívar, B., & Matos, L. (2008). *Fundamentos teorico-practicos de perforacion de pozos: principios basicos, planificacion, equipos, factores de incidencia e hidraulica*. Caracas: universidad central de venezuela.

Chadid, F., & Osma, P. (2011). Estudio de la factibilidad del uso de los taninos del pino como dispersante en fluidos de perforación. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

CIED. (2002). Fluidos de perforación. Venezuela: PDVSA.

Correa, J. E., & Bernal, H. Y. (1990). *Especies vegetales promisorias de los países del Convenio Andres Bello*. Bogotá: Talleres editoriales Guadalupe LTDA.

Cruces, C. (2002). Desarrollo de estructuras de gel y su comportamiento al agregar aditivos inertes y nos inertes en fluidos de perforación base agua. Caracas: Universidad Central De Venezuela.

Jansen, P. C. (2005). *Caesalpinia coriaria* (JACQ.). Países Bajos: Backhuys Publishers, CTA.

Peláez, E. *Preparación y concentración de minerales*. Caracas.

Prieto, A. (2007). *Tecnología de los fluidos de perforación manual técnico*. Apoca.

Rausseo, C. (2002). *Pruebas de hinchamiento lineal utilizando el aditivo Z-TROL100 como inhibidor de arcillas en fluidos de perforación*. Caracas: Universidad Central de Venezuela.

Rondón, W. (2010). *Estudio de Factibilidad del Uso de la Escoria Producida por Loma de Niquel Como Densificante en Fluidos de Perforación Base Agua*. Caracas: Universidad Central de Venezuela.

Tezen Roldan, P. A. (2008). *Determinación del contenido tanico en la corteza de cinco especies forestales aprovechadas en el aserradero de la asociación de cooperativas forestales de Peten*. Guatemala: Universidad San Carlos de Guatemala.

ANEXOS

ANEXO 1

Desarrollo de ecuaciones para el cálculo de la masa de bentonita

$$M_a + M_b = M_l$$

$$M_a + X_b * M_l = M_l$$

$$M_a + X_b * (M_a + M_b) = M_a + M_b \Rightarrow X_b * M_a + X_b * M_b = M_b$$

$$\begin{aligned} X_b * \rho_a * V_a + X_b * M_b &= M_b \Rightarrow X_b * \rho_a * (V_l - V_b) + X_b * M_b = M_b \\ \Rightarrow X_b * \rho_a * V_l - X_b * \rho_a * V_l - X_b * \rho_a V_b + X_b * M_b &= M_b \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_b * \rho_a * V_l - X_b * \rho_a * \frac{M_b}{\rho_b} + X_b * M_b &= M_b \Rightarrow X_b * \rho_a * V_l \\ &= M_b * \left(\frac{X_b * \rho_a}{\rho_b} - X_b + 1 \right) \end{aligned}$$

$$M_b = \frac{X_b * \rho_a * V_l}{\left(\frac{X_b * \rho_a}{\rho_b} \right) - X_b + 1}$$

Dónde:

M_a : Masa de agua

M_b : masa de arcilla

M_l : Masa del lodo

X_b : Fracción másica de arcilla

ρ_a : Densidad del agua (1g/cc)

ρ_b : Densidad de la bentonita (2,4 g/cc)

V_l : Volumen del lodo

V_a : Volumen de agua

ANEXO 2

Cálculo de masa de bentonita para preparar 3 barriles de laboratorio de fluido de perforación al 5%

$$Mb = \frac{Xb * \rho a * Vl}{\left(\frac{Xb * \rho a}{\rho b}\right) - Xb + 1} = \frac{0,05 * 1 * 1050}{\frac{0,05 * 1}{2,4} - 0,05 + 1} = 54,08 \text{ g de bentonita}$$

ANEXO 3

Cálculo de masa de agua para preparar 3 barriles de laboratorio de fluido de perforación al 5%

$$Xb * Ma + Xb * Mb = Mb \Rightarrow Ma = \frac{Mb * (1 - Xb)}{Xb} = \frac{54,08 * (1 - 0,05)}{0,05} \\ = 1027,5 \text{ g de agua}$$

ANEXO 4

Cálculo de volumen de agua para preparar 3 barriles de laboratorio de fluido de perforación al 5%

$$\rho a = \frac{Ma}{Va} \Rightarrow Va = \frac{Ma}{\rho a} = \frac{1027,5 \text{ g}}{1 \text{ g/cc}} = 1027,5 \text{ cc de agua}$$

ANEXO 5

Cálculo de masa de defloculante comercial Na_2CO_3

$$(\text{lb}/\text{bbl}) = 120 \text{ mg}/\text{l} * 0,97 * 0,000928 = 0,1080192 \text{ lb}/\text{bbl} \approx 0,11 \text{ lb}/\text{bbl}$$

ANEXO 6

Cálculo tipo del rendimiento de la Caesalpinia Coriaria

$$\text{Rendimiento} = \frac{g\#Mesh}{g\text{Total}} * 100\% = \frac{4,2}{10} * 100\% = 42\%$$

ANEXO 7

Cálculo de densidad de la solución de Caesalpinia Coriaria

$$\rho(\text{lpg}) = \frac{m(100\text{ml})}{V} * 8,33 = \frac{100,14\text{g}}{100\text{ml}} * 8,33 = 8,34 \text{ lpg}$$
